Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
Политехнический институт
Кафедра «Техносферная и экологическая безопасность»

УТВЕРЖДАЮ
Заведующий кафедрой
_____ Т.А. Кулагина
«___» _____ 2020 г.

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

20.03.01 «Техносферная безопасность»

«Расчёт аппаратов пылегазоочистки ТЭЦ»

Руководитель _____ д-р. техн. наук, профессор Т.А. Кулагина
подпись, дата

Научный консультант _____ ст. преподаватель И.В. Калинич
подпись, дата

Выпускник _____ А.А. Суховский
подпись, дата

Нормоконтролёр _____ ст. преподаватель Е.Н. Зайцева
подпись, дата

Красноярск 2020

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
Политехнический институт
Кафедра «Техносферная и экологическая безопасность»

УТВЕРЖДАЮ
Заведующий кафедрой
_____ Т. А. Кулагина
«___» _____ 2020 г.

ЗАДАНИЕ
НА ВЫПУСКНУЮ КВАЛИФИКАЦИОННУЮ РАБОТУ
в форме бакалаврской работы

Студенту Суховскому Александру Александровичу

Группа ФЭ16-10Б.

Направление (специальность) 20.03.01 «Техносферная безопасность»

Тема выпускной квалификационной работы «Расчёт аппаратов пылегазоочистки ТЭЦ»

Утверждена приказом по университету № 1853 от 12 февраля 2020 г.

Руководитель ВКР Т.А. Кулагина, д-р. техн. наук, профессор, заведующая кафедрой «Техносферная и экологическая безопасность»

Исходные данные для ВКР:

1) объект – Минусинская ТЭЦ (котел – БКЗ 210-140-Ф5 (t = 1330 °С; α = 1,24); мельница – В-50-160);

2) зола от сжигания угля Бородинского месторождения ($Q_н^р$ = 13,1 МДж/кг; $A^р$ = 9,5 %; $W^р$ = 40 %);

3) отбор пробы золы осуществлён из газохода перед электрофильтром;

4) расход дымовых газов W = 630000 м^3/ч;

5) дисперсный состав:

D, мкм	1,25	3,25	5,15	8,15	13	20,5	32,5
g, масс. %	98	95	90	79	63	40	14
Δ g, %	3	5	11	16	23	26	16

d_{50} = 22 мкм; σ = 274; $S_{уд}$ = 200 см^2/г;

6) механические свойства золы: $\rho_м$=2400 кг/м^3; $\rho_{н/у}$=1090 кг/м^3; $\rho_у$=1260 кг/м^3; $\alpha_{ст}$=52^0; α_g=38^0; p=48 Па; $K_а$=3,18·10^{-11} м^2/кг.

7) УЭС слоя золы:

УЭС (Ом·м)	1·10^8	1,8·10^8	6·10^8	2,8·10^8	3,5·10^8	1,2·10^8	3,7·10^8
t, °С	20	50	100	150	200	250	170-190

8) химический состав золы:

Компоненты	п.п.п.	Al_2O_3	SiO_2	Fe_2O_3	CaO	MgO	TiO_2	Na_2O	K_2O	SO_3
Содерж., масс. %	2,2	19	51,5	5,9	13,3	1,75	1,0	3,6	1,15	0,65

9) pH водной вытяжки – 8;

10) равновесная влажность золы:

$\varphi_п$, %	0,17	0,20	0,28	0,42	0,46	0,87
$\varphi_в$, %	10	20	40	60	80	95

11) смачиваемость – 82%;

12) характеристика газа-носителя: $t_г$ = 172 °С; z = 4,24 г/м^3;

13) содержание в газе, об. %: CO_2=14,6; O_2=4,1; N_2=77,1; SO_2=0,1; H_2O=4,1.

Руководитель _____ Т.А. Кулагина

Задание принял к исполнению _____ А.А. Суховский

«___» _____ 2020 г.

КАЛЕНДАРНЫЙ ГРАФИК

выполнения ВКР

Наименование и содержание этапа	Срок выполнения
Сбор и анализ исходной литературы и документации	21.05.2020 – 18.06.2020
Постановка основной задачи, освоение расчетных методик	19.06.2020 – 20.06.2020
Выполнение расчетов, оформление результатов, составление выводов	21.06.2020 – 25.06.2020
Оформление расчетно-пояснительной записки	26.06.2020 – 27.06.2020
Графическое оформление чертежей	28.06.2020 – 29.06.2020
Оформление прочей документации	30.06.2020 – 01.07.2020

«___» _____ 2020 г.

Руководитель _____ Т.А. Кулагина

Задание принял к исполнению _____ А.А. Суховский

РЕФЕРАТ

Настоящая выпускная квалификационная работа «Расчёт аппаратов пылегазоочистки ТЭЦ» включает в себя: 58 страниц текстового документа, 5 листов графического материала, 1 приложение, 21 использованный источник.

ПЫЛЕУЛОВИТЕЛЬ, СКРУББЕР ВЕНТУРИ, ФИЛЬТР, ЦИКЛОН, ЭЛЕКТРОФИЛЬТР.

Объект расчёта – Минусинская ТЭЦ.

Цель расчёта: расчёт промышленных газов от взвешенных частиц.

Задачи расчёта:

1) расчёт аппаратов сухой механической газоочистки;
2) расчёт аппаратов мокрой газоочистки;
3) расчёт фильтрации газа;
4) расчёт электрической очистки газа.

В результате решения указанных задач произведён расчёт различных аппаратов пылегазоочистки, выбраны их конкретные марки и количество.

Работа оформлена согласно требованиям [1].

СОДЕРЖАНИЕ

Введение……. 8
1 Расчёт пылеосадительной камеры……... 9
2 Расчёт жалюзийных пылеуловителей……. 14
3 Расчёт одиночного циклона……. 19
4 Расчёт батарейного циклона…… 25
5 Расчёт скруббера ударного действия…….. 28
6 Расчёт пенного газопромывателя……..... 30
7 Расчёт скруббера Вентури……... 35
7.1 Расчёт по вероятностному методу……. 35
7.2 Расчёт по энергетическому методу…… 39
8 Расчёт рукавных фильтров…… 44
9 Расчёт электрофильтра…….. 45
10 Расчёт состава пыли после первой ступени очистки…… 50
11 Выбор аппаратов пылегазоочистки…… 53
Заключение…… 54
Список использованных источников……. 55
Приложение А Характеристики принятого оборудования..... 58

ВВЕДЕНИЕ

В настоящей выпускной квалификационной работе источником загрязнения атмосферы являются котельные установки Минусинской ТЭЦ, состав загрязняющих компонентов газа которой включает гетерогенные выбросы. Выработка тепло- и электроэнергии обусловлена сжиганием твёрдого топлива в виде угля Бородинского месторождения в котле БКЗ 210-140-Ф5. При горении в атмосферу выбрасывается большое количество твёрдых и газообразных загрязняющих выбросов. Газовая фаза включает частицы минеральных составляющих, а также не полностью сгоревшие частицы органики – сажу.

Защита атмосферного воздуха от технологических и вентиляционных выбросов имеет важное инженерное значение и является неотъемлемой частью экологической деятельности.

На сегодняшний день разработка любых технологических схем предполагает мероприятия по предотвращению загрязнения окружающей среды. Важно, чтобы они обеспечивали максимально возможную очистку выбросов, связанных с производственными процессами.

Существуют несколько способов очистки промышленных газов от взвешенных частиц: мокрая газоочистка и сухая механическая; фильтрация и электрическая очистка газа, предполагающие использование соответствующих аппаратов, подробный расчёт которых осуществлён в настоящей работе.

1 Расчёт пылеосадительной камеры

Простейшим сепаратором твёрдых частиц является – пылеосадительная камера, в которой загрязнённый газовый поток двигается с относительно маленькой скоростью, благодаря этому вполне вероятно гравитационное осаждение двигающейся взвеси.

В промышленности пылеосадительные камеры предусматриваются как устройства предварительной обработки газов, с целью отсеивания крупных частиц и облегчения работы аппаратов, последующих ступеней очистки.

Нередко коэффициенты очистки имеют все шансы быть определены опытным путём, потому что седиментация связана с турбулентной диффузией.

Расчёт производится согласно [2] в следующем порядке.

1. Размеры принимаются исходя из габаритов: h = 7 м; b = 5 м.

Скорость газового потока в рабочем сечении камеры w, м/с:

$$w = \frac{W}{hb} \qquad (1)$$

где W – расход дымовых газов, м^3/ч;

h, b – размеры габаритные, м.

$$w = \frac{630000}{5 \cdot 7 \cdot 3600 \cdot 9} = 0,55$$

Ввиду довольно большого значения расхода газа, принимаем решение разделить поток на девять равных частей, соответственно принимаем девять пылеосадительных камер.

2. Принимается отношение длины камеры к её высоте: $\frac{l}{h} = 10$ м.

3. Принимается отношение $\frac{w_р}{w}=1,5\cdot\left(\frac{h}{l}\right)=0,15$; значит скорость витания частиц, улавливаемых на 50 %, составляет: $w_р=0,15\cdot w=0,15\cdot 0,55=0,0825$ м/с.

4. Диаметр частиц, улавливаемых на 50 % $D_р$, м:

$$D_р=1,614\cdot 10^{-3}\cdot(273+t)^{0,75}\cdot\left(\frac{w_р}{\rho_р\cdot(384+t)}\right)^{0,5} \quad (2)$$

где $\rho_р$ – плотность частиц, кг/м^3.

$$D_{р(0,0825)}=1,614\cdot 10^{-3}\cdot(273+172)^{0,75}\cdot\left(\frac{0,0825}{2400\cdot(384+172)}\right)^{0,5}=39\cdot 10^{-6}$$

5. Чтобы оценить зависимости $\eta_р=f(D_р)$ берётся еще два размера частиц, выражающихся в отношении скорости газового потока к скорости витания: $\frac{w_р}{w}=0,075$ и $\frac{w_р}{w}=0,025$; скорости витания $w_р$ будут составлять 0,04125 и 0,12375 м соответственно; размеры частиц рассчитываются по формуле (2):

$$D_{р(0,04125)}=1,614\cdot 10^{-3}\cdot(273+172)^{0,75}\cdot\left(\frac{0,04125}{2400\cdot(384+172)}\right)^{0,5}=27\cdot 10^{-6}$$

$$D_{р(0,12375)}=1,614\cdot 10^{-3}\cdot(273+172)^{0,75}\cdot\left(\frac{0,12375}{2400\cdot(384+172)}\right)^{0,5}=47\cdot 10^{-6}$$

1) Получение средних концентраций и парциальных коэффициентов осаждения частиц размером 47 и 27 мкм в соответствии с этим:

2) берутся 5 точек в выходящем сечении пылеосадителя: 0; 0,25; 0,5; 0.75; 1;

3) рассчитываются параметры осажденияx_1и x_2 соответственно:

$$x_1 = \left(1 + (x/h) - (l/h) \cdot (w_p / w)\right) / \sqrt{\left(7 \cdot 10^{-3} \cdot (l/h)\right)} \quad (3)$$

$$x_2 = \left(1 + (x/h) - (l/h) \cdot (w_p / w)\right) / \sqrt{\left(7 \cdot 10^{-3} \cdot (l/h)\right)} \quad (4)$$

4) находятся интегралы вероятностей $\Phi(x_1)$; $\Phi(x_2)$ и рассчитывается величина N:

$$N = \Phi(x_1) + \Phi(x_2) - 100 \quad (5)$$

5) определяется среднеарифметическое N_m по сечению:

$$N_m = \sum N / k \quad (6)$$

6) определяются парциальные коэффициенты:

$$\eta_p = 100 - N_m \quad (7)$$

В случае, если расчёты верны, коэффициент осаждения частиц принятого в первом случае размера D_p = 39 мкм равняется 50%. С целью проверки точности подобным образом повторим расчёт коэффициента осаждения для

частиц размером $D_р$ = 39 мкм и определяем парциальный коэффициент очистки частиц размером – 47 мкм.

Расчёты представлены в таблице 1

Таблица 1 – Средние концентрации и парциальные коэффициенты осаждения частиц

$w_р/w$ = 0,75; $w_р$ = 0,04125 м/с; $D_р$ = 27 мкм					
x/h	0	0,25	0,5	0,75	1
x_1	0,94	1,88	2,83	3,78	4,72
x_2	6,61	5,67	4,72	3,78	2,83
$Ф(x_1)$	82,64	96,99	100	100	100
$Ф(x_2)$	100	100	100	100	100
N	82,64	96,99	100	100	100
N_m=(82,64+96,99+100+100)/5=95,93%; $\eta_р$=100-95,93=4,07%					
$w_р/w$=0,225; $w_р$=0,12375 м/с; $D_р$=47 мкм					
x/h	0	0,25	0,5	0,75	1
x_1	-4,72	-3,78	-2,83	-1,88	-0,94
x_2	12,28	11,34	10,39	9,45	8,47
$Ф(x_1)$	0	0	0	3,01	17,36
$Ф(x_2)$	100	100	100	100	100
N	0	0	0	3	17,36
N_m=(0+0+3,01+17,36)/5=4,07%; $\eta_р$=100-4,07=95,93%					

Исходя из расчётов можно сделать вывод, что коэффициент очистки частиц диаметром 39 мкм – 50 %, частиц размером более 47 мкм – 100 %.

6. Рассчитываем полный коэффициент очистки η_{tot}, %:

$$\eta_{tot} = \sum \eta_{iF} \cdot (F_{ib} / 100) \qquad (8)$$

где η_{iF} – фракционные коэффициенты очистки;

F_{ib} – доля частицы i-ой фракции в дисперсном веществе.

$$\eta_{tot} = (0,2 \cdot 0,15) \cdot 100 = 0,3$$

Расчёты представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Средние концентрации и парциальные коэффициенты осаждения частиц

W_p/w=0,15; w_p=0,0825 м/с;D_p=39 мкм					
x/h	0	0,25	0,5	0,75	1
x_1	-1,88	-0,94	0	0,94	1,88
x_2	9,45	8,47	7,56	6,61	5,67
$\Phi(x_1)$	3,01	17,36	50	82,64	96,99
$\Phi(x_2)$	100	100	100	100	100
N	3,01	17,36	50	82,64	96,99
N_m=50%; η_p=100-50=50%					
W_p/w=0,3 w_p=0,165 м/с D_p=55 мкм					
x/h	0	0,25	0,5	0,75	1
x_1	-7,56	-6,61	-5,67	-4,72	-3,78
x2	15,12	14,17	13,23	12,28	11,34
$\Phi(x_1)$	0	0	0	0	0
$\Phi(x_2)$	100	100	100	100	100
N	0	0	0	0	0
N_m = 0%; η_p = 100-0 = 100%					

Исходя из расчётов можно сделать вывод, что коэффициент очистки частиц диаметром 39 мкм – 50 %, частиц размером более 47 мкм – 100 %.

7. Рассчитываем полный коэффициент очистки η_{tot}, %:

$$\eta_{tot} = \sum \eta_{iF} \cdot (F_{ib} / 100) \quad (8)$$

где η_{iF} – фракционные коэффициенты очистки;

F_{ib} – доля частицы i-ой фракции в дисперсном веществе.

$$\eta_{tot} = (0,2 \cdot 0,15) \cdot 100 = 0,3.$$

Исходя из полученных данных применяем пылеосадительную камеру для предварительной сепарации, поскольку полный коэффициент очистки составляет 3%.

2 Расчёт жалюзийных пылеуловителей

Жалюзийные пылеуловители – простейшие инерционные сепараторы. Данные устройства конструктивно просты, дешевы и обладают малым гидравлическим сопротивлением. К числу недостатков можно отнести то, что они улавливают только крупные частицы ($D_р$> 60-70 мкм) ввиду чего применяются зачастую для предварительного осаждения крупных частиц с для сокращения абразивного износа оборудования.

Расчёт производится согласно [3] в порядке.

1. Получаем скорость газов во входном сечении *w*, м/с:

$$w = \sqrt{2\Delta p_1} / (\xi\rho) \tag{9}$$

где Δp_1 – гидравлическое сопротивление решетки, Па (Δp_1 = 300 Па [2]);

ξ – коэффициент гидравлического сопротивления решетки (ξ = 5 [2]);

ρ – плотность газов (в расчетных условиях), (ρ = 0,793 кг/м^3).

$$w = \sqrt{2 \cdot 300} / (5 \cdot 0,793) = 12,3$$

2. Получаем площадь сечения входной камеры f_1, м^2:

$$f_1 = W / w \tag{10}$$

где *W* – расход газовых выбросов, м^3/с.

Поскольку поток газовых выбросов велик, *W*=175 м^3/с, принимается к установке три жалюзийных пылеуловителя с равным расходом *W*=58,3 м^3/с.

$$f_1 = 58,3 / 12,3 = 4,7$$

Близка к требуемой площадь решетки с 70 лопастями, с шириной входной камеры b_1 = 1,296 м, высотой h = 3,786 м, рабочей длиной l = 3,816 м и шириной отсосной щели b_2=0,063 м [4]. По фактической площади входного сечения редактируем входную скорость потока:

$$f_1 = 1,296 \cdot 3,786 = 4,9$$

$$w = 58,3 / 4,9 = 11,89$$

3. Получаем площадь сечения подводящего воздуховода от диффузора до отсосного циклона f_4, м^2:

$$f_4 = C_4 \cdot \sqrt{\Delta p_1 f_1} / N_4 \qquad (11)$$

где N_4 – число подводящих воздуховодов, подсоединенных к отсосным щелям (N_4 = 1);

C_4 – коэффициент, зависящий от величины относительного отбора газов в отсосный циклон (C_4=0,0048).

$$f_4 = 0,0048 \cdot \sqrt{300 \cdot 4,9} / 1 = 0,407$$

4. Определяем диаметр отсосного циклона, м:

$$D_5 = C_5 \cdot \sqrt[4]{\Delta p_1 / \Delta p_5} \cdot \sqrt{f_1 / N_5} \qquad (12)$$

где Δp_5 – гидравлическое сопротивление циклона, Па (Δp_5 = 100 Па);

N_5– число циклонов, присоединенных к одной отсосной щели (N_5 = 1);

C_5– коэффициент, равный 0,0775.

$$D_5 = 0,0775 \cdot \sqrt[4]{300/100} \cdot \sqrt{4,9/1} = 0,0225$$

Принимается к установке циклон диаметром 500 мм, (диаметр выхлопной трубы равен 0,295 м).

5. Принимается площадь сечения отводящего воздуховода f_6 в два раза превосходящая площадь сечения подводящего f_4, м^2:

$$f_6 = 2 f_4 \qquad (13)$$

$$f_6 = 2 \cdot 0,407 = 0,814$$

6. Исходя из конструкции принимаем соотношение $l/d_{экв}$ и количество отводов для подводящего газохода соответственно 10 и 5, для отводящего – соответственно 15 и 5. Рассчитываем площадь сечения инжектора f_8, м^2:

$$f_8 = \frac{0,87 \cdot 4,9}{\sqrt{\frac{107,5(z_4 + z_6)}{\Delta p_1} + \frac{5 \cdot \Delta p_5}{\Delta p_1} - 0,95}} \qquad (14)$$

где z_4 и z_6 – приведенные коэффициенты (z_4=7, z_6=3,025 [4]).

$$f_8 = \frac{0,87 \cdot 4,9}{\sqrt{\frac{107,5(7 + 3,025)}{300} + \frac{5 \cdot 100}{300} - 0,95}} = 2,054$$

7. Рассчитываем сопротивление инжектора, ψ:

$$\psi = \frac{f_6'}{f_8 + f_6'} \tag{15}$$

где f_6' – площадь сечения отводящего воздуховода по месту установки инжектора.

$$\psi = \frac{0,814}{2,054 + 0,814} = 0,824$$

$$\Delta p_8 = \frac{\Delta p_1}{5(f)^2 / \left(f_8 + f_6'\right)^2} \cdot \frac{\varphi}{100} \cdot \left(1 - \frac{\varphi}{100 \cdot \psi}\right)^2 + \left(1 - \frac{\varphi}{100}\right) \cdot$$

$$\cdot \left(\frac{1 - \frac{\varphi}{100}}{1-\psi} - 1\right)^2 + 0,275 \cdot \left(1 - \frac{f_8 + f_6'}{f_9}\right)^2 \tag{16}$$

$$\Delta p_8 = \frac{300}{5(4,9)^2 / (2,054 + 0,814)^2} \cdot \frac{10}{100} \cdot \left(1 - \frac{10}{100 \cdot 0,284}\right)^2 + \left(1 - \frac{10}{100}\right) \cdot$$

$$\cdot \left(\frac{1 - \frac{10}{100}}{1-0,284} - 1\right)^2 + 0,275 \cdot \left(1 - \frac{2,054 + 0,814}{4,9}\right)^2 = 3,055 \tag{17}$$

8. Определяется суммарное сопротивление решетки и инжектора Δp, Па:

$$\Delta p = \Delta p_1 + \Delta p_8 \tag{18}$$

$$\Delta p = 300 + 3,055 = 303,055$$

Полученный результат почти втрое больше сопротивления циклона Δp_5=100 Па. Следовательно, установка вентилятора не требуется.

9. Для упрощения последующих расчётов выполняем апроксимацию, заданный фракционный состав пыли логарифмическим нормальным распределением и представляем его как прямую на вероятностно-логарифмической сетке координат. Для удобства аппроксимированные данные по фракционному составу пыли (в долях) g и по фракционным коэффициентам очистки (в %) η_F сводим в таблицу 3.

Таблица 3 – Фракционный состав пыли в долях и коэффициент очистки

D_p, мкм	1,25	3,25	5,15	8,15	13	20,5	32,5
Δg, %	3	5	11	16	23	26	16
η, %	4,5	17	28	40	56	68	81

Полный коэффициент очистки пыли жалюзийного пылеуловителя η_{tot}, %:

$$\eta_{tot} = \sum (\Delta g_i \eta_i) / 100 \qquad (19)$$

$$\eta_{tot} = \frac{3 \cdot 4,5}{100} + \frac{5 \cdot 17}{100} + \frac{11 \cdot 28}{100} + \frac{16 \cdot 40}{100} + \frac{23 \cdot 56}{100} + \frac{26 \cdot 68}{100} + \frac{16 \cdot 81}{100} = 54$$

Жалюзийный пылеуловитель применяем для первой ступени очистки.

3 Расчёт одиночного циклона

Запылённые газы подаются в циклоны тангенциальными или же аксиальными завихрителями. Внутри этих устройств происходит вращательно-поступательное движение. На взвешенные частицы действует инерционная сила, стремящаяся сместить их с криволинейных линий тока по касательной, направленной под углом к стене корпуса. Далее частицы соскальзывают вниз и попадают в пылеприёмник

Считается, что траектория движения взвешенных частиц является окружностью. В связи с этим сепарация частиц в циклонах осуществляется интенсивнее, нежели в гравитационных осадителях.

Расчёт производится согласно [5] в следующем порядке.

1. Принимаем циклон ЦН-24.

2. Определяем диаметр циклона D_{ci}, м:

$$D_{ci} = \sqrt{\frac{W}{0,785 \cdot w_{opt} \cdot N}} \tag{20}$$

где w_{opt} – средняя скорость потока в циклоне, м/с (принимаем по [5] w_{opt} = 4,5 м/с);

N– число циклонов (принимаем N = 36).

Принимаем 36 типовых циклонов. Используем следующее их расположение: два ряда по шесть циклонов.

$$D_{ci} = \sqrt{\frac{175}{0,785 \cdot 4,5 \cdot 36}} = 1,173$$

Округляем в большую сторону и принимаем диаметр циклона D=1,2 м.

3. Получаем скорость потока в циклоне с диаметром D = 1,2 м w, м/с:

$$w = \frac{W}{0,785 \cdot D^2 \cdot N} \quad (21)$$

Для D =1,2 м:

$$w = \frac{175}{0,785 \cdot 1,2^2 \cdot 36} = 4,3$$

4. Подыскиваем значения ξ_{500} = 80, K_1 =1, K_2 =1, K_3 = 60 для взятого нами циклона ЦН-24, определяем коэффициент гидравлического сопротивления ξ:

$$\xi = K_1 K_2 \xi_{500} + K_3 \quad (22)$$

$$\xi = 1 \cdot 1 \cdot 80 + 60 = 140$$

5. Получаем плотность дымовых газов заданного состава в нормальных условиях ρ_0, кг/м^3, принимая значения плотностей ингредиентов по справочным данным [6]:

$$\rho_0 = 0,01(13,0\rho_{CO_2} + 0,02\rho_{SO_2} + 78,96\rho_{N_2} + 1,4\rho_{O_2} + 6,62\rho_{H_2O}) \quad (23)$$

$$\rho_0 = (0,146 \cdot 1,977 + 0,041 \cdot 1,429 + 0,771 \cdot 1,251$$

$$+0,001 \cdot 2,927 + 0,041 \cdot 0,769) = 1,346$$

Плотность дымовых газов в рабочих условиях ρ_{172}, кг/м^3:

$$\rho = \rho_г \cdot \frac{273}{273 + 200} \quad (24)$$

$$\rho_{172} = 1,346 \cdot \frac{273}{273 + 200} = 0,826$$

Потери давления в циклоне Δp, Па:

$$\Delta p = \xi \rho w^2 / 2 \quad (25)$$

$$\Delta p = 140 \cdot 0,826 \cdot 4,3^2 / 2 = 1069,09$$

6. Производим перерасчёт для циклона ЦН-24 D_{50} = 8,5 мкм диаметром $D_т$ = 1,2 м при табличном [6] значении плотности частиц 1930 кг/м^3 и вязкости газа-носителя [6] 22,2·10^{-6} Па·с и величину $\lg\sigma_\eta$ = 0,308.

Данные вязкостей ингредиентов и критических температур приняты согласно [6] и приведены в таблице 4.

Таблица 4 – Составные производственных газовых выбросов

Ингредиенты	CO_2	SO_2	N_2	O_2	H_2O
r_i (доли об.)	0,146	0,001	0,771	0,041	0,041
η_{0i}, 10^{6}Па·с	14,7	12,7	17	19,3	10
T_{cri}, К	304,2	430,7	126	154,3	647,15
k_i	254	396	114	131	961

Динамическая вязкость в нормальных условиях заданной газовой смеси η_0, Па·с:

$$\eta_0 = \sum r_i \cdot \left(\eta_{0i} \cdot 10^{-6}\right) \cdot \sqrt{\left(\eta_{0i} \cdot 10^{-6}\right)} \cdot T_{cri} \quad (26)$$

$$\eta_0 = (0{,}146 \cdot 14{,}7 \cdot 10^{-6} \cdot \sqrt{14{,}7 \cdot 10^{-6} \cdot 304{,}2} + 0{,}0001 \cdot 12{,}7 \cdot 10^{-6} \cdot \sqrt{12{,}7 \cdot 10^{-6} \cdot 430{,}7} +$$

$$+0{,}771 \cdot 17 \cdot 10^{-6} \cdot \sqrt{17 \cdot 10^{-6} \cdot 126} + 0{,}041 \cdot 19{,}3 \cdot 10^{-6} \cdot \sqrt{19{,}3 \cdot 10^{-6} \cdot 154{,}3} + 0{,}041 \cdot 10 \cdot 10^{-6} \cdot$$

$$\sqrt{10 \cdot 10^{-6} \cdot 647{,}15}) / (0{,}146 \cdot \sqrt{14{,}7 \cdot 10^{-6} \cdot 304{,}2} + 0{,}0001 \cdot \sqrt{12{,}7 \cdot 10^{-6} \cdot 430{,}7} +$$

$$0{,}771 \cdot \sqrt{17 \cdot 10^{-6} \cdot 126} +$$

$$+0{,}0041 \cdot \sqrt{19{,}3 \cdot 10^{-6} \cdot 154{,}3} + 0{,}041 \cdot \sqrt{10 \cdot 10^{-6} \cdot 647{,}15}) = 16{,}2 \cdot 10^{-6}$$

Производим пересчёт на рабочую температуру с учётом поправки на коэффициенты k_i.

$$k = 0{,}146 \cdot 254 + 0{,}001 \cdot 396 + 0{,}771 \cdot 114 + 0{,}041 \cdot 131 + 0{,}041 \cdot 961 = 170{,}146;$$

Динамическая вязкость на рабочую температуру $\eta_т$, Па·с:

$$\eta_т = \eta_0 ((273 + k) / (T + k))(T / 273)^{3/2} \quad (27)$$

$$\eta_{172} = 16{,}2 \cdot 10^{-6} ((273 + 170{,}146) / (445 + 273))(445 / 273)^{3/2} = 24{,}28 \cdot 10^{-6}$$

Производим пересчёт значения частицD_{50}, м:

$$D_{50} = D_{50r} \cdot \sqrt{\left(\frac{D}{D_r}\right) \cdot \left(\frac{\rho_{pr}}{\rho_p}\right) \cdot \left(\frac{\eta_т}{\eta_r}\right) \cdot \left(\frac{w_т}{w}\right)} \quad (28)$$

где D_{50r}, D_r – соответственно средний диаметр осаждённых в циклоне частиц и диаметр самого циклона, м;

ρ_{pr} – плотность частиц, кг/м^3;

$w_г$ – скорость газового потока, м/с.

$$D_{50} = 8,5 \cdot \sqrt{\left(\frac{1200}{600}\right) \cdot \left(\frac{1930}{2400}\right) \cdot \left(\frac{24,28 \cdot 10^{-6}}{22,2 \cdot 10^{-6}}\right) \cdot \left(\frac{4,5}{4,3}\right)} = 11,53$$

Параметр осаждения x:

$$x = \frac{\lg \frac{22}{11,5353}}{\sqrt{0,308^2 + (\lg 2, 0,32)^2}} = 1,14$$

7. Рассчитываем полный коэффициент очистки циклоном η_{tot}, %:

$$\eta_{tot} = \sum (\Delta g_i \eta_i) / 100 \qquad (29)$$

где Δg_i, η_i – соответственно фракционный состав пыли и коэффициент очистки, %, значения которых приведены в таблице 5.

Таблица 5 – Фракционный состав пыли и коэффициент очистки

D, мкм	1,25	3,25	5,15	8,15	13	20,5	32,5
Δg,%	3	5	11	16	23	26	16
η, %	0	4	13,5	32	60	80	94

$$\eta_{tot} = \frac{3 \cdot 0}{100} + \frac{5 \cdot 4}{100} + \frac{11 \cdot 13,5}{100} + \frac{16 \cdot 32}{100} + \frac{23 \cdot 60}{100} + \frac{26 \cdot 80}{100} + \frac{16 \cdot 94}{100} = 56,4 \text{, \%.}$$

Величина полного коэффициента очистки циклона позволяет применять их для первой ступени очистки. Стоит отметить, что установка 36 циклонов проблематична. В связи с этим необходима проверка результата при

рассмотрении батарейных циклонов, осуществлённая в следующем разделе настоящей работы.

4 Расчёт батарейного циклона

Для гарантированной хорошей пропускной способности применяются батарейные циклоны, состоящие из элементов, объединённых в один цельный аппарат и имеющие один общий бункер. Подключение аппаратов осуществляется параллельно от одного коллектора, а также единый отвод чистого газа.

Расчёт происходит согласно [7] в порядке. При расчёте применяются аналогичные формулы, представленные в разделе 3 настоящей работы.

1. Берётся нормативное значение оптимальной скорости:

w_{opt}= 5 м/с

2. Получаем расход газа W_1, м^3/с, проходящий через 1 циклонный элемент, взяв диаметр 250 мм:

$$W_1 = 0,785 \cdot 5 \cdot 0,25^2 = 0,245$$

3. Рассчитываем число элементов N, штук:

$$N = \frac{175}{0,245} = 714$$

4. Получаем 9 батарейных циклонов марки ЦБ-254Р, включающих в себе восемьдесят возвратно-поточных элементов, у них имеются направляющие элементы вида «розетка». Когда выбиралась марка аппарата, в том числе уделялось внимание возможности его эксплуатации при температуре, превышающей 150 ^{0}С.

Проверка скорости потокаw, м/с, через один элемент:

$$w = \frac{175}{0,785 \cdot 720 \cdot 0,25^2} = 4,9$$

Исходя из результата расчёта видно, что он практически идентичен принятой оптимальной скорости (см. п. 1 настоящего раздела) для выбранного вида батарейного циклона.

5. Берутся значения D_{50} = 3,85 мкм и $\lg\sigma_\eta$ = 0,460 для элемента вида «розетка» с углом наклона завихрителей, равным двадцать пять градусов. Пересчитываем параметры очистки с табличных характеристик потока аэрозоля (плотность частиц 2400 кг/м3, скорость потока 4,5 м/с, динамическая вязкость газов $23,7 \cdot 10^{-6}$ Па·с) на задаваемые.

Пересчитываем значение D_{50}:

$$D_{50} = 3,85 \cdot \sqrt{\frac{250}{250} \cdot \frac{2200}{2400} \cdot \frac{24,28 \cdot 10^{-6}}{23,7 \cdot 10^{-6}} \cdot \frac{4,5}{4,9}} = 3,57$$

Аналогично рассчитываем для $D_{84,2}$ = 1,239, мкм и $D_{15,8}$ = 10,239, мкм.

Параметр осаждения, x:

$$x = \frac{\lg \frac{22}{3,57}}{\sqrt{0,46^2 + (\lg 2,88)^2}} = 1,215$$

6. Рассчитываем полный коэффициент очистки циклоном η_{tot}, %:

$$\eta_{tot} = 100(0,03 \cdot 0,8 + 0,05 \cdot 0,32 + 0,11 \cdot 0,5 + 0,16 \cdot 0,67 + 0,23 \cdot 0,82 +$$

$$+0,26 \cdot 0,915 + 0,16 \cdot 0,196) = 60,\%$$

Характеристики фракционного состава пыли и коэффициента очистки, необходимые для расчёта полного коэффициента очистки представлены в таблице 6.

Таблица 6 – Фракционный состав пыли и коэффициент очистки

D, мкм	1,25	3,25	5,15	8,15	13	20,5	32,5
Δg,%	3	5	11	16	23	26	16
η, %	8	32	50	67	82	91,5	96,5

Потому что итог получен при равенстве степени очистки газов в батарейном циклоне и коэффициента осаждения 1-го элемента, а настоящий проскок больше приблизительно в 5 раз, стоит обозначить, что батарейные циклоны имеют все шансы быть применены только с целью предварительной очистки дымовых газов определённого состава.

5 Расчёт скруббера ударного действия

Рассмотрим промыватель ПВМ (пылеуловитель вентиляторный мокрый) типа. В предоставленном газопромывателе загрязненные газы поступают в аппарат, а набирают необходимую скорость для формирования смеси в канале (щелевом)ч.

Расчёт производится согласно [8] в следующем порядке.

1. Принимаем по данным работы [8] 15 промывателей ПВМ-40 с 2-мя перегородками длиной по восемь метров.

Удельный расход газов на 1 метр длины перегородки W/l = 11,6/8 = 1,458 м^3/(с·м).

Полученные результаты находятся в области рекомендуемых значений, что подтверждается в работе [9].

2. Получаем гидравлическое сопротивление промывателя Δp, Па:

$$\Delta p = g\left(10^3 \cdot \Delta + 90(W / l)^{0,5}\right) \tag{30}$$

где Δ – расстояние от низа перегородки l до верхнего уровня воды, м (Δ = 0,2 м [8]).

$$\Delta p = 9,81\left(10^3 \cdot 0,2 + 90(1,458)^{0,5}\right) = 3000$$

Исходя из результата расчёта по формуле (30) выбираем вентилятор марки ЦП7-40 №8 с электродвигателем типа АО 2-82-4 мощностью 55 кВт, имеющий подачу до 6,5 м^3/с и давление до 3300 Па.

3. По формуле использованной нами раньше определяем параметр осаждения частиц газа в пылеуловителе. Исходя из опытных данных [9] для D_m=22 мкм,D_{50}=1,5 мкм, σ_η=2,74.

$$x = \frac{\lg \frac{22}{1,5}}{\sqrt{0,17^2 + (\lg 2,74)^2}} = 1,85$$

4. По величине параметра x с помощью данных источника [9] определяем величину интеграла вероятностей $\Phi(x)$=96,89 %.

5. Определяем диаметры $D_{84,2}$ и $D_{15,8}$ для построения в вероятностно-логарифмической системе координат кривую парциальных коэффициентов осаждения: $D_{84,2}$=1,014 мкм; $D_{15,8}$=2,22 мкм.

По отдельным чертам (низкая коррозионная активность, буквально 100%-ая смачиваемость, невысокий аппаратный расход воды) выбор газопромывателя типа ПВМ-40 представляется реально обоснованным.

6 Расчёт пенного газопромывателя

Пенные газопромыватели – колонны с перфорированными перегородками (тарелками).

Данные тарелки существуют следующих видов:

а) провальные щелевые;

б) дырчатые.

В настоящей работе принят пенный газопромыватель с провальными щелевыми тарелками.

Расчёт указанных аппаратов производится согласно [10] в следующем порядке.

1. Ориентировочно согласно [11] принимается скорость газового потока w = 2 м/с. Ввиду высокой зольности (4,24 г/нм^3) к установке в аппарате принимаем две щелевые провальные тарелки, имеющих живое сечение s = 0,25 м^2/м^2.

Берём ширину щелей b = 0,005 м. Вычисляем примерный диаметр аппарата D, м:

$$D = \sqrt{\frac{W}{0,785 \cdot w}} \tag{31}$$

$$D = \sqrt{\frac{19,4}{0,785 \cdot 2}} = 1,435$$

Берём длину медианной щели l_m на 0,01 м меньше диаметра аппарата (l_m = 1,425 м):

Рассчитываем конструктивный параметр χ, шт:

$$\chi = \frac{0,785 \cdot D^2 \cdot s}{l_m \cdot b} \quad (32)$$

$$\chi = \frac{0,785 \cdot 1,435^2 \cdot 0,25}{1,425 \cdot 0,005} = 57 \text{, шт.}$$

С помощью экстраполяции по данным работы [11], определяем необходимое число щелей N=43. Далее определяем шаг δ, м, и расстояние b_1, м, между щелями:

$$\delta = 1,564 / N \quad (33)$$

$$\delta = 1,564 / 43 = 0,331$$

$$b_1 = \delta - 0,005 \quad (34)$$

$$b_1 = 0,0331 - 0,005 = 0,0281$$

Общая длина всех щелей равняется, l_{tot}, м:

$$l_{tot} = 0,785 \cdot D^2 \cdot (s / b) \quad (35)$$

$$l_{tot} = 0,785 \cdot 1,435^2 \cdot (0,25 / 0,005) = 80,824$$

2. При отсутствии требования охлаждения газов при обработке принимаем удельное орошение W_L/W_G = 0,6 · 10^{-3}, м^3/ м^3.

Определяем плотность орошения, ρ, кг/(м^2·с), принимая как орошающую жидкость воду:

$$\rho_{ir} = r_{ir} \cdot w \cdot \rho_L \qquad (36)$$

где r_{ir} – удельное орошение, м^3/ м^3;

ρ_L – плотность воды, кг/м^3.

$$\rho_{ir} = 0,6 \cdot 10^{-3} \cdot 2 \cdot 1000 = 1,2, \text{ кг/(м}^2\cdot\text{с)}$$

3. Получаем значение скорости потока путём последовательных приближений [10]: θ = 2,33; Lgw_{max} = 0,516 = > w_{max} = 3,33 м/с.

Условие $w \le w_{max} \le 1,1w$ не выполнено.

Изменяем геометрические размеры решётки, принимаем следующие значения:

а) ширина щелей b = 0,004 м;

б) живое сечение тарелок s = 0,2 м^2/м^2.

В результате пересчёта получаются следующие значения: Lgw_{max} = 0,339 = > w_{max} = 2,1 м/с.

В данном случае условие с учётом небольшой погрешности выполняется, поэтому окончательно принимаем w_{max} = 2 м/с.

4. Потому что подготовительное значение скорости потока принято за окончательное, диаметры аппарата и решетки также остаются неизменными. Испытаем иные размерные характеристики решетки. Отметим, собственно что отношение размера щели к живому сечению тарелки не изменилось. Ввиду этого, не изменятся:

а) параметр χ;

б) число щелей N= 43;

в) шаг δ = 33,1;

г) промежуток между щелями b_1 = 28,1, м

5. Получаем гидравлическое сопротивление тарелки со слоем пены Δp_3, Па, учитывая, что при температуре воды 20°С коэффициент поверхностного натяжения составляет $\sigma_L = 72{,}8 \cdot 10^{-3}$ Н/м:

$$\Delta p_3 = \frac{w_{max}^{\ 2} \cdot 0{,}826 \cdot \theta^2}{w_{max} \cdot s^2} + \frac{2 \cdot \sigma_L}{b} \tag{37}$$

где θ – критерий (θ = 2,33);

$$\Delta p_3 = \frac{2^2 \cdot 0{,}826 \cdot 2{,}33^2}{2 \cdot 0{,}2^2} + \frac{2 \cdot 72{,}8 \cdot 10^{-3}}{0{,}004} = 260{,}6$$

Сопротивления остальных элементов аппарата считаются по конкретным конструктивным характеристикам.

6. Исходная высота слоя жидкости на тарелке h_b, м:

$$h_b = \frac{(\theta^2 - \zeta_d) \cdot w_{max}^{\ 2} \cdot 0{,}826}{w_{max} \cdot s^2 \cdot \rho_L} \tag{38}$$

где ζ_d – константа (ζ_d = 1,65).

$$h_b = \frac{(2{,}33^2 - 1{,}65) \cdot 2^2 \cdot 0{,}826}{2 \cdot 0{,}2^2 \cdot 1000} = 0{,}156$$

Затем определяем величину брызгоуноса, L_{fl}, кг/кг:

$$L_{fl} = 0{,}133 \cdot 10^{-3} \cdot \exp\left(\frac{4 \cdot 10^{-3} \cdot w_{max}}{s \cdot 0{,}156}\right) \tag{39}$$

$$L_{fl} = 0{,}133 \cdot 10^{-3} \cdot \exp\left(\frac{4 \cdot 10^{-3} \cdot 2}{0{,}2 \cdot 0{,}156}\right) = 0{,}172 \cdot 10^{-3}$$

7. Для получения полного коэффициента очистки вычисляем параметр осаждения *x* при следующих значениях:

а) D_{50}=0,85мкм;

б) $\lg\sigma_\eta$ = 0,769;

в) D_m= 22 мкм;

г) σ = 2,74 (по заданию).

$$x = \lg(D_m / D_{50}) / \sqrt{\lg \sigma_\eta^{\,2} + \sigma^2} \qquad (40)$$

$$x = \lg(22 / 0{,}85) / \sqrt{\lg 0{,}769^2 + 2{,}74^2} = 0{,}57$$

Согласно [11] по значению *x* определяем значение полного коэффициента очистки, которое равняется η_{tot} = 91,35%.

Вывод: полученный результат показывает целесообразность использования пенного газопромывателя как аппарата для предварительной ступени очистки.

7 Расчёт скруббера Вентури

7.1 Расчёт по вероятностному методу

Расчёт производится согласно [12] в порядке.

1. Принимается тип скруббера. По расходу газовых выбросов по данным работы [13] выбираем типоразмер скруббера. Дальше определяется скорость газового потока в горловине по расходу и диаметру горловины трубы.

Принят скруббер марки ГВПВ-0,140, имеющий следующие характеристики:

а) производительность - 23,13 м^3/с;

б) диаметр горловины D = 420 мм;

в) габариты – 2015х2015х8140 мм;

г) масса - 1160 кг.

Рассчитываем диаметр горловины $F_{гор}$, м^2:

$$F_{гор} = \frac{\pi d^2}{4} \quad (41)$$

$$F_{гор} = \frac{3,14 \cdot 0,42^2}{4} = 0,1385 \text{, м}^2$$

Скорость газового потока *w*, м/с, равняется:

$$w = \frac{19,4}{0,785 \cdot D^2} \quad (42)$$

$$w = \frac{19,4}{0,785 \cdot 0,42^2} = 140$$

2. Берём коэффициент гидравлического сопротивления сухой трубы

Вентури ζ_d =0,165 [13].

3. С учётом конструкции скруббера, метода подвода орошающей воды в трубу, скорости газового потока и соотношение длины горловины к диаметру выбираем нужное уравнение:

$$\zeta_w = \zeta_d \cdot 13,4 \left(\frac{W_L}{W_G} \right)^{0,024} \quad (43)$$

где W_L, W_G – соответственно расходы орошающей жидкости и обрабатываемого газа, м^3/с.

Принимаем по [8] W_L = 0,0097 м^3/с; W_G = 19,4; ζ_w=1,839 м^2

$$\zeta_w = 0,165 \cdot 13,4 \left(\frac{0,0097}{19,4} \right)^{0,024} = 1,839 \text{, м}^2$$

4. По полученному значению ζ_d рассчитываем сопротивление сухой трубы Вентури Δp_d, Па, добавленное сопротивление Δp_w, Па и полное сопротивление орошаемой трубы Вентури Δp, Па.

$$\Delta p = \Delta p_d + \Delta p_w \quad (44)$$

$$\Delta p_w = \zeta_w w^2 \rho_L / 2 \cdot (W_L / W_G) / 2 \quad (45)$$

$$\Delta p_w = 1,839 \cdot 140^2 \cdot 1000 / 2 \cdot (0,0097 / 19,4) / 2 = 9011,1$$

$$\Delta p_d = \zeta_d w^2 \rho_G / 2 \quad (46)$$

$$\Delta p_d = 0,165 \cdot 140^2 \cdot 0,826 / 2 = 1335,642$$

$$\Delta p = 1335,642 + 9011,1 = 10346,742$$

5. Принимаем величину удельного орошения по опытным данным для подобного состава дисперсных выбросов (в случае недоступности принимаем равным 1 л/м^3).

6. Определим ориентировочный размер капель орошающей жидкости D_{dr}, м:

$$D_{dr} = (0,0585 / w_{rg})(\sigma\rho_L)^{0,5} + 1,884\left[\eta_L / (\sigma\rho_L)^{0,5}\right]^{0,45}(W_L / W_G)^{1,5} \quad (47)$$

где: W_L, W_G – скорость газов относительно капли, м/с, которую принимают равной скорости газового потока в горловине трубы;

- η_L – коэффициент динамической вязкости жидкости, Па·с;
- σ – коэффициент поверхностного натяжения жидкости, Н/м (для воды при 20 ^{0}С; η_L=10^{-3} Па·с, σ=72,8·10^{-3} Н/м).

Полученные результаты размера капель по указанной формуле рассматриваются в качестве оценочных, но точнее чем данные уравнения на сегодняшний день нет.

$$D_{dr} = (0,0585 / 140 \cdot \left[10^3 / \left(72,8 \cdot 10^{-3} \cdot 1000\right)\right]^{0,5} +$$

$$+1,884 \cdot \left[\cdot 10^{-3} / \left(10^3 72,8 \cdot 10^{-3} \cdot 10^3\right)\right]^{0,45} \cdot (0,0097 / 19,4)^{1,5} = 1,131 \cdot 10^{-3}$$

7. Рассчитываем инерционный параметр ψ для каждой фракции заданного состава дисперсных загрязнителей:

$$\psi_i = D_{pi}^2 \rho_p w C_i^{'} / (18\eta l), \quad (48)$$

где D_{pi} – диаметр частицы *i*-той фракции, м;

ρ_p – истинная плотность частицы, кг/м^3;

$C_i^{'}$ – поправка Каннингхема, равная диаметру капли орошающей жидкости [5];

l – определяющий размер, м, равная диаметру капли орошающей жидкости [5].

Расчёты по формуле (48) сведены в таблицу 7.

Таблица 7 – Инерционный параметр ψ

ψ	Фракция	Результат
	1,25	1,215;
	3,25	7,179
	5,15	18,028
	8,15	45,151
	13	144,879
	20,5	285,669
	32,5	717,996

8. Рассчитываем коэффициент захвата частиц различных фракций каплями орошающей жидкости η_{dr}:

$$\eta_{dr} = \psi_i^2 / (\psi_i + 0,35)^2 \quad (49)$$

9. Принимаем рассчитанные значения коэффициентов за парциальные коэффициенты очистки η_p, рассчитываем полный коэффициент очистки η_{tot}, %:

$$\eta_{tot} = \sum \eta_{iF} \cdot F_{ib} \quad (50)$$

$$\eta_{tot} = 0,603 \cdot 3 + 0,909 \cdot 5 + 0,962 \cdot 11 + 0,984 \cdot 16 + 0,994 \cdot 23 = 97,542, \%.$$

Расчёты по формуле (49) сведены в таблицу 8.

Таблица 8 – Коэффициент захвата частицы ψ

ψ	Фракция	Результат
	1,25	0,603
	3,25	0,909
	5,15	0,962
	8,15	0,984
	13	0,994

Степень очистки по скрубберу Вентури по вероятностному методу довольно высокая. Однако, для принятия окончательного решения для указанного аппарата, необходимо произвести его расчёт по энергетическому методу.

7.2 Расчёт по энергетическому методу

Расчёт производится согласно [14] в следующем порядке.

1. Берём содержание пыли на выходе из очистного оборудования в пределах 10-15 ПДК (порядок 1,5-2 мг/м^3).

В итоге результат расчёта согласно исходных данным составит η_{tot} = 99,95%.

Выброс пыли за сутки при этой степени очистки составит M = 3,612, кг [9]:

2. По данным работы [15] определяем число единиц переноса: N = 7,601.

3. Так как отсутствуют эмпирические данные, принимаем значения коэффициентов B и k: зола-унос, пылевидное сжигание углей $B = 4,34 \cdot 10^{-3}$; k = 0,3.

4. По уравнению вычисляем необходимую для очистки долю энергозатрат A^k, Дж/м^3:

$$A^k = \left(\frac{N}{B} \right)^k \tag{51}$$

$$A^k = \left(7,601 / \left(4,34 \cdot 10^{-3}\right)\right)^{1/0,3} = 6,475 \cdot 10^{10}$$

5. Согласно [15] получается, что большая доля энергии затрачивается в трубе Вентури, меньшая – затрачивается в каплеуловителе.

6. Получаем данные центробежного каплеуловителя с коническим завихрителем для трубы ГВПВ-0,140:

- в свободном сечении каплеуловителя скорость газов будет равна w_G = 5,0÷9,72 м/с;
- диаметр каплеуловителя D = 400мм.

Когда производим расчет сопротивления каплеуловителя Δp_{dr} принимаем, что собственно охлаждение газов в скруббере Вентури относительно мало. Плотность газов считаем по задаваемой температуре выбросов, но в начале определив плотность газа-носителя в промышленных условиях: ρ_0 = 1,346 кг/м^3; ρ_{172} = 0,826 кг/м^3.

Согласно данным работ [15] берём коэффициент сопротивления каплеуловителя. Данные данного коэффициента ζ в ней относятся к скорости в поперечном сечении сепараторов.

Получаем, что сопротивление каплеуловителя Δp_{dr}, Па, при скорости газового потока 3 м/с и значении ζ = 4 будет равно:

$$\Delta p_{dr} = \zeta w_G^2 \rho_G / 2 \tag{52}$$

$$\Delta p_{dr} = 4 \cdot 3^2 \cdot 0,826 / 2 = 14,868$$

Возможное сопротивление трубы Вентури Δр, Па равняется:

$$\Delta p = A - \Delta p_{dr} \quad (53)$$

$$\Delta p = 6,475 \cdot 10^{10} - 14,868 = 6,4749 \cdot 10^{10}$$

Рассчитанная величина сопротивления трубы слишком большая, поэтому расчет скруббера Вентури по энергетическому методу в данном случае нецелесообразен. Принимаем расчёт по вероятностному методу (п. 7.1).

8 Расчёт рукавных фильтров

Расчёт производится согласно [16] в следующем порядке.

1. Исходя из заданной температуры газов (T = 445, К) по данным работы [17] подбираем материал фильтра. Выбираем стеклоткань, которой соответствуют фильтры марки ФРДО-6500, обладающие посекционной регенерацией обратной продувкой. Указанный фильтр имеет следующие характеристики:

- площадь фильтровальной поверхности 6500 м^2;
- количество секций – 10 шт;
- количество рукавов в секции – 212;
- диаметр рукава 130 мм;
- высота рукава 7,85 м;
- пропускная способность > 14 м^3/с;
- сопротивление 2000 Па;
- габариты фильтра 22,3х7,6х16 м.

2. Весь расход запыленных газов W=175 м^3/с. Расход на регенерацию обратной продувкой принимаем в размере десяти процентов от всего расхода обрабатываемых газов W_1 =17,5 м^3/с. Согласно источнику [17] для золы и регенерации обратной продувкой значение W_{sf} = 0,015 м^3/(м^2·с), что практически совпадает со справочными данными - удельной нагрузки для выбранного.
Получим нужную величину рабочей площади фильтрации f_{fr}, м^2:

$$f_{wr} = (W + W_1) / W_{sf} \qquad (54)$$

$$f_{wr} = (175 + 17,5) / 0,015 = 12833$$

Берём к установке два фильтра ФРДО-6500 с общей площадью фильтрации 13000 м^2.

3. Рассчитаем дополнительную площадь f_1, м^2, секций которые отключаются при регенерации:

$$f_1 = N f_N \tau n / 3600 \quad (55)$$

где N– число секций в фильтре (N = 2);

f_N – площадь фильтрации одной секции (f_N = 6500 [18]), м^2;

τ – сколько времени отключается секции на регенерацию (τ = 5 [18]), с;

n – кол-во регенераций за один час (n = 5 [19]).

$$f_1 = 2 \cdot 6500 \cdot 5 \cdot 5 / 3600 = 90,3 \text{, м}^2$$

площадь поверхности фильтрации f_{tot}, м^2 (общая) обеспечиваемая двумя фильтрами ФРДО-6500:

$$f_{tot} = f_{wr} + f_1 \quad (56)$$

$$f_{tot} = 12833 + 90,3 = 12923,3 \text{, м}^2$$

4. Для расчета площади фильтрации одной секции f_N берём следующими характеристики:

- кол-во рукавов n_1 =212;
- диаметр рукава d =0,13 м;
- высота рукава h =7,85 м.

Получим площадь фильтрации одного рукава f_N, м^2, как получаем площадь боковой поверхности цилиндра, у которого одинаковая высота и диаметр:

$$f_N = \pi d h n_1 \quad (57)$$

$$f_N = 3{,}14 \cdot 0{,}13 \cdot 7{,}85 \cdot 212 = 679{,}326$$

Необходимое число секций *N*, штук, определим по формуле:

$$N = f_{tot} / f_N$$

$$N = 12923{,}3 / 679{,}326 = 20$$

Полученное количество секций в 2 фильтрах ФРДО-6500 равняется требуемой величине.

5. Берём 2000 Па – это максимально допустимое сопротивление устройства. Если происходит потере давления в газоходах до 500 Па устройством движения воздушной массы для установки может быть использован вентилятор типа Ц4-76 № 10 с подачей 7 м^3/с, давлением 2580 Па и потребляемой мощностью 22 кВт.

9 Расчёт электрофильтра

Выбираем из каталога [20] электрофильтр ЭГА2-56-12-6-3.

По маркировке берём нужные из необходимых конструктивных характеристик:

- кол-во полей – 3;
- активная длина каждого поля – 12 м;
- площадь активного сечения f = 181,7 м^2;
- общая площадь осаждения – 15740 м^2;
- габариты электрофильтра – 17,28х19,94х19,91 м;
- скорость газов – до 1 м/с;
- запыленность на входе – до 90 г/м^3;

Плоские осадительные электроды электрофильтра, коронирующие изготовленны в виде трубчатых рам с ленточно-игольчатыми или зубчатыми элементами;

- высота электродов h = 6 мм;
- расстояние между осадительными электродами – 300 мм;
- Механическим встряхивание происходит регенерация.

Из-за отсутствия сведений об интервале между встряхиваниями, принимаем интервал в двенадцать минут, [20].

Расчёт производится согласно [21] в следующем порядке.

1. Рассчитываем скорость газов в активном сечении w, м/с:

$$w = \frac{W}{f} \tag{58}$$

$$w = \frac{175}{181,7} = 0,96$$

Относительная скорость газов w_{rl}, м/с:

$$w_{rl} = \frac{0,96}{1} = 0,96 \quad (59)$$

Относительная длина электродовh_{rl}, м:

$$h_{rl} = \frac{l}{8} \quad (60)$$

где l – габаритный размер, м.

$$h_{rl} = \frac{19,91}{8} = 2,49$$

Определим ориентировочную величину пылеемкости электродов m, кг/м^2, как количество пыли, осевшее на площади S = 15740 м^2 за время между регенерациями 720 с (12 мин.) при следующих значениях:

а) W=175, м^3/с;

б) z=4,24·10^{-3}, кг/м^3;

в) степень улавливания s = 98%.

$$m = \frac{Wz \cdot 720 \cdot s}{S} \quad (61)$$

$$m = \frac{175 \cdot 4,24 \cdot 10^{-3} \cdot 720 \cdot 0,98}{15740} = 0,033$$

Относительная пылеёмкость $m_{rl} = m$ = 0,033.

Коэффициент вторичного уноса K_{fl}:

$$k_{fl} = 1 - 0,275 \cdot w_{rl}^{0,35} \cdot h_{rl}^{0,51} \cdot \exp(-1,72 \cdot m_{rl}) \quad (62)$$

где: w_{rl}, h_{rl}, m_{rl} – относительные скорость газа, высота и пылеемкость осадительных электродов, вычисляем как отношение действительных значений указанных характеристик к базовым, принимаемым соответственно 1 м/с, 8 м и 1кг/м^2.

$$k_{fl} = 1 - 0,275 \cdot 0,96^{0,35} \cdot 2,49^{0,51} \cdot \exp(-1,72 \cdot 0,033) = 0,537$$

2. Напряженность поля у осадительного электрода E, В/м, рассчитываем по формуле согласно источнику [21], внеся в неё необходимые корректировки на геометрические данные электродов:

$$E = \frac{U}{(0,15 - c) \cdot \ln(a / b)} \quad (63)$$

Берём за D_1 шаг между осадительными электродами a = 0,3 м; за D_2 – расстояние между концами игл (зубьев) коронирующих электродов b = 0,03 м; за δ расстояние от конца иглы (c = 0,015 м) до осадительного электрода. Расчет производим при максимальном напряжение U =50 кВ:

$$E = \frac{50 \cdot 10^3}{(0,15 - 0,015) \cdot \ln(0,3 / 0,03)} = 160,85 \cdot 10^3$$

Рассчитываем коэффициент k:

$$k = 0,55 \cdot 10^{-4} \cdot T \cdot \frac{\frac{1}{p} + \frac{10}{E}}{D_{50}} \quad (64)$$

Характеристики для расчёта следующие:

а) температура: T = 172+273 = 445, К;

б) абсолютное давление в электрофильтре: p = 101325-3000 = 98325, Па;

в) средний размер дисперсных частиц: $D_{50} = 13{,}3 \cdot 10^{-6}$, м.

$$k = 0{,}55 \cdot 10^{-4} \cdot 445 \cdot \frac{\frac{1}{98325} + \frac{10}{160850}}{13{,}3 \cdot 10^{-6}} = 0{,}133$$

Принимаем величину f_{rl} = 0,9 [21] при заданной σ = 2,032 и максимальном значении k, которое имеется в таблице [21], определяем параметр A =1,8287.

3. Устройство ЭГА2-56-12-6-3 имеет 20 газовых проходов (ширина активной зоны – 6000 мм, расстояние между осадительными электродами – 300 мм). Возьмём для него среднее значение κ_{rg} = 0,93.

Определяем коэффициент динамической вязкости η газа-носителя заданного состава для нормальных условий [21] с условием пересчёта рабочую температуру [21] (η_{172}=24,28·10^{-6} Па·с.).

Рассчитываем параметр β:

$$\beta = \frac{8{,}85 \cdot 10^{-12} \cdot (160{,}85 \cdot 10^{3})^{2} \cdot 13{,}3 \cdot 10^{-6} \cdot 17{,}28}{0{,}96 \cdot 0{,}93 \cdot 24{,}28 \cdot 10^{-6} \cdot 0{,}15} = 16{,}184$$

4. Рассчитываем коэффициент очистки η_{tot}, %:

$$\eta_{tot} = 1 - \exp(-k_{fl} \cdot A \cdot \beta^{0{,}42}) \qquad (65)$$

$$\eta_{tot} = 1 - \exp(-0{,}537 \cdot 1{,}8287 \cdot 16{,}184^{0{,}42}) = 0{,}9576, \%.$$

В результате расчёта установлено, что величина полного коэффициента очистки, практически совпадает с величиной из каталога [21].

Стоит отметить, что результаты расчётов во многом зависят от подбора значений опытных параметров, таких как интервал между встряхиваниями, напряжение на электродах и пр. Так, при напряжении 40 кВ расчетный проскок составляет примерно 6%. Так как для электрических полей, создаваемых электродами, расчётная напряженность практически не соответствует реальной, можно предположить, что в неоднородном поле проскок возрастет еще более резко.

Можно сделать вывод о целесообразности электрофильтрации выбросов биохимического предприятия, если при эксплуатации удастся поддерживать параметры процесса очистки (пылеемкость, температуру газов, напряжение на электродах и т.д.) на расчётном уровне.

10 Расчёт состава пыли после первой ступени очистки

После выбора аппаратов для первой и второй ступеней очистки выполняется пересчёт состава пыли для второй ступени очистки.

Для заданного на проектирование дисперсного состава пыли определяется содержание каждой фракции Δq_{bi}, %:

$$\Delta q_{bi} = q_{bi} - q_{bi} \quad (66)$$

$$\Delta q_{b1} = q_{b1} - q_{b2} = 98 - 95 = 3$$

$$\Delta q_{b2} = q_{b2} - q_{b3} = 95 - 90 = 5$$

$$\Delta q_{b3} = q_{b3} - q_{b4} = 90 - 79 = 11$$

$$\Delta q_{b4} = q_{b4} - q_{b5} = 79 - 63 = 16$$

$$\Delta q_{b5} = q_{b5} - q_{b6} = 63 - 40 = 23$$

$$\Delta q_{b6} = q_{b6} - q_{b7} = 40 - 14 = 26$$

По линии парциальных коэффициентов осаждения для батарейного циклона ЦБ-254Р определяем величины фракционных коэффициентов очистки Δq_{bi}, %, для заданного состава пыли.

$$\Delta q_{pi} = \Delta q_{bi}(1-\eta_{pi}) \quad (67)$$

$$\eta_{p1} = 8\%; \Delta q_{p1} = 0,03(1\text{-}0,08) = 0,276$$

$$\eta_{p2} = 32\%; \Delta q_{p2} = 0,05(1\text{-}0,32) = 0,034$$

$$\eta_{p3} = 50\%; \Delta q_{p3} = 0,11(1\text{-}0,5) = 0,055$$

$$\eta_{p4} = 67\%; \Delta q_{p1} = 0,16(1\text{-}0,67) = 0,0528$$

$$\eta_{p5} = 82\%; \Delta q_{p5} = 0,23(1\text{-}0,82) = 0,0414$$

$$\eta_{p6} = 91,5\%; \Delta q_{p1} = 0,26(1\text{-}0,915) = 0,0221$$

$$\eta_{p7} = 96,5\%; \Delta q_{p7} = 0,16(1\text{-}0,965) = 0,0056$$

Суммируем значения $\Sigma\Delta q_{pi}$ = 0,2385. Представим, что $\Sigma\Delta q_{pi}$ = 100%, т.е. составляем пропорцию: 0,2385=100%; 0,0276=*x*%. Исходя из этого получаем: Δq_{e1} = 11,572 %; Δq_{e2}= 14,255 %; Δq_{e3}= 23,060 %; Δq_{e4} = 22,138 %; Δq_{e5} = 17,358 %; Δq_{e6} = 9,266 %; Δq_{e7} = 2,351 %; $\Sigma\Delta q_{ei}$ = 100 %.

Суммируются значения Δq_{pi}, начиная с самой крупной фракции *d*=32,5 мкм, и получается интегральное распределение состава пыли q_{ei}, %, по остатку *R*(*d*):

$$\Delta q_{ei} = \Delta q_{pi} + \Delta q_{ei} \qquad (68)$$

$$\Delta q_{e1} = 2,351 + 9,266 = 11,617$$

$$\Delta q_{e2} = 11,617 + 17,358 = 28,975$$

$$\Delta q_{e3} = 28,975 + 22,138 = 51,113$$

$$\Delta q_{e4} = 51,113 + 23,060 = 74,173$$

$$\Delta q_{e5} = 74,173 + 14,255 = 88,428$$

$$\Delta q_{e6} = 88,428 + 11,572 = 100$$

Все расчёты сводим в таблицу 9.

Таблица 9 – Перерасчёт состава пыли для второй ступени очистки

D, мкм	1,25	3,25	5,15	8,15	13	20,5	32,5
Δg, %	3	5	11	16	23	26	16
Δq_{pi}, %	0,0276	0,034	0,055	0,0528	0,414	0,0221	0,0056
Δq_{ei}, %	11,572	14,255	23,060	22,138	17,358	9,266	2,348
q_{ei}, %	100	88,428	74,173	51,113	28,975	11,617	2,351

11 Выбор аппаратов пылегазоочистки

В настоящей работы расчёт был произведён с целью обеспечения двухступенчатой очистка от золы от сжигания угля в котлах типа БКЗ – 210-140-Ф5. В соответствии с заданием дисперсный загрязнитель находится в твердой фазе.

По результатам расчёта всех очистных аппаратов, необходимо выбрать аппараты для первой и второй ступеней. Для этого, нужно не только ориентироваться на полученную степень очистки, но также учитывать физико-химические свойства пыли. Кроме этого, необходимо обратить внимание на простоту аппаратов.

Не стоит принимать во внимание аппарат с весьма малым коэффициентом очистки, так как аппарат при малом коэффициенте очистки будет менее удерживать пыль.

Для первой ступени очистки выбрана установка батарейных циклонов, которая обеспечила большую пропускную способность дымовых газов, поэтому окончательный выбор для первой ступени очистки – 9 батарейных циклон ЦБ-254Р.

Для второй ступени очистки наиболее подходящее устройство – электрофильтр. Электрофильтр обеспечивает весьма высокий коэффициент очистки. При этом пыль обладает малым удельным электрическим сопротивлением, что является положительным фактором в процессе очистки.

При проектировании скорость газового потока обеспечивает условия для малого вторичного уноса пыли с электродов. Таким образом, для второй ступени очистки применяется 1 электрофильтр ЭГА 2-56-12-6-3.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе рассчитаны сухие и мокрые аппараты пылегазоочистки. Расчёт включал в себя следующие аппараты:

1) пылеосадительная камера;

2) жалюзийный пылеуловитель;

3) циклон;

4) батарейные циклоны;

5) скруббер ПВМ;

6) пенный газопромыватель;

7) скруббер Вентури;

8) рукавный фильтр;

10) электрофильтр.

Выбраны аппараты для работы двухступенчатой очистки пыли, выделяющаяся от сжигания угля марки БСШ Бородинского месторождения в котле БКЗ 210-140-Ф5 Минусинской ТЭЦ.

Ими являются:

1) первая ступень – батарейный циклон ЦБ-254Р со степенью очистки 74,55 %;

2) вторая ступень – электрофильтр ЭГА2-56-12-6-3 со степенью очистки 95,76 %.

Характеристики указанных аппаратов приведены в приложении настоящей работы.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. СТО 4.2 – 07 – 2014. Система менеджмента качества. Общие требования к построению, изложению и оформлению документов учебной и научной деятельности. – Красноярск: ИПК СФУ, 2014. – 60 с.
2. Кольцов В.Б., Кольцова О.В. под общей редакцией Каракеяна В.И. Процессы и аппараты защиты окружающей среды. Учебник и практикум в 2 частях. Часть 1. 2-е изд. испр. и доп., – М: Юрайт, 2018 – 277 с.
3. Зиганшин М.Г., Колесник А.А., Зиганшин А.М. Проектирование аппаратов пылегазоочистки. Учеб. пособие. 2-е изд. перераб. и доп. – Спб.: Лань, 2014 – 535 с.
4. Процессы и аппараты пылеочистки [Электронный ресурс]: Учебное пособие // сост. Ветошкин А.Г. - Пенза: Изд-во Пенз. гос. ун-та, 2005 – Режим доступа: http://echemistry.ru/assets/files/books/ekologiya/skrubbery.pdf.
5. Ветошкин А.Г. Инженерная защита окружающей среды от вредных выбросов. Учеб. пособие. 2-е изд., испр. и доп. – М: Инфа-Инженерия, 2019 – 416 с.
6. Ветошкин А.Г. Аппаратурное оформление процессов защиты атмосферы от газовых выбросов. Учебное пособие. 2-е изд., испр. и доп., - М: Инфа-Инженерия, 2016 – 244 с.
7. Ветошкин А.Г. Техника и технология обращения с отходами жизнедеятельности. Учебное пособие. В 2-х частях. Часть 1 Системное обращение с отходами – М: Инфа-Инженерия, 2019 – 440 с.
8. Методы расчета аппаратов для защиты атмосферы и гидросферы [Электронный ресурс]: Методические указания к практическим работам // сост.: С.Б. Ловинецкая, О.В. Плешакова – Омск: СибАДИ, 2019 – Режим доступа: http://bek.sibadi.org/fulltext/esd967.pdf.

9. Плотность газов при нормальных условиях [Электронный ресурс]: Справочные таблицы // «Infotables.ru» - Режим доступа: https://infotables.ru/fizika/34-plotnost-veshchestv/98-tablitsa-plotnost-veshchestv-gazy-zhidkosti.

10. Вязкость жидкостей, водных растворов, паров и газов (Таблица) [Электронный ресурс]: Справочные таблицы // «Infotables.ru» - Режим доступа: https://infotables.ru/fizika/300-vyazkost-zhidkostej-vodnykh-rastvorov-parov-i-gazov-tablitsa.

11. Борисов Г.С. и др. под редакцией Дытнерского Ю.И. Основные процессы и аппараты химической технологии. Учебное пособие по проектированию. Второе изд. перераб. и доп. – М: Альянс, 2017 – 493 с.

12. Процессы и аппараты защиты окружающей среды (атмосфера) [Электронный ресурс]: Методические указания к выполнению курсового проекта // сост. Пак Т.С. - Псков: Изд-во ППИ, 2010 – Режим доступа: https://C:/Users/XXX/Downloads/ПиАЗОС_методические_указания%20(1).pdf.

13. Техника пылеулавливания и очистки промышленных газов [Электронный ресурс]: Батарейные циклоны // сост.: Алиев Г.М.-А. – Режим доступа: https://www.циклоны-цн.рф/batareynye-cyclones.html

14. Зубрев Н.И., Крошечкина И.Ю., Устинова М.В. Системы защиты среды обитания. Учебник – М: КНОРУС, 2017 - 382 с.

15. Козлова С.А., Шалаев И.М., Раева О.В., Киселев А.В. Оборудование для очистки газов промышленных печей. Электронный конспект лекций. – Красноярск: СФУ, 2007 – 156 с.

16. Выбор и расчет средств по пылегазоочистке воздуха [Электронный ресурс]: Учебное электронное текстовое издание // сост.: Волкова А.А., Шашмурина Е.В. - ГОУ ВПО УГТУ – УПИ, 2009 - Режим доступа: https://www.ustu.ru

17. Степановских А.С. Охрана окружающей среды. Учебник для вузов – М: ЮНИТИ, 2002 – 560 с.

18. Промышленная экология. [Электронный ресурс]: Курс лекций // сост. Калыгин В.Г. – М: МНЭПУ, 2000 - Режим доступа: https://may.alleng.org/d/ecol/ecol12.htm

19. Егоренков Л.И. Охрана окружающей среды. Учебное пособие – М: Форум: Инфа-М, 2013 – 256 с.

20. ГОСТ 25199-82. Оборудование пылеулавливающее. Термины и определения.

21. ГОСТ 25757-83. Пылеуловители инерционные сухие. Типы и основные параметры.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Характеристики принятого оборудования

1. Батарейный циклон ЦБ-254Р:
   - число элементов - 80;
   - оптимальная скорость газов в элементе – 4,5 м/с;
   - пропускная способность – 5,5÷16 $м^3$/с;
   - коэффициент сопротивления – 90;
   - тип направляющего аппарата элемента – винт;
   - область применения – очистка высокотемпературных газов (до t=400 ^{0}С).
2. Электрофильтр ЭГА 2-56-12-6-3:
   - площадь активного сечения – 181,7 $м^2$;
   - общая площадь осаждения – 15740 $м^2$;
   - длина – 17,28 м;
   - ширина – 19,94 м;
   - высота – 19,91 м.