

Министерство образования и науки РФ

Томский государственный
архитектурно-строительный университет

РАСЧЕТ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПЫЛЕУЛАВЛИВАНИЯ КАСКАДА ПРОТИВОТОЧНЫХ ЦИКЛОНОВ

Методические указания к практическим работам

Составитель М.В. Анисимов



Томск 2011

Расчет эффективности пылеулавливания каскада противоточных циклонов: методические указания / Сост. М.В. Анисимов. – Томск.: Изд-во Том. гос. архит.-строит. ун-та, 2011. – 27 с.

Рецензент Г.И. Ковалев
Редактор Е.Ю. Глотова

Методические указания к практическим занятиям по дисциплине ФТД.4 «Современные проблемы микроклимата в рабочей зоне» и «Численные методы решения задач БЖД» для студентов специальности 280102 «Безопасность технологических процессов и производств» всех форм обучения.

Печатаются по решению методического семинара кафедры охраны труда и окружающей среды, протокол № 2 от 30.09.2010 г.

Утверждены и введены в действие проректором по учебной работе В.В. Дзюбо

с 15.03.2011
до 15.03.2016

Оригинал-макет подготовлен автором.

Подписано в печать
Формат 60×84. Бумага офсет. Гарнитура Таймс.
Уч-изд. л. 1,42. Тираж 75 экз. Заказ №

Изд-во ТГАСУ, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2.
Отпечатано с оригинал-макета в ООП ТГАСУ.
634003, г. Томск, ул. Партизанская, 15.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	4
1. Основные сведения о пылеуловителях	6
2. Противоточные циклоны	9
3. Определение эффективности пылеулавливания каскадом инерционных уловителей	12
3.1. Сравнение каскада циклонов ЦН с высокоэффективным циклоном СК-ЦН-34	19
4. Пример расчета эффективности пылеулавливания каскада противоточных циклонов	20
5. Задание по расчету эффективности пылеулавливания каскада противоточных циклонов	23
Контрольные вопросы	24
Список использованной и рекомендуемой литературы	25
Приложение	26

Распределение учебной нагрузки по дисциплине «Современные проблемы микроклимата в рабочей зоне»

Форма обучения	Курс	Се- местр	Объем часов по ГОС	Объем работы студента с преподавателем			Само- стоя- тель- ная рабо- та сту- дентов (СРС)	Конт- роль са- мост. рабо- ты	КП, КР	Ито- го- вый конт- роль	
				Всего	Из них						
					лек- ций	лабо- ратор- ных работ					прак- тиче- ских заян- тий
О	5	9	36	36	18	–	18	28	2	–	Зачет
З	5	10	30	30	8	–	8	22	12	–	Зачет

Распределение часов самостоятельной работы студента

Самостоятельная работа студентов	Очки	Заочники
1. Изучение теоретического материала	4	14
2. Подготовка и выполнение лабораторных работ	24	8

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в связи с постоянно увеличивающимися объемами промышленного производства остро встала проблема пылегазоочистки дымовых газов и вентиляционных выбросов, отходящих от различных энергетических и промышленных объектов. Объёмы промышленного производства, как известно, удваиваются каждые 7–10 лет, в то время как загрязнение воздушного бассейна возрастает на порядок. При этом предприятия строительных материалов стоят в первой пятёрке основных загрязнителей атмосферы. Так, по общему выбросу вредных веществ ТЭС занимают первое место – 29 %, далее следуют предприятия

чёрной металлургии – 24 %, цветной металлургии – 10,5 %, нефтехимии – 15,5 %, строительных материалов – 8,1 % [1].

Для поддержания нормативных параметров воздуха в производственных помещениях, что, несомненно, является задачей инженеров охраны труда, необходимо выполнение определенных мероприятий, к которым относятся организация общеобменной вентиляции и устройство местных отсосов, способствующих отводу пыли от рабочей зоны или обслуживаемой зоны. Местные отсосы требуют, как правило, установки пылеочистного оборудования, которое снижает вредное воздействие вентиляционных газовых выбросов на окружающую среду.

В связи с вышеизложенным, для предотвращения роста загрязнения атмосферы эффективность газоочистных систем должна повышаться, а это в свою очередь ведёт к увеличению энергозатрат, приходящихся на единицу объёма очищаемых газов. Так что проблема экономики очистки газов становится особенно актуальной. В [2] предложен энергетический принцип сравнения оптимального выбора и компоновки отдельных пылеулавливающих аппаратов в высокоэффективные каскадные газоочистные системы с общим невысоким гидравлическим сопротивлением, подводящий фундаментальную основу под решение проблемы энергосбережения в области газоочистки.

Ознакомление с энергетическим принципом оптимальной последовательной компоновки пылеулавливающих аппаратов на примере противоточных циклонов НИИОГАЗ. Получение навыков расчета эффективности пылеулавливания аппаратов, объединенных в каскад и сравнение каскада с высокоэффективным единичным циклоном. Создание компьютерной программы расчета необходимого числа циклонов в каскаде для обеспечения необходимой эффективности пылеулавливания из вытяжного воздуха частиц заданного размера.

1. ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ О ПЫЛЕУЛОВИТЕЛЯХ

Для очистки запылённых воздушных выбросов создан большой ассортимент пылеуловителей, что в большинстве случаев позволяет сориентироваться в выборе средств очистки соответственно её задачам. Пылеуловители применяются главным образом для улавливания из воздуха пылей 2-й, 3-й и 4-й групп дисперсности. Пыли 5-й группы, как правило, не могут эффективно улавливаться в пылеуловителях вследствие их высокой дисперсности. Для достижения эффективности порядка 90–95% должны улавливаться полностью частицы крупностью 0,1–0,2 мкм. Такая эффективность достижима только в воздушных фильтрах 1-го класса. Пылеуловители в зависимости от размеров эффективно улавливаемых частиц и эффективности их улавливания условно подразделяются на пять классов [3].

К первой группе пылей по дисперсности относятся порошки, легко осаждающиеся под действием силы тяжести.

Пылеуловители 1-го класса предназначены для эффективного улавливания пылей 4-й группы дисперсности. Верхняя граница дисперсности этой группы пыли соответствует дымам металлургических печей, а также конденсационным туманам кислот и масел.

Улавливание частиц размером более 2 мкм из пыли 3-й группы легко осуществляется в пылеуловителях типа Вентури 2-го класса, а также в многочисленных разного вида тканевых и электрических пылеуловителях 2-го класса при обычном режиме их использования. Из инерционных пылеуловителей требованиям 2-го класса могут удовлетворять также струйные пылеуловители типа Ротоклон, ПВМ и т. п. при сопротивлении 3000–5000 Па.

В табл. 1 представлены основные пылеулавливающие устройства, разделённые по классам их эффективности.

Таблица 1

Классификация пылеуловителей по их эффективности

Класс пылеуловителя	Размеры эффективно улавливаемых пылевых частиц, мкм	Группа пыли по дисперсности	Эффективность, %
1	Более 0,3–0,5	5	< 80
		4	99,9–80
2	> 2	4	92–45
		3	99,9–92
3	> 4	3	99–80
		2	99,9–99
4	> 8	2	99,9–95
		1	> 99,9
5	> 20	1	> 99

Частицы размером 4 мкм и более улавливаются струйными пылеуловителями при потерях давления 800–1200 Па. Электрические пылеуловители для улавливания частиц данной крупности не применяются. Матерчатые уловители иногда применяются для улавливания пыли 2-й и 3-й группы органического и синтетического происхождения, которые по причине специфических особенностей не могут быть уловленными эффективно в инерционных пылеуловителях (древесная пыль, волокнистая пыль текстильной промышленности и т. п.).

Пылеуловители 4-го класса представлены простейшими мокрыми пылеуловителями с перепадом давления приблизительно 1000 Па, высокоэффективными циклонами СН, СКН, УЦ, СИОТ и др. Пылеуловители 4-го класса улавливают достаточно эффективно пыль 4-й группы, а некоторые из них применяются и для улавливания пыли 3-й группы, хотя обычно эффективность в таком случае не превышает 70 %.

К пылеуловителям 5-го класса можно отнести циклоны средней эффективности большого диаметра, например, циклоны НИИОГАЗ (ЦН-24, ЦН-11, ЦН-15), хорошо приспособленные к большим пылевым нагрузкам, пылесадочные камеры и т. д.

В табл. 2 приведены основные типы и классы пылеуловителей, разделённых по группам улавливаемой пыли и по их эффективности [3].

Таблица 2

Номенклатура пылеуловителей

Вид устройств	Тип пылеуловителей	Класс по эфф-ти	Область наиболее целесообразного применения					Сопrotивление, Па
			1	2	3	4	5	
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1. Гравитационные	Пылесадочные камеры	5	+	+	–	–	–	2 00
2. Инерционные	Циклоны (большой пр-ти)	5	+	+	–	–	–	6 00
	Циклоны высокой эфф-ти	4	–	+	+	–	–	2 000
	Батарейные циклоны	4	–	+	+	–	–	2 000
	Центробежные скрубберы	4	–	+	+	–	–	1000
	Стуйные типа Ротоклон	3 2	– –	– –	+ +	– +	– –	1200 3500

Окончание табл. 2

Вид устройств	Тип пылеуловителей	Класс по эфф-ти	Область наиболее целесообразного применения					Сопротивление, Па
			1	2	3	4	5	
1	2	3	4	5	6	7	8	9
	Аппараты Вентури	3 2 1	– – –	– – –	+ + –	– + +	– – +	1350 3500 > 10000
3. Промывные	Пенные	2	–	–	+	+	–	2000
4. Тканевые	Сетчатые (для волокнистой пыли)	5	+	–	–	–	–	400 – 800
	Матерчатые (рукавные)	3	+	+	–	–	–	600
		2 1	– –	– –	+ –	+ +	– +	1500 2500
5. Электрические	Электрические (пластинчатые)	2	–	–	+	–	–	300
		1	–	–	–	+	+	600

Как видно из табл. 2, чем эффективнее нужно очистить воздух от различных взвесей (особенно от мелкодисперсных), тем большее сопротивление необходимо преодолеть, вследствие чего затратить большее количество энергии.

2. ПРОТИВОТОЧНЫЕ ЦИКЛОНЫ

На практике для очистки отходящего воздуха от механической пыли размерами ≥ 20 мкм считается наиболее целесообразным применение циклонов НИИОГАЗ. Принцип действия противоточных циклонов основан на использовании центробежных сил, возникающих при вращении газопылевого потока внутри корпуса аппарата. Вращение достигается путём тангенциального ввода потока в циклон. В результате действия центробежных сил

частицы пыли, взвешенные в потоке, отбрасываются на стенки корпуса и выпадают из потока. Чистый газ, продолжая вращаться, совершает поворот на 180° и выходит из циклона через расположенную по оси выхлопную трубу.

Частицы пыли, достигшие стенок корпуса, под действием перемещающегося в осевом направлении потока и сил тяжести движутся к выходному отверстию корпуса и выводятся из циклона. Ввиду того, что решающим фактором, обуславливающим движение пыли, являются аэродинамические силы, а не силы тяжести, циклоны можно располагать наклонно и даже горизонтально. На практике из-за компоновочных решений, а также для рационального размещения пылетранспортных систем циклоны, как правило, устанавливают в вертикальном положении.

Из вышеизложенного следует: в принципе циклоны могут нормально работать при любом их положении в пространстве, но они чрезвычайно чувствительны к дополнительным присосам воздуха через бункер из-за увеличения объёмов газов, движущихся навстречу пыли; бункер участвует в организации аэродинамики циклонного процесса, поэтому использование циклонов без бункеров или с уменьшенными (против рекомендуемых) размерами бункеров приводит к ухудшению эффективности пылеулавливания. Для установки на опорные конструкции бункеры снабжаются лапами по МН 5128-63.

Тип опорных лап выбирается в зависимости от веса аппарата с пылью и условий его установки. Плоские крышки цилиндрических циклонов должны быть снабжены рёбрами жесткости, размеры которых определяются исходя из давления (разрежения) в аппарате и действующих нагрузок.

Наибольшее распространение получили циклоны типов ЦН и ЦМС-27, позволяющие при необходимости подобрать оптимальный типоразмер циклона почти для любых случаев очистки газов.

Конструктивная схема цилиндрического противоточного циклона ЦН-24 представлена на рис. 1.

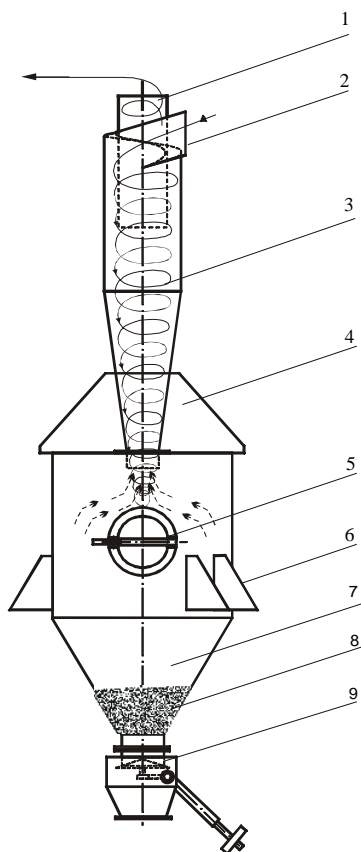


Рис. 1. Схема циклона ЦН с присоединенным к нему бункером:
1 – выходной патрубок циклона ЦН-24 (воздух выходит очищенным);
2 – входной патрубок циклона ЦН-24 (запыленный воздух); 3 – циклон ЦН-24; 4 – ребра жесткости (рекомендуемое количество – 4 штуки); 5 – смотровой люк; 6 – опорные лапы; 7 – корпус бункера; 8 – уловленная циклоном пыль; 9 – пылевой затвор

Типоразмеры аппаратов подбираются из соотношения внутреннего диаметра к их длине, ширине и высоте входного патрубка, диаметру выхлопной трубы и другим определяющим размерам [2]. Для осмотра и чистки бункеров в них предусматриваются люки 5 (рис. 1) с диаметрами $\varnothing 250$ или $\varnothing 500$ мм.

Отверстия для выгрузки пыли приняты в зависимости от емкости бункеров и производительности циклонов следующих размеров: $d_{кр} = 200$ мм, $d_{кр} = 300$ мм, $d_{кр} = 500$ мм.

В виде исключения для самых маленьких бункеров $\varnothing 300$ и $\varnothing 500$ мм приняты пылевывпускные отверстия соответственно $d = 100$ мм и $d = 150$ мм. Размеры фланца на штуцере выгрузки пыли должны соответствовать размерам пылевых затворов.

На основании этих соотношений могут быть разработаны циклоны ЦН-24, ЦН-11, ЦН-15, ЦН-15У любых размеров в пределах от 200 до 2000 мм и циклоны СДК-ЦН-33, СК-ЦН-34 и ЦН-24 в пределах от 400 до 3000 мм. Согласно ГОСТ 9617–67, для циклонов приняты следующие типовые размеры диаметров (в мм): 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800, 1000, 1200, 1400, 1600, 1800, 2000, 2400, 3000.

3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПЫЛЕУЛАВЛИВАНИЯ КАСКАДОМ ИНЕРЦИОННЫХ УЛОВИТЕЛЕЙ

Из энергетического принципа сравнения и компоновки пылеулавливающего оборудования [1] следует вывод о том, что в каскадах последовательно установленных пылеуловителей с невысокой эффективностью каждый может быть в целом достигнута высокая степень очистки газа при удельных энергозатратах, значительно меньших, чем в одиночных высокоэффективных аппаратах. При выводе принципа полагалось, что общее сопротивление каскада равно сумме сопротивлений отдельных аппаратов, а фракционная эффективность каждого не зависит от его

месторасположения в каскаде и остаётся равной фракционной эффективности пылеулавливания отдельных аппаратов.

На рис. 2 схематически показан каскад циклонов НИИОГАЗ, стрелками условно обозначены основные направления движения запыленного воздуха и выпадение пыли в бункеры.

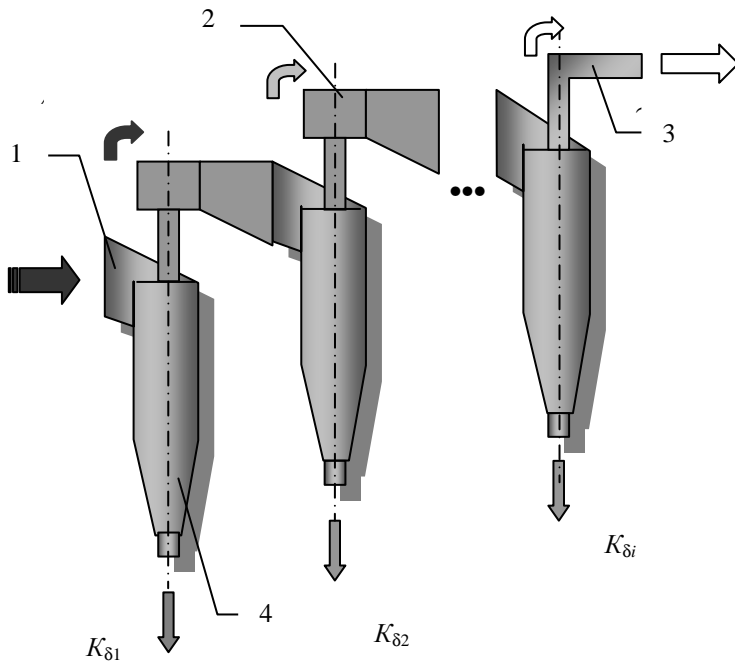


Рис. 2. Каскад противоточных циклонов НИИОГАЗ:

1 – входной патрубок циклона, стоящего в каскаде 1-м; 2 – инерционный раскручиватель циклона, стоящего в каскаде 2-м; 3 – выходной патрубок циклона, стоящего в каскаде i -м; 4 – противоточный циклон ЦН; $K_{\delta_1}, K_{\delta_2}, \dots, K_{\delta_i}$ – коэффициенты проскока частиц размером δ первого, второго и i -го циклонов

Данный принцип позволяет производить не только компоновку отдельных пылеулавливающих аппаратов в высокоэффек-

тивные газоочистные системы, но и дает возможность прогнозировать степень пылеулавливания и общее гидравлическое сопротивление каскада пылеуловителей, состоящего из инерционных аппаратов пылеулавливания различного типа, и сравнивать эти системы с целью подбора более экономичной схемы. Расчеты показали, что высокая степень очистки запыленного воздуха достигается при последовательной компоновке в каскад даже двух циклонов НИИОГАЗ.

Для вычисления эффективности пылеулавливания необходимо знать медианный размер частиц δ_{50} , улавливаемых из очищаемого воздуха, и среднелогарифмическое отклонение σ . Размер частиц δ_{50} и величину σ исходной пыли можно определить, например, седиментационным методом анализа дисперсных порошков в гравитационном поле. Наиболее целесообразным считается использование противоточных циклонов для улавливания частиц размером около 20 мкм и более. Однако в каскаде эффективно улавливаются частицы и значительно меньших размеров.

Для вычисления перепада давления на отдельных циклонах используется формула

$$\Delta P = \sum \xi \frac{\rho V_{\text{ц}}^2}{2},$$

где $\sum \xi$ – коэффициент гидравлического сопротивления циклона; $V_{\text{ц}}$ – оптимальная скорость движения очищаемого газа в плане циклона, м/с.

Оптимальная скорость – это скорость, при которой процессы пылеулавливания в аппаратах протекают наиболее эффективно при наименьших потерях давления на гидравлическое сопротивление. Для инерционных пылеуловителей (противоточные циклоны) оптимальная скорость в плане циклона находится в интервале 3–5 м/с [3]. Так, для противоточного циклона НИИОГАЗ ЦН-24 оптимальная скорость равна 4,5 м/с (см. табл. 4).

Зная объёмный расход очищаемых газов Q , который определяется из конкретных условий эксплуатации очистных аппаратов, допустимое гидравлическое сопротивление ΔP и оптимальную скорость движения потока в циклоне $V_{ц}$ для выбранного типа пылеуловителя, находим его диаметр:

$$D = \sqrt{\frac{Q \cdot 4}{\pi \cdot V_{ц}}} . \quad (1)$$

После того как получено значение диаметра циклона, согласно ГОСТ 9617–67*, подбираем ближайший по значению типовой размер диаметра (в мм): 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800, 1000, 1200, 1400, 1600, 1800, 2000, 2400, 3000 .

Производим пересчет скорости в циклоне с учетом диаметра $D_{г}$ по ГОСТ 9617 – 67*.

Определяем действительную скорость:

$$V_{д} = \frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot D_{г}^2} . \quad (2)$$

Скорость в циклоне не должна отклоняться более чем на 15 % от оптимальной при установке одиночных циклонов.

Коэффициенты сопротивления циклонов в каскаде определяются по формуле:

$$\xi_i = \frac{2\Delta P_i}{\rho V_{цi}^2} , \quad (3)$$

где ξ_i – коэффициент гидравлического сопротивления циклона, стоящего в каскаде i -м, определяется опытным путем (для ЦН-24 коэффициент гидравлического сопротивления $\xi_i \approx 60$); $V_{цi}$ – скорость очищаемого воздуха в i -м циклоне.

Суммарный коэффициент гидравлического сопротивления всего каскада циклонов в целом при $V_{цi} = V_{ц}$.

$$\xi_{\Sigma} = \frac{2\Delta P_{\Sigma}}{\rho V_{\text{ц}}^2}, \quad (4)$$

где ξ_{Σ} – суммарный коэффициент гидравлического сопротивления, ΔP_{Σ} – суммарные потери давления на всем каскаде циклонов, Па.

Суммарное значение коэффициента ξ_{Σ} всего каскада рассчитывается как сумма коэффициентов местных сопротивлений циклонов и переходников:

$$\xi_{\Sigma} = \xi_1 + \xi_2 + \dots + \xi_i + \dots + \xi_n, \quad (5)$$

где $\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n$ – коэффициенты гидравлического сопротивления отдельных узлов каскада n циклонов.

В табл. 3 представлены значения коэффициентов гидравлических сопротивлений ξ различных циклонов НИИОГАЗ в зависимости от вида устройств, устанавливаемых на выходном патрубке циклона (инерционный раскручиватель, улитка и т. д.).

Таблица 3

Значения коэффициентов сопротивления различных типов циклонов диаметром 500 мм

Тип циклона	d/D	Без дополнительных устройств		С раскручивателем		С кольцевым диффузором		С вых. улиткой
		$\xi_{\text{ц}500}^{\text{с}}$	$\xi_{\text{ц}500}^{\text{п}}$	$\xi_{\text{ц}500}^{\text{с}}$	$\xi_{\text{ц}500}^{\text{п}}$	$\xi_{\text{ц}500}^{\text{с}}$	$\xi_{\text{ц}500}^{\text{п}}$	
ЦН-11	0.59	245	250	—	—	207	215	235
ЦН-15	—	155	163	115	121	132	140	150
ЦН-15У	—	165	170	148	152	140	148	158
ЦН-24	—	75	80	61	66	64	70	73
СДК-ЦН-33	0.33	520	600	—	—	—	—	500
СК-ЦН-34	0.34	1050	1150	—	—	—	—	—

Здесь $\xi_{ц}^n$, $\xi_{ц}^c$ – коэффициенты полного сопротивления циклона и для сети при $D = 500$ мм. Полная методика проведения расчетов, определяющих гидравлические сопротивления циклонов, приведена в руководящих указаниях по проектированию, монтажу и эксплуатации циклонов НИИОГАЗ [4]. Как видно из табл. 3, наименьшее гидравлическое сопротивление имеет циклон ЦН-24, у которого степень пылеулавливания частиц размером >20 мкм $\eta = 80-90$ % (при оптимальной скорости в плане циклона $V_{ц} = 4,5$ м/с), а наибольшее – циклон СК-ЦН-34 при $\eta = 95-99$ %.

Так как фракционный коэффициент проскока частиц K_{δ} , а следовательно, и степень фракционного пылеулавливания аппарата η_{δ} напрямую зависят от инерционности движения частиц в нем, то их определяют по формулам [1,2]:

$$K_{\delta} = e^{-a \cdot Stk^n}, \quad \eta_{\delta} = 1 - K_{\delta}, \quad (6)$$

где $Stk = \tau \frac{V_{ц}}{D_{ц}}$, $\tau = \rho_{т} \delta^2 / 18\mu$; K_{δ} , η_{δ} – фракционные коэффициенты проскока и эффективность улавливания частиц размером δ ; τ – время динамической релаксации частиц, с; $D_{ц}$ – диаметр противочного циклона, м; $V_{ц}$ – скорость в плане циклона, м/с; μ – динамическая вязкость очищаемого газа, Па·с; $\rho_{т}$ – плотность частиц пыли, кг/м³.

При условии, что каждый аппарат в каскаде идентичен, фракционные коэффициенты проскока частиц размером δ отдельных циклонов K_{δ} и, следовательно, фракционные эффективности пылеулавливания η_{δ} их будут одинаковы. Зная K_{δ} единичных аппаратов, можем определить суммарный коэффициент проскока частиц размером δ всего каскада. Испытания различных аппаратов показали, что коэффициент проскока K_{δ} меняется в зависимости от вида пылеуловителя. В табл. 4 приведены формулы вида (6) для K_{δ} различных циклонов НИИОГАЗ.

**Зависимости фракционных коэффициентов проскока
различных циклонов НИИОГАЗ [1, 2]**

Циклон	K_{δ}	Оптим-я скорость, м/с
ЦН-11	$\exp(-22.05\text{Stk}^{0.45})$	3,5
ЦН-15	$\exp(-17.14\text{Stk}^{0.46})$	3,5
ЦН-15У	$\exp(-12.37\text{Stk}^{0.41})$	3,5
ЦН-24	$\exp(-11.9\text{Stk}^{0.47})$	4,5
СДК-ЦН-33	$\exp(-24.31\text{Stk}^{0.37})$	2,5
СК-ЦН-34	$\exp(-27.9\text{Stk}^{0.38})$	2,5

Суммарный коэффициент проскока каскада последовательно установленных одинаковых m противоточных циклонов для пыли, имеющей весовую дифференциальную функцию распределения частиц по размерам $g(\delta)$, определяется по формуле

$$K_{\Sigma} = \int_0^{\infty} K_{\delta}^m g(\delta) d\delta, \quad (7)$$

где в качестве K_{δ} подставляется зависимость вида (6) конкретного аппарата (см. табл. 4).

Так, для каскада 3 циклонов НИИОГАЗ ЦН-24 формула (7) будет иметь вид

$$\eta_{\Sigma} = 1 - \int_0^{\infty} (e^{-11,9\text{Stk}^{0.47}})^3 g(\delta) d\delta.$$

Для практических расчетов выражение (7) при логарифмически нормальном распределении частиц по размерам приводится к виду [1, 5]

$$K_{\Sigma} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-4}^4 e^{-\left(\alpha \cdot \sigma^{2 \cdot n \cdot t} + \frac{t^2}{2}\right)} dt, \quad (8)$$

где $t = \frac{\lg \frac{\delta}{\delta_{50}}}{\lg \sigma}$, $\alpha = maStk_{50}^n$, $Stk = \tau_{50} \frac{V_{II}}{D_{II}}$, $\tau_{50} = \rho_r \delta_{50}^2 / 18\mu$.

Причем для обеспечения достаточной точности интегрирование по t можно проводить в интервале от -4 до $+4$ [1, 2].

Суммарная эффективность пылеулавливания всего каскада

$$\eta_{\Sigma} = 1 - K_{\Sigma}. \quad (9)$$

Для расчета интеграла суммарного фракционного коэффициента проскока (8) можно использовать различные программные оболочки. Студентам предлагается реализовать данный принцип математического расчета эффективности пылеулавливания в каскадах циклонов НИИОГАЗ (ЦН-24, ЦН-11, ЦН-15, ЦН-15У) с использованием численных методов в приложении Turbo basic.

3.1. Сравнение каскада циклонов ЦН с высокоэффективным циклоном СК-ЦН-34

Концентрация пыли в реальных производственных условиях может составлять от нескольких мг/м^3 до сотен мг/м^3 . Предельно допустимые концентрации (ПДК) пылей на постоянных рабочих местах и в рабочей зоне должны быть обеспечены в соответствии с требованиями санитарных норм (СН 245-71) и ГОСТ 12.1.005–88*. Нормы ПДК распространяются на воздух рабочей зоны всех рабочих мест независимо от их расположения (в производственных помещениях, на открытых площадках, транспортных средствах и т. д.).

По степени влияния на организм человека производственная пыль подразделяется на четыре класса опасности (ГОСТ 12.1.007–76*), табл. 5.

Классы опасности вредных веществ

Класс опасности	Концентрация, мг/м ³
1. Вещества чрезвычайно опасные	менее 0,1
2. Вещества высокоопасные	0,1 – 1,0
3. Вещества умеренно опасные	1,0 – 10,0
4. Вещества малоопасные	более 10,0

Требуемая степень пылеулавливания газоочистных аппаратов определяется в соответствии с классом опасности взвешенных в очищаемом воздухе частиц, а также с количеством пыли в единице объема.

4. ПРИМЕР РАСЧЕТА ЭФФЕКТИВНОСТИ ПЫЛЕУЛАВЛИВАНИЯ КАСКАДОМ ПРОТИВОТОЧНЫХ ЦИКЛОНОВ

Требуется определить количество m циклонов, например ЦН-24, в каскаде по заданному расходу воздуха $Q = 3000 \text{ м}^3/\text{ч}$ для улавливания пыли с параметрами $\rho_m = 7800 \text{ кг/м}^3$, $\sigma = 1,9$, $\delta_{50} = 30 \text{ мкм}$ при стандартных скоростях воздуха в плане циклона (см. табл. 4) и эффективности пылеулавливания, соответствующей одиночному циклону СК-ЦН-34 с диаметром 0,7 м. Вычислить гидравлическое сопротивление каскада m циклонов ЦН-24 и сравнить его с соответствующим сопротивлением циклона СК-ЦН-34.

1. Определяем эффективность пылеулавливания циклона СК-ЦН-34 при заданных параметрах с использованием номограммы [4]:

$$\eta_{\Sigma} = 99,5 \% .$$

2. Рассчитываем гидравлическое сопротивление циклона СК-ЦН-34 с использованием данных, представленных в [4]:

$$\Delta P_{\text{СК-ЦН-34}} = \xi \frac{\rho \cdot V_{\text{ц}}^2}{2}.$$

Здесь $\xi = 1050$, определяется по табл. 33 [4]. Введение поправки на диаметр для этого циклона не требуется. Плотность воздуха примем $\rho = 1,2 \text{ кг/м}^3$.

Скорость $V_{\text{ц}}$ определяем по заданному расходу, м/с:

$$V_{\text{ц}} = \frac{4 \cdot Q}{3600 \cdot \pi \cdot D^2} = \frac{4 \cdot 3000}{3,14 \cdot 3600 \cdot 0,7^2} = 2,16.$$

Полученная скорость для циклона СК-ЦН-34 отличается от стандартной (2,5 м/с) на 13,6 %, что по требованиям допустимо. Таким образом,

$$\Delta P_{\text{СК-ЦН-34}} = 1150 \frac{1,2 \cdot 2,16^2}{2} = 3219,2 \text{ Па}.$$

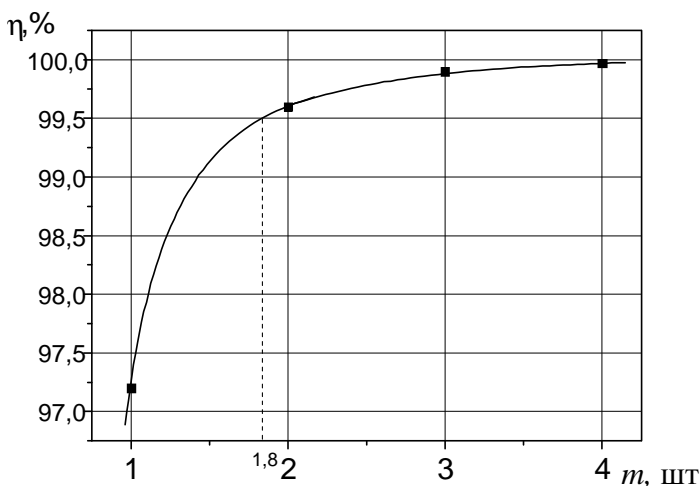
3. Производим расчет эффективности каскада циклонов ЦН-24 при заданных параметрах и $m = 1, 2, 3, \dots$.

4. Диаметр циклона ЦН-24 определяем по формуле при $V_{\text{ц}} = 4,5 \text{ м/с}$:

$$D = \sqrt{\frac{Q \cdot 4}{3600 \cdot \pi \cdot V_{\text{цстанд}}}} = 0,48 \text{ м}.$$

К расчету принимаем $D = D_{\Gamma} = 0,5 \text{ м}$. Следовательно, действительная скорость $V_{\text{цд}} = 4,25 \text{ м/с}$.

5. Строим график эффективности каскада циклонов ЦН-24 от количества циклонов и находим значение m , соответствующее эффективности $\eta = 99,5 \%$ (в соответствии с разработанной программой, представленной в приложении).



Как видно из графика, $m = 2$ шт.

6. Рассчитаем гидравлическое сопротивление каскада $m = 2$ циклонов ЦН-24 по формуле:

$$\Delta P_k = \xi_{\Sigma} \cdot \frac{\rho \cdot V_{цд}^2}{2} = m \cdot \xi_{цн-24,500}^c \cdot K_1 \cdot \frac{\rho \cdot V_{цд}^2}{2} = (2 \cdot 61) \cdot 1 \cdot \frac{1,2 \cdot 4,25^2}{2} = 13221 \text{ Па,}$$

где $\xi_{\Sigma} = m \cdot \xi_{цн-24,500}^c \cdot K_1$, $K_1 = 1$ [4, табл. 34] – поправка на диаметр.

7. Сравним гидравлические сопротивления циклона СК-ЦН-34 и каскада $m = 2$ циклонов ЦН-24:

$$\frac{\Delta P_{СК-ЦН-34}}{\Delta P_{ЦН-24,каск.}} = \frac{3219,2}{1322,1} \approx 2,5 \text{ раза.}$$

Приведенным примером проиллюстрированы возможности экономичного применения каскадов пылеулавливающих аппаратов и показано в рассматриваемом случае, что каскад из двух противоточных циклонов может обладать таким же качеством пылеочистки, что и один высокоэффективный другого типа циклон, но более низкими потерями давления. Так, каскад из двух противоточных циклонов ЦН-24 при данных условиях экономичнее СК-ЦН-34 в 2,5 раза.

Отсюда следует, что использование каскадных систем требует значительно меньших эксплуатационных затрат, чем одиночные аппараты. Поэтому такие системы следует рекомендовать там, где требуется высокая степень очистки и невысокие энергозатраты (но при этом выбор типа пылеуловителей должен быть обоснован технико-экономическими расчетами и конкретными условиями применимости).

5. ЗАДАНИЕ ПО РАСЧЕТУ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПЫЛЕУЛАВЛИВАНИЯ КАСКАДОМ ЦИКЛОНОВ

В задании необходимо:

1. Разработать программу расчета с использованием численного метода необходимого количества единичных циклонов, входящих в каскад, для обеспечения необходимых параметров пылеочистки вытяжного воздуха (см. задание по вариантам). За основу можно взять листинг программы, представленной в приложении.

2. Определить количество m циклонов заданной марки в каскаде по заданному расходу воздуха Q для улавливания пыли с параметрами ρ_m , σ , δ_{50} при стандартных скоростях воздуха в плане циклона (см. табл. 4) и эффективности пылеулавливания, соответствующей одиночному циклону СК-ЦН-34.

3. Вычислить гидравлическое сопротивление каскада m циклонов ЦН-24 и сравнить его с соответствующим сопротивлением циклона СК-ЦН-34.

Вариант	Марка единичных циклонов в каскаде	Расход воздуха Q , $\text{м}^3/\text{ч}$	Плотность пыли ρ_m , $\text{кг}/\text{м}^3$	Медианный размер частиц δ_{50} , мкм
1	ЦН-11	2500	2500	25
2	ЦН-15	4000	7800	30

Окончание таблицы

Вариант	Марка единичных циклонов в каскаде	Расход воздуха Q , м ³ /ч	Плотность пыли ρ_m , кг/м ³	Медианный размер частиц δ_{50} , мкм
3	ЦН-15У	5000	3500	40
4	ЦН-24	8000	4200	35
5	ЦН-11	2500	2500	25
6	ЦН-15	4000	7800	30
7	ЦН-15У	5000	3500	40
8	ЦН-24	8000	4200	35
9	ЦН-11	2500	2500	25
10	ЦН-15	4000	7800	30
11	ЦН-15У	5000	3500	40
12	ЦН-24	8000	4200	35
13	ЦН-11	2500	2500	25
14	ЦН-15	4000	7800	30
15	ЦН-15У	5000	3500	40
16	ЦН-24	8000	4200	35
17	ЦН-11	2500	2500	25
18	ЦН-15	4000	7800	30

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. К какому классу пылеуловителей относятся противочастичные циклоны НИИОГАЗ?
2. Частицы какого размера наиболее эффективно улавливаются пылеуловителями 5-го класса?
3. Поясните принцип действия противочастичных циклонов.
4. В чем заключается принцип последовательной компоновки пылеуловителей?
5. Что такое оптимальная скорость движения газа в пылеулавливающих аппаратах?

СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

Основная литература

1. Шиляев, М.И. Методы расчета пылеуловителя: учебное пособие для строительных вузов / М.И. Шиляев, А.М. Шиляев, Е.И. Грищенко; под ред. М.И. Шиляева. – Томск: ТГАСУ, 2006. – 385 с.
2. Шиляев, М.И. Методы расчёта и принципы компоновки пылеулавливающего оборудования: учебное пособие / М.И. Шиляев, А.Р. Дорохов. – Томск: ТГАСУ, 1999. – 209 с.

Дополнительная литература

1. Шиляев, М.И. Проблемы экономики очистки газов на предприятиях по производству строительных материалов // Нетрадиционные технологии в строительстве: Материалы международного научно-технического семинара. – Томск: Изд-во ТГАСУ, 1999. – С. 25–48.
2. Пирумов, А.И. Обеспыливание воздуха / А.И. Пирумов. – М.: Стройиздат, 1981. – 296 с.
3. Экспериментальная проверка энергетического принципа сравнения и компоновки пылеулавливающего оборудования на каскаде циклонов НИИОГАЗ // Нетрадиционные технологии в строительстве: Материалы международного научно-технического семинара / А.М. Шиляев, М.В. Анисимов, Д.Г. Слабожанин [и др.]. – Томск: ТГАСУ, 2001. – С. 27–50.
4. Вержбицкий, В.Н. Основы численных методов / В.Н. Вержбицкий. – М.: Высшая школа, 2005. – 840 с.
5. Введение в математическое моделирование: учебное пособие / В.Н. Ашихмин, М.Г. Бояршинов, М.Б. Гитман [и др.]. – М.: Интернет Инжиниринг, 2000. – 336 с.
6. Аляев, Ю. А. Алгоритмизация и языки программирования Pascal, C++, Visual Basic: учебно-справочное пособие / Ю. А. Аляев, О. А. Козлов. – М.: Финансы и статистика, 2002. – 320 с.

Приложение

Листинг программы расчета эффективности улавливания по формулам (8) и (9)

```
screen 12
color 8
input "ВВЕДИТЕ НОМЕР МАРКИ ЦИКЛОНА, НАПРИМЕР ЦН-24:24";o
if o=24 then gosub 24
if o=11 then gosub 11
if o=15 then gosub 15
if o=16 then gosub 16
color 4
input "ВВЕДИТЕ КОЛИЧЕСТВО ЦИКЛОНОВ В КАСКАДЕ, ШТ";z
pi=3.14159
e=1e-7
color 5
input "ВВЕДИТЕ ЗНАЧЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОЙ СКОРОСТИ, М/С";vc
color 6
input "ВВЕДИТЕ ЗНАЧЕНИЕ ПЛОТНОСТИ УЛАВЛИВАЕМЫХ ЧАСТИЦ, КГ/М3 ";rom
ro=1.2
color 2
input "ВВЕДИТЕ ЗНАЧЕНИЕ ДИАМЕТРА ЦИКЛОНА, М";dc
mu=18.1e-6
color 3
input "ВВЕДИТЕ РАЗМЕР УЛАВЛИВАЕМЫХ ЧАСТИЦ, М";d50
color 11
input "ВВЕДИТЕ ПАРАМЕТР СИГМА ";sigma
rr=vc*ro*dc/mu
color 2
locate 10,1
print "КРИТЕРИЙ РЕЙНОЛЬДСА =";rr
gosub 321
end
321 locate 10,45
color 3
print "ЗНАЧЕНИЕ Sigma=" int(sigma*1000)/1000 " "
m=1, a=-4, c=0, b=4, x=b
```

```

gosub 210
d=f
j=0
110 m=m*2
h=(b-a)/m/2
n=0
ii=0
x=a
130 x=x+h
gosub 210
ii=ii+4*f
n=n+2
if n=2*m then goto 180
x=x+h
gosub 210
ii=ii+2*f
goto 130
180 ii=(ii+c+d)*h/3
kk=j
j=ii
if abs(ii-kk)>e*15 then goto 110
locate 23,1
color 4
print "ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПЫЛЕУЛАВЛИВАНИЯ РАВНА" 1-ii" "
return
210 c1=1/((2*pi)^.5)
c2=-w*(1/18)^r*z*(rom/ro*rr*(d50/dc)^2)^r
c3=sigma^(2*r*x)
c4=x*x/2
f=c1*(exp(c2*c3-c4))
return
11 w=22.05
r=0.45
return
15 w=17.14
r=0.46
return
24 w=11.9
r=0.47
return

```