

Министерство сельского хозяйства Российской Федерации  
ФГБОУ ВО «Красноярский государственный аграрный университет»

**В.Н. Тепляшин, В.Н. Невзоров**

**МЕТОДЫ ФИЛЬТРАЦИИ И ОЧИСТКИ В ПИЩЕВОЙ  
ПРОМЫШЛЕННОСТИ**

Методические указания  
к выполнению практических работ

*Электронное издание*

Красноярск 2020

УДК 628.2 (07)

*Рецензент*

*В.Н. Холопов*, доктор технических наук, профессор кафедры автомобилей и транспортно-технологических машин, ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева»

**Тепляшин, В.Н.**

**Методы фильтрации и очистки в пищевой промышленности** [Электронный ресурс]: метод. указания к выполнению практических работ / В.Н. Тепляшин, В.Н. Невзоров; Краснояр. гос. аграр. ун-т. – Красноярск, 2020. – 60 с.

Представлены практические работы, что позволяет изучать дисциплину «Методы фильтрации и очистки в пищевой промышленности» или ее отдельные разделы как традиционным путем, так и самостоятельно; литература. Содержание методических указаний соответствует курсу лекций, читаемому авторами в Красноярском ГАУ, где изучаются основные методы фильтрации жидкости и очистки газа.

Предназначено для студентов направления подготовки 15.03.02 «Технологические машины и оборудование» очной и заочной форм обучения.

Печатается по решению редакционно-издательского совета  
Красноярского государственного аграрного университета

© Тепляшин В.Н., Невзоров В.Н., 2020  
© ФГБОУ ВО «Красноярский государственный аграрный университет», 2020

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	4
Практическая работа № 1. Аппараты сухой механической очистки запыленных газов (выбросов). Расчет циклонов.....	7
Практическая работа № 2. Аппараты мокрой очистки запыленных газов. Расчет скруббера и форсунки .....	14
Практическая работа № 3. Расчет пористых металлических фильтров для очистки выбросов от пыли.....	19
Практическая работа № 4. Расчет электрофильтра.....	24
Практическая работа № 5. Химические методы очистки сточных вод. Нейтрализация, хлорирование и озонирование.....	29
Практическая работа № 6. Адсорбционная очистка сточных вод от растворимых органических веществ. Расчет адсорбера.....	38
Практическая работа № 7. Экстракционный процесс очистки сточных вод. Расчет вертикального экстрактора.....	46
Практическая работа № 8. Разделение «жидкость – твердое тело» центрифугированием. Технологический и конструктивный расчет центрифуг.....	49
Заключение.....	58
Литература.....	59

## Введение

Методы фильтрации и очистки помогают найти наиболее эффективные пути создания машин и аппаратов для пищевой промышленности.

Интенсивный путь развития инновационного пищевого оборудования позволяет распространять полученные разработки в пищевых технологиях.

Цель изучения дисциплины заключается в получении знаний об основных методах фильтрации и очистки в профессиональной деятельности.

Задачи дисциплины:

- помочь студентам овладеть основами методов фильтрации и очистки газа;
- помочь студентам овладеть основами методов фильтрации и очистки жидкости.

Реализация в дисциплине «Методы фильтрации и очистки в пищевой промышленности» требований ФГОС ВО, ОПОП и учебного плана по направлению подготовки 15.03.02 «Технологические машины и оборудование» должна формировать следующие профессиональные компетенции:

- ПК-11 (способность проектировать техническое оснащение рабочих мест с размещением технологического оборудования, умение осваивать вводимое оборудование);
- ПК-13 (умение проверять техническое состояние и остаточный ресурс технологического оборудования, организовывать профилактический осмотр и текущий ремонт технологических машин и оборудования);
- ПК-14 (умение проводить мероприятия по профилактике производственного травматизма и профессиональных заболеваний, контролировать соблюдение экологической безопасности проводимых работ).

Методические указания включают введение, 8 практических работ, заключение, использованную литературу.

Каждая практическая работа составлена по единому плану: цель работы, теоретическая часть, методики выполнения работы, исходные данные, контрольные вопросы.

Предварительно студенты должны изучить теоретический материал по предлагаемой литературе или по лекциям, ознакомиться с предстоящей работой, оформить титульный лист, провести расчеты, вычертить схему установки.

В процессе выполнения работы студенты делают необходимые замеры, заполняют протоколы испытаний (измерений), производят соответствующие расчеты. Окончив практическую работу, студенты должны выключить оборудование и предъявить преподавателю протокол испытаний.

Отчет о работе защищается студентом в конце текущего занятия или в начале следующего.

К практическим занятиям в лаборатории допускаются студенты, получившие инструктаж по технике безопасности с соответствующим оформлением его в журнале.

Студентам запрещается без разрешения преподавателя включать электрооборудование, открывать и закрывать задвижки и вентили трубопроводов, включать измерительные приборы и установки.

Перед началом работы необходимо ознакомиться с заданием, с правилами безопасности проведения работ, проверить исправность ограждений и предохранительных устройств.

При работе в лабораториях выполняется только та практическая работа, которая предусмотрена планом. Категорически воспрещается выполнять другие работы.

Во время выполнения практической работы ходить без дела по лаборатории запрещается, так как этим отвлекается внимание других студентов и остается без наблюдения лабораторная установка, что может повлечь за собой несчастный случай.

Оборудование лаборатории относится к разряду особо опасных в связи с возможностью поражения электрическим током, поэтому студенты обязаны строго соблюдать правила безопасности. В случае прекращения подачи электроэнергии необходимо отключить установку и оставаться у рабочего места.

Если произошел несчастный случай, то необходимо немедленно оказать первую помощь и сообщить об этом преподавателю.

Бережное отношение к приборам и оборудованию лаборатории создает условия вашей безопасности.

Запрещается приносить верхнюю одежду в лабораторию.

По окончании работы приведите в порядок рабочее место.

После выполнения работы каждым студентом составляется индивидуальный отчет, который должен содержать следующие разделы:

– титульный лист, на котором указывается наименование работы, кто выполнил, кто проверил, указывается год выполнения работы;

– листы отчета, на которых должны быть: цель работы, схема опытного устройства и таблицы результатов расчетов с расчетами.

Особое внимание при проведении расчетов необходимо обращать на соблюдение единства систем единиц измерения. Все величины, участвующие в расчетах, выражать в единицах СИ.

Графическая часть строится на отдельной бумаге формата А4 в масштабе и прилагается к отчету.

## **Практическая работа № 1. Аппараты сухой механической очистки запыленных газов (выбросов). Расчет циклонов**

### *Цель работы*

Приобретение навыков по выбору и расчету циклонов.

*Рекомендуемая литература:* [3, 5].

### *Задание*

1. Изучить классификацию сухих механических пылеуловителей.
2. Изучить принцип работы циклонов.
3. Определить основные параметры циклонов.

### *Теоретическая часть*

Аппаратами сухой механической очистки запыленных газов (выбросов) являются пылеосадительные камеры, инерционные и ротационные пылеуловители, циклоны, вихревые пылеуловители, пористые фильтры.

Циклоны являются наиболее распространенными установками сухого пылеулавливания.

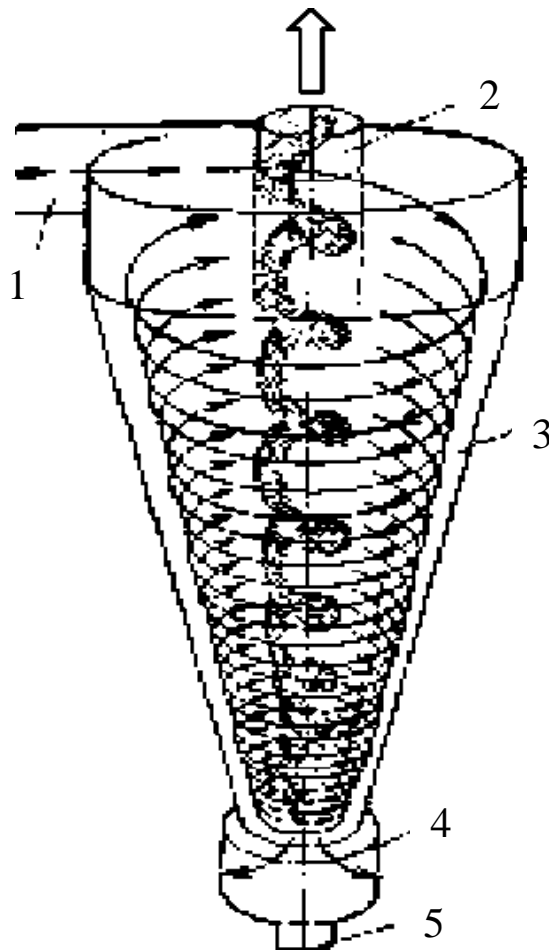
Принцип работы – оседание частиц под воздействием центробежных сил и сил тяжести. При вводе через тангенциальный патрубок 1 частицы отжимаются к внутренней стенке корпуса 3 и, теряя скорость, выпадают в бункер 4, откуда выводятся через выход 5. Очищенный газ выводится через выхлопную трубу 2 (рис. 1.1). Центробежный эффект сильнее проявляется у крупных частиц, поэтому циклоны предназначены для грубой механической очистки выбросов от крупной и тяжелой пыли, например, для улавливания золы, образующейся при сжигании топлива в котлах тепловых станций.

В промышленности используют циклоны, рассчитанные на скорость потока от 5 до 20 м/с.

Эффективность циклонов составляет:

- 0,98 для частиц размеров 30–40 мкм;
- 0,8 для частиц размеров 10 мкм;
- 0,6 для частиц размеров 4–5 мкм.

Производительность циклонов лежит в диапазоне от нескольких сот до десятков тысяч кубометров в час.



*Рисунок 1.1 – Циклон:*

*1 – патрубок тангенциальный входной; 2 – патрубок выходной;  
3 – стенка; 4 – бункер; 5 – патрубок пылевывпускной*

Преимуществом циклонов являются простота конструкции, отсутствие движущихся частей и небольшие размеры. Недостатками являются затраты энергии на вращение потока и абразивный износ частей аппарата пылью.

Для большей эффективности используют несколько циклонов небольшого диаметра, собранные в секции батареи – батарейные циклоны. Циклоны соединяются между собой подводными патрубками и сборными камерами. Для нормальной работы циклона необходима герметичность бункера для исключения выноса пыли с потоком из-за подсоса наружного воздуха.

Конструктивно циклоны бывают цилиндрические и конические. Цилиндрические циклоны типа ЦН-15 (15 – угол наклона входной патрубки:  $\alpha = 15^\circ$ ) изготавливаются из углеродистой или низколегированной стали. Они предназначены для предварительной очистки выбросов от пыли перед фильтрами и электрофильтрами. Конические циклоны типа СК предназначены для очистки выбросов от сажи, об-



ладают повышенной эффективностью из-за большего гидравлического сопротивления. Бункеры циклонов имеют цилиндрическую форму диаметром  $1,5 D$  для цилиндрических и  $1,2 D$  для конических циклонов. Высота цилиндрической части бункера составляет  $0,8 D$ .

Для расчета циклона необходимо иметь следующие исходные данные:

- объем очищаемого газа  $Q$ ,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;
- плотность газа при рабочих условиях  $\rho$ ,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;
- вязкость при рабочей температуре  $\mu$ ,  $\text{Па}\cdot\text{с}$ ;
- дисперсный состав пыли  $d_{50}$ ;
- входную концентрацию пыли  $c_{\text{вх}}$ ,  $\text{г}/\text{м}^3$ ;
- требуемую эффективность очистки  $\eta$ .

#### *Методика выполнения работы*

Расчет циклонов ведут методом последовательных приближений.

1. Определяют оптимальную скорость движения газа  $w_{\text{опт}}$  в зависимости от типа циклона (табл. 1.1).

Таблица 1.1 – Оптимальная скорость движения газа  $w_{\text{опт}}$  в циклоне

Тип циклона	ЦН-24	ЦН-15	ЦН-11	СДК-ЦН-33	СК-ЦН-34	СК-ЦН-34м
$w_{\text{опт}}$ , м/с	4,5	3,5	3,5	2,0	1,7	2,0

2. Рассчитывают диаметр циклона

$$D = \sqrt{\frac{4Q}{\pi w_{\text{опт}}}} \quad (1.1)$$

Полученное значение необходимо округлить до ближайшего типового значения. В России принят следующий ряд внутреннего типового диаметра циклонов  $D$ , мм: 150; 200; 300; 400; 450; 500; 600; 700; 800; 900; 1 000; 1 200; 1 400; 1 600; 1 800; 2 000; 2 400; 3 000.

Если значение  $D$  превышает максимальное типовое значение, то необходимо применять два или более параллельно установленных циклонов.

3. Рассчитывают действительную скорость потока в циклоне

$$w = 4Q / \pi N D^2, \quad (1.2)$$

где  $N$  – число циклонов;

$w$  – не должно отклоняться от  $w_{\text{опт}}$  более чем на 15 %.

4. Рассчитывают коэффициент гидравлического сопротивления

$$R = k_1 k_2 R_{500}, \quad (1.3)$$

где  $k_1$  и  $k_2$  – коэффициенты, зависящие от  $D$ ,  $c_{вх}$  и типа циклона (табл. 1.2 и 1.3);

$R_{500}$  – коэффициент гидравлического сопротивления при  $D = 500$  мм (табл. 1.4).

5. Рассчитывают значение гидравлического сопротивления

$$\Delta P = P_{вх} - P_{вых} = \frac{1}{2} R \rho_r W^2. \quad (1.4)$$

6. Определяют эффективность очистки

$$\eta = 0,5 (1 + \Phi(x)), \quad (1.5)$$

где  $\Phi(x)$  – табличная (табл. 1.5) функция параметра  $x$

$$x = 0,8 \lg \left( \frac{d_{50}}{d_{т50}} \right). \quad (1.6)$$

Таблица 1.2 – Значения  $k_1$  при различных  $D$  и типах циклонов

Тип циклона	D, мм				
	150	200	300	450	> 500
ЦН-11	0,94	0,95	0,96	0,99	1,0
ЦН-15, ЦН-24	0,85	0,90	0,93	1,0	1,0
СДК-ЦН-33, СК-ЦН-34 и 34 м	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0

Таблица 1.3 – Значения  $k_2$  при различных  $c_{вх}$  и типах циклонов

Тип циклона	$c_{вх}$ , г/м <sup>3</sup>						
	0	10	20	40	80	120	150
ЦН-11	1	0,96	0,94	0,92	0,90	0,87	–
ЦН-15	1	0,93	0,92	0,91	0,90	0,87	0,86
ЦН-24	1	0,95	0,93	0,92	0,90	0,87	0,86
СДК-ЦН-33	1	0,81	0,785	0,78	0,77	0,76	0,745
СК-ЦН-34	1	0,98	0,947	0,93	0,915	0,91	0,90
СК-ЦН-34м	1	0,99	0,97	0,95	–	–	–

Таблица 1.4 – Значения  $R_{500}$  в зависимости от типов циклонов

Тип циклона	Выхлоп		Тип циклона	Выхлоп	
	в атмосферу	гидр. сеть		в атмос-сфере	гидр. сеть
ЦН-11	245	250	СДК-ЦН-33	520	600
ЦН-15	155	163	СК-ЦН-34	1 050	1 150
ЦН-24	75	80	СК-ЦН-34м	–	2 000

Таблица 1.5 – Значения функции  $\Phi(x)$  в зависимости от параметра  $x$

$x$	-2,7	-2,0	-1,6	-1,4	-1,2	-1,0	-0,8	-0,6-	-0,2
$\Phi(x)$	0,004	0,023	0,055	0,081	0,115	0,159	0,212	0,274	0,421
$x$	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1,2	1,6	1,8	2,7
$\Phi(x)$	0,5	0,579	0,655	0,726	0,788	0,885	0,964	0,964	0,997

Значение  $d_{50}$  определяется по формуле

$$d_{50} = d_{T50} \sqrt{\frac{D}{D_T} \frac{\rho_{чТ}}{\rho_ч} \frac{\mu}{\mu_T} \frac{w_T}{w}}, \quad (1.7)$$

где  $\rho_ч$  – плотность частиц;

$\mu$  – вязкость;

$w$  – скорость потока;

$D_T = 600$  мм;

$\rho_{чТ} = 1\,930$  кг/м<sup>3</sup>;

$\mu_T = 22,2 \cdot 10^{-6}$  Па\*с;

$w_T = 3,5$  м/с (индекс  $t$  означает типовое значение параметра);

значение  $d_{T50}$  приведено в таблице 1.6.

Таблица 1.6 – Значения параметра  $d_{T50}$  в зависимости от типов циклонов

Тип	ЦН-11	ЦН-15	ЦН-24	СДК-ЦН-33	СК-ЦН-34	СК-ЦН-34м
$d_{T50}$	8,5	4,5	3,65	2,31	1,95	1,3

7. Осуществляют выбор циклона. Если расчетное  $\eta$  меньше требуемого, то необходимо выбрать другой циклон с большим гидравлическим сопротивлением  $R$ . Можно пользоваться формулой

$$\frac{R_1}{R_2} = \left( \frac{1-\eta_1}{1-\eta_2} \right)^2 \frac{w_1 D_1}{w_2 D_2}, \quad (1.8)$$

где индексы 1 и 2 соответствуют двум различным циклонам.

8. Рассчитывают конструкционные размеры циклона в мм (рис. 1.2, табл. 1.7) в соответствии с диаметром  $D$  (в мм) выбранного циклона

$$y = k \cdot D, \quad (1.9)$$

где  $y$  – конкретный параметр циклона (диаметр  $d$ , ширина  $b$ , высота  $H$  и т. д.);

$k$  – коэффициент пропорциональности (табл. 1.7).

9. Радиус улитки рассчитывается по формуле

$$\rho = D/2 + b\varphi/2\pi, \quad (1.10)$$

где  $b$  – ширина входного патрубка;

$\varphi = 135^\circ = 2,35$  рад.

Таблица 1.7 – Параметры циклонов

Параметр	Циклон					
	ЦН-11	ЦН-15	ЦН-24	СДК-ЦН-33	СК-ЦН-34	СК-ЦН-34 м
Диаметр выхлопной трубы $d$	0,59			0,334	0,34	0,22
Диаметр пылевыпускного отверстия $d_1$	0,3–0,4			0,334	0,23	0,18
Ширина входного патрубка $b$	0,2			0,264	0,214	0,18
Длина входного патрубка $l$	0,6					
Высота входного патрубка $a$	0,48	0,66	1,11	0,535	0,515	0,4
Высота выхлопной трубы $h_T$	1,56	1,74	2,11	0,535	0,515	0,4
Высота внешней части выхлопной трубы $h_B$	0,3	0,3	0,4	0,2–0,3		
Высота цилиндрической части $H_{Ц}$	2,06	2,06	2,11	0,535	0,515	0,4
Высота конуса $H_K$	2,0	2,0	1,75	3,0	2,11	2,6
Высота установки фланца $h_{фл}$	0,1					
Общая высота циклона $H$	4,38	4,56	4,26	3,835	2,925	3,3

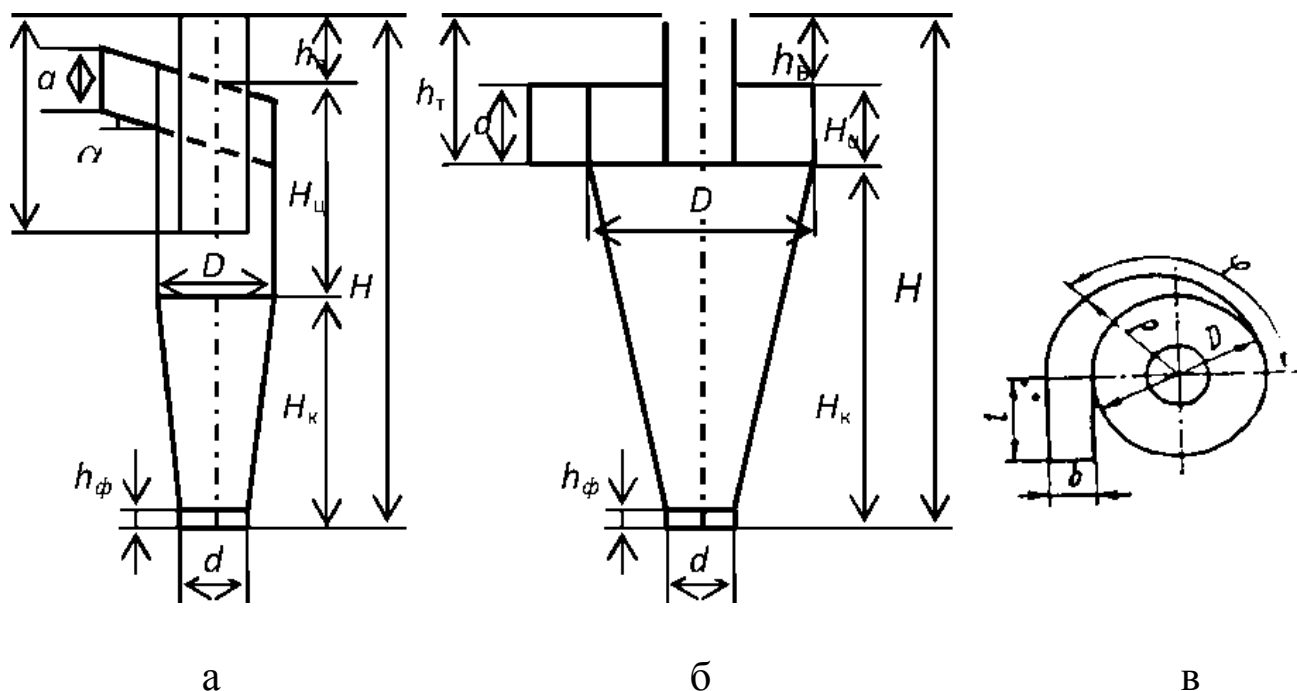


Рисунок 1.2 – Схема циклонов:  
*a* – цилиндрический; *б* – конический; *в* – вид сверху (улитка)

10. Начертить схему циклона (в зависимости от типа, рис. 1.2) с конструкционными размерами (в мм).

*Исходные данные для выполнения работы*

Исходные данные для выполнения работы представлены в таблице 1.8.

Таблица 1.8 – Исходные данные для выполнения практической работы (варианты)

Номер вар.	Тип	Q, м <sup>3</sup> /с	c <sub>вх</sub> , г/м <sup>3</sup>	ρ <sub>г</sub> , кг/м <sup>3</sup>	ρ <sub>ч</sub> , кг/м <sup>3</sup>	μ·10 <sup>6</sup> , Па·с	η
1, 10	ЦН-11	10	40	1,34	1 930	22,2	0,95
2, 11	ЦН-11	11	120	1,35	2 230	22,1	0,65
3, 12	ЦН-15	12	80	1,36	1 650	22,0	0,75
4, 13	ЦН-15	13	10	1,37	1 700	21,9	0,95
5, 14	ЦН-24	14	20	1,38	1 750	21,8	0,90
6, 15	ЦН-24	15	40	1,39	1 900	21,7	0,85
7, 16	СДК-ЦН-33	8	150	1,33	2 130	21,6	0,65
8, 17	СК-ЦН-34	5	80	1,32	2 050	21,5	0,75
9, 18	СК-ЦН-34 м	1	40	1,31	2 100	21,4	0,75

*Контрольные вопросы*

1. Классификация сухих механических пылеуловителей.
2. Принцип работы циклонов.
3. Групповые и батарейные циклоны.
4. Основные параметры циклонов.
5. Преимущества и недостатки циклонов.

## Практическая работа № 2. Аппараты мокрой очистки запыленных газов. Расчет скруббера и форсунки

### *Цель работы*

Применение приобретенных знаний и навыков при расчете аппаратов мокрой очистки выбросов.

*Рекомендуемая литература:* [1, 3, 4, 5].

### *Задание*

1. Изучить сущность метода мокрой очистки газов.
2. Изучить классификацию аппаратов мокрой очистки.
3. Изучить принцип работы и классификацию форсунок, область применения.
4. Рассчитать параметры форсунок.

### *Теоретическая часть*

Мокрые газоочистные аппараты применяют для предварительной очистки и подготовки (кондиционирования) газов, поступающих в газоочистные аппараты других типов, например, в рукавные фильтры, электрофильтры. Мокрые пылеуловители широко применяются для очистки воздуха от пыли с размером частиц  $d_{\text{ч}} = 0,3\text{--}2$  мкм, а также при высоких температурах очищаемого газа. В качестве орошаемой жидкости (абсорбента) чаще всего применяется вода.

Мокрая очистка эффективнее сухой очистки. Контакт пыли или газа с каплями жидкости увеличивает эффективность очистки. Принцип действия мокрых пылеуловителей заключается в осаждении частицы пыли на поверхность капель и пленки жидкости за счет сил инерции и броуновского движения. При мокрой очистке важную роль играет смачиваемость частиц жидкостью: чем лучше смачиваемость – тем эффективнее очистка.

С учетом конструктивных особенностей мокрые газоочистные аппараты делят на следующие типы: скрубберы Вентуры; форсуночные и центробежные скрубберы; ударно-инерционные аппараты; барботажно-пенные аппараты и др.

Форсуночный скруббер состоит из полый емкости 1, в которую встроен форсунок 2. Очищаемый газ поступает через патрубок 3 и направляется на поверхность воды, где осаждаются крупные частицы (рис. 2.1). Далее поток поднимается вверх на встречу потока капель жидкости, распыляемый через форсунок. Частицы адсорбируются на поверхности капель и падают вниз. Шлам выводится через нижнюю

часть аппарата. Очищенный газ выводится через верхнюю часть аппарата. Форсунок может быть несколько. Удельный расход воды составляет  $q = 3-6 \text{ л/м}^3$ , гидравлическое сопротивление – до  $\Delta P = 250 \text{ Па}$ , при скорости потока  $v = 0,7-1,5 \text{ м/с}$ . Сечение аппарата можно определить по формуле  $S = Q/v$ , где  $Q$  – объемный расход очищаемого газа,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;  $v$  – скорость пропускания потока,  $\text{м/с}$ .

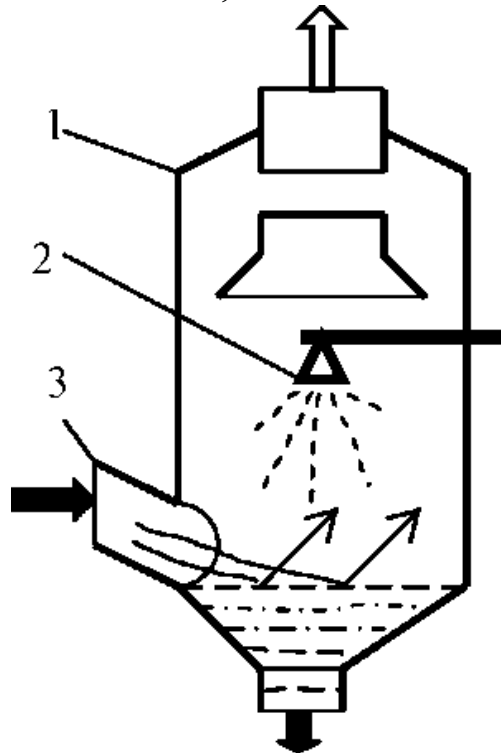


Рисунок 2.1 – Полный форсуночный скруббер:  
1 – полая емкость; 2 – форсунок; 3 – патрубок

Форсунки используются для распыления жидкости и распределения газа в различных аппаратах защиты окружающей среды (аппараты мокрой очистки газов, абсорберы, адсорберы и др.). Форсунки можно разделить на три класса: центробежные, центробежно-струйные, ударно-струйные. В каждом классе десятки различных конструкций. В данной работе рассматривается центробежно-струйная форсунка с завихряющими вставками (рис. 2.2). Для расчета скруббера и форсунки необходимы следующие исходные данные: расход очищаемого газа  $Q_{\text{газ}}$  ( $\text{м}^3/\text{с}$ ); скорость потока ( $\text{м/с}$ ); требуемая производительность форсунки  $Q$  ( $\text{м}^3/\text{с}$ ); перепад давления  $\Delta P_{\text{ж}}$  ( $\text{Па}$ ); корневой угол факела  $\beta$  (град.); свойства жидкости: плотность  $\rho_{\text{ж}}$  ( $\text{кг/м}^3$ ), вязкость  $\mu_{\text{ж}}$  ( $\text{Па}\cdot\text{с}$ ) и поверхностное натяжение  $\sigma$ ; плотность  $\rho_{\text{г}}$  и вязкость  $\mu_{\text{г}}$  окружающего газа; коэффициент расхода  $\gamma$ .

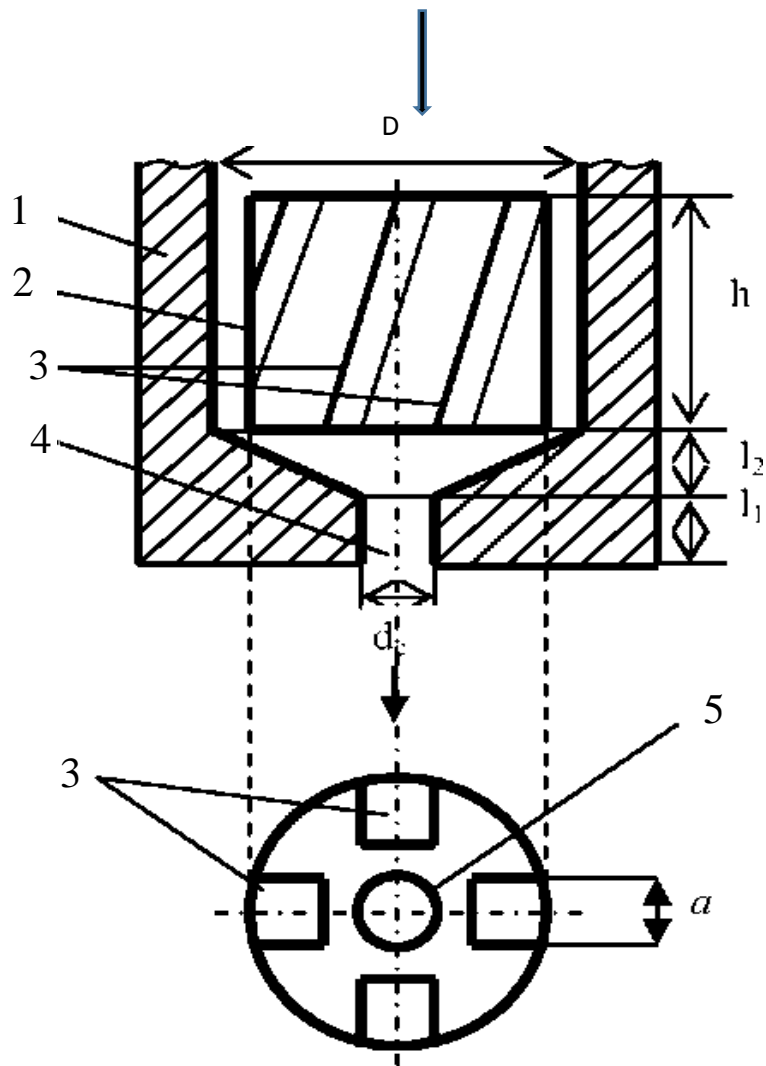


Рисунок 2.2 – Центробежно-струйная форсунка:  
 1 – корпус; 2 – вкладыш; 3 – каналы завихряющие; 4 – сопло;  
 5 – центробежный канал

*Методика выполнения работы*

Упражнение 1. Расчет скруббера.

1. Определяют сечение скруббера

$$S = \frac{Q_{\text{газ}}}{v}. \quad (2.1)$$

2. Определяют диаметр скруббера

$$D_{\text{скр}} = \sqrt{\frac{4 \cdot S}{\pi}}. \quad (2.2)$$

3. Определяют высоту скруббера

$$H_{\text{скр}} = (3/4)D_{\text{скр}}. \quad (2.3)$$



Упражнение 2. Расчет центробежно-струйной форсунки.

1. Определяют диаметр сопла форсунки

$$d_c = \sqrt{\frac{4*Q}{\pi\gamma\sqrt{\Delta P_{ж}/\rho_{ж}}}}, \text{ м.} \quad (2.4)$$

Для воды  $\rho_{ж} = 1\,000 \text{ кг/м}^3$ . Далее значения  $d_c$  переводят в мм.

2. Определяют диаметр вкладыша и равный ему внутренний диаметр корпуса форсунки

$$D = 1,925 - d_c, \text{ мм.} \quad (2.5)$$

При  $d_c \leq 14 \text{ мм}$  значения  $D$  принимают 27 мм.

3. Определяют высоту вкладыша

$$h = 2,5 + 2 - d_c, \text{ мм.} \quad (2.6)$$

4. Определяют длину соплового канала

$$\ell_1 = (0,5/1,0) - d_c, \text{ мм.} \quad (2.7)$$

5. Определяют высоту камеры смещения

$$\ell_2 = \frac{D - d_c}{2 * \tan \frac{\theta}{2}}, \text{ мм.} \quad (2.8)$$

6. Определяют диаметр центрального канала

$$d_0 = d_c \sqrt{0,676 - 0,024 * d_c}, \text{ мм.} \quad (2.9)$$

7. Определяют суммарную площадь закручивающих каналов

$$S_k = 1,075 * \pi * d_0^2, \text{ мм}^2. \quad (2.10)$$

8. Определяют угол наклона закручивающих каналов

$$\lg \alpha = 0,053 * \beta * \left(\frac{d_0^2}{d_c^2}\right)^{0,58} + 0,32, \quad (2.11)$$

где  $\beta$  в [рад] (1 рад = 57,3 град).

Далее находят  $\alpha = 10^x$ , [рад], и переводят в [град],

где  $x = \lg \alpha$ .

9. Определяют размер закручивающих каналов

$$a = \sqrt{\frac{S_k}{n * \cos \alpha}}, \quad (2.12)$$

где число каналов  $n = 4/6$  (если  $\alpha > 90^\circ$ , то заменит  $\cos \alpha$  на  $\cos (\alpha - 90)$ ).

10. По необходимости определяют средний объемно-поверхностный диаметр капель жидкости

$$d_{ж} = 0,154 * \Delta P_{ж}^{0,44} * d_c^{0,23}, \text{ мм,} \quad (2.13)$$

где  $\Delta P_{ж}$  в [МПа],  $d_c$  в [мм].

### *Исходные данные для выполнения работы*

Исходные данные для выполнения практической работы представлены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Исходные данные (варианты)

Номер вар.	$Q_{\text{газ}}, \text{ м}^3/\text{ч}$	$Q, \text{ м}^3/\text{ч}$	$v, \text{ м/с}$	$\Delta P_{\text{ж}}, \text{ МПа}$	$\gamma$	$\beta$
1, 10	3 000	30	0,5	0,5	0,85	60
2, 11	2 500	25	0,4	0,4	0,80	65
3, 12	2 000	20	0,3	0,3	0,78	70
4, 13	1 500	15	0,2	0,2	0,73	75
5, 14	1 000	10	0,15	0,15	0,70	80
6, 15	500	5	0,15	0,15	0,65	60
7, 16	2 200	22	0,45	0,45	0,67	70
8, 17	1 800	18	0,22	0,22	0,75	80
9, 18	1 200	12	0,25	0,25	0,79	65

### *Контрольные вопросы*

1. Сущность метода мокрой очистки газов.
2. Классификация аппаратов мокрой очистки.
3. Принцип работы и классификация форсунок, область применения.
4. Параметры форсунок.

## Практическая работа № 3. Расчет пористых металлических фильтров для очистки выбросов от пыли

### *Цель работы*

Приобретение навыков и знаний по расчету и конструкции пористых фильтров.

*Рекомендуемая литература:* [3, 5].

### *Задание*

1. Изучить сущность процесса фильтрации.
2. Изучить классификацию фильтров по типу перегородки.
3. Рассчитать параметры, характеризующие процесс фильтрации.

### *Теоретическая часть*

Фильтры широко используются для тонкой очистки промышленных выбросов. Процесс фильтрации основан на задержании частиц примесей в пористых перегородках при движении дисперсных систем через них. Фильтры применяются для очистки выбросов от пыли (с концентрацией до  $150 \text{ мг/м}^3$ ), очистки воздуха, подаваемого в помещения (кондиционирования), очистки жидкостей от примесей и др. Эффективность очистки фильтрами зависит от размера частиц ( $d_{\text{ч}}$ ) и их скорости ( $v$ ), размера пор ( $d_{\text{п}}$ ), состояния поверхности фильтрующего элемента и параметров газового потока.

Фильтры можно классифицировать по типу перегородки, конструкции и назначения. В фильтрах применяются перегородки различных типов:

- полужесткие пористые материалы (вязаные сетки, прессованные спирали и стружка);
- жесткие пористые материалы (пористая керамика и металлы);
- гибкие пористые материалы (ткани, войлок, губчатая резина);
- зернистый слой (гравий, песок).

Фильтры 1 и 2 группы представляет собой корпус 1, разделенный пористой перегородкой 2. Задержанные частицы загрязнителя на поверхности перегородки образуют слой 3 и становятся частью фильтровой перегородки (рис. 3.1). Задерживание частиц происходит в результате эффекта касания, диффузионного, инерционного и гравитационного процессов. Через некоторое время возникает необходимость удаления осадка, т. е. регенерация фильтра, так как по мере

накопления частиц пористость уменьшается, а сопротивление увеличивается.

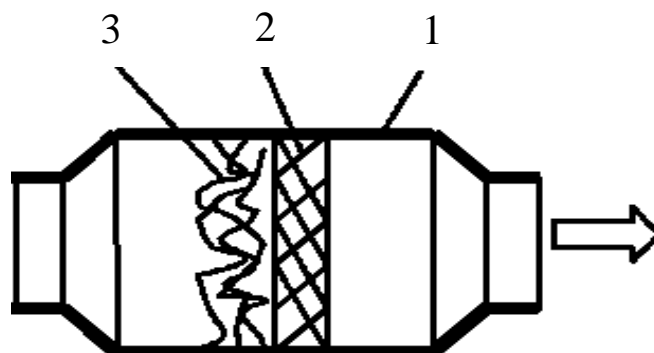


Рисунок 3.1 – Схема фильтра:  
1 – корпус; 2 – пористая перегородка; 3 – слой

Из фильтров третьего типа наиболее употребительны тканевые рукавные фильтры. В корпусе фильтра устанавливается необходимое число рукавов, на которые подается запыленный воздух. Воздух проникает через ткань, а частицы пыли задерживаются. Через определенное время рукава продувают и встряхивают. Эффективность очистки достигает 0,99 для частиц размером более 0,5 мкм.

Процесс фильтрации характеризуется следующими параметрами: эффективность очистки; тонкость очистки; пористость; скорость фильтрации; пропускная способность; гидравлическое или аэродинамическое сопротивление.

Абсолютная тонкость очистки – это максимальный размер частиц, прошедших через фильтр. Номинальная тонкость очистки – это размер частиц, для которых фракционная эффективность очистки равна 0,97. Предпочтительный ряд: 1; 2; 5; 10; 16; 25 мкм и т. д.

Пористостью фильтр-элемента называется отношение объема пустот ( $V_n$ ) к полному объему фильтр-элемента ( $V$ ):  $\Pi = V_n/V$ .

Скорость фильтрации – это отношение объемного расхода  $Q$  ( $\text{м}^3/\text{с}$ ) очищаемого вещества к площади фильтрующей поверхности  $F$  ( $\text{м}^2$ ):  $w = Q/F$ , м/с.

Удельная массовая пропускная способность фильтра:  $G = wr$ ,  $\text{кг}/(\text{м}^2\text{с})$ , где  $r$  – плотность очищаемого вещества,  $\text{кг}/\text{м}^3$ .

Гидравлическое (аэродинамическое) сопротивление фильтра – это разность давлений на входе и выходе фильтра:  $\Delta P = P_{\text{вх}} - P_{\text{вых}}$ .

При проектировании назначается начальное и конечное сопротивление фильтра. При достижении конечного сопротивления процесс фильтрации прекращается и фильтр подвергается регенерации.

#### Методика выполнения работы

1. Выбирают материал для изготовления фильтр-элемента исходя из условия эксплуатации фильтра, прочностных, коррозионных характеристик материала и экономических соображений (или по варианту).

2. Определяют максимальный размер пор

$$d_{\text{п макс}} = 3 d_{\text{ТО абс}}, \text{ мкм}, \quad (3.1)$$

где  $d_{\text{ТО абс}}$  – абсолютная тонкость очистки, мкм.

3. Определяют средний размер пор

$$d_{\text{п ср}} = 1,25 d_{\text{п макс}} \Pi^{0,3}, \text{ мкм}, \quad (3.2)$$

где  $\Pi$  – пористость фильтр-элемента.

4. Определяют размер частиц порошка для изготовления фильтр-элемента

$$d_{\text{ч ср}} = d_{\text{п ср}} / \Pi^2, \text{ мкм}. \quad (3.3)$$

5. Назначают толщину фильтр-элемента  $h$  по технологическим и прочностным соображениям в пределах 0,25–5 мм (обычно 1 мм).

6. Находят скорость потока в порах

$$w_{\text{п}} = \frac{\Delta P_{\text{нач}} * d_{\text{п ср}}^2}{208 * h * \mu}, \text{ м/с}, \quad (3.4)$$

где  $\Delta P_{\text{нач}}$  – начальное сопротивление фильтра, Па;

$\mu$  – вязкость фильтруемого вещества, Па\*с.

7. Определяют площадь фильтрации

$$F = \frac{Q}{w_{\text{п}} * \Pi}, \text{ м}^2. \quad (3.5)$$

8. Определяют расчетное конечное сопротивление фильтра

$$\Delta P_{\text{кон.р.}} = \frac{\Delta P_{\text{нач}}}{h} \left[ (1 - e^{-X}) * \left( \frac{e^Y - 1}{A * B} \right) + h \right], \text{ Па}, \quad (3.6)$$

где  $X = A * B * h$ ;  $Y = A * q_{\text{вх}} * \tau$ ;

$$q_{\text{вх}} = c_{\text{вх}} / \rho_{\text{ч}};$$

$$B = \frac{(1 - \Pi_0) \Pi}{w_{\text{ф}}}, \text{ с/м};$$

$$w_{\text{ф}} = \Pi * w_{\text{п}}, \text{ м/с};$$

$A$  – опытный коэффициент, зависящий от размеров частиц и размер пор: для очистки газов  $A = 5,25 - 10^3 \text{ с}^{-1}$ , для очистки жидкостей  $A = 10 \text{ с}^{-1}$ ;

$\tau$  – время работы фильтра, с;

$q_{\text{вх}}$  – объемное содержание твердых частиц в фильтруемом веществе на входе фильтра;

$c_{\text{вх}}$  – концентрация загрязнителя, кг/м<sup>3</sup>;

$\rho_{\text{ч}}$  – плотность частиц загрязнителя, кг/м<sup>3</sup>;

$w_{\text{ф}}$  – скорость фильтрации, м/с;

$\Pi_0$  – пористость осадка (смотрите задание).

9. Определяют максимально допустимое время работы фильтра (если  $\Delta P_{\text{кон.р.}}$  отличается от заданного  $\Delta P_{\text{кон}}$ )

$$\tau_{\text{м}} = \frac{1}{A \cdot q_{\text{вх}}} * \ln \left[ 1 + \frac{\Delta P_{\text{кон.р.}}}{\Delta P_{\text{нач}}} * \frac{X}{1 - e^{-X}} \right], \text{ с.} \quad (3.7)$$

10. Определяют эффективность очистки

$$\eta = \frac{q_{\text{вх}} - q_{\text{вых}}}{q_{\text{вх}}} * 100\%. \quad (3.8)$$

где  $q_{\text{вых}} = \frac{1}{A \cdot \tau_{\text{м}}} * \ln \left( \frac{e^Z + e^X - 1}{e^X} \right);$

$$Z = A q_{\text{вх}} \tau_{\text{м}}.$$

Если конечные данные (например, эффективность очистки) не удовлетворяют требованиям, то расчет производят вновь, изменив размеры фильтр-элемента или структурные свойства его материала.

Примечание: единицы измерения величин в формулах необходимо перевести в одну систему:

– 1 час = 3 600 с;

– 1 с = 1/3 600 час;

– 1 мкм = 10<sup>-6</sup> м;

– 1 мм = 10<sup>-3</sup> м;

– 1 мг = 10<sup>-6</sup> кг;

– 1 кПа = 10<sup>3</sup> Па.

*Исходные данные для выполнения работы*

Рассчитать параметры пористого металлического фильтра для очистки воздуха от пыли глинозема при нормальном атмосферном давлении ( $P_{\text{атм}} = 100$  кПа) и температуры воздуха 20 °С. Начальное сопротивление фильтра  $\Delta P_{\text{нач}} = 10$  кПа. Плотность частиц загрязнителя  $\rho_{\text{ч}} = 3,9 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>. Пористость осадка  $\Pi_0 = 0,5$ . Вязкость воздуха при 20 °С:  $\mu = 18 \cdot 10^{-6}$  Па\*с. Другие исходные данные по вариантам представлены в таблице 3.1:

– расход воздуха  $Q$ ;

– концентрация пыли в воздухе  $c_{\text{вх}}$ ;

– требуемая тонкость очистки  $d_{\text{то абс}}$ ;

- наибольшее допустимое (конечное) сопротивление фильтра  $\Delta P_{\text{кон}}$ ;
- время непрерывной работы фильтра  $\tau$ .

Таблица 3.1 – Исходные данные (варианты)

Номер вар.	Q, м <sup>3</sup> /ч	c <sub>вх</sub> , мг/м <sup>3</sup>	d <sub>ТО абс</sub> , мкм	$\Delta P_{\text{кон}}$ , кПа	$\tau$ , ч	Пористый материал	Форма частиц	П	h, мм
1, 10	150	5	5	20	50	Бронза	Сфера	0,33	1
2, 11	160	10	4	25	45	Ст50ХГ	Сфера	0,25	0,7
3, 12	120	15	3	15	40	Ст50ХГ	80 % Сф	0,30	0,5
4, 13	140	20	10	20	35	Ст50ХГ	20 % Сф	0,28	2
5, 14	100	25	16	15	30	Ст50ХГ	Лепестковая	0,26	3
6, 15	130	30	25	20	25			0,24	4
7, 16	170	35	10	25	20	Железо	Тарельчатая	0,38	2
8, 17	100	40	16	15	15			0,42	3
9, 18	180	45	25	20	10	Бронза	Сфера	0,35	4

*Контрольные вопросы*

1. Сущность процесса фильтрации.
2. Классификация фильтров по типу перегородки.
3. Параметры, характеризующие процесс фильтрации.
4. Что означает максимальное время работы фильтра?

## Практическая работа № 4. Расчет электрофильтра

### *Цель работы*

Приобретение знаний и навыков по расчету электрофильтров.

*Рекомендуемая литература:* [3, 4, 5].

### *Задание*

1. Изучить принцип работы электрофильтра.
2. Изучить классификацию электрофильтров.
3. Рассчитать параметры электрофильтров.

### *Теоретическая часть*

Электрическая фильтрация основана на зарядке взвешенных частиц и осаждение заряженных частиц на осадительных электродах под действием электрических сил. Газ, содержащий взвешенные частицы, проходит через систему, состоящую из заземленных осадительных электродов и размещенных на некотором расстоянии коронирующих электродов, к которым подводится выпрямленный электрический ток высокого напряжения (рис. 4.1). При достаточно большом напряжении, приложенном к электродам, у поверхности коронирующего электрода возникает интенсивная ударная ионизация газа, сопровождающаяся возникновением коронного разряда (короны). Коронный разряд – это явление ударной ионизации газа под действием движущихся электронов или ионов вблизи коронирующего электрода.

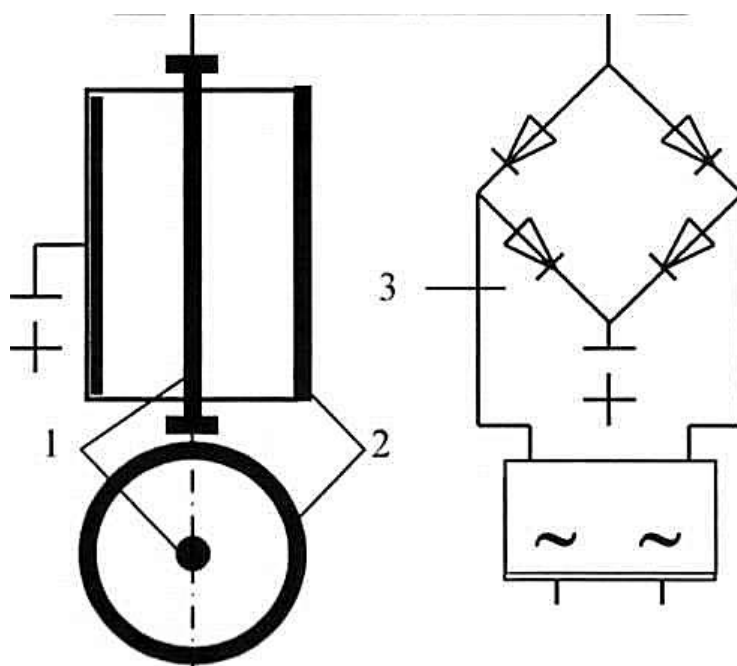


Рисунок 4.1 – Схема трубчатого электрофильтра



Сила тока зависит от числа ионов и напряжения между электродами. На рисунке 4.2 показана ВАХ (вольтамперная характеристика) электрофилтра. Сила тока растет с повышением напряжения до тех пор, пока все ионы не вовлечутся в движение. После этого наступает насыщение, т. е. все ионы вовлечены в движение, и повышение напряжения не влияет на силу тока. При некотором критическом напряжении ( $U_{кр}$ ) ионы и электроны настолько ускоряются, что, сталкиваясь с молекулами газа, ионизируют, превращая в положительные ионы и электроны. Образовавшиеся ионы и электроны ускоряются электрическим полем и участвуют в ионизации молекул. Этот процесс называется ударной ионизацией газа. После этого происходит пробой газа. Взвешенные частицы, поступающие в зону между электродами, адсорбируют на своей поверхности ионы, приобретая электрический заряд. Заряженные частицы под действием электрического поля движутся в сторону электрода с зарядом противоположного знака и оседают на коронирующей 1 и осадительной 2 электродах (рис. 4.1). Электрофилтр питается от источника высокого напряжения 3 (20–90 кВ).

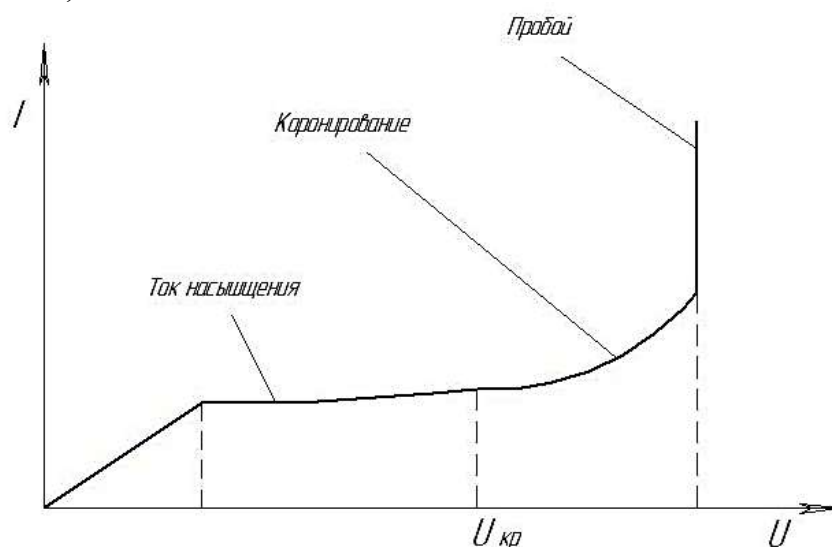


Рисунок 4.2 – Вольтамперная характеристика электрофилтра

Время зарядки частиц измеряется долями секунды. Скорость движения частиц зависит от напряженности электрического поля и диаметра частиц (табл. 4.1).

Электрофилтры бывают трубчатые и пластинчатые, которые могут быть горизонтальные и вертикальные, сухие и мокрые. В трубчатых электрофилтрах в качестве осадительных электродов используют трубы диаметром 0,25–0,30 м и длиной 3–5 м.

В пластинчатых электрофильтрах в качестве осадительных электродов используют пластинки плоских, с-образных и других форм. В качестве коронирующих электродов используют конструкции с нефиксированными и фиксированными точками разряда.

Таблица 4.1 – Скорость движения частиц к осадительному электроду,  $v_z$ , м/с

Диаметр частиц, мкм		0,4	1	2	10	30
E, кВ/м	150	0,012	0,013	0,015	0,075	0,1
	300	0,025	0,03	0,06	0,5	0,6

Важную роль в процессе осаждения пыли на электродах играет электрическое сопротивление слоя пыли. Пыли с удельным сопротивлением от  $10^6$  до  $10^{12}$  хорошо осаждаются и легко удаляются встряхиванием. Пыли меньшего сопротивления быстро отдают заряд и возвращаются в поток. Пыли большего сопротивления разряжаются медленно и препятствуют осаждению новых частиц.

Для обеспечения равномерности поступления газа на входе электрофильтра устанавливается распределительная решетка. Удаление слоя пыли осуществляется встряхивающим устройством. При этом пыль сыпается в бункер, расположенный под электродами. Интервал между встряхивающими импульсами обычно составляет около 3 мин.

Эффективность очистки запыленного газа с помощью электрофильтра определяют по формуле Дейча

$$\eta = 1 - e^{-v_z F_{уд}}, \quad (4.1)$$

где  $F_{уд} = F/Q$  – удельная поверхность осадительных электродов, с/м;

F – площадь осадительных электродов, м<sup>2</sup>;

Q – расход газа, м<sup>3</sup>/с.

Электрофильтры характеризуются следующими параметрами:

– активная зона – рабочая часть аппарата, образованная межэлектродными промежутками;

– активное сечение – свободное сечение активной зоны для прохода газа;

– активная высота поля – расстояние между коронирующими и осадительными электродами;

– активная длина поля – протяженность поля в направлении хода газа;

– площадь осаждения – суммарная поверхность осадительных электродов;

– активная длина коронирующих электродов – суммарная длина всех коронирующих электродов.

Для расчета электрофильтра необходимы следующие исходные данные:

– объемный расход газа  $Q$  и другие параметры очищаемых газов;

– концентрация и некоторые другие свойства пыли;

– требуемая степень очистки газа.

*Методика выполнения работы*

1. Выбирают конструктивный тип электрофильтра с учетом исходных условий (по варианту).

2. Рассчитывают требуемую площадь активного сечения электрофильтра

$$S = Q/w_r, \text{ м}^2, \quad (4.2)$$

где  $Q$  – объемный расход очищаемых газов,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;

$w_r$  – скорость газа,  $\text{м}/\text{с}$ .

3. Определяют напряженность электрического поля

$$E = U/H, \text{ В}/\text{м}, \quad (4.3)$$

где  $U$  – рабочее напряжение электрофильтра, В;

$H$  – расстояние между электродами, м.

Для трубчатых электрофильтров  $H = R$ ,

где  $R$  – радиус трубы.

4. Определяют скорость осаждения (дрейфа) частиц

$$w_0 = \frac{\varepsilon_0 * \varepsilon * d * E^2}{(\varepsilon + 2) * \mu}, \quad (4.4)$$

где  $\varepsilon_0 = 8,85 * 10^{-12} \text{ Ф}/\text{м}$ ;

$\varepsilon$  – относительная диэлектрическая проницаемость вещества частиц;

$\mu$  – динамическая вязкость газа,  $\text{Па} * \text{с}$ .

5. Рассчитывают требуемую активную длину электрофильтра

$$L = \frac{R - w_r}{2 * w_0} * \ln \frac{1}{1 - \eta}, \text{ м (трубчатый электрофильтр)}, \quad (4.5)$$

$$L = \frac{H - w_r}{w_0} * \ln \frac{1}{1 - \eta}, \text{ м (пластинчатый электрофильтр)}, \quad (4.6)$$

где  $\eta$  – требуемая эффективность очистки.

## 6. Ожидаемая эффективность очистки

$$\eta = 1 - \exp\left[-\frac{2 \cdot w_0 \cdot L}{R - w_r}\right] \quad (\text{трубчатый электрофильтр}), \quad (4.7)$$

$$\eta = 1 - \exp\left[-\frac{w_0 \cdot L}{H - w_r}\right] \quad (\text{пластинчатый электрофильтр}). \quad (4.8)$$

### Исходные данные для выполнения работы

Исходные данные для выполнения практической работы представлены в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Исходные данные для выполнения практической работы

Номер вар.	Тип электрофильтра	H, R мм	U, кВ	Q, м <sup>3</sup> /с	w <sub>r</sub> , м/с	μ, ю <sup>-6</sup> Па*с	d, мкм	ε	η
1, 10	УГ (П)	137,5	35	150	0,7	22,2	30	4	0,98
2, 11	ЭГА (П)	150	40	200	1,5	20,1	10	7,5	0,95
3, 12	ЭГТ (П)	130	30	40	0,9	18,8	2	5	0,9
4, 13	УВ (П)	137,5	35	60	1,2	17,5	1	15	0,88
5, 14	СПМ-8	130	30	7	0,8	19,0	0,4	18	0,85
6, 15	ГМЦ-20-2 (П)	137,5	35	25	1,2	23,0	2	2,2	0,9
7, 16	ДМ-316 (Тр)	115	25	20	1,5	20,0	30	4	0,98
8, 17	ШМК-4,5 (Тр)	110	25	5	1,0	17,0	2	5	0,95
9, 18	КТ-9 (Тр)	120	25	8	1,1	18,0	1	15	0,95

Примечание: А – модифицированный; В – вертикальный;  
 Г – горизонтальный; Д – доменный; К – кислотный; М – мокрый;  
 П – пластинчатый; С – сажевый; Т – высокотемпературный;  
 Тр – трубчатый; У – унифицированный; Ц – цилиндрический корпус;  
 Ш – шестигранные электроды; Э – электрофильтр.

### Контрольные вопросы

1. Принцип работы электрофильтра.
2. Вольтамперная характеристика электрофильтра.
3. Классификация электрофильтров.
4. Параметры электрофильтров.

## Практическая работа № 5. Химические методы очистки сточных вод. Нейтрализация, хлорирование и озонирование

### *Цель работы*

Практическое изучение методов нейтрализации кислых сточных вод и хлорирование.

*Рекомендуемая литература:* [2].

### *Задание*

1. Изучить методы очистки сточных вод от ионов металлов.
2. Изучить способы нейтрализации сточных вод.
3. Изучить метод хлорирования.

### *Теоретическая часть*

К химическим методам очистки сточных вод относятся процесс нейтрализации кислых и щелочных стоков, хлорирование и озонирование.

Нейтрализации подвергаются сточные воды, содержащие кислоты, щелочи и соли тяжелых металлов. Способы нейтрализации следующие:

- взаимная нейтрализация кислых и щелочных сточных вод;
- нейтрализация реагентами (растворы кислот, известь, сода);
- фильтрация через нейтрализующий материал (известь  $\text{CaO}$ , мел  $\text{CaCO}_3$ , магнезит  $\text{MgCO}_3$ , доломит  $\text{CaCO}_3\text{-MgCO}_3$ ).

При наличии на предприятии только кислых или только щелочных сточных вод их нейтрализацию проводят реагентами. Например, для нейтрализации серной кислоты  $\text{H}_2\text{SO}_4$  применяют гашеную известь  $\text{Ca(OH)}_2$ , в результате чего образуется сульфат кальция (гипс)  $\text{CaSO}_4$  и вода  $\text{H}_2\text{O}$ :  $\text{H}_2\text{SO}_4 + \text{Ca(OH)}_2 = \text{CaSO}_4 + \text{H}_2\text{O}$ .

Далее происходит кристаллизация в виде  $\text{CaSO}_4 - \text{H}_2\text{O}$  и при достаточных концентрациях выпадает осадок. Процесс нейтрализации проводится в нейтрализационных установках или станциях.

Расход реагентов определяется по формуле

$$G = k \frac{100}{B} V (qc + q_1 c_1 + q_2 c_2 + \dots + q_n c_n), \text{ кг}, \quad (5.1)$$

где  $k$  – коэффициент запаса;

$B$  – количество активной части реагента, %;

$V$  – объем сточной воды,  $\text{м}^3$ ;

$c$  – концентрация кислоты (щелочи) в сточной воде,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;

$q$  – удельный расход реагента для нейтрализации кислоты (щелочи),  $\text{кг}/\text{кг}$  (табл. 5.1);

$c_1, c_2, \dots, c_n$ , – концентрация металлов в сточной воде, кг/м<sup>3</sup>;

$q_1, q_2, \dots, q_n$ , – удельный расход реагента для нейтрализации металлов, кг/кг (табл. 5.2);

$n$  – число металлов в воде.

Таблица 5.1 – Удельный расход реагентов (щелочь/кислота) для нейтрализации 100 % кислот (щелочей)  $q$ , кг/кг

Щелочь / Кислота	Серная	Соляная	Азотная	Уксусная
Негашеная известь CaO	0,56/1,79	0,77/1,3	0,46/2,2	0,47/2,15
Гашеная известь Ca(OH) <sub>2</sub>	0,47/2,15	1,01/0,99	0,59/1,7	0,62/1,62
Сода кальцинир. Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	1,08/1,93	1,45/0,69	0,84/1,19	0,88/1,14
Сода каустическая NaOH	0,82/1,22	1,1/0,91	0,64/1,59	0,67/1,5
Аммиак NH <sub>4</sub>	0,35/2,88	0,47/2,12	0,27/3,71	-

Таблица 5.2 – Удельный расход реагентов для нейтрализации металлов  $q$ , кг/кг

Металл	Реагент	CaO	Ca(OH) <sub>2</sub>	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	NaOH
Цинк		0,85	1,13	1,6	1,22
Никель		0,95	1,26	1,8	1,36
Медь		0,88	1,16	1,66	1,26
Железо		1,00	1,32	1,9	1,43
Свинец		0,27	0,36	0,51	0,38

Хлорирование применяется для обеззараживания очищенных сточных вод от патогенных бактерий и вирусов и очистки сточных вод от фенолов, крезолов, цианидов и других веществ, а также для борьбы с биологическими обрастаниями на трубопроводах и сооружениях.

Для хлорирования сточных вод используется элементарный хлор, хлорная известь и другие сыпучие хлорсодержащие продукты (например, гипохлорит кальция Ca(OCl)<sub>2</sub> – белое кристаллическое вещество), растворы гипохлорита натрия и кальция, двуокись хлора. Хлор (элементарный) поступает на канализационные сооружения в жидком виде (температура кипения 34,5 °С). Хлорную известь поставляют в полиэтиленовых мешках массой 35 кг, в стальных барабанах, в деревянных или фанерных бочках вместимостью 100 и 275 л.

Расчетные дозы активного хлора следующие: после механической очистки –  $10 \text{ г/м}^3$ ; после полной искусственной биологической очистки –  $3 \text{ г/м}^3$ , после неполной –  $5 \text{ г/м}^3$ . Продолжительность контакта для свободного активного хлора составляет 0,5 ч, для связанного активного хлора – 1 ч.

Хлор растворяется в воде только в газообразном виде, поэтому жидкий хлор испаряют, превращая его в газ. Из испарителя газообразный хлор направляется для получения хлорной воды к водохлорному эжектору. Ввод хлорной воды осуществляют через диффузоры (титан, керамика или пластмасса), которые обеспечивают перемешивание хлорной воды с обрабатываемыми стоками и уменьшают проскоки хлора в атмосферу.

Озонирование применяется для очистки сточных вод от фенолов, нефтепродуктов, сероводорода, соединений мышьяка, ПАВ, цианидов, красителей, канцерогенных ароматических углеводов, пестицидов и др. Окислительно-восстановительный потенциал озона выше, чем у кислорода и хлора, вследствие чего он обладает более высоким бактерицидным и окислительным действием.

В обрабатываемую воду озон вводят различными способами:

- барботированием воздуха, содержащего озон, через слой воды через фильтровые пластины или пористые трубки;
- смешением воды с озоновоздушной смесью в эжекторах.

Предельно допустимая концентрация озона в рабочих помещениях составляет  $0,1 \text{ мг/м}^3$ . Оборудование для синтеза озона нужно устанавливать в изолированном помещении. Помещения синтеза озона должны быть оборудованы принудительной приточно-вытяжной и аварийной вентиляцией с шестикратным воздухообменом за час.

Озон получают в озонаторах из кислорода воздуха под действием электрического разряда. Воздух перед подачей в озонатор очищают от механических примесей и осушают до остаточного влагосодержания  $0,05 \text{ г/м}^3$ , для этого и используют адсорбционные или холодильные установки.

### *Методика выполнения работы*

Упражнение 1. Очистка кислых сточных вод от ионов металлов методом нейтрализации.

1. Освоение методики анализа кислых растворов на содержание ионов меди. В колбу помещают 5 мл раствора соли меди, разбавляют дистиллированной водой до 50 мл, прибавляют мурексид на кончике шпателя (или 3–4 капли раствора), титруют раствором трилона Б до

изменения цвета раствора, добавляют по каплям аммиак (1:1) до перехода окраски в зеленоватую и продолжают титровать раствором трилона Б до достижения сиреневой окраски раствора.

Расчет результатов анализа проводят по формуле

$$C = V \cdot 0.025M \cdot 1000/a, \text{ мг/л}, \quad (5.2)$$

где  $V$  – объем раствора трилона Б, израсходованный на титрование ионов металла, мл;

$a$  – объем аликвоты, взятой на титрование, мл;

$M$  – молярная масса металла.

2. Определение концентрации ионов меди в предложенной сточной воде  $C_0$ , мг/л.

3. Нейтрализация исследуемых сточных вод до  $pH = 3, 5, 6, 7, 8, 9$  раствором  $NaOH$  ( $Ca(OH)_2$ ). Для проведения нейтрализации отбирают 3–5 проб исследуемого раствора объемом по 50 мл с помощью мерного цилиндра в стаканы объемом не менее 150 мл. В них проводят нейтрализацию при перемешивании на магнитной мешалке и при постоянном замере значения  $pH$  на  $pH$ -метре. По достижении необходимой величины  $pH$  (или близкого к этому значению) растворы при перемешивании выдерживают 1–2 мин. Результаты измерений заносят в таблицу 5.3.

Таблица 5.3 – Расход реагентов на нейтрализацию сточной воды

Загрязняющее вещество	Концентрация, мг/л			Объем раствора щелочи, затраченного на достижение $pH$ , мл					
	ионов $Me$	кислоты	щелочи	3	5	6	7	8	9

4. Отделение осадка гидроксида меди после нейтрализации методом фильтрования.

5. Определение остаточной концентрации ионов  $Cu^{2+}$  в фильтрате с остаточной концентрацией  $C_1$ , мг/л и сравнение с ПДК.

6. Определение степени извлечения металла по формуле

$$\eta = (C_0/C_1) \times 100 \%. \quad (5.3)$$

7. Результаты занести в таблицу 5.4.

Таблица 5.4 – Определение степени извлечения ионов металла

Загрязняющее вещество	Исходная концентрация $C_0$ , мг/л	$pH$ растворов после нейтрализации	Остаточная концентрация $C_1$ , мг/л	Степень извлечения $\eta$ , %	ПДК металла, мг/л



8. Построение графической зависимости степени извлечения ионов металла от рН раствора.

9. Выводы.

Упражнение 2. Очистка сточных вод хлорированием.

1. Раствор хлорной извести (хлорную воду) разбавляют в десять раз, фильтруют и определяют его титр. Для этого прибавляют к 10 мл хлорной воды 1 г сухого иодида калия, подкисляют (10 мл 30 % раствора  $\text{CH}_3\text{COOH}$ ) и титруют выделившийся йод 0,05н раствором тиосульфата натрия в присутствии крахмала.

2. В 8–10 конических колб вместимостью 250 мл, снабженных притертыми пробками, наливают по 100 мл исследуемой воды, прибавляют раствор хлорной извести: в первую колбу – 1 мл, во вторую – 2 мл, далее – 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10 и т. д. (табл. 5.5). Колбы закрывают притертыми пробками, ставят в темное место и выдерживают 5 мин при температуре 16–20 °С. Параллельно с этими пробами ставят другие с такими же добавками раствора хлорной извести и выдерживают 1,5 ч.

3. В каждую колбу добавляют от 0,2 до 2 г сухого йодида калия в зависимости от прибавленного количества раствора хлорной извести (табл. 5.5), перемешивают до растворения, подкисляют (10 мл 30 % раствора  $\text{CH}_3\text{COOH}$ ) и титруют выделившийся йод раствором тиосульфата натрия. Когда цвет раствора станет слабо-желтым, прибавляют 1 мл раствора крахмала и продолжают титрование до исчезновения синей окраски.

Таблица 5.5 – Расход реагентов для расчета содержания остаточного хлора

Но- мер опыта	Количество добавленного хлора		Количество добавленного KI, г	Объем раствора $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ на титрование, мл	Остаточный хлор в 100 мл сточной воды, мг
	Объем рас- твор хлорной извести, мл	Содержание хлора, мг			
1	1		0,2		
2	2		0,4		
3	4		0,6		
4	5		0,8		
5	6		1,0		
6	7		1,2		
7	8		1,6		
8	10		2,0		

4. Остаточный хлор вычисляют по формуле

$$C_{\text{ост}} = (a \times K \times 1,78 \times 1000) / V, \text{ мг/л}, \quad (5.4)$$

где  $a$  – объем раствора тиосульфата натрия, израсходованного на титрование, мл;

$K$  – поправочный коэффициент для приведения концентрации раствора тиосульфата натрия точно к 0,05 н;

1,78 – число миллиграммов хлора, эквивалентное 1 мл 0,05 н раствора тиосульфата натрия;

$V$  – объем анализируемой сточной воды, мл.

5. Строят диаграммы зависимости количества остаточного хлора от количества добавленного хлора (рис. 5.1). Если на диаграмме нет перехода кривой линии в прямую, то недостаточно прибавлен хлор, если отсутствует участок ОА, то введено слишком большое количество хлора. Длина этого участка показывает содержание в воде веществ, быстро окисляющихся хлором. Когда исследуемая вода содержит аммиак, аммонийные соли или некоторые органические амины и когда определение остаточного хлора проводят йодометрическим методом, начальный отрезок кривой может получиться другой формы (рис. 5.2). Объясняется это тем, что прибавляемый хлор, вступая в реакцию с перечисленными соединениями, образует различные хлорамины, которые выделяют йод из йодида калия, как и прибавленный хлор. Дальнейшее прибавление хлора приводит к разрушению хлораминов (с образованием азота и хлороводородной кислоты), и кривая, достигнув некоторого максимума, снова снижается, подходя к нижней точке перегиба. Ввиду этого перегиб на кривой при анализе сточных вод можно не учитывать, в отличие от анализа питьевых вод, которые хлорируют меньшим количеством хлорирующего агента.

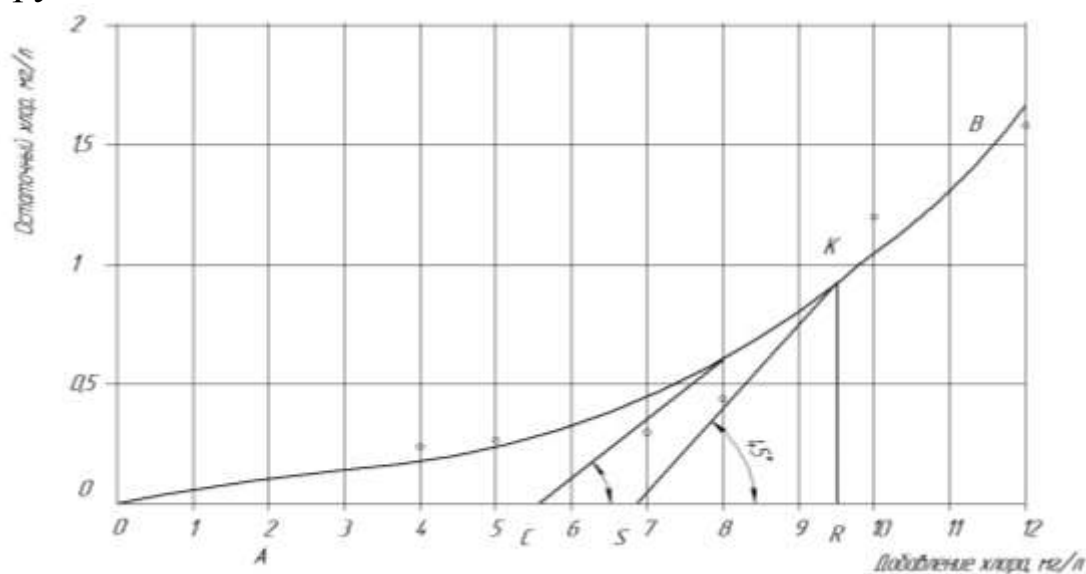


Рисунок 5.1 – Кривая определения хлороемкости

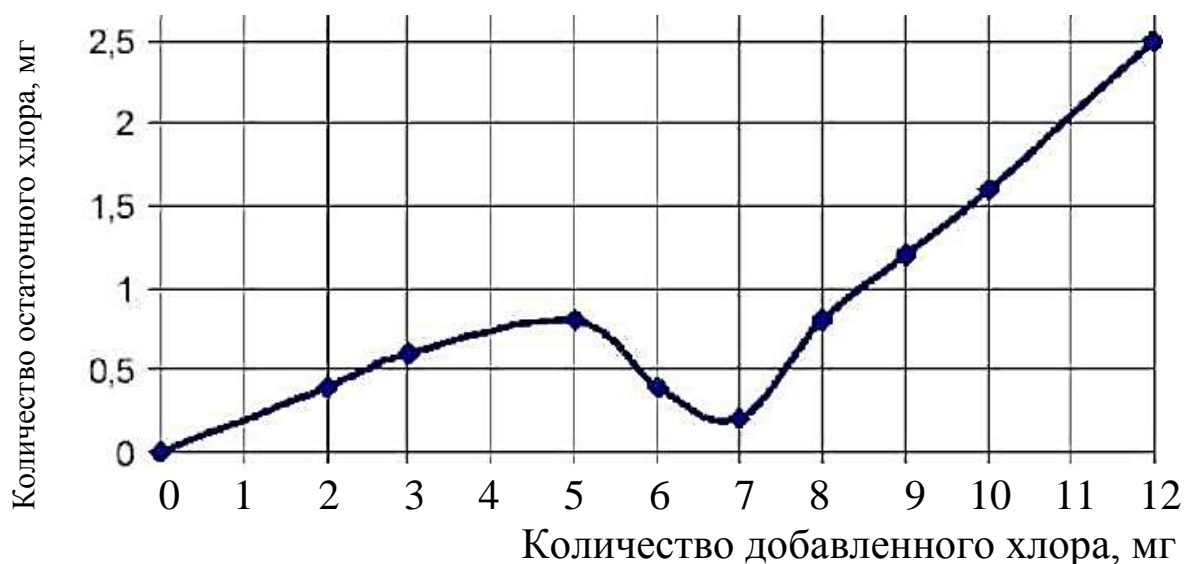


Рисунок 5.2 – Кривая йодометрического титрования активного хлора

Отрезок АК кривой характеризует процесс окисления и хлорирования веществ, медленно реагирующих с хлором, которые за время опыта не успевают прореагировать и остаются в растворе вместе с остаточным хлором. Отрезок KB (всегда прямолинейный) показывает отсутствие в растворе к концу опыта веществ, реагирующих с хлором.

6. После построения кривых по ним определяют:

a – длину отрезка OA – содержание быстро реагирующих с хлором веществ;

b – отрезок OC – количество хлора, израсходованное на окисление органических веществ и на хлорирование (действительную хлороемкость воды);

c – длину отрезка OS (OR-SR) – количество хлора, расходуемое на окисление, замещение хлором и на каталитическое разложение;

d – длину отрезка OR – прибавка хлора для полноты реакции его с окисляющими и хлорируемыми веществами в воде за время проведения опыта (5 мин или 1,5 ч);

f = c – b – количество хлора, прореагировавшего с водой с образованием кислорода за время проведения опыта: площадь треугольника AKC условно характеризует за медленность и неполноту происходящих реакций: чем больше площадь, тем медленнее или менее полно проходят реакции в растворе; угол p (наклона прямой CB к оси абсцисс) – характеризует каталитическое разложение хлорноватистой кислоты:  $2\text{HClO} = 2\text{HCl} + \text{O}_2$ .

## 7. Выводы.

### *Исходные данные для выполнения работы*

Исходные данные для выполнения упражнения 1. Очистка кислых сточных вод от ионов металлов методом нейтрализации.

Реактивы:

- раствор  $\text{CuSO}_4$  (1–2 г/л) +  $\text{H}_2\text{SO}_4$  (10 мл/л);
- 0,2 % смесь индикатора мурексид (пурпурат аммония) с твердым хлоридом натрия;
- 0,05 н раствор трилон-Б;
- водный раствор  $\text{NH}_4\text{OH}$  (1:1);
- 1н раствор  $\text{NaOH}$  или  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ .

Оборудование:

- фильтры – синяя лента;
- стакан – 150 мл (3 шт.);
- воронки – 3 шт.;
- пипетка – 5 мл;
- колбы – 150 мл (3 шт.);
- мерный цилиндр – 50 и 100 мл;
- мерные колбы – 100 мл (3 шт.);
- бюретка с 1 н  $\text{NaOH}$  ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ );
- микробюретка с раствором трилон-Б; магнитная мешалка;
- рН-метр.

Исходные данные для выполнения упражнения 2. Очистка сточных вод хлорированием.

Реактивы:

- насыщенный раствор  $\text{Ca}(\text{OCl})_2$ ;
- кристаллический  $\text{KI}$ ;
- 0,05 н раствор  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ ;
- 0,5 % раствор крахмала;
- 30 % раствор  $\text{CH}_3\text{COOH}$ .

Оборудование:

- пипетка – 5 и 10 мл;
- мерный цилиндр – 100 мл;
- конические колбы – 250 мл (10 шт.);
- бюретка на 25 мл и микробюретка на 1 мл для раствора тиосульфата натрия.

### *Контрольные вопросы*

1. Методы очистки сточных вод от ионов металлов.
2. Способы нейтрализации сточных вод.
3. Что такое рН?
4. Порядок работы на рН-метре.
5. Метод хлорирования.
6. Отличие процесса очистки питьевой воды активным хлором от очистки сточных вод (кривая хлорирования).

## **Практическая работа № 6. Адсорбционная очистка сточных вод от растворимых органических веществ. Расчет адсорбера**

### *Цель работы*

Изучение процесса адсорбции и приобретение навыков расчета адсорбционных устройств.

*Рекомендуемая литература:* [2].

### *Задание*

1. Изучить сущность методов абсорбции, адсорбции, хемосорбции и десорбции.
2. Рассчитать параметры абсорберов и адсорберов.

### *Теоретическая часть*

Сорбция – это процесс поглощения вещества из раствора (жидкого или газообразного) на поверхностях твердого (адсорбция) или в объеме жидкого (абсорбция) сорбента.

Адсорбция применяется для глубокой очистки сточных вод от растворенных органических веществ после биохимической очистки, либо самостоятельно, если концентрация загрязняющих веществ невелика и загрязняющие вещества являются очень токсичными.

Строгую проверку подлежат сточные воды, содержащие фенолы (растворимые органические вещества). ПДК фенола в воде водных объектов хозяйственно-питьевого назначения составляет 0,001 мг/л. Это связано с токсичностью и высокой восстановительной способностью фенолов. Существенным источником фенольных загрязнений являются производство фенолформальдегидных пластмасс и коксохимическое производство.

Методы очистки сточных вод от фенолов можно разделить на две группы: деструктивные и регенеративные. Деструктивными методами достигается окисление или разрушение фенолов (озонирование, хлорирование, сжигание).

Регенеративными методами фенолы извлекают из сточных вод для вторичного использования (экстракция, сорбция, ионный обмен). Методы второй группы применять, когда концентрация фенола превышает 1 г/л. Адсорбционный метод рекомендуется для очистки небольших по объему стоков с содержанием фенолов от 1,5–2,0 г/л.

Наиболее эффективными сорбентами являются активные угли различных марок. Растворенные органические вещества имеют размер частиц менее 10 А. Они заполняют объем микропор сорбента,

полная удельная вместимость ( $W_{\Sigma}$ , см<sup>3</sup>/г) которых соответствует поглощающей способности сорбента, поэтому объем микропор  $W_{01}$  является одной из важнейших характеристик и приводится в спецификациях соответствующих марок активных углей (табл. 6.1).

Таблица 6.1 – Свойства активных углей

Марка АУ	$W_{\Sigma}$ , см <sup>3</sup> /г	$W_{01}$ , см <sup>3</sup> /г	$W_{02}$ , см <sup>3</sup> /г	$B_{01}10^6$ , град <sup>-2</sup>	$B_{02}10^6$ , град <sup>-2</sup>
АГ-3	0,891	0,3	–	0,7–0,8	–
БАУ	1,5	0,22	–	0,55	–
АР-3	0,7	0,19	0,18	0,74	3,42
КАД йодный	1	0,23	0,13	0,7	3,1
КАД молотый	–	0,12	–	1,08	–
СКТ	0,98	0,5	–	0,83	–

Известную сорбционную активность проявляют и супермикропоры; в характеристике активных углей приводится и их объем  $W_{02}$ . Макропоры и переходные поры служат главным образом путями подвода сорбата к микропорам. Другой важной характеристикой активных углей является структурно-энергетическая константа  $B$ , град<sup>-2</sup>. Она может также приводиться для микропор и супермикропор ( $B_{01}$  и  $B_{02}$ ). Характеристиками активных углей являются также их насыпной удельный вес, г/см<sup>3</sup>; механическая прочность, %; диаметр зерен, мм.

Сорбцию можно проводить в статических и динамических условиях. Сорбция в статических условиях осуществляется путем интенсивного перемешивания обрабатываемой воды с сорбентом в течение определенного времени и последующего отделения сорбента от воды в результате отстаивания, фильтрования. При однократном введении сорбента в количестве  $m$  г на 1 л обрабатываемой воды исходным расчетным уравнением является уравнение баланса вещества

$$ma + QC_1 = QC_0, \quad (6.1)$$

где  $a$  – удельная сорбция;

$Q$  – количество обрабатываемых сточных вод;

$C_1$  – концентрация вещества, устанавливающаяся в воде после перемешивания воды и сорбента в течение времени  $\tau$ ;

$C_0$  – концентрация вещества в исходной воде.

Соотношение между  $a$  и  $C_1$  можно выразить

$$a = (Q(C_0 - C_1))/m. \quad (6.2)$$

Фактическое время перемешивания может быть принято значительно меньше  $\tau_{\text{равн}}$ , при котором достигается близкое к равновесному состояние. В этом случае соотношение между  $C_1$  и  $a$  будет выражено зависимостью

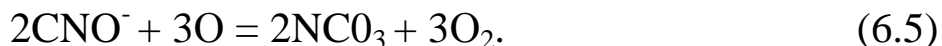
$$a = kC_1. \quad (6.3)$$

Изотермы адсорбции представляют собой зависимость величины сорбции ( $a$ ) целевого компонента от его концентрации ( $C_1$ ) в очищаемой среде в условиях равновесия. Наряду с изотермами адсорбции практический интерес представляют кинетические кривые адсорбции. Они выражают зависимость величины сорбции ( $a$ ) вещества каким-либо сорбентом или остаточной концентрации вещества ( $C_0 - C_1$ ) в очищаемой воде от времени  $t$ .

На участках нанесения гальванических покрытий образуется сточная вода, загрязненная кислотами, тяжелыми металлами и их солями и другими веществами, в том числе цианидами. Цианиды являются ядовитым веществом и сточную воду необходимо очистить перед сбросом. Наиболее эффективным способом является озонирование и адсорбция. При подаче озона в сточную воду цианит-ионы окисляются:



По мере окисления цианид-ионов в сточной воде появляются цианит-ионы  $\text{CNO}^-$ . Около 30 % цианит-ионов окисляются по схеме



Остальные цианитионы гидрализуются в сточной воде с образованием  $\text{NH}_3$  и окислением до  $\text{NO}_3$ . Для подачи озонозвоздушной смеси в адсорбер и ее равномерного распределения используют шамотно-силикатные пористые элементы в виде патронов с замкнутым дном (наружный диаметр 50 мм, внутренний – 30 мм, длина 230 мм, средний размер пор 0,1 мм).

#### *Методика выполнения работы*

Упражнение 1. Изучение процесса адсорбции.

1. Приготовить рабочий раствор. Для приготовления рабочего раствора разбавляют 10 мл основного раствора  $\text{C}_6\text{H}_5\text{OH}$  до 1 л свежeproкипяченной и охлажденной дистиллированной водой (1 мл рабочего раствора содержит 1 мкг фенола). Рабочий раствор нужно приготовить не ранее чем за два часа до начала анализа.

2. Приготовить 8 %-й водный раствор  $\text{K}_3[\text{Fe}(\text{CN})_6]$  (гексацианоферрат (III) калия). Растворяют 8 г  $\text{K}_3[\text{Fe}(\text{CN})_6]$  (ч.д.а.) в дистиллиро-



ванной воде и разбавляют до 100 мл. Раствор пригоден в течение недели.

3. Приготовить буферный раствор с  $pH = 10,0$ . Для приготовления растворяют 12,5 г хлорида аммония в 100 мл 25 %-го раствора аммиака.

4. Приготовить 2 %-й раствор 4-аминоантипирина. Пригоден в течение недели.

5. Построить калибровочный график для определения фенола в растворе колориметрическим методом с применением 4-аминоантипирина.

5.1. В мерные колбы на 100 мл помещают 10, 20, 30, 40, и 50 мл рабочего раствора, добавляют до половины колбы дистиллированную воду, 1 мл [буферного раствора, 2 мл раствора 4-аминоантипирина и 2 мл раствора гексацианоферрата калия (III)]. После каждого добавленного реактива раствор перемешивают. Добавляют дистиллированную воду до 100 мл.

5.2. Готовят раствор холостого опыта (в него добавляют все указанные реактивы, кроме фенола).

5.3. Через 15 мин измеряют оптическую плотность каждого раствора по отношению к раствору холостого опыта при  $\lambda = 540$  нм, кювета – 1 см. Результаты заносят в таблицу 6.2.

5.4. По полученным данным строят калибровочный график в координатах: оптическая плотность ( $D$ , %) – концентрация фенола ( $C$ , мг/л).

Таблица 6.2 – Определение оптической плотности растворов сточных вод

№ п/п	Объем рабочего раствора, мл	Содержание фенола в 100 мл раствора, мг	Концентрация фенола $C$ , мг/л	Оптическая плотность, $D$ , %
1	10	0,1	1	
2	20	0,2	2	
3	30	0,3	3	
4	40	0,4	4	
5	50	0,5	5	

6. Определяют содержание фенола в исследуемой воде.

6.1. Отбирают аликвотную часть сточной воды для двух параллельных проб, содержащую 0,1–0,5 мг фенола (не менее 10 и не более

90 мл), в мерные колбы на 100 мл и обрабатывают так же, как при построении калибровочного графика. Если величина оптической плотности не укладывается в калибровочный график, сточную воду следует разбавить в необходимое количество раз или построить новый калибровочный график с рабочим раствором.

6.2. Массовую концентрацию фенола ( $C_o$ , мг/л) рассчитывают по формуле

$$C_o = (100C_{гр})/V, \quad (6.6)$$

где 100 – объем мерной колбы, мл;

$V$  – объем воды, взятой на анализ (аликвота), мл;

$D$  – оптическая плотность,

$C_{гр}$  – концентрация фенола в сточной воде (по калибровочному графику), мг/л.

7. Провести сорбцию фенола из фенольной воды активными углями в статических условиях.

7.1. В пять конических колб на 200 мл помещают по 100 мл исследуемой фенольной воды и активного угля (марку указывает преподаватель) и в течение времени  $t = 3, 5, 10, 20, 30$  мин перемешивают с помощью вибрационной мешалки, затем отфильтровывают в конические колбы на 100 мл.

7.2. В каждом фильтрате определяют остаточную концентрацию фенола ( $C_1$ ), для этого берут аликвоту объемом 50 мл и готовят пробу для анализа, как при построении калибровочного графика. Результаты заносят в таблицу 6.3.

Таблица 6.3 – Определение сорбции фенола активными углями

Номер опыта	$\tau$ , мин	$V$ аликвоты	Оптическая плотность, $D$ , %	$C_1$ , мг/л	$C_0 - C_1$ , мг/л
1	3	10			
2	5	10			
3	10	10			
4	20	20			
5	30	20			

8. Построить график зависимости степени очистки от остаточной концентрации фенола и сделать выводы.

Упражнение 2. Очистка сточных вод от цианидов. Расчет адсорбера.

1. Определяют объем адсорбера

$$V = \frac{Q \cdot \tau \cdot k}{y \cdot n}, \text{ м}^3, \quad (6.7)$$

где  $Q$  – расход сточной воды,  $\text{м}^3/\text{ч}$ ;

$\tau$  – время цикла очистки (заполнения, обезвреживания, опорожнения);

$k$  – коэффициент запаса (1,15–1,2);

$y$  – коэффициент заполнения адсорбера (0,6–0,8);

$n$  – количество адсорберов (обычно 2).

Выбирают фактический объем  $V_n$  адсорбера по ряду номинальных внутренних объемов сосудов и аппаратов (ближайшее значение к расчетному) по таблице 6.4.

Таблица 6.4 – Ряд номинальных внутренних объемов сосудов и аппаратов  $V_n, \text{ м}^3$

0,010	0,100	0,32	1,00	3,2	10	32	100	320
0,016	0,125	0,40	1,25	4,0	–	40	125	400
0,025	0,160	0,50	1,60	5,0	16	50	160	500
0,040	0,200	0,63	2,00	6,3	20	63	200	–
0,063	0,250	0,80	2,50	8,0	25	80	250	–

2. Определяют высоту адсорбера

$$H = \frac{4 \cdot V_n}{\pi \cdot D^2}, \text{ м}, \quad (6.8)$$

где  $D$  – диаметр адсорбера, выбирается из конструктивных соображений (отношение высоты к диаметру  $x = H/D = 1,2 - 1,5$ ;  $D = (4V/x\pi)^{1/3}$ ).

3. Определяют расход озона, необходимого для окисления

$$Q_o = C_o Q, \text{ кг/с}, \quad (6.9)$$

где  $Q$  – расход сточной воды,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;

$C_o$  – необходимая концентрация озона в адсорбере,  $\text{кг}/\text{м}^3$ :

$$C_o = \Delta C_{\text{CN}^-} \cdot M_o / M_{\text{CN}}, \text{ кг}/\text{м}^3, \quad (6.10)$$

где  $M_o$  и  $M_{\text{CN}}$  молекулярные массы озона и цианида;

$\Delta C_{\text{CN}^-}$  – разность концентраций цианидов в сточной и очищенной воде. Обычно

$$\Delta C_{\text{CN}^-} = \Delta C_{\text{CN}} \cdot \text{ПДК}_{\text{CN}}. \quad (6.11)$$

4. Определяют количество аэрируемых элементов

$$n_3 = Q_{\text{ОВ}} / Q_3, \quad (6.12)$$

где  $Q_{\text{ОВ}}$  – максимальный расход озоновоздушной смеси

$$Q_{OB} = \frac{Q_0(273+t) \cdot P_0}{(273+t_0) \cdot P_a}, \text{ м}^3/\text{с}, \quad (6.13)$$

где  $t$  – температура воздуха на выходе теплообменника;

$P_a$  – давление на входе в адсорбер;

$t_0, P_0$  – при нормальных условиях:  $t_0 = 0^\circ$ ;  $P_0 = 0,1$  МПа;

$Q_0$  – допустимый расход воздуха через аэрируемый элемент:

$$Q_0 = K \cdot \Delta P \cdot h \cdot f, \text{ м}^3/\text{с}, \quad (6.14)$$

где  $K$  – коэффициент воздухопроницаемости элемента,  $\text{м}^3/\text{м}^2$ ;

$\Delta P$  – перепад давления на элементе, МПа;

$h$  – толщина элемента, м;

$f$  – площадь фильтрации одного элемента,  $\text{м}^2$ .

5. Определяют эффективность очистки

$$\eta = \frac{C_{CN} - \text{ПДК}_{CN}}{C_{CN}} \quad (6.15)$$

*Исходные данные для выполнения работы*

Реактивы:

–  $\text{C}_6\text{H}_5\text{OH}$ , растворы (1 мг фенола в 1 мл раствора);

– 8 %-й раствор  $\text{K}_3[\text{Fe}(\text{CN})_6]$  (гексацианоферрат (III) калия);

– буферный раствор с  $\text{pH} = 10,0$ ;

– 2 %-й раствор 4-аминоантипирина; набор активных углей.

Оборудование:

– колбы мерные – 100 мл (5 шт.);

– конические колбы 100 мл (5 шт.);

– пипетки – 1 мл, 2 мл (2 шт.);

– вибрационная мешалка;

– фотоэлектроколориметр КФК.

Исходные данные для выполнения практической работы представлены в таблице 6.5.

Таблица 6.5 – Исходные данные (варианты)

Номер вар.	$Q, \text{ м}^3/\text{ч}$	$C_{CN}, \text{ кг}/\text{м}^3$	$k$	$\tau, \text{ ч}$	$n$	$P_a, \text{ МПа}$	$Q_0, \text{ м}^3/\text{с}$
1, 10	6	0,02	1,15	0,60	1	0,15	0,0020
2, 11	8	0,03	1,16	0,65	1	0,16	0,0025
3, 12	10	0,04	1,17	0,70	2	0,17	0,0030
4, 13	12	0,05	1,18	0,75	2	0,18	0,0035
5, 14	14	0,06	1,19	0,80	2	0,19	0,0040
6, 15	16	0,07	1,20	0,85	2	0,18	0,0045
7, 16	18	0,08	1,15	0,90	2	0,17	0,0050
8, 17	20	0,09	1,16	0,95	2	0,16	0,0055
9, 18	22	0,01	1,17	1,00	2	0,15	0,0020

*Контрольные вопросы*

1. Сущность методов абсорбции, адсорбции, хемосорбции и десорбции.
2. Параметры абсорберов и адсорберов.
3. Сорбенты и требования к сорбентам.

## Практическая работа № 7. Экстракционный процесс очистки сточных вод. Расчет вертикального экстрактора

### *Цель работы*

Приобретение навыков расчета процессов и аппаратов для экстракционной очистки сточных вод.

*Рекомендуемая литература:* [2, 7].

### *Задание*

1. Изучить технологические процессы жидкостной экстракции.
2. Изучить классификацию экстракторов.

### *Теоретическая часть*

Экстракция – это избирательное извлечение компонента из жидкости (рафинада) с помощью жидкого растворителя (экстрагента). Фазу, которая обогащается веществом загрязнителя, называют экстрагентом – до контакта, и экстрактом – после контакта. Одним из условий процесса экстракции являются взаимная нерастворимость и достаточная разность плотностей фаз (рафинада и экстрагента). Жидкостная экстракция состоит из ряда технологических операций:

- контактирования очищаемой жидкости с экстрагентом;
- переноса компонента из одной фазы в другую;
- разделения фаз;
- регенерации экстрагента.

Экстракторы бывают горизонтальные и вертикальные, непрерывные и периодические, одноступенчатые и многоступенчатые, перекрестноточные и противоточные, с подводом механической энергии (для контакта фаз) и без подвода механической энергии и т. д.

Простейшим типом экстрактора является распылительная вертикальная колонна с непрерывным контактом фаз (рис. 7.1). В полуую вертикальную цилиндрическую колонну сверху заполняется сточная вода, снизу с помощью диспергатора распыляется (в виде капель) экстрагент, плотность которого меньше плотности воды. Противоточное движение фаз обеспечивается силой тяжести, т. е. различием плотности фаз (движущая сила). Образовавшиеся капли проходят рабочую зону, извлекают загрязняющее вещество и собираются в верхнем отстойнике.

Вывод легкой фазы из верхней отстойной зоны не вызывает затруднений, избыток жидкости сливается через патрубок. Вывод тяжелой фазы требует специальной регулировки, в противном случае с

нижней части может вылиться вся жидкость. Наиболее простым устройством является флорентийский сосуд, принцип работы, которого основан на уравнивании столбов жидкостей (сообщающиеся сосуды), выводимых потоками легкой и тяжелой фаз.

Требования к экстрагенту:

- минимальная взаимная растворимость с рафинадом;
- высокая избирательность;
- высокий коэффициент распределения и большая емкость;
- достаточное отличие плотности по сравнению с рафинадом;
- доступность, дешевизна, легкость регенерации;
- нетоксичность, взрывобезопасность, минимальные коррозионные действия.

Экстракция является эффективной при высоком содержании в производственных сточных водах растворенных органических веществ, представляющих техническую ценность. Наиболее широко применяется для очистки сточных вод предприятий по термической обработке твердых топлив (углей, сланцев, торфа), содержащих значительное количество фенолов.

*Методика выполнения работы*

#### 1. Фактор экстракции

$$\Psi = \frac{C_{\text{вх}}}{C_{\text{вых}}} - 1, \quad (7.1)$$

где  $C_{\text{вх}}$  и  $C_{\text{вых}}$  – входная и требуемая выходная (ПДК) концентрация загрязняющего вещества в сточной воде.

#### 2. Объемный расход экстрагента

$$Q_{\text{э}} = \frac{\psi}{m} Q_{\text{св}}, \text{ м}^3/\text{ч}, \quad (7.2)$$

где  $Q_{\text{св}}$  – расход сточной воды,  $\text{м}^3/\text{ч}$ ;

$m$  – коэффициент распределения.

3. Концентрация извлеченного вещества в экстракте (при исходном чистом экстрагенте)

$$C_{\text{э}} = \frac{m * C_{\text{вх}}}{1 + \psi}, \text{ мг/л}. \quad (7.3)$$

#### 4. Требуемая степень экстракции

$$\eta = \frac{\psi}{1 + \psi} = \frac{m * Q_{\text{э}}}{Q_{\text{св}} + m * Q_{\text{э}}}. \quad (7.4)$$

#### 5. Поперечное сечение аппарата

$$S = \frac{Q_{\text{св}} + Q_{\text{э}}}{w}, \text{ м}^2, \quad (7.5)$$

где  $Q_{\text{св}}, Q_{\text{э}}$  – расход сточной воды и экстрагента,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;

$w$  – скорость потока, м/с.

В расчетах  $w = 0,02$  м/с.

6. Диаметр колонны

$$D = \sqrt{4S/\pi}, \text{ м} \quad (7.6)$$

7. Высота колонны

$$H = (5/7)D, \text{ м.} \quad (7.7)$$

8. Высота вывода ТФ (из уравнения сообщающихся сосудов)

$$h = \frac{\rho_{\text{Л}}}{\rho_{\text{Т}}} h_{\text{Л}} + h_{\text{Т}}, \text{ м,} \quad (7.8)$$

где  $\rho_{\text{Л}}$  и  $\rho_{\text{Т}}$  – плотности ЛФ и ТФ (воды),  $\rho_{\text{Т}}=1\ 000$  кг/м<sup>3</sup>;

$h_{\text{Л}}$  и  $h_{\text{Т}}$  – высоты ЛФ и ТФ (рис. 7.1).

Принимая, что  $H = h_{\text{Л}} + h_{\text{Т}}$ , можно задать  $h_{\text{Л}}$  или  $h_{\text{Т}}$  (например,  $h_{\text{Л}} = H/7$ ) и рассчитать высоту вывода ТФ.

*Исходные данные для выполнения работы*

Исходные данные для выполнения практической работы представлены в таблице 7.1.

Таблица 7.1 – Исходные данные (варианты)

Номер вар.	Загрязняющее вещество	Экстрагент	$\rho_{\text{Л}},$ кг/м <sup>3</sup>	m	$Q_{\text{св}},$ м <sup>3</sup> /ч	$C_{\text{вк}},$ мг/м <sup>3</sup>	$C_{\text{вык}},$ мг/м <sup>3</sup>
1, 10	Анилин	Толуол	867	19	70	2,2	0,1
2, 11	Бензойная кислота	Толуол	867	12	60	12	0,5
3, 12	Муравьиный альдегид	Амиловый спирт	814	3	50	15	0,6
4, 13	Пикриновая кислота	Бензол	879	5	90	13	0,5
5, 14	Пиридин	Толуол	867	9	100	5	0,2
6, 15	Салициловая кислота	Ацетон	790	126	110	10	0,4
7, 16	Толуидин	Бензол	879	60	80	14	0,5
8, 17	Фенол	Толуол	867	9	130	2	0,1
9, 18	Хлоруксусная кислота	Амиловый спирт	814	3,6	120	9	0,3

*Контрольные вопросы*

1. Что такое экстракция?
2. Технологические процессы жидкостной экстракции.
3. Классификация экстракторов.
4. Требования к экстрагентам.



## Практическая работа № 8. Разделение «жидкость – твердое тело» центрифугированием. Технологический и конструктивный расчет центрифуг

### *Цель работы*

Приобретение навыков по очистке воды от твердых частиц методом центрифугирования, выбор и расчет центрифуг.

*Рекомендуемая литература:* [1, 4, 6, 7].

### *Задание*

1. Изучить центрифугирование.
2. Изучить классификацию и основные параметры центрифуг.
3. Изучить классификацию и основные параметры гидроциклонов.
4. Рассчитать силы, действующие на частицы при центрифугировании.

### *Теоретическая часть*

Центрифугирование – это процесс разделения неоднородных систем (суспензий, эмульсий, шламов и ряд других систем) под действием центробежных сил, создаваемых в результате вращения ротора с объектом. При этом на тела (частицы) действует центробежная сила

$$F_{ц} = m \frac{v^2}{R} = m\omega^2 R, \quad (8.1)$$

где  $m$  – масса частицы;

$v$  – линейная скорость частицы;

$\omega$  – угловая скорость вращения;

$R$  – радиус вращения.

Как видно из формулы, изменяя скорость и радиус, можно получить силу в сотни и тысячи раз больше гравитационной, что влияет на скорость осаждения, производительности и компактности аппарата. Центрифугирование суспензий осуществляется в центрифугах и гидроциклонах. Аппараты для разделения и концентрирования эмульсий также называются сепараторами. Центрифугирование растворов не применяется, так как центробежное поле, развиваемое в современных центрифугах, не позволяет преодолеть силы диффузии.

По значениям фактора разделения центрифуги подразделяют: на нормальные центрифуги ( $Fr < 4\ 000$ ) и суперцентрифуги ( $Fr > 4\ 000$ ). К настоящему времени максимальное значение фактора разделения промышленных центрифуг достигло значения 15 000, а небольших – 9 000. Фактор разделения центрифуги или центробежная критерия Фруда называется величина, показывающая, на сколько центробежная сила превышает силу гравитации

$$Fr = \omega^2 R / g, \quad (8.2)$$

где  $\omega$  – угловая скорость вращения ротора центрифуги, рад/с;

$R$  – характерный размер ротора (радиус), м.

Еще одной из основных характеристик центрифуг является индекс производительности  $\Sigma$  – площадь поверхности осаждения такого идеального гравитационного отстойника, который может быть заменен центрифугой, выполняющей его функции. Для цилиндрического ротора

$$\Sigma = 4\pi R^2 L \omega^2 / g, \text{ м}^2, \quad (8.3)$$

где  $L$  – длина (высота) ротора, м.

Важной характеристикой центрифуг является крупность разделения – наиболее крупные частицы дисперсной фазы, которые могут быть вынесены с фугатом (очищенной водой)

$$d_{кр} = \sqrt{\frac{18\mu Q}{\Sigma(\rho - \rho_{ж})g}}, \text{ м}, \quad (8.4)$$

где  $\mu$  – динамическая вязкость очищаемой жидкости, Па\*с;

$\rho$  и  $\rho_{ж}$  – плотность взвешенных частиц и жидкости, кг/м<sup>3</sup>.

Центрифуги подразделяются на горизонтальные (рис. 8.1, а) и вертикальные (рис. 8.1, б), производственные и лабораторные (рис. 8.2), непрерывные и периодические, осаждающие и осветляющие. По способу выгрузки осадка центрифуги подразделяются на ручной, шнековый (рис. 8.1, в), пульсирующий.

Гидроциклоны состоят из цилиндрической и конической частей, отличаются отсутствием движущихся частей (роторов). Вращение потока происходит из-за тангенциального расположения входного патрубка (подобно циклонам). Гидроциклоны подразделяются на открытые и напорные.

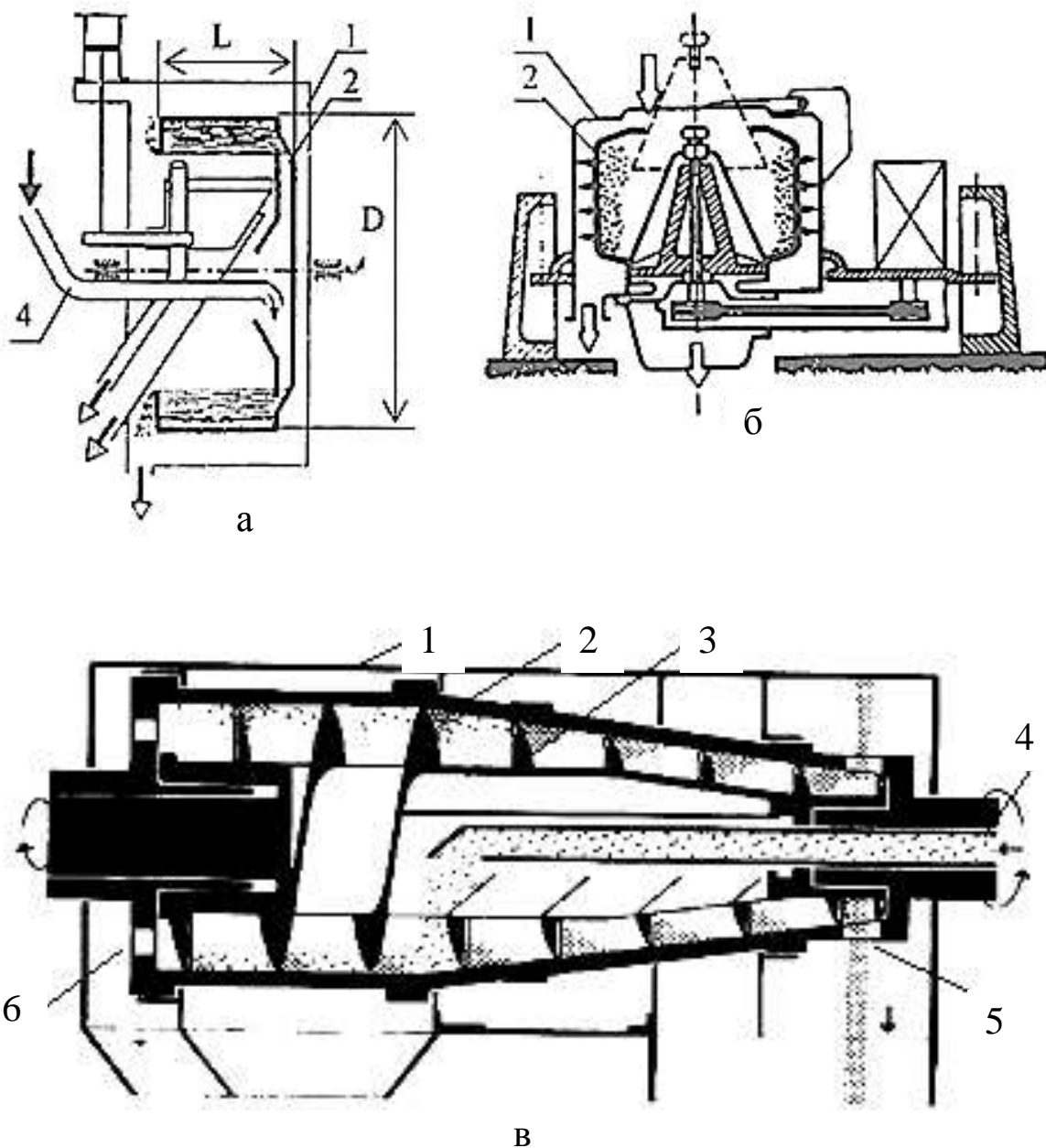


Рисунок 8.1 – Центрифуга: а – горизонтальная; б – вертикальная; в – центрифуга типа ОГШ:  
 1 – корпус; 2 – ротор; 3 – шнек; 4 – питающая труба; 5 – окно выгрузки осадка; 6 – окно отвода фугата

Диаметр и высота открытых гидроциклонов составляет 2–6 м, угол конической части –  $60^\circ$ . скорость осаждения частиц – достигает 0,02 м/с. Диаметр входного отверстия  $d = 0,1D$ . Открытые гидроциклоны отличаются большой производительностью и малой потерей напора (до 500 Па), производительность

$$Q = 3,4vD^2, \text{ м}^3/\text{с}, \quad (8.5)$$

где  $v$  – скорость воды на входе аппарата, м/с;

$D$  – диаметр цилиндрической части, м.

Диаметр цилиндрической части напорных гидроциклонов составляет 25–500 мм. Сточная вода подается под давлением 0,15–0,4 МПа. Производительность напорного гидроциклона

$$Q = kDd\sqrt{2g\Delta P}. \quad (8.6)$$

Для центрифугирования требуется создавать центробежное поле достаточно высокой напряженности, для чего необходим регулируемый режим высокочастотного вращения материалов в некоторой емкости (рис. 8.2). Вокруг оси 1 вращаются емкости 2. Суспензия вместе с ротором центрифуги совершает вращательное движение с угловой скоростью

$$\Omega = 2\pi n, \text{ рад/с}, \quad (8.7)$$

где  $n$  – частота вращения, об/с.

При этом на частицу массой  $m$  действует центробежная сила

$$F_n = m\omega^2 r, \text{ Н}, \quad (8.8)$$

где  $r$  – расстояние от оси вращения до частицы.

Удельная (на  $1 \text{ м}^3$ ) движущая сила процесса осаждения с учетом архимедовой силы запишется в виде

$$f = (p_m - p)\omega^2 r, \text{ Н/м}^3, \quad (8.9)$$

где  $p_m$  и  $p$  – соответственно плотности твердых частиц и жидкости,  $\text{кг/м}^3$ .

Поскольку за счет высокой частоты вращения центробежное ускорение  $\omega^2 r$  намного больше ускорения силы тяжести  $g$ , то в поле центробежных сил наблюдается существенное возрастание скорости осаждения и суспензия разделяется на осветленную жидкость 3 и осадок 4.

#### *Методика выполнения работы*

Упражнение 1. Изучение процесса центрифугирования суспензий.

#### Порядок проведения работы

1. Ознакомиться с принципом работы центрифуги (рис. 8.2) и фотоколориметра и подготовить приборы к работе. Фотоколориметр необходимо включить в сеть за 15 минут до начала измерений. Кюветное отделение держать открытым.

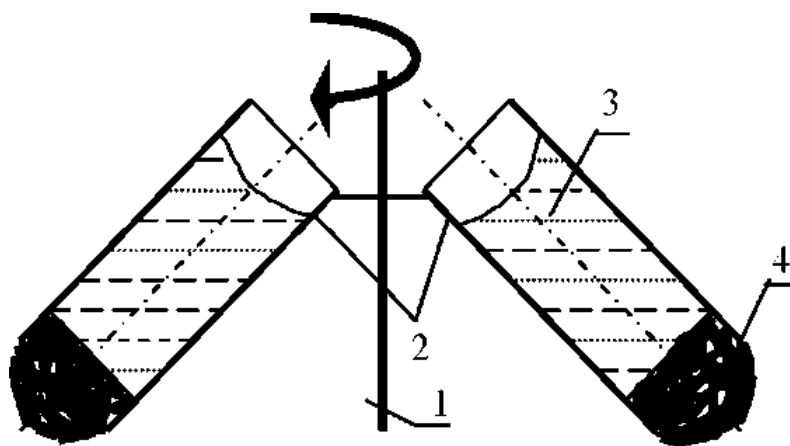


Рисунок 8.2 – Схема лабораторной центрифуги:  
 1 – ось вращения ротора; 2 – емкость; 3 – осветленная жидкость;  
 4 – осадок

2. Подготовить суспензию с различными концентрациями взвешенных частиц ( $c = 0; 25; 50; 75; 100$  мг/л) и соответственно мутностями.

3. Установить в фотоколориметре необходимую длину волны.

4. В кюветное отделение установить кюветы с контрольным (чистая вода) и исследуемым объектом.

5. Для контрольного объекта установить коэффициент пропускания  $T$ , равный 100 %, затем поворотом ручки кювету с контрольным объектом заменить кюветой с исследуемым объектом и снять показания.

6. Определить оптическую плотность  $D$  по формуле  $D = 2 - \lg T$  (или по показанию прибора).

7. Опыт проводить с очередными растворами. Данные занести в таблицу 8.1.

Таблица 8.1 – Данные для калибровочного графика

Показатель	1	2	3	4	5
$c$ , мг/л	0	250	500	750	1 000
$T$ , %					
$D$					

8. Построить калибровочный график, т.е. график зависимости оптической плотности или коэффициента пропускания от концентрации взвешенных веществ:  $D = f(c)$  или  $T = f(c)$ .

9. Измерить радиус  $r$  ротора центрифуги.

10. Поместить суспензию с известной концентрацией  $c_0$  взвешенных частиц (например,  $c_0 = 1\ 000$  мг/л) в емкость центрифуги с целью центрифугирования, закрыть крышку.

11. Установить (левой ручкой) таймер (1–2 мин) и установить (правой ручкой) минимальную частоту вращения ротора. После остановки прибора извлечь осветленную воду из центрифуги и произвести измерения оптической плотности фотоколориметром (п. 3–6).

12. По калибровочному графику определить концентрацию взвешенных частиц в осветленной воде  $c_1$ .

13. Повторить опыт 4–5 раз при различных частотах вращения ротора  $n$  и постоянном времени центрифугирования. Определить угловую скорость ротора  $\omega$  по формуле (8.7). Данные занести в таблицу 8.2.

14. Определить фактор разделения центрифуги по формуле (8.2).

15. Определить эффективность разделения (осветления)

$$\mu = \frac{c_0 - c_1}{c_0} * 100\%, \quad (8.10)$$

где  $c_0$  – концентрация взвешенных частиц в исходной суспензии (сточной воде);

$c_1$  – концентрация взвешенных частиц в осветленной воде.

16. Построить график зависимости эффективности разделения от частоты вращения ротора  $\eta = f(n)$ .

Таблица 8.2 – Результаты опытных и расчетных работ

№	$r$ , м	$c_0$ , мг/л	$n$ , об/мин	$\omega$ , рад/с	$c_1$ , мг/л	Fr	$\eta$
1							
2							
3							
4							
5							

Упражнение 2. Технологический и конструктивный расчет центрифуги.

В теоретическом анализе процессов центрифугирования следует отметить наличие белых пятен, относящихся к проблемам гидроди-

намики жидкостей в поле центробежных сил. При практических расчетах и анализе процессов центрифугирования приходится пользоваться упрощениями, схематизацией и допущениями, а также результатами широкомасштабного эксперимента.

1. Определяем рабочий объем ротора центрифуги

$$V = Q * \tau, \text{ м}^3, \quad (8.11)$$

где  $Q$  – расход сточной воды,  $\text{м}^3/\text{с}$ ,  $\tau$  – время центрифугирования, принимаем  $\tau = 120$  с.

2. Так как ротор обычно заполняют наполовину или на  $2/3$ , поэтому полный объем ротора

$$V = 1,5 * V_{\text{раб}}. \quad (8.12)$$

3. Если принять равным длину  $L$  и радиус  $R$  ротора, тогда можно пользоваться формулой

$$L = R = \sqrt[3]{\frac{V}{\pi}}, \text{ м}. \quad (8.13)$$

4. Определяем среднее расстояние от оси ротора до частиц

$$r_{\text{ср}} = (R + r_0)/2, \text{ м}, \quad (8.14)$$

где  $r_0$  – радиус свободной поверхности жидкости в роторе,

..... $r_0 = 0,866 R$ .

5. Определяем угловую скорость вращения ротора

$$\omega = \sqrt{\frac{Qg}{2\pi v_{\text{ос}} L r_{\text{ср}}^2}}, \text{ рад/с}, \quad (8.15)$$

где  $v_{\text{ос}}$  – скорость осаждения частиц в гравитационном поле

$$v_{\text{ос}} = \frac{(\rho_{\text{ч}} - \rho_{\text{ж}}) d_{\text{ч}}^2 g}{18\mu}, \text{ м/с}, \quad (8.16)$$

где  $d_{\text{ч}}$  – минимальный эквивалентный диаметр осаждаемых частиц, м;

$\rho_{\text{ч}}$  – кажущаяся плотность частиц,  $\text{кг/м}^3$ ;

$\rho_{\text{ж}}$  – плотность жидкости, примем  $1020 \text{ кг/м}^3$ ;

$g$  – ускорение свободного падения, равное  $9,81 \text{ м/с}^2$ ;

$\mu$  – динамическая вязкость жидкости, принимаем  $10^{-3} \text{ Па*с}$ .

6. Скорость осаждения частиц в центробежном поле

$$v_{\text{ц}} = d^2 * (\rho_{\text{ч}} - \rho_{\text{ж}}) * \omega^2 * r_{\text{ср}} / (18 * \mu). \quad (8.17)$$

7. Индекс производительности центрифуги

$$\Sigma = 4 * \pi * R^2 * L * \omega^2 / g, \text{ м}^2. \quad (8.18)$$

8. Производительность по осадку

$$Q_{\text{ос}} = c_0 Q / \rho_{\text{ч}}, \text{ м}^3/\text{ч} \text{ или } Q_{\text{ос}} = c_0 Q, \text{ кг/ч}, \quad (8.19)$$

где  $c_0$  – концентрация твердых частиц в сточной воде,  $\text{кг/м}^3$ .

9. Площадь поверхности барабана

$$S = S_1 + S_2 + S_3 = \pi R^2 + \pi(R^2 - r_0^2) + 2\pi RL = \pi(2R^2 - r_0^2 + 2R*L), \text{ м}^2, \quad (8.20)$$

где  $S_1$  и  $S_2$  – площади торцевых частей (сплошная сторона и сторона подвода воды и механизма съема осадка);

$S_3$  – площадь боковой части.

10. Объем материала барабана

$$V_m = S*h, \text{ м}^3, \quad (8.21)$$

где  $h$  – толщина материала (например, 5 мм).

11. Масса барабана

$$m_b = V_m*\rho_m, \text{ кг}, \quad (8.22)$$

где  $\rho_m$  – плотность материала барабана (обычно – сталь плотностью 7 900 кг/м<sup>3</sup>).

12. Масса суспензии

$$m_c = \rho_{ж} V_{\text{раб.}}, \text{ кг}. \quad (8.23)$$

13. Количество суспензии за единицу времени

$$G = Q\rho_{ж}, \text{ кг/с}. \quad (8.24)$$

14. Затраты энергии на центрифугирование или мощность электродвигателя на рабочем ходу

$$N_p = N_b + N_c + N_t = 0,005R^4L\rho\omega^3 + 0,5Gr_{\text{ср}}^2\omega^2 + (m_b + m_c)gkr_b\omega, \text{ Вт}, \quad (8.25)$$

где  $N_t$  – мощность для преодоления силы трения вала в подшипниках;

$N_c$  – мощность для закручивания поступающей суспензии;

$N_b$  – мощность для взаимодействия вращающегося ротора с воздухом;

$\rho = 1,29 \text{ кг/м}^3$  – плотность воздуха;

$k$  – коэффициент трения, принимаем  $k = 0,1$ ;

радиус вала –  $r_b = 0,025 - 0,05 \text{ м}$ .

15. Мощность для пуска

$$N_{\text{п}} = 2,5N_p, \text{ Вт}. \quad (8.26)$$

*Исходные данные для выполнения работы*

Задание. Выбрать и произвести технологический расчет горизонтальной центрифуги с ножевым съемом осадка (рис. 8.1, а) согласно исходным данным (табл. 8.3). Начертить схему центрифуги с размерами.



Таблица 8.3 – Исходные данные (варианты)

Номер вар.	Q, м <sup>3</sup> /ч	c <sub>0</sub> , мг/л	l <sub>1ч</sub> , мкм	ρ <sub>ч</sub> , кг/м <sup>3</sup>
1, 10	90	1 000	9	2 000
2, 11	80	950	8	1 950
3, 12	70	900	8	1 900
8, 13	60	850	7	1 850
5, 14	50	800	7	1 800
6, 15	40	750	6	1 750
7, 16	30	700	6	1 600
8, 17	20	650	5	1 550
9, 18	10	600	5	1 500

*Контрольные вопросы*

1. Что такое центрифугирование?
2. Классификация и основные параметры центрифуг.
3. Классификация и основные параметры гидроциклонов.
4. Силы, действующие на частицы при центрифугировании.
5. От чего зависят затраты энергии на центрифугирование?

## **Заключение**

В методических указаниях к выполнению практических работ по курсу «Методы фильтрации и очистки в пищевой промышленности» представлены работы с содержанием основных законов механической, мокрой, электрической и химической очистки жидкости или газа, а также с примерами технологического и конструктивного расчета отдельных видов очистного оборудования, применяемого в пищевой промышленности.

## Литература

1. Айнштейн, В.Г. Общий курс процессов и аппаратов химической технологии. Кн. 1 / В.Г. Айнштейн, М.К. Захаров, Г.А. Носов. – М.: Химия, 1999. – 888 с.
2. Белоусова, О.А. Промышленная экология / О.А. Белоусова, Л.В. Струкова, А.Н. Горшкова; УГТУ – УПИ. – Екатеринбург, 2006. – 38 с.
3. Иванова, Н.И. Инженерная экология и экологический менеджмент / Н.И. Иванова, И.М. Фаина. – М.: Логос, 2003. – 528 с.
4. Кутепова, А.М. Процессы и аппараты химической технологии. Т. 1, 2 / А.М. Кутепова. – М.: Логос, 2002. – 600 с.
5. Медведева, В.Т. Инженерная экология / В.Т. Медведева. – М.: Гардарики, 2002. – 688 с.
6. Процессы и аппараты защиты окружающей среды: практикум / С.А. Тагоев, И.Х. Мингазетдинов [и др.]. – Казань: Эко-центр, 2005. – 94 с.
7. Тимонин, А.С. Инженерно-экологический справочник. Т. 1–4 / А.С. Тимонин. – Калуга: Изд-во Н. Бочкаревой, 2003. – 230 с.

# **МЕТОДЫ ФИЛЬТРАЦИИ И ОЧИСТКИ В ПИЩЕВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ**

Методические указания  
к выполнению практических работ

*Тепляшин Василий Николаевич  
Невзоров Виктор Николаевич*

Электронное издание

*Редактор И.В. Пантелеева*

Подписано в свет 07.02.2020. Регистрационный номер 312  
Редакционно-издательский центр Красноярского государственного аграрного университета  
660017, Красноярск, ул. Ленина, 117  
e-mail: rio@kgau.ru