

Министерство образования и науки Российской Федерации

---

Государственное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«Санкт-Петербургский государственный технологический институт  
(Технический университет)»

---

Кафедра инженерной защиты окружающей среды

В.И.Редин, А.С.Князев

## **ПРОЦЕССЫ И АППАРАТЫ ЗАЩИТЫ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ**

Методические указания к контрольным работам  
для студентов заочной формы обучения  
по специальности 280202 «Инженерная защита окружающей среды»

Санкт-Петербург  
2010

УДК 502.3

Редин В.И, Князев А.С. Процессы и аппараты защиты окружающей среды: Метод. указания.- СПб.:СПбГТИ(ТУ), 2010.- 41 с.

В методических указаниях приведены темы контрольных работ по основным разделам дисциплины с кратким изложением теоретических вопросов, а также порядок их выполнения и оформления. Дан список вопросов по учебной дисциплине «Процессы и аппараты защиты окружающей среды» и рекомендуемая литература. Методические указания предназначены для студентов заочной формы обучения по специальности 280202 «Инженерная защита окружающей среды».

Рис.7; табл.11; библиогр. 15 названий.

Рецензент: Н.З.Евтюков, д-р хим. наук, профессор кафедры технологии органических покрытий. СПбГТИ(ТУ).

Утверждены на заседании учебно-методической комиссии факультета защиты окружающей среды

Рекомендованы к изданию РИСо СПбГТИ(ТУ)

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>1 УКАЗАНИЯ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ И ОФОРМЛЕНИЮ КОНТРОЛЬНЫХ РАБОТ .....</b>	<b>4</b>
<b>2 КОНТРОЛЬНЫЕ РАБОТЫ .....</b>	<b>5</b>
2.1 Контрольная работа №1 .....	5
2.1.1 Расчет горизонтальной песколовки .....	5
2.1.2 Расчет циклона .....	8
2.2 Контрольная работа №2 .....	17
2.2.1 Расчет тонкослойного отстойника .....	17
2.2.2 Расчет пылеосадительной камеры .....	21
2.3 Контрольная работа №3 .....	24
2.3.1 Расчет гидроциклона .....	24
2.3.2 Расчет мокрого скруббера .....	27
<b>3 Экзаменационные вопросы.....</b>	<b>31</b>
<b>Приложение 1 .....</b>	<b>34</b>
<b>ЛИТЕРАТУРА .....</b>	<b>35</b>

## 1 УКАЗАНИЯ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ И ОФОРМЛЕНИЮ КОНТРОЛЬНЫХ РАБОТ

Разделы дисциплины «Процессы и аппараты защиты окружающей среды» во многом связаны между собой и, прежде, чем приступить к выполнению контрольных работ, необходимо изучить дисциплину в целом. Перечень основной и рекомендуемой литературы, содержащей сведения о процессах и аппаратах, используемых при инженерной защите среды обитания, приводится на с.41. Каждая контрольная работа включает в себя две конкретные практические задачи, связанные с расчетом природоохранного оборудования. Пример оформления титульного листа приводится в Приложении А. Текст контрольной работы должен быть набран на компьютере (интервал - полуторный, кегель – 14) на листах формата А4 с одной стороны. Допускаются рукописные ответы, но и в этом случае титульный лист следует сделать на компьютере. Номер выполняемого варианта, определяется последней цифрой шифра студенческого билета (зачетной книжки). При оформлении контрольной работы не следует воспроизводить теоретическую часть, представленную в данном пособии. Материал контрольной работы должен содержать, преимущественно, результаты самостоятельной учебной и расчетно-практической деятельности студента, а не являться копией электронного учебника.

## 2 КОНТРОЛЬНЫЕ РАБОТЫ

### 2.1 Контрольная работа №1

#### 2.1.1 Расчет горизонтальной песколовки

Механическая очистка применяется для выделения из сточной воды нерастворенных минеральных и органических примесей. Этап механической очистки в ряде случаев предваряет стадии биологической, физико-химической или других методов более глубокой очистки воды.

Механическая очистка включает в себя процеживание через решетки или сита, отстаивание в поле гравитационных или центробежных сил, фильтрование и др. Типы и размеры этих сооружений зависят в основном от состава, свойств и расхода производственных сточных вод, а также от методов их дальнейшей обработки.

Как правило, механическая очистка является предварительным, реже — окончательным этапом для очистки производственных сточных вод. Она обеспечивает выделение взвешенных веществ из этих вод до 90-95 % и снижение органических загрязнений (по показателю БПК<sub>полн</sub>) до 20-25%.

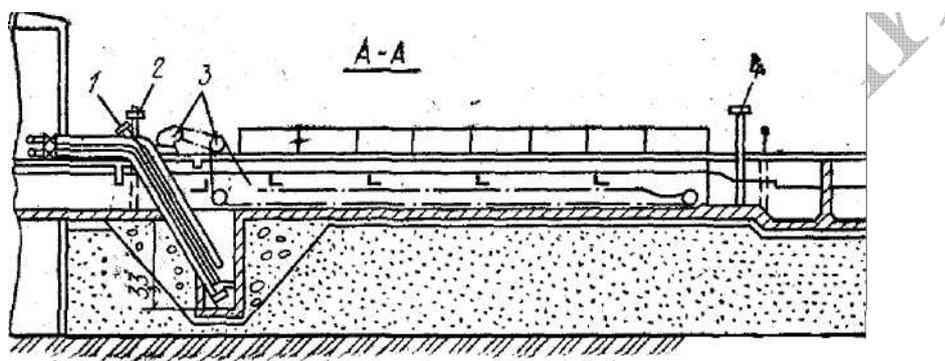
При выборе способов и технологического оборудования для очистки сточных вод от примесей необходимо учитывать, что заданные эффективность и надежность работы любого очистного устройства обеспечиваются в определенном диапазоне значений концентраций примесей и расходов сточной воды. Любые изменения могут существенно уменьшить эффективность работы очистных устройств или вывести их из строя. Выбор метода очистки сточных вод от взвешенных частиц осуществляется с учетом кинетики процесса. Размеры взвешенных частиц, содержащихся в производственных сточных водах, могут колебаться в очень широких пределах. Если частицы достаточно велики (диаметром более 30...50 мкм), то в соответствии с законом Стокса они могут легко выделяться отстаиванием. На практике процесс отстаивания осуществляется в две стадии. На первой - выделяются тяжелые минеральные примеси, которые могут откладываться в коммуникациях и выводить из строя насосы и другое оборудование. На второй стадии из потока воды извлекаются более тонкодисперсные легкие частицы. Песколовки предназначены для выделения из сточных вод тяжелых минеральных примесей (главным образом песка) крупностью свыше 0,1...0,25 мм при пропускной способности станции очистки сточных вод более 100 м<sup>3</sup>/сут.

Песколовки рассчитываются на максимальный расход сточных вод и проверяются на минимальный приток. В системах очистки наибольшее применение нашли песколовки с горизонтальным прямолинейным движением воды, горизонтальные с круговым движением воды, круглой формы с тангенциальным подводом воды и аэрируемые. Конструкцию сооружения выбирают в зависимости от количества сточных вод и concentra-

ции твердых примесей. Для расчета такого рода сооружений необходимы следующие данные.

- 1) Расход сточных вод  $Q$ , м<sup>3</sup>/с, по максимальному притоку.
- 2) Исходная концентрация взвешенных  $C_1$ , г/м<sup>3</sup>, тяжелых механических примесей.
- 3) Гидравлическая крупность (скорость осаждения в спокойной воде) твердых частиц  $w_0$ , см/с.
- 4) Требуемая степень очистки, или допустимое содержание взвешенных веществ в осветленной воде  $C_2$ , г/м<sup>3</sup>.

**Горизонтальные песколовки** — это удлиненные прямоугольные в плане сооружения с прямолинейным движением воды, рисунок 1.1



1 - гидроэлеваторы; 2 - щитовые и 3 - скребковые механизмы для удаления песка

Рисунок 1.1 - Горизонтальная песколовка с прямолинейным движением воды

Расчет горизонтальных песколовок проводят в следующем порядке:

1) Определяют скорость осаждения частиц в спокойной воде  $w_0$  (гидравлическая крупность). Обычно берется из экспериментальных данных, но ее можно рассчитать по формуле Стокса.

$$w_0 = \frac{d^2 g (\rho_{ч} - \rho_{жс})}{18 \mu_в},$$

где  $d$  - диаметр частиц песка,  $\rho_{ч}$  и  $\rho_{жс}$  - соответственно плотности частиц и воды,  $\mu_в$  - вязкость воды.

Так как в песколовке осаждается преимущественно песок, то  $\rho_{ч} = 2650 \text{ кг/м}^3$ .

2) Площадь сечения песколовки  $P$  (м<sup>2</sup>) определяется как:

$$P = Q / 3600 u n,$$

где  $Q$  - расход сточных вод, м<sup>3</sup>/с,  $u$  - средняя скорость движения воды м/с;  $n$  - количество параллельно установленных секций песколовки.

Средней скоростью движения воды задаются, принимая ее от 0,15 до 0,3 м/с.

3) Рабочая глубина песколовки  $H_p$ (м) определяется как:

$$H_p = \frac{Q}{Bu},$$

где  $B$  – ширина отстойной части песколовки (м), которая выбирается конструктивно.

4) Длину песколовки  $L$ (в м) находят по формуле:

$$L = k \frac{H_p u}{w_0},$$

где  $H_p$  – рабочая глубина песколовки (м),  $k$  — коэффициент, учитывающий влияние турбулентности потока и других факторов на скорость осаждения, он равен -  $k = \frac{w_0}{\sqrt{w_0 - 0,05u}}$ .

5) Площадь зеркала воды  $F$  ( $m^2$ ), и удельную нагрузку по воде  $q_0$  [ $m^3 / (m^2 \cdot c)$ ] при эффективности очистки  $\mathcal{E}$  определяют по формулам:

$$F = \frac{Q}{q_0} = BL; \quad q_0 = \frac{-0,43w_0}{\lg(1 - \mathcal{E})}; \quad \mathcal{E} = \frac{C_1 - C_2}{C_1} 100,$$

где  $C_1$  и  $C_2$  начальная и конечная концентрации частиц песка в воде ( $г/м^3$ ).

Для поддержания в песколовках постоянной скорости сточной воды на выходе из песколовки устанавливают водослив с широким порогом.

Объем приемков принимают равным не более двух суточных объемов выпадающего песка. Угол наклона стенок приемка  $60^\circ$ .

б) Объем осадка, накапливаемого в контейнере песколовки определяется как:

$$V_{oc} = \frac{Q \Delta C_{\text{ос}}}{\rho_{oc} (1 - \varphi)},$$

где  $\rho_{oc}$  - плотность выпавшего осадка,  $кг/м^3$ ;  $\varphi$  - влажность выпавшего осадка ( $\varphi = 0,6$ );  $\Delta C_{\text{ос}}$  - разность концентраций взвешенных веществ на входе и выходе из песколовки,  $кг/м^3$ . Плотность выпавшего осадка:

$$\rho_{oc} = \rho_{\text{вв}}(1 - \varphi) + \rho_{\text{воды}} \varphi,$$

где  $\rho_{\text{вв}}$  - плотность осаждающихся взвешенных веществ,  $кг/м^3$ .

Длина контейнера принимается равной длине секции песколовки, длина и ширина выбраны из конструктивных соображений. Выгрузку осадка рекомендуется осуществлять по мере накопления его в песколовке до высоты 0,75....0,80 м.

Для ориентировочных расчетов принимают глубину песколовки  $H = 0,25 \dots 1$  м, соотношение ширины и глубины  $B/H = 1:2$ . Среднюю скорость движения воды в расчетах следует принимать  $u = 0,3$  м/с, диаметр частиц пес-

ка 0,15...0,25 мм, продолжительность пребывания воды в песколовке не менее 30 с.

Исходные данные для расчета аппарата приводятся в таблице 1.1

Таблица 1.1 – Варианты заданий к контрольной работе №1 часть 1 (вариант выбирается по последней цифре номера зачетной книжки)

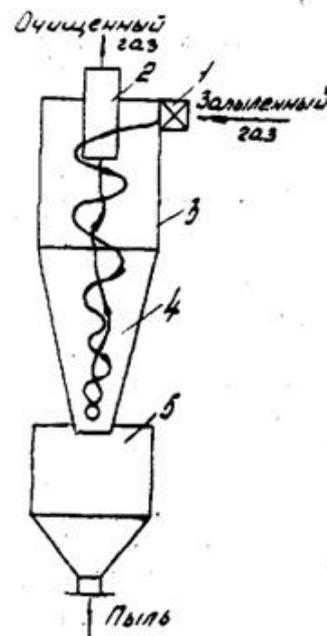
№ варианта	Расход воды, м <sup>3</sup> /ч	Концентрация, г/м <sup>3</sup>		Средний диаметр частиц, мм
		исходная	конечная	
1	750	1600	400	0,14
2	1000	1200	260	0,20
3	1500	1800	700	0,13
4	2000	1100	250	0,21
5	2500	900	90	0,30
6	3000	2050	650	0,12
7	3500	1350	300	0,22
8	4000	950	110	0,28
9	4500	1450	350	0,15
10	5000	1050	180	0,20

### 2.1.2 Расчет циклона

В циклонах частицы пыли движутся вместе с вращающимся газовым потоком и под действием центробежных сил оседают на стенках аппарата. Существуют два основных типа -циклонов: к первому относятся прямоточные циклоны, в которых вращение газа осуществляется с помощью лопастного статора, при этом внешние слои газового потока обогащаются частицами, которые частично агломерируются. Эти слои отделяются и направляются во второй аппарат, например, осадительную камеру или циклон противоточного типа. Более широкое применение получили циклоны второго типа, условно называемые противоточными (рисунок 1.2). Принцип действия таких циклонов следующий. Вращающийся газовый поток вначале перемещается по направлению к коллектору, а затем газы, продолжая вращаться в том же направлении, устремляются вверх и выходят через расположенную в центре выхлопную трубу. Частицы из внешних слоев газового потока оседают в пылесборнике. Ввод газа чаще всего осуществляют с помощью тангенциального патрубка.

Циклоны имеют следующие преимущества перед другими аппаратами: отсутствие движущихся частей, надежную работу при температуре до 500°С без конструктивных изменений; пыль улавливается в сухом виде; возможность улавливания абразивных пылей, для чего активные поверхности циклов покрываются специальными материалами; возможность работы при высоких давлениях; стабильную величину гидравлического сопротивления; повышение концентрации пыли не приводит к снижению фракционной эффективности аппарата. К недостаткам можно отнести высокое гидравлическое

сопротивление, достигающее иногда 1250—1500 Па, и низкую эффективность при улавливании частиц размером <5 мкм.



1 – входной патрубок; 2-выхлопная труба. 3 – цилиндрическая камера; 4-коническая камера; 5 – пылесборник или пылеосадительная камера

Рисунок 1.2 – Противоточный циклон

Широкое распространение получили в нашей стране циклоны конструкции НИИО-ГАЗ – цилиндрические и конические. Первые на практике относятся к высокопроизводительным, вторые – к высокоэффективным. Конические циклоны при равных производительностях с цилиндрическими отличаются от последних большими габаритами и поэтому обычно не применяются в групповом исполнении. Для повышения эффективности очистки больших объемов газа в настоящее время используют циклонные элементы малого диаметра, которые объединяют в одном корпусе в виде батареи. Работают они параллельно и имеют общие раздающую и собирающую камеры.

Существуют три способа расчета эффективности циклона.

В первом из них используется модель осадительной камеры с сечением, эквивалентным тангенциальному входу, и длиной, эквивалентной спиральному пути газового потока вдоль стен. В такой осадительной камере на частицу, находящуюся в среднем положении, на входе, действует сила, равная центробежной силе. Приравнявая силу сопротивления и центробежную можно получить приближенное выражение для скорости осаждения в циклоне:

$$V_{oc} = \frac{d^2 \cdot (\rho - \rho_0)g}{18\mu} K_p,$$

где  $K_p$  — фактор разделения, т. е. отношение центробежного ускорения к ускорению силы тяжести:

где  $\omega$  – окружная скорость вращения потока, м/с;  $r$  — радиус вращения,  
м

Степень очистки газа в циклонах зависит от величины фактора

$$K_p = \frac{\omega^2}{g \cdot r}$$

разделения. Из  $K_p$  видно, что степень очистки газа в циклонах может быть повышена либо путем уменьшения радиуса вращения потока запыленного газа, либо путем увеличения скорости газа. Однако повышение скорости газа вызывает значительное возрастание гидравлического сопротивления циклона, и увеличение турбулентности газового потока, ухудшающей очистку газа от пыли. Уменьшение радиуса циклона приводит к снижению его производительности. В связи с этим часто в промышленности вместо циклона большого диаметра применяют несколько циклонных элементов значительно меньшего диаметра, расположенных в одном корпусе.

Другие способы расчета и прогнозирования эффективности улавливания в циклоне основаны на изучении вихревого движения газового потока и равновесия между присущей частицам способностью двигаться по направлению к стенкам и движением газов по направлению к выходу. В этом случае используются эмпирические параметры, позволяющие получить хорошее соответствие между теоретически вычисленными и экспериментальными значениями эффективности. Совершенство циклонного процесса наиболее полно характеризуется фракционной степенью очистки, т. е. отношением массы уловленных частиц пыли данной фракции к массе частиц той же фракции, внесенных газами в циклон за то же время. При использовании критериальных зависимостей оказалось возможным выразить фракционную степень очистки в циклонах (%) путем математической обработки уравнения для вероятностных функций:

$$\eta_{об} = 50[1 + \Phi(x)],$$

где  $\Phi(x)$  – функция логарифмически-вероятностного распределения, определяемая в зависимости от величины  $x$  (таблица 5).

Величину  $x$  вычисляют по формуле:

$$x = \frac{\lg \left( \frac{d'}{d_{50ц} \cdot K \cdot 10^3 \sqrt{\frac{D \cdot \mu}{\rho \cdot V_{ц}}}} \right)}{\sigma_{ц}}$$

где  $d'$  – наибольший диаметр частиц фракции пыли, для которой определяют коэффициент очистки, мкм;  $d_{50ц}$  – диаметр частиц, которые в условном циклоне улавливаются на 50%, мкм (таблица 3);  $\sigma_{ц}$  — характеристика полидисперсности пыли (дисперсия) – безразмерная величина (таблица 3);  $v_{ц}$  — скорость движения газов в плане корпуса циклона, м/с;  $\rho$  – плотность ма-

териала пыли, кг/м<sup>3</sup>;  $\mu$  – динамическая вязкость газа при заданной температуре, Па·с;  $K$  – коэффициент, величина которого зависит от типа циклона (таблица 3);  $D$  — диаметр корпуса циклона, м.

Общая эффективность пылеулавливания

$$\eta_{об} = 50[1 + \Phi(x')],$$

где  $\Phi(x')$  см. в таблице 1.6.

Величину  $x'$  находят по формуле:

$$x' = \frac{\lg \left( \frac{d_{50}}{d_{50ц} \cdot K \cdot 10^3 \sqrt{\frac{D \cdot \mu}{\rho \cdot V_{ц}}}} \right)}{\sqrt{\sigma_{ц}^2 + \lg^2 \left[ \frac{d_{50}}{d_{16}} \right]}}$$

где  $d_{50}$  — медиана распределения — диаметр частиц, при котором суммарная масса всех частиц, имеющих размер меньше  $d_{50}$ , составляет 50% массы всей пыли;  $d_{16}$  — диаметр частиц улавливаемой пыли, при котором суммарная масса всех частиц с размером меньше составляет 16% массы всей пыли.

Иногда применяют несколько последовательно установленных циклонов, причем вначале устанавливают циклон большего диаметра, так как с уменьшением диаметра коэффициент очистки циклонов возрастает. Общий коэффициент очистки в этом случае определяют по формуле:

$$\eta_{об} = [1 - (1 - \eta_1) \cdot (1 - \eta_2) \cdot \dots \cdot (1 - \eta_N)] \cdot 100\%,$$

где  $\eta_1 \dots \eta_n$  — коэффициенты очистки соответственно в первом, втором и  $n$ -циклонах, отн. ед.

Гидравлическое сопротивление циклона (Па) определяют по формуле:

$$P = 0,5 \cdot \xi \cdot \omega_{ц}^2 \cdot \rho_t,$$

где  $\rho_t$  — плотность очищаемых газов при температуре ( $t$ , °C), кг/м<sup>3</sup>;  $\omega_{ц}$  — скорость движения воздуха в плане корпуса, принимает обычно 2, 3, 4 м/с;  $\xi$  — коэффициент гидравлического сопротивления циклона по отношению к сечению входа или к сечению в плане циклона (таблица 4).

Гидравлическое сопротивление циклона может быть подсчитано по формуле

$$P = 0,81 \cdot \frac{\xi \cdot q_c^2}{D^4},$$

где  $q_c$  — секундный расход газа через циклон, м<sup>3</sup>/с.

Порядок решения задачи.

1) Представим дисперсный состав пыли в виде суммарных процентов распределения частиц по массе - например, в виде таблицы с размером частиц, мкм, и дисперсным составом пыли, %.

2) На логарифмически-вероятностную координатную сетку на рисунке 3 накладываем чистый лист кальки и наносим на него точки, характеризующие суммарную массу частиц по вышеприведенным данным. Соединением точек прямой, получим график дисперсного состава пыли. По графику находим дисперсию пыли:

$$\sigma_{\Pi} = d_{50} / d_{16} .$$

3) Определяем условную скорость воздуха в поперечном сечении циклона.

4) Определим фракционный коэффициент очистки для частиц размером менее 5 мкм. Находим величину  $X$  для рассчитываемого циклона.

По таблице 1.5 определим  $\Phi_x$ . и далее - фракционный коэффициент очистки.

5) Аналогичным образом находим фракционные коэффициенты очистки для частиц размером менее 10, 15, 20, 30, 40 мкм.

Результаты расчетов представляем в табличной форме, например, как таблицу 1.2 :

Таблица 1.2 - Фракционные коэффициенты очистки

d	X	$\Phi(x)$	$\square_{\text{ФР}}, \%$
$d_5$			
$d_{10}$			
$d_{15}$			
$d_{20}$			
$d_{30}$			
$d_{40}$			

6) Находим общий коэффициент очистки воздуха от пыли в циклоне ( $X'$ ), и по таблице 1.6 находим  $\Phi_{(X')}$ .

7) Рассчитываем общий коэффициент очистки циклона.

8) Выбираем величину коэффициента сопротивления циклона и определяем гидравлическое сопротивление циклона.

Таблица 1.3 – Варианты заданий к контрольной работе №1 часть 2 (вариант выбирается по последней цифре номера зачетной книжки)

№ Задания	Тип циклона	Пыль	Газопылевая смесь			Массовая доля фракций частиц, %						
						Размер частиц, мкм						
			Расход, $10^{-3} \cdot \text{м}^3/\text{ч}$	Температура, $^{\circ}\text{C}$	Нач. конц., г/м <sup>3</sup>	0-5	5-10	10-15	15-20	20-30	30-40	Более 40
1	ЦН-11	Кокс	3,5	20	8	0	5	5	60	20	10	0
2	ЦН-15	Цемент	4,5	120	6	10	50	30	5	5	0	0
3	ЦН-24	Фосфорит	10	40	12	5	10	15	25	35	10	0
4	ЦН-11	Кварцит	4,0	60	10	0	1	4	40	50	3	2
5	ЦН-15у	Кокс	6,0	25	7	1	4	10	50	30	3	2
6	ЦН-24	Цемент	14	150	8	20	70	5	3	2	0	0
7	СКДЦН-33	Песок	8,0	100	14	0	5	5	10	40	30	10
8	ЦН-11	Цемент	5,0	70	12	15	75	3	2	2	2	1
9	ЦН-24	Кам. уголь	8,5	25	8	2	3	10	45	20	15	5
10	СКДЦН-33	Песок	12	35	9	0	0	5	15	50	25	10

Таблица 1.4 - Расчетные параметры циклонов НИИОГАЗ

Параметр	ЦН-11	ЦН-15	ЦН-15У	ЦН-24	СКД-ЦН-33
К	41,4	41,4	41,4	46,9	34,97
$d_{50ц}$	2,47	3,06	3,48	4,71	1,428
$\sigma_{ц}$	0,3979	0,3979	0,3949	0,3979	0,4281
$\sigma_{ц}^2$	0,158	0,158	0,158	0,158	0,183
$\omega_{расч.}$	3,5	3,5	3,5	4,5	2,5

Таблица 1.5 - Сравнительная характеристика циклонов

Тип циклона	Коэффициент гидравлического сопротивления		Относительные величины				Металлоемкость при расходе воздуха 1000 м <sup>3</sup> /ч
			степень выноса пыли	поверхность циклона, м	Диаметр циклона, м	Высота циклона, м	
	$\xi_{пл}^*$	$\xi_{вх}^{**}$					
ЦН-11	250	6,1	1,0	1,0	1,0	1,0	1,96
ЦН-15	160	7,6	1,05	0,85	0,90	0,93	1,67
ЦН-15У	170	8,2	1,26	0,66	0,92	0,70	1,29
ЦН-24	80	<b>10,9</b>	1,35	0,55	0,75	0,72	1,09,
СКД-ЦН-33	173	11,9	0,78	1,73	1,60	1,25	3,88

\* Коэффициент сопротивления к скорости воздуха в поперечном сечении циклона.

\*\* Коэффициент сопротивления к скорости воздуха на входе в циклон.

Для определения группы дисперсности пыли на приведенную номограмму наносят линию *АВ*, представляющую собой заданную функцию распределения массы этой пыли по размеру частиц. Расположение линии *АВ* на номограмме определяет принадлежность пыли к соответствующей группе дисперсности. Если линия *АВ* пересекает на номограмме границы зон, характеризующих группы дисперсности, то пыли следует относить к более высокой группе.

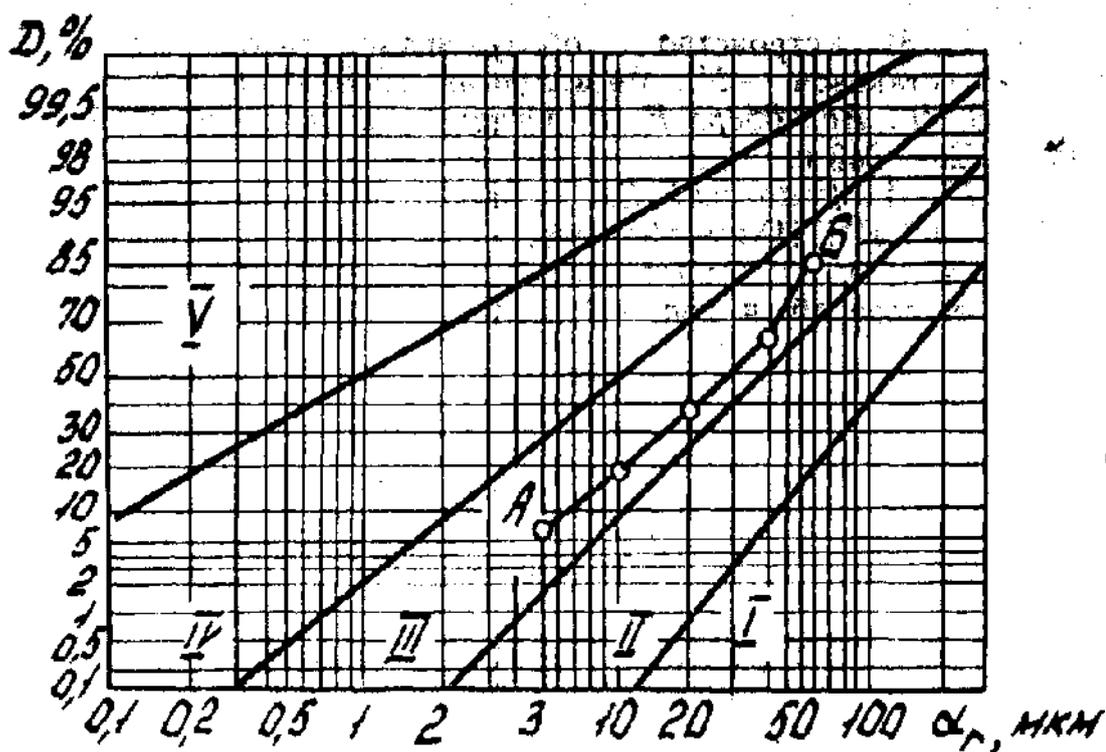


Рисунок 1.3 - Номограмма для определения группы дисперсности пылей.

**Обозначения, принятые на номограмме:**  $dч$  — размер частиц пыли, мкм;  $D$  — суммарная масса всех частиц пыли имеющих размер менее данного  $dч$ , % (от общей массы частиц пыли);

**I÷V - зоны, характеризующие группы дисперсности пыли:**

I — наиболее крупнодисперсная пыль; II — крупнодисперсная пыль (например, песок для строительных растворов); III — среднедисперсная пыль (например, цемент); IV — мелкодисперсная пыль (например, кварц молотый пылевидный КП-3); V — наиболее мелкодисперсная пыль.

Таблица 1.6 - Функция логарифмически вероятного распределения

X	$\Phi(x)$	X	$\Phi(x)$	X	$\Phi(x)$	X	$\Phi(x)$
0,00	0,0000	57	0,4313	14	0,7457	71	0,9127
01	0,0080	58	0,4381	15	0,7499	72	0,9146
02	0,0160	59	0,4448	16	0,7540	73	0,9164
03	0,0239	0,60	0,4515	17	0,7580	74	0,9181
04	0,0319	61	0,4531	18	0,7620	75	0,9199
05	0,0399	62	0,4647	19	0,7660	76	0,9216
06	0,0478	63	0,4713	1,20	0,7699	77	0,9233
07	0,0558	64	0,4778	21	0,7737	78	0,9246
08	0,0638	65	0,4843	22	0,7775	79	0,9263
09	0,0717	66	0,4907	23	0,7813	1,80	0,9281

0,10	0,0797	67	0,4971	24	0,7850	81	0,9297
11	0,0876	68	0,5035	25	0,7887	82	0,9312
12	0,0955	69	0,5098	26	0,7923	83	0,9328
13	0,1034	0,70	0,5161	27	0,7959	84	0,9342
14	0,1113	71	0,5223	28	0,7995	85	0,9357
15	0,1192	72	0,5285	29	0,8029	86	0,9371
16	0,1271	73	0,5346	1,30	0,8064	87	0,9385
17	0,1350	74	0,5407	31	0,8098	88	0,9399
18	0,1428	75	0,5467	32	0,8132	89	0,9412
19	0,1507	76	0,5527	33	0,8163	1,90	0,9426
0.20	0,1585	77	0,5587	34	0,8198	91	0,9439
21	0,1663	78	0,5646	35	0,8230	92	0,9451
22	0,1741	79	0,5705	36	0,8262	93	0,9464
23	0,1819	0,80	0,5763	37	0,8293	94	0,9476
24	0,1897	81	0,5821	38	0,8324	95	0,9488
25	0,1974	82	0,5878	39	0,8355	96	0,9500
26	0,2051	83	0,5935	1,40	0,8385	97	0,9512
27	0,2112	84	0,5991	41	0,8415	98	0,9523
28	0,2205	85	0,6047	42	0,8444	99	0,9534
29	0,2282	86	0,6102	43	0,8475	2,00	0,9545
0,30	0,2358	87	0,6157	44	0,8501	05	0,9596
31	0,2434	88	0,6211	45	0,8529	10	0,9643
32	0,2510	89	0,6265	46	0,8557	15	0,9684
33	0,2586	0,90	0,6319	47	0,8584	20	0,9722
0,34	0,266.1	0,91	0,6372	1,48	0,8611	2,25	0,9756
35	0,2737	92	0,6424	49	0,8638	30	0,9786
36	0,2812	93	0,6475	1,50	0,8664	35	0,9813
37	0,2886	94	0,6528	51	0,8690	40	0,9836
38	0,2961	95	0,6579	52	0,8715	45	0,9857
39	0,3035	96	0,6629	53	0,8740	2,50	0,9876
40	0,3108	97	0,6680	54	0,8764	55	0,9892
41	0,3182	98	0,6729	55	0,8789	60	0,9907
42	0,3255	99	0,6778	56	0,8812	65	0,9920
43	0,3328	1,00	0,6827	57	0,8836	70	0,9931
44	0,3401	01	0,6875	58	0,8859		
45	0,3473	02	0,6923	59	0,8882		
46	0,3545	03	0,6070	1,60	0,8904		
47	0,3616	04	0,7017	61	0,8926		
48	0,3688	05	0,7063	62	0,8948		
49	0,3759	06	0,7109	63	0,8969		
0.50	0,3829	07	0,7154	64	0,8990		
51	0,3899	08	0,7199	65	6,9011		
52	0,3969	09	0,7243	66	0,9031		
53	0,4039	10	0,7287	67	0,9051		
54	0,4108	11	0,7330	68	0,9070		
55	0,4177	12	0,7373	69	0,9090		
56	0,4245	13	0,7415	1,70	0,9109		

## 2.2 Контрольная работа №2

### 2.2.1 Расчет тонкослойного отстойника

После удаления тяжелых минеральных загрязнений необходимо удалить из воды более тонкодисперсные, относительно длительное время находящиеся во взвешенном состоянии примеси. Для этих целей чаще всего используют отстойники. В зависимости от направления движения потока воды отстойники подразделяют на горизонтальные, вертикальные и радиальные. Следует иметь в виду, что при прохождении потока воды через эти аппараты может наблюдаться низкочастотная пульсация, которая за счет турбулизации потока ухудшает условия осаждения. Кроме того, требуется значительное время нахождения воды в аппаратах, так как частицам в процессе осаждения необходимо преодолеть значительные расстояния (исчисляемое метрами) до достижения поверхности осаждения. Этим недостатком практически нет у горизонтальных и крутонаклонных трубчатых и пластинчатых (полочных) отстойников, где отстаивание происходит в тонком слое жидкости. К отстойникам относят также и осветлители, в которых одновременно с отстаиванием сточная вода фильтруется через взвешенный слой ранее выпавшего осадка.

Выбор типа и конструкции отстойников зависит от количества и состава производственных сточных вод, поступающих на очистку, характеристик образующегося осадка (уплотняемость, транспортируемость), требований к качеству очищенной воды. Эффект очистки в традиционных отстойниках составляет в среднем 40-60%, в трубчатых и пластинчатых отстойниках - 70-90%. В осветлителях со взвешенным слоем осадка - 70%. Эффективность сильно зависит от продолжительности отстаивания. В каждом конкретном случае выбор типа отстойников должен определяться в результате технико-экономического сравнения нескольких вариантов. Число отстойников следует принимать не менее двух, но и не более четырех, идя по пути увеличения габаритов отстойников, так как стоимость единицы объема крупногабаритных отстойников меньше, чем малогабаритных. Для повышения эффективности осаждения в сточную воду вводят коагулянты и флокулянты, способствующие агрегации взвешенных мелких частиц и как следствие увеличению скорости их осаждения. Гидравлическую крупность частиц можно определять по формуле Стокса. Так как взвешенные частицы в сточной воде в процессе осаждения в большинстве случаев изменяют форму, плотность, размеры и представляют собой агрегативно-неустойчивую полидисперсную систему, действительную скорость осаждения частиц в сточных водах лучше определять экспериментально. В этом случае гидравлическая крупность, определяется по кривым кинетики отстаивания  $\Xi = f(t)$ , которые получают в лаборатории в статических условиях при высоте слоя отстаивания  $h1 \geq 200$  мм или  $h2$  ( $\Delta h = h2 - h1 \geq 200$  мм). Для приведения полученной величины к слою, равному высоте слоя потока воды в отстойнике, производится перерасчет по формуле

$$w_0 = \frac{1000HK}{t_1(HK/h_1)^n},$$

где  $H$  — глубина проточной части в отстойнике, м;  $K$  — коэффициент использования объема в отстойнике, равный в первом приближении коэффициенту использования объема отстойника выбранной конструкции;  $t_1$  — продолжительность отстаивания в лабораторном цилиндре при высоте слоя  $h_1$ , в течение которого достигается требуемый эффект осветления;  $n$  — коэффициент пропорциональности, зависящий от агломерируемости взвешенных веществ в процессе осаждения, определяемый при  $h_1 > h_2$  по формуле

$$n = \frac{\lg t_1 - \lg t_2}{\lg h_1 - \lg h_2}.$$

Здесь  $h_1, h_2$  — высота слоев отстаивания в лабораторных условиях, мм;  $t_1, t_2$  — продолжительность отстаивания в соответствующих слоях, при которой достигается требуемый эффект отстаивания, с.

В случае, когда температура сточной воды в производственных условиях отличается от температуры сточной воды, при которой определялась кинетика отстаивания, необходимо вводить поправку, учитывающую изменение вязкости от температуры:

$$w_0 = \frac{\mu_n}{\mu_l} w_l,$$

где  $\mu_l, \mu_n$  — вязкость воды при соответствующих температурах в лабораторных и производственных условиях;  $w_0$  — гидравлическая крупность частиц.

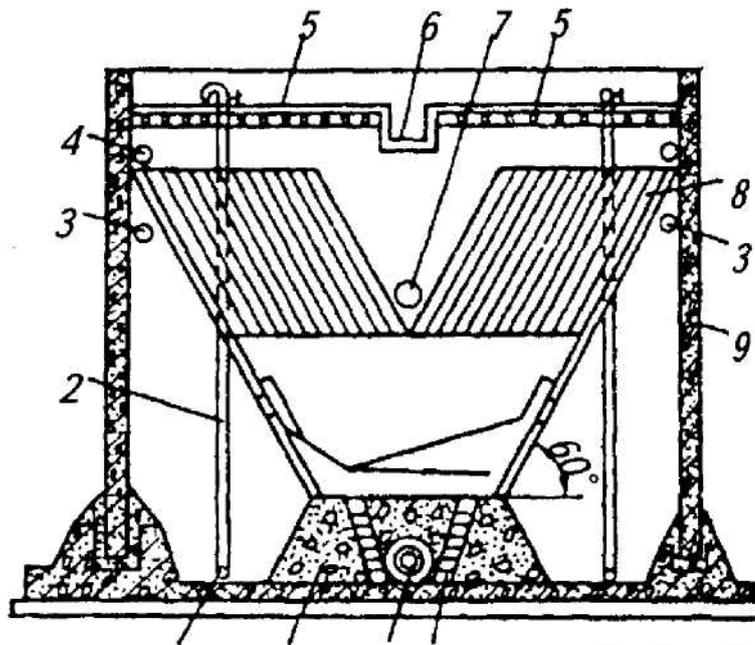
Объем отстойной (проточной) части любого отстойника  $V_{io} = QT$ , а поверхность осаждения  $F_0 = \frac{Q}{w_0}$ .

Длину отстойника вычисляют по зависимости:

$$L = \frac{uH}{kw_0}$$

где  $u$  — скорость движения воды в проточной части отстойника, принимают равной 5 ... 10 мм/с,  $k$  — коэффициент объемного использования, равный 0,5.

**Тонкослойные отстойники.** Для увеличения эффективности отстаивания используют тонкослойные отстойники (рисунок 1.4). Они могут быть вертикальными, радиальными или горизонтальными; состоят из водораспределительной, водосборной и отстойной зон. В таких отстойниках отстойная зона делится трубчатыми или пластинчатыми элементами на ряд слоев небольшой глубины (до 150 мм). При малой глубине отстаивание протекает быстро, что позволяет уменьшить размеры отстойников.



- 1 — труба для удаления осадка; 2 — труба для выпуска воздуха;  
 3,7 — отвод осветленной воды из осадкоуплотнителя; 4 — трубопровод подогрева;  
 5 — отверстия в поперечных сборных желобах; 6 — сварной лоток;  
 8 — многослойная загрузка; 9 — корпус; 10 — кирпичная кладка;  
 11 — подвод воды в секцию; 12 — гравийная камера хлопьеобразования

Рисунок 1.4 - Тонкослойный отстойник

Поперечное сечение трубчатых секций может быть прямоугольным, квадратным, шестиугольным или круглым. Полочные секции монтируются из плоских или гофрированных листов и имеют прямоугольное сечение. Элементы отстойника выполняют из стали, алюминия и пластмассы (полипропилена, полиэтилена, стеклопластиков).

Горизонтальные отстойники являются аппаратами периодического действия. Наклон блоков в этих отстойниках небольшой  $5-7^{\circ}$ . Накопившийся осадок удаляется промывкой обратным током осветленной воды. Наклон элементов в отстойниках непрерывного действия (крутонаклонных) составляет  $45...60^{\circ}$ . Эффективность трубчатых и полочных отстойников практически одинакова.

При расчете тонкослойных отстойников обычно определяют их геометрические размеры — длину, ширину и высоту канала, время отстаивания и некоторые другие параметры — при заданных расходе сточной воды  $Q$  ( $\text{м}^3/\text{с}$ ), концентрации взвешенных частиц в воде до и после очистки и физико-химических параметрах примесей.

Расчет тонкослойных отстойников производится в следующем порядке:

1) Задаемся расстоянием между пластинами в полочных секциях или диаметром труб в трубчатых секциях  $H_0$ . Обычно его значение лежит в пределах от 50 до 150 мм;

2) Находим гидравлическую крупность частиц (диаметром до 120 мкм) по формуле Стокса с учетом поправок на изменение плотности  $\rho_m$  и дисперсности  $d$  частиц:

$$w_o = \frac{d_1^2(\rho'_m - \rho_{c,e})gk_0}{18\mu} ; \quad \rho'_m = \frac{\rho_c d^3 + \rho_{c,e}(d_1^3 - d^3)}{d_1^3}$$

где  $\rho'_m$  — плотность агрегата (частицы с присоединенным слоем воды);  $\rho_c$  - плотность частицы (принимается для расчета  $\rho = 2400 \text{ кг/м}^3$ ),  $d_1 = d + 2 \cdot 0,15$  — диаметр агрегата, мкм;  $k_0$  - коэффициент стесненности, для наших условий принимаем равным 0,8

3) Определяем среднюю скорость движения сточной воды в секциях  $u$  (в мм/с), которая должна быть в 1,5-2,5 раза меньше максимально допустимой ( $u_{max}$ )

$$u_{max} = \frac{Re_{kp} v_{ce}}{4R} ,$$

где  $Re_{kp}$  — Число Рейнольдса, для каналов прямоугольного сечения принимается равным 2800.

$v_{ce}$  - коэффициент кинематической вязкости сточной воды, м<sup>2</sup>/с.  $R$  — гидравлический радиус, его величина принимается равной 17 см.

Полученный результат для средней скорости должен укладываться в соотношение

$$10w_o \leq u \leq 500/R ,$$

Среднюю скорость потока можно принимать и в зависимости от концентрации взвеси. При концентрации взвеси  $\leq 50$ , 50...500, 500...5000 и  $> 5000$  мг/л средняя скорость потока соответственно равна 0,015; 0,017; 0,02 и 0,025 м/с.

4) Определяем угол продольного наклона секций  $\alpha$ , который равен:

$$\alpha = \arcsin\left(\frac{w_o}{u}\right).$$

5) Вычисляем рабочую длину отстойной секции (в мм) по формуле:

$$L_p = 1,1H_0 \sqrt{\frac{u^2}{w_o^2} - 1} .$$

6) Устанавливаем длину зоны осаждения (в мм):

$$L_{in} = 1,3 \cdot 10^{-3} \frac{(C_1 - C_2)u}{(100 - P)\rho} ,$$

где  $C_1, C_2$  — концентрации взвешенных частиц до и после осаждения, мг/л;  $P$  — влажность осадка перед выпуском из отстойника, %.

7) Определяем число отстойных секций, которое равно:

$$N = 10^9 \frac{Q}{F_n u} ,$$

где  $F_n$  — площадь поперечного сечения тонкослойного пространства, м<sup>2</sup>; для определения которой также необходимо задаться шириной отстойной секции, которая должна быть больше высоты канала.

8) Рассчитываем продолжительность отстаивания ( $\tau_0$ , с):

$$\tau_0 = \frac{H}{w_0 \cos \alpha} .$$

9) Устанавливаем объем зоны осаждения:

$$V_{oc} = \frac{\tau_0 Q C}{C_{oc}} ,$$

где  $C_{oc}$  — концентрация осадка.

Исходные данные для расчета аппарата приводятся в таблице 1.7

Таблица 1.7 – Варианты заданий к контрольной работе №2 часть 1 (вариант выбирается по последней цифре номера зачетной книжки)

№ варианта	Расход воды, м <sup>3</sup> /ч	Концентрация, г/м <sup>3</sup>		Средний диаметр частиц, мм
		Исходная	Конечная	
1	50	200	40	0,08
2	75	150	35	0,06
3	100	220	35	0,07
4	150	95	15	0,05
5	200	250	40	0,06
6	250	300	35	0,04
7	300	180	20	0,07
8	350	150	30	0,03
9	400	210	25	0,08
10	500	190	25	0,09

### 2.2.2 Расчет пылеосадительной камеры

Если запыленный газ, движущийся с определенной скоростью по газопроводу, ввести в камеру, имеющую площадь поперечного сечения, значительно большую, чем площадь газопровода, то в этой камере скорость газа резко уменьшается. В этих условиях содержащаяся в газе пыль начинает выпадать из него под действием сил тяжести. Такие камеры называют пылеосадительными (рисунок 5). Пылеосадительные камеры действуют по принципу осаждения частиц при медленном движении пылегазового потока через рабочую камеру, поэтому основными параметрами, которые учитывают при расчете, являются ее высота и длина. Камеры используют при ламинарном движении воздуха в поперечном сечении камеры. Приближенный расчет пылеосадительных камер сводится к определению площади осаждения, т. е. площади дна камеры или полок (полочные фильтры) по заданному размеру частиц пыли, подлежащих удалению из газового потока. При расчете принимают ряд допущений: пыль равномерно распределена по сечению камеры как по концентрации, так и по дисперсности; она состоит из шаровых частиц; скорость газа по сечению камеры принимается равномерной; результат действия конвекционных токов и турбулентности газового потока на частицы пыли равен нулю; осевшая пыль не уносится из камеры.

- а) - простейшая камера; 1 - корпус; 2 - бункер;  
 б) - камера с перегородками: 1 - корпус; 2 - бункер; 3 - перегородка;  
 в) - многополочная камера: 1 - корпус; 2 – полка.

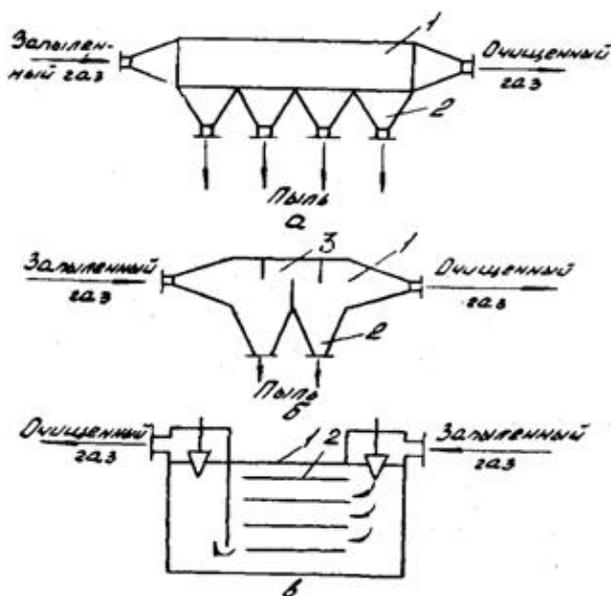


Рисунок 1.5 - Пылеосадительные камеры

Производительность пылеосадительной камеры:

$$Q = V_{oc} \cdot F,$$

где  $Q$  — производительность пылеосадительной камеры, м<sup>3</sup>/ч; м<sup>3</sup>/с;  $V_{oc}$  — скорость осаждения частиц, м/с;  $F$  — площадь камеры в плане, м<sup>2</sup>.

Скорость осаждения частиц обусловлена уравниванием сил сопротивления и тяжести:

$$V_{oc} = \frac{d^2(\rho - \rho_0) \cdot g}{18 \cdot \mu},$$

где  $d$  — диаметр частиц, мкм;  $\rho$ ,  $\rho_0$  — плотность частицы и воздушной среды, кг/м<sup>3</sup>;  $\mu$  — динамическая вязкость среды, Па·с;  $g$  — ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>.

Для обеспечения ламинарного движения воздуха и с целью уменьшения высоты осаждения частиц простые пылеосадительные камеры могут быть оснащены горизонтальными полками (полочные фильтры). Применение таких фильтров приводит к сокращению габаритных размеров аппарата. Они трудны для очистки, поэтому эти камеры не нашли широкого использования в промышленности.

#### Выполнение расчета.

Исходные данные: расход газа,  $V$  м<sup>3</sup>/ч; концентрация пыли на входе и выходе из пылеосадительной камеры  $c_{вх}$  и  $c_{вых}$  кг/м<sup>3</sup>; скорость газового потока в камере,  $v$ , м/с; температура выбросов,  $t$ , °С; плотность пыли,  $\rho$ , кг/м<sup>3</sup>; длина и ширина пылеосадительной камеры,  $L$  и  $B$ , м. – см.таблицу 1.8

При расчете пылеосадительной камеры рассчитаем: площадь осаждения пылеосадительной камеры, размер частиц, способных осесть и коэффициент очистки.

1) Высота пылеосадительной камеры рассчитывается по формуле:

$$h = \frac{V}{3600 \cdot v_{II} \cdot b}.$$

2) Площадь осаждения камеры:

$$S = Lb.$$

3) Скорость осаждения пыли определяем по формуле:

$$v_{oc} = \frac{V}{3600 \cdot S},$$

учитывая, что плотность пыли значительно выше плотности воздушного потока, то плотностью воздушного потока пренебрегаем.

4) Размер частиц, которые могут осесть в данной камере ( $d$ , мкм):

$$d = \sqrt{\frac{18 \cdot \mu \cdot v_{oc}}{\rho \cdot g}}.$$

5) Масса пыли поступившей в аппарат и неуловленной (прошедшей аппарат) составляет:

$$G_{BX} = C_{BX} \cdot V;$$

$$G_{BLYX} = C_{BLYX} \cdot V.$$

6) Коэффициент очистки составит:

$$\eta = \frac{C_{BX} - C_{BLYX}}{C_{BX}} \cdot 100\%.$$

Исходные данные для расчета пылеосадительной камеры приводятся в таблице 1.8.

Таблица 1.8 – Варианты заданий к контрольной работе №2 часть 2 (вариант выбирается по последней цифре номера зачетной книжки)

№	Расход газа, $10^{-3} \cdot \text{м}^3/\text{ч}$	Размеры камеры, м		Концентрация пыли, $\text{г}/\text{м}^3$		Температура потока, $^{\circ}\text{C}$	Плотность частиц пыли, $\text{кг}/\text{м}^3$
		Длина	Ширина	Исходная	Конечная		
1	35	3	1	24	4	30	2400
2	75	4	3	15	5	25	2500
3	15	4	1	25	3	40	2100
4	50	5	2	12	8	15	2000
5	20	6	3	25	5	50	2700
6	60	6	4	30	4	25	2300
7	30	3	2	18	5	30	2600
8	70	6	4	15	4	15	2100
9	40	5	3	22	3	45	2000
10	55	6	4	19	3	45	2500

## 2.3 Контрольная работа №3

### 2.3.1 Расчет гидроциклона

Интенсификацию процессов выделения взвешенных частиц из воды возможно осуществить путем их осаждения в поле центробежных сил. Скорость разделения неоднородных систем в поле центробежных сил выше по сравнению со скоростью разделения этих систем в поле силы тяжести. Отношение центробежной силы к силе тяжести можно сделать сравнением ускорений, действующих на частицы примесей в центробежном и гравитационном полях, т.к. применительно к частице определенной массы силы пропорциональны ускорениям. Отношение центробежного ускорения  $a_2$  к ускорению силы тяжести  $g$  называют *фактором разделения*:

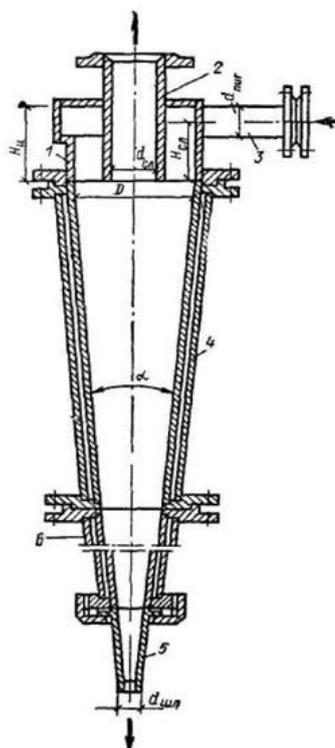
При этом скорость осаждения в десятки и сотни раз может превосходить осаждение аналогичных частиц в гравитационном поле. В настоящее время используются как низконапорные (открытые) гидроциклоны, так и напорные аппараты. Вращательное движение жидкости в гидроциклоне, приводящее к сепарации частиц, обеспечивается тангенциальным подводом воды к цилиндрическому корпусу. Вращение потока способствует агломерации частиц и увеличению их гидравлической крупности, что дополнительно повышает эффективность осаждения в центробежном поле.

**Открытые гидроциклоны** чаще всего применяют для выделения из сточных вод тяжелых примесей с гидравлической крупностью более 0,2 мм/с и скоагулированных взвешенных веществ. Часто их используют в качестве первой ступени в комплексе с другими аппаратами для механической очистки сточных вод. Значительным преимуществом открытых гидроциклонов является большая удельная производительность от 2 до 20 м<sup>3</sup>/(м<sup>2</sup>.ч) при небольших потерях напора (не более 0,5 м). Число впускных патрубков в гидроциклоне для более равномерного распределения потока должно быть не менее двух. Скорость впуска воды равна 0,1 ÷ 0,5 м/с. Для интенсификации процесса очистки используют *многоярусные гидроциклоны*. В них рабочий объем разделен на отдельные ярусы свободно вставляемыми коническими диафрагмами. Вследствие этого высота слоя отстаивания уменьшается. Вращательное движение позволяет полнее использовать объем яруса и способствует агломерации взвешенных частиц. Каждый ярус гидроциклона работает самостоятельно.

**Напорные гидроциклоны** применяются для выделения из производственных сточных вод грубодисперсных примесей, плотность которых отличается от плотности жидкой среды сточных вод. Сточная вода под давлением поступает по тангенциально расположенному вводу в верхнюю часть цилиндра и приобретает вращательное движение. Возникающие центробежные силы перемещают частицы примесей к стенкам аппарата по спиральной траектории вниз к выходному патрубку. Очищенная вода удаляется через верхний патрубок. Фактор разделения напорных гидроциклопов достигает 2000, что обуславливает их высокую эффективность. Гидроциклоны могут иметь диаметры от 15 до 1000 мм.

Напорные гидроциклоны могут быть единичными и батарейными (мультигидроциклоны) и используются при осветлении сточных вод для сгущения осадка, и твердой фазы сточных вод в процессе их утилизации. Скорость осаждения пропорциональна квадрату скорости вращения частиц, которую можно считать равной скорости воды на входе в аппарат.

Гидроциклоны малого диаметра объединяют в общий агрегат, в котором они работают параллельно. Мультигидроциклоны наиболее эффективны при очистке небольших количеств воды от тонкодисперсированных примесей. Конструктивные размеры напорных гидроциклонов подбирают в зависимости от количества сточных вод, концентрации и свойств примесей.



1 - цилиндрическая часть; 2 - сливной патрубок; 3 - питающий патрубок;  
4 - корпус; 5- шламовый патрубок; 6 - съёмная вставка

Рисунок 1.6 - Конструкция напорного гидроциклона со съёмными элементами рабочей камеры

Суммарная, производительность напорных гидроциклонов определяется в зависимости от конструктивных размеров аппаратов, давления питания и гидродинамических условий выхода жидкости и шлама. В большинстве случаев напорные гидроциклоны работают без противодействия со стороны сливного и шламового патрубков, т.е. давление на выходе из сливного и шламового патрубков соответствует атмосферному. При выборе конструкций напорных гидроциклонов необходимо учитывать следующие основные данные: 1) требуемую эффективность разделения сточных вод; 2) абразивные свойства твердой фазы; 3) химическую агрессивность жидкой фазы; 4) предельное давление перед аппаратом и требуемое давлением в сливном трубопроводе; 5) гранулометрический состав и плотность частиц твердой фазы; 6)

механическую прочность частиц твердой фазы суспензии; 7) производительность установки.

Выбор типа гидроциклона в каждом конкретном случае следует определять технико-экономическим сравнением вариантов.

Расчет установки производится в следующем порядке:

1) Определяем производительность гидроциклона назначенных размеров  $Q_{num}$ , л/с,

$$Q_{num} = 0,017 D^{0,525} d_{num}^{1,279} d_{сл}^{0,4046} d_{шл}^{0,1434} \alpha^{0,0258} H^{0,0149} P_{num}^{0,443},$$

где:  $D$  – диаметр цилиндрической части циклона, см,  $d_{num}$  – диаметр питающего штуцера, см,  $d_{сл}$  – диаметр сливного штуцера, см,  $d_{шл}$  – диаметр шламового штуцера, см,  $H$  – высота цилиндрической части, см;  $\alpha$  – угол конусности, °,  $P_{num}$  – давление воды на входе в гидроциклон, МПа.

2) Устанавливаем требуемое число напорных гидроциклонов  $N$  с учетом обеспечения расчетной производительности установки и надежности ее работы:

$$N = Q / Q_{num}$$

где  $Q$  – расчетная производительность установки м<sup>3</sup>/с

3) Определяем расход шлама  $Q_{шл}$ , л/с, по формуле

$$Q_{шл} = \frac{D^{0,45} d_{num}^{0,24} d_{шл}^{2,86} H^{0,09}}{d_{сл}^{2,318} \alpha^{0,46} P_{num}^{0,32}}.$$

4) Находим гидравлическую крупность частиц по упрощенной формуле:

$$w_o = 15,33 \frac{k_m D^3}{\alpha Q_{num}},$$

где  $Q_{num}$  – производительность гидроциклона, м<sup>3</sup>/с;  $k_m$  – коэффициент, учитывающий влияние концентрации примесей и турбулентность потока; для агрегативно-устойчивых суспензий с небольшой концентрацией  $k_m = 0,04$ ;  $\alpha$  – коэффициент, учитывающий затухание тангенциальной скорости, равен 0,45.

5) Рассчитываем диаметр выделяемых частиц  $d_c$ , мкм, который определяется по формуле

$$d_c \geq 4,1 \cdot 10^5 \alpha^{0,35} \frac{D^{0,2}}{P^{0,25}} \sqrt{\frac{\mu}{(\rho_c - \rho)(1 - \varphi)^{4,65}}},$$

где  $\rho_c$  – плотность частиц, кг/м<sup>3</sup>,  $\varphi$  – объемная доля частиц в суспензии. Динамическая вязкость воды при 20°C  $\mu = 1 \cdot 10^{-3}$  Па·с и плотность ее  $\rho = 1000$  кг/м<sup>3</sup>. Исходные данные для расчета аппарата приводятся в таблице 1.9

Для всех вариантов диаметры питающего штуцера ( $d_{пит}$ ), сливного штуцера ( $d_{сл}$ ) и шламового штуцера ( $d_{шл}$ ) принимать, соответственно, равными 3 см, 5 см и 1,5 см.

Таблица 9 – Варианты заданий к контрольной работе №3 часть 1 (вариант выбирается по последней цифре номера зачетной книжки)

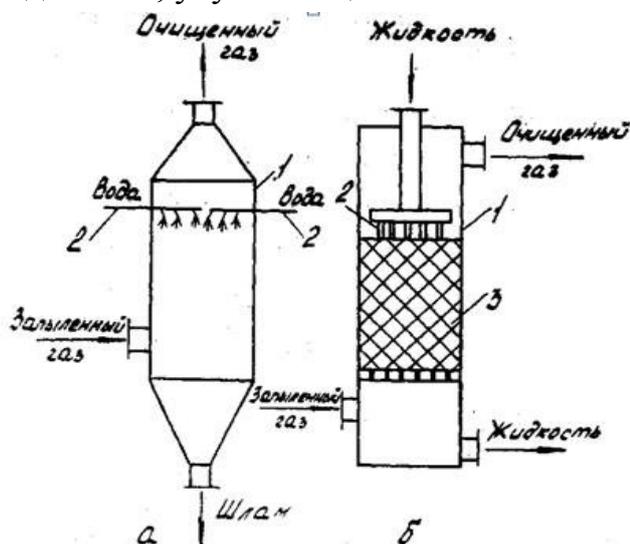
Вариант	$Q_{шт}$ , м <sup>3</sup> /ч	$D$ , см	$H_{ц}$ , см	$\alpha$ , °	$P_{шт}$ , МПа	$\rho_{ч}$ , кг/м <sup>3</sup>	$\varphi$
1	32	8	10	12	0,20	2100	0,11
2	30	10	10	15	0,25	2000	0,10
3	59	12	11	15	0,30	2200	0,12
4	64	14	14	18	0,35	1900	0,09
5	70	16	15	20	0,30	2300	0,14
6	78	18	20	25	0,25	2100	0,11
7	92	20	18	20	0,24	1850	0,10
8	72	14	16	15	0,35	2000	0,15
9	88	16	16	18	0,30	2200	0,13
10	65	12	14	20	0,40	2150	0,12

### 2.3.2 Расчет мокрого скруббера

Мокрые механические скрубберы были разработаны на основе сухих с целью повышения эффективности очистки газовых выбросов от тонкодисперсной пыли, а также улучшения функциональной надежности при удалении увлажненной и налипающей пыли. Первоначально, воду просто впрыскивали в обычные сухие сепараторы или пылесборники, из которых и были впоследствии созданы скрубберы, а также в циклоны или мультициклоны; что привело затем к разработке мокрых вихревых скрубберов.

В этих аппаратах используют эффекты коагуляции. Если в чистый газовый поток, содержащий мелкие частицы (например, тонкодисперсную пыль), ввести крупные частицы (например, капли воды), то на них будут собираться мелкие частицы, что происходит вследствие столкновения или диффузии и зависит от плотности распределения этих двух видов частиц, а также от других свойств среды.

С помощью этого метода удаляют хорошо смачиваемую пыль или применяют жидкости и добавки, улучшающие ее смачиваемость.



1 – корпус; 2 - форсунки; 3 – насадка

Рисунок 1.7 – Мокрые скрубберы: а) полый; б) противоточный насадочный.

В зависимости от поверхности контакта или способа действия мокрые пылеуловители разделяют на группы:

- полые газопромыватели (оросительные устройства, полые форсуночные скрубберы);
- насадочные скрубберы;
- тарельчатые газопромыватели (барботажные и пенные аппараты);
- скоростные газопромыватели (скрубберы Вентури).

Принцип действия пылеуловителей такого типа основан на взаимодействии улавливаемых частиц с каплями орошающей жидкости. В полых газопромывателях газопылевой поток пропускают через завесу распыляемой жидкости. При этом частицы пыли захватываются каплями промываемой жидкости и осаждаются в промывателе, а очищенные газы удаляются из аппарата. Наиболее распространенным аппаратом этого класса является полый форсуночный скруббер (рисунок 7).

Он широко используется как для очистки газов от крупных частиц пыли, так и для охлаждения газов, выполняя в различных системах пылеулавливания роль аппарата, обеспечивающего подготовку (кондиционирования) газов. Степень очистки в полном форсуночном скруббере достигает 95—99% при улавливании частиц размером  $>10$  мкм и резко снижается при размере  $<5$  мкм. Скорость газа принимается до 1 м/с.

Насадочные газопромыватели представляют собой колонны, заполненные телами различной формы. Эти аппараты применяются только при улавливании хорошо смачиваемой пыли, особенно в тех случаях, когда процессы улавливания пыли сопровождаются охлаждением газов или абсорбцией.

Основными параметрами насадки являются удельная поверхность, свободный объем и эквивалентный диаметр. Расход орошаемой жидкости в противоточных насадочных скрубберах составляет 1,3—2,6 л/м<sup>3</sup>.

Механизм улавливания частиц пыли в скруббере состоит в следующем. Мелкие частицы пыли, витающие в потоке газа, с трудом встречаются с капельками жидкости и увлажняются. При повышении скорости газа до 3 м/с обеспечивается лучшее перемешивание газа с разбрызгиваемой водой, уменьшается плотность газовой оболочки вокруг частиц пыли, что способствует укрупнению частиц пыли, которые осаждаются в основном под действием гравитационных сил.

В насадочных скрубберах газ движется по смоченным каналам, образуемым элементами насадки. При проходе через насадку газ многократно изменяет направление движения. В результате этого содержащаяся в газе пыль или капельные компоненты по инерции попадают на смоченную поверхность насадки и улавливаются пленкой стекающей жидкости. Поэтому в скрубберах с насадкой пыль улавливается более эффективно, чем в полых. Часто в скрубберах устанавливают форсунки грубого распыла (центробежные), которые работают под давлением 0,3—0,4 мПа и создают  $d_k=0,6-1,0$  мм. Полые форсуночные скрубберы обеспечивают высокую степень очистки при улав-

ливания частиц  $d > 10$  мкм и малоэффективны при улавливании частиц  $d < 5$  мкм.

Расчет полого орошаемого скруббера проводится в следующей последовательности.

1) Определяют площадь сечения скруббера:

$$S = \frac{V}{v_{II}},$$

где  $S$  — площадь сечения скруббера,  $m^2$ ;  $V$  — расход очищаемого газа,  $m^3/c$ ;  $v_{II}$  — скорость газов на выходе из аппарата, принимается около 1 м/с.

2) Высоту противоточного скруббера выбирают из условия  $H \sim 2,5 \cdot D$ .

Определяют удельный расход жидкости, который для газов находится в пределах 0,5—8 л/ $m^3$  газа. При больших концентрациях пыли на входе ( $C_{ВХ} = 10-12$  г/ $m^3$ ) удельный расход жидкости выбирают в пределах 6—8 л/ $m^3$ . Тогда общий расход жидкости, подаваемой на орошение аппарата

$$V_{ж} = mV,$$

где  $V_{ж}$  — общий расход жидкости, л/с;  $m$  — удельный расход жидкости, л/ $m^3$ .

Гидравлическое сопротивление полого скруббера (без каплеуловителя и газораспределительной тарелки) принимают обычно не более 250 Па,

3) При расчете для конкретных случаев применения полых скрубберов предложены уравнения, связывающие значения коэффициента очистки со значениями отдельных факторов, влияющих на работу. Так для противоточного скруббера эффективность пылеулавливания  $\eta$  составляет:

$$\eta = 1 - \exp \left[ - \frac{3 \cdot V_{ж} \cdot \eta_3 \cdot (v_{Г} + v_{К}) H}{2,0 \cdot v_{Г} \cdot d_{К} \cdot v_{К}} \right],$$

где  $\eta_3$  — эффективность захвата каплями частиц определенного диаметра;  $v_{К}$  — скорость осаждения капли, м/с;  $d_{К}$  — диаметр капли, м;  $H$  — высота скруббера, м.

4) Определим  $v_{К}$  из уравнения

$$v_{К} = v_{О.Г.} - v_{Г},$$

где  $v_{О.Г.}$  — скорость движения капли относительно газов, м/с;

$$v_{О.Г.} = \sqrt{\frac{4g \cdot d_{К} \cdot \rho_{К}}{3\xi_{К} \cdot \rho_{Г}}}.$$

При  $Re > 500$  значение  $\xi_{К}$  составит 0,44.

При  $m < 2$  л/ $m^3$  используют уравнение:

$$\eta_3 = \frac{Stk^2}{(Stk + 0,35)^2}.$$

При  $m = 2$  л/ $m^3$  и более, коэффициент  $\eta_3$  определяют по формуле:

$$\eta_3 = 1 - 0,15 \cdot Stk^{-1,24}.$$

Это выражение справедливо при  $1 < Stk < 170$  (см. таблицу 10).

Таблица 1.10 - Эффективность осаждения аэрозолей распыленной водой в зависимости от критерия Стокса

Размер частиц, $d_{\text{ч}}$ , мкм	Размер капель $d_{\text{к}}$ , см						
	$2 \cdot 10^{-3}$	$4 \cdot 10^{-3}$	$10^{-2}$	$2 \cdot 10^{-2}$	$4 \cdot 10^{-2}$	$2 \cdot 10^{-1}$	$2 \cdot 10^{-1}$
1,0	$4,2 \cdot 10^{-3}$	$8,4 \cdot 10^{-3}$	$16 \cdot 10^{-3}$	$24 \cdot 10^{-3}$	$28 \cdot 10^{-3}$	$28 \cdot 10^{-3}$	$23 \cdot 10^{-3}$
1,4	$0,8 \cdot 10^{-2}$	$1,6 \cdot 10^{-2}$	$3,1 \cdot 10^{-2}$	$4,7 \cdot 10^{-2}$	$5,4 \cdot 10^{-2}$	$5,4 \cdot 10^{-2}$	$4,4 \cdot 10^{-2}$
2,0	$1,5 \cdot 10^{-2}$	$3,1 \cdot 10^{-2}$	$6 \cdot 10^{-2}$	$9,1 \cdot 10^{-2}$	$10,4 \cdot 10^{-2}$	$10,4 \cdot 10^{-2}$	$10,5 \cdot 10^{-2}$
4,0	0,06	0,12	0,23	0,25	0,40	0,40	0,33
10,0	0,35	0,70	1,4	2,1	2,4	2,4	2,0

Таблица 1.11 – Варианты заданий к контрольной работе №3 часть 2 (вариант выбирается по последней цифре номера зачетной книжки)

№ задания	Расход газа, $10^{-3} \cdot V$ , $\text{м}^3/\text{ч}$ ,	Частицы пыли		Скорость газа, $v_{\text{г}}$ , м/с	Диаметр капель, $d_{\text{к}}$ , мкм	Плотность газа, $\rho_{\text{г}}$ , $\text{кг}/\text{м}^3$
		Размер, $d_{\text{ч}}$ , мкм,	Концентрация, $C$ , $\text{г}/\text{м}^3$			
1	50	10	8	0,95	750	1,32
2	25	14	7	0,80	800	1,36
3	75	6	10	1,10	700	1,22
4	60	8	12	0,95	650	1,30
5	50	12	4	0,80	800	1,36
6	40	5	7	1,00	500	1,22
7	55	7	9	1,00	780	1,20
8	75	6	10	0,95	650	1,30
9	30	8	12	0,80	800	1,34
10	75	9	9	0,90	580	1,28

Принимаем: давление в распылительной форсунке, ( $P_{\phi}$ ), 300 кПа; гидравлическое сопротивление аппарата ( $\Delta P_{\text{апп}}$ ), - 250 Па.

### 3 ЭКЗАМЕНАЦИОННЫЕ ВОПРОСЫ

- 1) Водоснабжение промышленных предприятий.
- 2) Состав и свойства сточных вод.
- 3) Классификация сточных вод и принципы их канализования.
- 4) Классификация методов очистки ПСВ.
- 5) Оборудование для смешения и усреднения ПСВ.
- 6) Оборудование для очистки ПСВ от крупных загрязнений.
- 7) Очистка ПСВ от тяжелых минеральных загрязнений.
- 8) Осветление ПСВ отстаиванием.
- 9) Осветление ПСВ в аппаратах со взвешенным слоем осадка.
- 10) Удаление взвешенных веществ из ПСВ в ц/б аппаратах.
- 11) Осветление ПСВ в фильтрах.
- 12) Основы процесса флотационной очистки ПСВ и факторы, влияющие на ее эффективность.
- 13) Флотация в аппаратах с механическим диспергированием воздуха.
- 14) Флотации в аппаратах с подачей воздуха через пористые элементы.
- 15) Напорная и вакуумная флотация.
- 16) Биохимические процессы в практике очистки ПСВ.
- 17) Микрофлора сооружений биохимической очистки воды, основные закономерности потребления микроорганизмами питательных веществ из воды.
- 18) Основные факторы, влияющие на эффективность процессов биологической очистки воды.
- 19) Аэробная биохимическая очистка воды на полях фильтрации, орошения и в биологических прудах.
- 20) Биологические фильтры. Схемы очистки воды с использованием биофильтров.
- 21) Аэротенки - вытеснители. Их конструкция, особенности эксплуатации, параметры работы.
- 22) Аэротенки - смесители. Их конструкция, особенности эксплуатации, параметры работы.
- 23) Аэротенки промежуточного типа. Циркуляционные окислительные каналы.
- 24) Окситенки. Их конструкция и условия эксплуатации.
- 25) Дезинфекция ПСВ после биохимической очистки.
- 26) Анаэробная очистка ПСВ.
- 27) Парофазное термическое обезвреживание ПСВ. Основные закономерности процесса и оборудование.
- 28) Жидкофазное термическое обезвреживание ПСВ. Основные схемы установок и условия проведения процесса.

- 29) Очистка ПСВ методами простой перегонки и отдувки летучих компонентов, а также азеотропной отгонки.
- 30) Очистка ПСВ методами ультрафильтрации и обратного осмоса, применяемое оборудование.
- 31) Адсорбционная очистка ПСВ. Оборудование, основные закономерности процесса.
- 32) Очистка ПСВ методом экстракции. Оборудование, основные закономерности процесса.
- 33) Очистка ПСВ методом ионного обмена. Оборудование, основные закономерности процесса.
- 34) Процессы электрокоагуляции, электрофлотации и электродиализа в практике очистки ПСВ.
- 35) Процессы электрохимического окисления и восстановления примесей в практике обезвреживания ПСВ.
- 36) Методы химической очистки ПСВ. Основные процессы и оборудование.
- 37) Технические (общие) меры по охране ОС и атмосферного воздуха. Основы подхода к проектированию производств в части защиты ОС и атмосферного воздуха.
- 38) Основные источники загрязнения атмосферного воздуха, их классификация. Состав газовых выбросов. Характеристики газовых выбросов.
- 39) Понятие об очистке газовых выбросов. Классификация методов и аппаратов для очистки газов.
- 40) Пыли, дымы, туманы, аэрозоли. Физико-химические свойства пылей.
- 41) Классификация выбросов в атмосферу. Классификация источников загрязнения приземного слоя атмосферы.
- 42) Вентиляционные и технологические системы и их особенности. Температурные режимы, периодичность работы, степень централизации источников выброса.
- 43) Технические возможности предприятий по защите приземного слоя атмосферы. Регулирование выбросов в атмосферу в зависимости от метеоусловий. Защита атмосферы населенных мест планировочными решениями.
- 44) Подготовка промышленных газов к очистке. Регулирование основных параметров: дисперсного состава, температуры, влажности и концентрации.
- 45) Технико-экономическая оценка пылеулавливающих устройств. Основные показатели. Удельные затраты на пылеочистку и относительная стоимость очистки.
- 46) Очистка ГПС от частиц с выраженными адгезионными свойствами. Улучшение работы уловителей для слипающихся пылей.

- 47) Очистка газов от гигроскопичных пылей. Управление свойствами слипающихся пылей.
- 48) Специфика очистки печных газов от технического углерода.
- 49) Необходимость очистки приточного и рециркуляционного воздуха. Тонкая очистка приточного воздуха. Ячейковые масляные фильтры.
- 50) Эксплуатация пылеулавливающих устройств: регистрация, ввод в эксплуатацию, паспорт установки. Оборудование пылеулавливающих установок КИП.
- 51) Обеспечение безопасной эксплуатации “мокрых” пылеуловителей и пенных аппаратов.
- 52) Безопасная эксплуатация электрофильтров. Рекуперация пылей.
- 53) Абсорбционные методы очистки газов. Очистка газов от диоксида серы. Установки для абсорбции  $SO_2$  морской водой, щелочными растворами, известково-известняковые методы.
- 54) Адсорбционные методы защиты атмосферы. Адсорбенты их классификация, характеристики, и возможности применения.
- 55) Рекуперация паров органических растворителей. Общие проблемы сорбционной очистки газов.
- 56) Адсорбционная очистка газов от  $SO_2$ .
- 57) Каталитическая очистка газов. Катализаторы, виды форма выпуска, общие свойства. Очистка газовых сбросов от  $CO$ .
- 58) Высокотемпературное обезвреживание газов: преимущества, недостатки метода. Аппаратурное оформление.

# ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Государственное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«Санкт-Петербургский государственный технологический институт  
(технический университет)»

Кафедра инженерной защиты окружающей среды

Факультет 9  
Курс 5  
Группа .....

Учебная дисциплина:  
Процессы и аппараты защиты окружающей среды  
Контрольная работа № 0  
(Вариант № 00)

Студент

*Иванов*  
00.00.2010.

Иванов И.И.

Руководитель, проф./доцент/ассист.

Петров П.П.

Оценка за работу

Санкт-Петербург  
2010 г.

## ЛИТЕРАТУРА

### Основная литература

- 1 Ветошкин А.Г. Процессы инженерной защиты окружающей среды. Учебное пособие.- Пенза: Изд-во Пензенского гос. ун-та 2008,
- 2 Ветошкин А.Г. Процессы и аппараты защиты гидросферы. Учебное пособие.-Пенза: Изд-во Пензенского гос.ун-та 2004, 209с.
- 3 Ветошкин А.Г. Процессы и аппараты пылеочистки.Учебное пособие.- Пенза: Изд-во ПГУ, 2005, 210с.
- 4 Ветошкин А.Г. Процессы и аппараты газоочистки.Учебное пособие.- Пенза: Изд-во ПГУ, 2006, 201с.
- 5 Родионов А.И., Клушин В.Н., Торочешников Н.С. Техника защиты окружающей среды.-М.: Химия, 1989.- 435 с.
- 6 Тимонин А.С. Основы расчета и конструирования химико-технологического и природоохранного оборудования. Справочник в 3 т.- Калуга: Изд-во Н.Бочкаревой, 2002.
- 7 Павлов К.Ф. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии: учебное пособие для студ. хим- технол. спец. вузов / К.Ф. Павлов, П.Г. Романков, А.А. Носков. Под. ред. П.Г. Романкова. – 10- е изд. перераб. и доп.СПб.: Альянс, 2004. – 676 с. (и др. годы издания).
- 8 Основные процессы и аппараты химической технологии : Пособие по курсовому проектированию / Под ред. Ю.И.Дытнерского. – М.: Альянс, 2010. – 496 с.
- 9 Кельцев Н.В. Основы сорбционной техники.- М.: Химия, 1984.- 592 с.

### Дополнительная литература

- 10 Касаткин А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии: учебник для студ. хим.- технол. спец. Вузов. – 9-е изд. испр. – М.: Альянс, 2004. – 750 с. (и др. годы издания).
- 11 Смирнов Н.Н., Курочкина М.И., Волжинский А.И., Плесовских В.А. Процессы и аппараты химической технологии. Основы инженерной химии. СПб.: Химия, 1996. – 408 с.
- 12 С.Ф.Гребенников, Г.К. Ивахнюк, В.К. Крылов, А.Т. Кынин. Теоретические основы расчета локальных средств защиты окружающей среды: Учебное пособие для экологических специальностей технических вузов, СПб.: СПбГУТД, 2004. – 157 с.
- 13 Романков П.Г.,Фролов В.Ф., Флисюк О.М. Курочкина М.И. Методы расчета процессов и аппаратов химической технологии.-СПб.Химия,1993. – 496 с.
- 14 Дытнерский Ю.И. Процессы и аппараты химической технологии. Часть 1. Теоретические основы процессов химической технологии. Гидромеханические и тепловые процессы и аппараты. – М.: Химия, 1992. 406 с.
- 15 Дытнерский Ю.И. Процессы и аппараты химической технологии. Часть 2. Массообменные процессы и аппараты. – М.: Химия, 1992. - 406 с.