

Министерство сельского хозяйства РФ  
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования «Вологодская государственная молочнохозяйственная  
академия имени Н.В. Верещагина»

Инженерный факультет

Кафедра Технические системы в агробизнесе

## **ИНЖЕНЕРНАЯ ЭКОЛОГИЯ**

Методические указания к практическим занятиям для  
студентов по специальности 35.03.06 Агроинженерия

Вологда – Молочное  
2023

**УДК**  
**ББК**

**Автор**

ассистент кафедры Технические системы в агробизнесе

**Куренков Сергей Алексеевич**

**Рецензент**

кандидат технических наук, доцент кафедры Технические системы в агробизнесе

**Шушков Роман Анатольевич**

Методические указания по изучению дисциплины и самостоятельной работе студентов/ Сост. С. А. Куренков - Вологда – Молочное: ИЦ ВГМХА, 2023 –117 с.

Методические указания по изучению и самостоятельной работе студентов необходима для формирования, закрепления, развития практических навыков и компетенций в процессе выполнения определенных видов работ, связанных с будущей профессиональной деятельностью студентов по специальности по специальности 35.02.16 Агроинженерия направления «Технические системы в агробизнесе» и «Искусственный интеллект»

Методические указания рассмотрены и утверждены методической комиссией инженерного факультета (протокол № \_\_\_\_ от \_\_\_\_ 2023 года).

**УДК**  
**ББК**

© Куренков С.А.  
© ИЦ ВГМХА

## Введение

Современный научно-технический прогресс во всем мире непосредственным образом связан с глобальным использованием природных ресурсов. Развитие трудовых процессов, обуславливающих накопление материальных благ в обществе, имеет многоаспектный характер, который в экологическом смысле интегрируется по трем основным направлениям:

- формирование региональных природно-технических геосистем (на локальном уровне) и техносферы Земли (на планетарном уровне);
- исчерпание природных сырьевых ресурсов;
- возникновение экологического иммунодефицита планеты в результате глобальной антропогенной трансформации природной среды и подавления естественных механизмов саморегулирования биосферы.

По выражению академика В. И. Вернадского, «человек становится крупнейшей геологической силой, меняющей облик нашей планеты». В результате производственной деятельности людей возникли сложные структуры взаимодействия технических и природных комплексов, называемые природно-техническими геосистемами. Это специфические новообразования, распространение которых ныне во многом определяет сущность географической оболочки Земли: состояние природных комплексов, процессы распределения и перераспределения вещества и энергии, баланса вещества и трансформированных свойств океанов и континентов Земли, баланс между природообразующими сферами (геосферами, по В. И. Вернадскому): атмосферой, гидросферой, литосферой и биосферой.

Природно-технические геосистемы (ПТГ), формирующиеся в соответствии с законами развития и взаимодействия природы и общества, являются объектом сравнительно нового направления экологической науки – инженерной экологии.

Одной из основных задач инженерной экологии является создание таких методов и средств формирования и управления ПТГ, которые обеспечивали бы их функционирование, не нарушая механизмов саморегуляции объектов биосферы и естественного баланса природообразующих геосфер.

В учебном пособии рассматриваются теоретические вопросы и практические расчеты инженерной экологии.

# Раздел 1

## ЗАЩИТА АТМОСФЕРЫ

---

### *Практическая работа 1*

#### РАСЧЕТ ПРИЗЕМНЫХ КОНЦЕНТРАЦИЙ ЗАГРЯЗНЯЮЩИХ ВЕЩЕСТВ

##### 1 Цель работы

Освоить методики расчета максимальных приземных концентраций загрязняющих веществ  $C_m$  (мг/м<sup>3</sup>), выбрасываемых различными источниками загрязнения атмосферы, а также расстояния  $x_m$  (м) от источника выбросов, на котором приземная концентрация  $C_m$  при неблагоприятных метеорологических условиях достигает максимального значения и значений опасной скорости  $U_m$  (м/с) на уровне флюгера, при которой достигается наибольшее значение приземной концентрации вредных веществ  $C_m$ .

##### 2 Теоретические положения

Основным нормативным документом для расчета рассеивания в атмосфере вредных веществ, содержащихся в выбросах промышленных предприятий, является методика ОНД-86 (РД 52.04.212–86 Методика расчета концентраций в атмосферном воздухе загрязняющих веществ, содержащихся в выбросах предприятий).

##### *1. Определение максимальной приземной концентрации ( $C_m$ ) загрязняющего вещества от одиночного источника*

Расчет максимальной приземной концентрации от одного источника проводится по следующим формулам.

1) Для нагретых газовых выбросов:

$$C_m = \frac{AMF_{nm}\eta}{H^2 \sqrt[3]{V_1 \Delta T}} \quad (1)$$

где  $C_m$  – максимальная приземная концентрация примеси, мг/м<sup>3</sup>;

$A$  – коэффициент, зависящий от температурной стратификации атмосферы (от температурного градиента атмосферы) и определяющий условия вертикального и горизонтального рассеивания загрязняющих веществ;

$M$  – мощность выброса – масса примеси, выбрасываемой из источника в атмосферу, г/с;

$F$  – безразмерный коэффициент, учитывающий дисперсность выбрасываемой примеси (учитывает скорость оседания наиболее крупных фракций);

$M$  и  $n$  – безразмерные коэффициенты, учитывающие условия выхода газовой смеси из трубы (определяющие вертикальное и горизонтальное распределение соответственно);

$H$  – высота источника выброса над уровнем земли, м (для наземных источников при расчетах принимается  $H = 2$  м);

$\Delta T$  – разность температур выбрасываемой газовой смеси и окружающего атмосферного воздуха ( $T_{\text{г}} - T_{\text{атм}}$ ), °С;

$T_{\text{атм}}$  – температура окружающего атмосферного воздуха, равная средней максимальной температуре наружного воздуха наиболее жаркого месяца года. Для котельных, работающих по отопительному графику, допускается при расчетах принимать значения  $T_{\text{в}}$  равными средним температурам наружного воздуха за самый холодный месяц года;

$T_{\text{г}}$  – температура выбрасываемой в атмосферу газовой смеси, принимаемая по действующим для данного производства технологическим нормативам;

$\eta$  – безразмерный коэффициент, учитывающий влияние рельефа местности;

$V_1$  – объемная скорость выхода газовой смеси из устья источника, м<sup>3</sup>/с.

Объемная скорость выхода газовой смеси  $V_1$  определяется по следующей формуле:

$$V_1 = \frac{\pi D^2}{4} \omega_0, \quad (2)$$

где  $D$  – диаметр устья источника выброса, м;

$\omega_0$  – средняя скорость выхода газовой смеси из устья источника выброса, м/с.

### **Выбор и расчет коэффициентов**

Коэффициент  $A$  определяется в зависимости от географического положения источника:

$A = 250$  – для районов Средней Азии южнее 40° с. ш., Республики Бурятия и Забайкальского края;

$A = 200$  – для европейской территории России (ЕТР): для районов России южнее 50° с. ш., для остальных районов Нижнего Поволжья, Кавказа; для Молдавии; для азиатской территории России: для Дальнего Востока и остальной территории Сибири и Средней Азии; для Казахстана;

$A = 180$  – для европейской территории России и Урала от 50° до 52° с. ш., за исключением попадающих в эту зону перечисленных выше районов;

$A = 160$  – для европейской территории России и Урала севернее 52° с. ш. (за исключением Центра ЕТР), а также для Украины (для расположенных на Украине источников высотой менее 200 м в зоне от 50 до 52° с. ш. – 180°, а южнее 50° с. ш. – 200);

$A = 140$  – для Московской, Тульской, Рязанской, Владимирской, Калужской, Ивановской областей.

Коэффициент  $F$  принимают в следующих случаях:

$F = 1$  – для газообразных веществ и мелкодисперсных аэрозолей, в которых скорость оседания наиболее крупных фракций  $\leq 0,05$  м/с;

$F = 2$  – для крупнодисперсной пыли и золы при степени очистки  $\alpha > 90\%$ ;

$F = 2,5$  – при  $\alpha = 75-90\%$ ;

$F = 3$  – при отсутствии очистки или при  $\alpha < 75\%$ , а также для всех производств, у которых выбросы сопровождаются выделением конденсирующегося водяного пара.

Коэффициент  $\eta$  определяется следующим образом:

$\eta = 1$  в случае ровной или слабопересеченной местности с перепадом высот, не превышающим 50 м на 1 км;

в других случаях  $\eta$  определяется исходя из анализа картографического материала.

Коэффициент  $m$  определяется по формуле

$$m = \frac{1}{0,67 + 0,1\sqrt{f} + 0,34\sqrt[3]{f}} \text{ при } f < 100; \quad (3)$$

$$m = \frac{1,47}{\sqrt[3]{f}} \text{ при } f \geq 100, \quad (4)$$

при этом параметр  $f$  вычисляют как

$$f = 1000 \frac{\omega_0^2 D}{H^2 \Delta T}; \quad (5)$$

коэффициент  $n$  определяют исходя от величины параметра  $v_m$ :

$$v_m = 0,65 \sqrt[3]{\frac{V_1 \Delta T}{H}}; \text{ при } f < 100, \quad (6)$$

$n = 1$  при  $v_m \geq 2$ ;

$n = 0,532 v_m^2 - 2,13 v_m + 3,13$  при  $0,5 \leq v_m < 2$ ;

$n = 4,4 v_m$  при  $v_m < 0,5$ .

При приближенных расчетах значения  $m$  и  $n$  принимают равными 1.

2) для холодных газовых выбросов ( $\Delta T \approx 0$ ):

$$C_m = \frac{AMFn \eta D}{H^{4/3} \cdot 8V_1}. \quad (7)$$

Коэффициенты  $A$ ,  $F$ ,  $\eta$  принимают и рассчитывают, как для нагретых источников.

Коэффициент  $n$  определяется по тем же формулам, что и для нагретых выбросов, но вместо значения  $v_m$  используется  $v'_m$ , определяемое по формуле

$$v'_m = 1,3 \frac{\omega_0 D}{H}. \quad (8)$$

Учет комбинированного действия (суммации) вредных примесей:

$$M = M_1 + M_2 \cdot ПДК_1 + ПДК_2 + \dots + M_n \cdot ПДК_1 / ПДК_n,$$

где  $M$  – общая мощность выброса загрязняющих веществ, приведенная к веществу 1, г/с;

$M_1$  – мощность выброса 1-го вещества, г/с;

$M_2$  – мощность выброса 2-го вещества, г/с;

$M_n$  – мощность выброса  $n$ -го вещества, г/с;

$ПДК_1, ПДК_2, ПДК_n$  – максимально-разовая предельно допустимая концентрация для веществ соответственно 1, 2, ...,  $n$ , мг/м<sup>3</sup>.

Приведенная концентрация:

$$C = C_1 + C_2 \cdot ПДК_1 / ПДК_2 + \dots + C_n \cdot ПДК_1 / ПДК_n.$$

Фоновая концентрация:

$$C_{\phi} = C_{\phi 1} + C_{\phi 2} \cdot ПДК_1 / ПДК_2 + \dots + C_{\phi n} \cdot ПДК_1 / ПДК_n.$$

Эффектом суммированного вредного воздействия обладают многие сочетания вредных веществ, например:

- ацетон и фенол;
- озон, NO<sub>2</sub> и формальдегид;
- SO<sub>2</sub> + NO<sub>2</sub>;
- SO<sub>2</sub> + HF;
- SO<sub>2</sub> + аэрозоль серной кислоты;
- SO<sub>2</sub> + H<sub>2</sub>S;
- фурфурол, метанол, этанол;
- уксусные кислоты + уксусный ангидрид;
- бензол, ацетофенон.

## **2. Определение расстояния $X_m$ от источника выброса, на котором достигается величина максимальной приземной концентрации вредных веществ (по оси факела)**

Расстояние  $x_m$  (м) от источника выбросов, на котором приземная концентрация  $c$  (мг/м<sup>3</sup>) при неблагоприятных метеорологических условиях достигает максимального значения  $c_m$ , определяется по формуле

$$v'_m = 1,3 \frac{\omega_0 D}{H}. \quad (9)$$

Безразмерный коэффициент  $d$  вычисляется по следующим формулам:

а) для нагретых выбросов при  $f < 100$ :

$$d = 2,48(1 + 0,28\sqrt[3]{f}) \text{ при } v_m \leq 0,5; \quad (10)$$

$$d = 4,95v_m(1 + 0,28\sqrt[3]{f}) \text{ при } 0,5 < v_m \leq 2; \quad (11)$$

$$d = 7(1 + 0,28\sqrt[3]{f}) \text{ при } v_m > 2; \quad (12)$$

б) для холодных выбросов при  $f > 100$  или  $\Delta T \approx 0$ :

$$d = 5,7 \text{ при } v'_m \leq 0,5;$$

$$d = 11,4 \text{ при } 0,5 < v'_m \leq 2;$$

$$d = 16,1 \text{ при } v'_m > 2.$$

### 3. Определение опасной скорости ветра ( $u_m$ )

Значение опасной скорости  $u_m$  (м/с) на уровне флюгера (обычно 10 м от уровня земли), при которой достигается наибольшее значение приземной концентрации вредных веществ  $C_m$ , в случае нагретых и холодных выбросов определяется по формулам:

$$\begin{aligned} u_m &= 0,5 \text{ при } v_m \text{ (или } v'_m) \leq 0,5; \\ u_m &= v_m \text{ при } 0,5 < v_m \text{ (} v'_m) \leq 2; \\ u_m &= v_m(1 + 0,12\sqrt{f}) \text{ при } v_m > 2 \text{ – для нагретых выбросов;} \\ u_m &= 2,2v'_m \text{ при } v'_m > 2 \text{ – в случае холодных выбросов.} \end{aligned}$$

### 4. Расчет максимальной приземной концентрации вредных веществ в любой точке по оси факела

Максимальная концентрация  $C_{mx}$  (мг/м<sup>3</sup>), достигающаяся на любом расстоянии  $x$  от источника выброса на оси факела при скорости ветра  $u_{mx}$ , определяется по формуле

$$C_{mx} = S_1 \cdot C_i,$$

где безразмерный коэффициент  $S_1$  находится в зависимости от отношения  $x/x_m$  по формулам:

$$S_1 = 3(x/x_m)^4 - 8(x/x_m)^3 + 6(x/x_m)^2 \text{ при } x/x_m \leq 1 \quad (13)$$

$$S_1 = \frac{1,13}{0,13(x/x_m)^2 + 1} \text{ при } 1 < x/x_m \leq 8 \quad (14)$$

$$S_1 = \frac{x/x_m}{3,58(x/x_m)^2 - 35,2(x/x_m) + 120} \text{ при } x/x_m > 8; F \leq 1,5 \quad (15)$$

$$S_1 = \frac{1}{0,1(x/x_m)^2 + 2,47(x/x_m) - 17,8} \text{ при } x/x_m > 8; F > 1,5 \quad (16)$$

Аналогично определяется концентрация при других скоростях ветра:

$$C_{xu} = C_{mu} \cdot S_1. \quad (17)$$

### 5. Расчет нормативов предельно допустимых выбросов (ПДВ) загрязняющего вещества

Значения ПДВ (г/с) для одиночного источника с круглым устьем в случаях  $C_\phi < \text{ПДК}$  определяется по формулам:

а) для нагретых выбросов:

$$\text{ПДВ} = \frac{(\text{ПДВ} - C_\phi)H^2}{AFm\eta} \sqrt[3]{V_1 \Delta T}, \text{ г/с} \quad (18)$$

б) в случае холодных выбросов:

$$ПДВ = \frac{(ПДВ - C_{\phi})H^{4/3}}{AFmn\eta} \frac{8V_1}{D}, \text{ г/с} \quad (19)$$

в) для нескольких источников выброса:

$$ПДВ = \frac{(ПДВ - C_{\phi})H^2}{AFmn\eta} \sqrt[3]{V_c \Delta T}, \text{ г/с} \quad (20)$$

где  $V_c = V_1 + V_2 + \dots + V_n$

$H$  – высота источника выброса, м;

$V_1$  – объемный расход газовой смеси, м<sup>3</sup>/с;

$\Delta T$  – разность температур выбросов и атмосферного воздуха, °С;

$A$  – коэффициент температурной стратификации атмосферы, принимается в зависимости от региона;

$F$  – коэффициент, зависящий от скорости оседания вредных веществ в воздухе;

$m$  и  $n$  – коэффициенты условий выхода газовой смеси из устья источника;

$D$  – диаметр устья источника, м;

$V_c$  – суммарный объем газовой смеси, м<sup>3</sup>/с;

$V_1 + V_2 + \dots + V_n$  – объем газа, выбрасываемый каждым источником, м<sup>3</sup>/с.

### 3 Задания для самостоятельного решения

1. Используя данные, приведенные в табл. 1, определить максимальную приземную концентрацию загрязняющих веществ (диоксида серы и летучей золы) для котельной, работающей по отопительному графику.

2. Сравнить полученные данные с ПДК:

ПДК<sub>м.р.</sub> SO<sub>2</sub> = 0,5 мг/м<sup>3</sup>;

ПДК<sub>м.р.</sub> летучей золы 0,5 мг/м<sup>3</sup>.

3. Рассчитать опасную скорость ветра  $u_m$  и расстояние  $x$ , м, по оси факела выброса, при которых достигается максимальная приземная концентрация вредных веществ.

4. Определить приземную концентрацию загрязняющих веществ в атмосфере  $C_x$ , мг/м<sup>3</sup>, по оси факела выброса на различных расстояниях  $x$ , м, от источника загрязнения при опасной скорости ветра  $u_m$ , м/с.

Построить график распределения концентраций  $C_x = f(x)$ .

Для удобства расчеты концентраций можно свести в таблицу:

| $x, \text{ м}$ | $x / x_m$ | $S_l$ | $C_x, \text{ мг/м}^3$ |
|----------------|-----------|-------|-----------------------|
| 50             |           |       |                       |
| ...            |           |       |                       |
| 400            |           |       |                       |

Таблица 1 – Метеорологические данные и характеристики выброса ЗВ

| Показатели                                                           | Варианты        |                         |                |                   |                |
|----------------------------------------------------------------------|-----------------|-------------------------|----------------|-------------------|----------------|
|                                                                      | 1               | 2                       | 3              | 4                 | 5              |
| Коэффициент А, зависящий от стратификации атмосферы                  | Московская обл. | Урал, севернее 52° с.ш. | Иркутская обл. | Красноярский край | Дальний Восток |
| Коэффициент рельефа местности                                        | 1,0             | 1,0                     | 1,0            | 1,0               | 1,0            |
| Температура окружающего воздуха, °С                                  | 24,5            | 21,3                    | 21,3           | 25                | 25             |
| Средняя температура наиболее холодного месяца, °С                    | - 12            | - 50                    | - 50           | - 35              | - 10           |
| Высота дымовой трубы, м                                              | 120             | 100                     | 100            | 125               | 160            |
| Температура отходящих газов, °С                                      | 140             | 50                      | 50             | 140               | 80             |
| Диаметр устья дымовой трубы, м                                       | 7,2             | 2,1                     | 2,1            | 10,8              | 3,0            |
| Суммарный объем выбрасываемой газозоодушной смеси, м <sup>3</sup> /с | 11,48           | 1,183                   | 4,923          | 12                | 0,005          |
| Выход летучей золы М <sub>3</sub> при 98%-ной очистке, г/с           | 404,4           | 4,923                   | 6,8515         | 0,085             | 7,125          |
| Выход диоксида серы V <sub>SO<sub>2</sub></sub> , м/с                | 666,7           | 6,8515                  | 5              | 2,5               | 2              |
| Расстояние от населенного пункта, км                                 | 3               | 4                       | 0              | 0                 | 0              |
| Фоновая концентрация пыли                                            | 0               | 0                       | 0              | 0                 | 0              |
| Фоновая концентрация SO <sub>2</sub> , мг/м <sup>3</sup>             | 0               | 0,02                    | 0              | 0                 | 0              |

## *Практическая работа 2*

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ КЛАССИФИКАЦИОННОЙ ГРУППЫ ПЫЛИ ПО ДИСПЕРСНОСТИ.

#### ОПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТИ ВИТАНИЯ ЧАСТИЦ И РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ПЫЛЕОСАДОЧНОЙ КАМЕРЫ

### 1 Цель работы

Освоить методику оценки дисперсионного состава пыли и определить группу дисперсности пыли и скорости витания частиц пыли с помощью номограммы, расчет параметров пылеосадоочной камеры.

## 2 Теоретические положения

### 1. Определение классификационной группы пыли по дисперсности

Понятие «дисперсность пыли» означает всю совокупность размеров составляющих ее частиц, т. е. распределение массы пыли по размерам частиц (рис. 1).

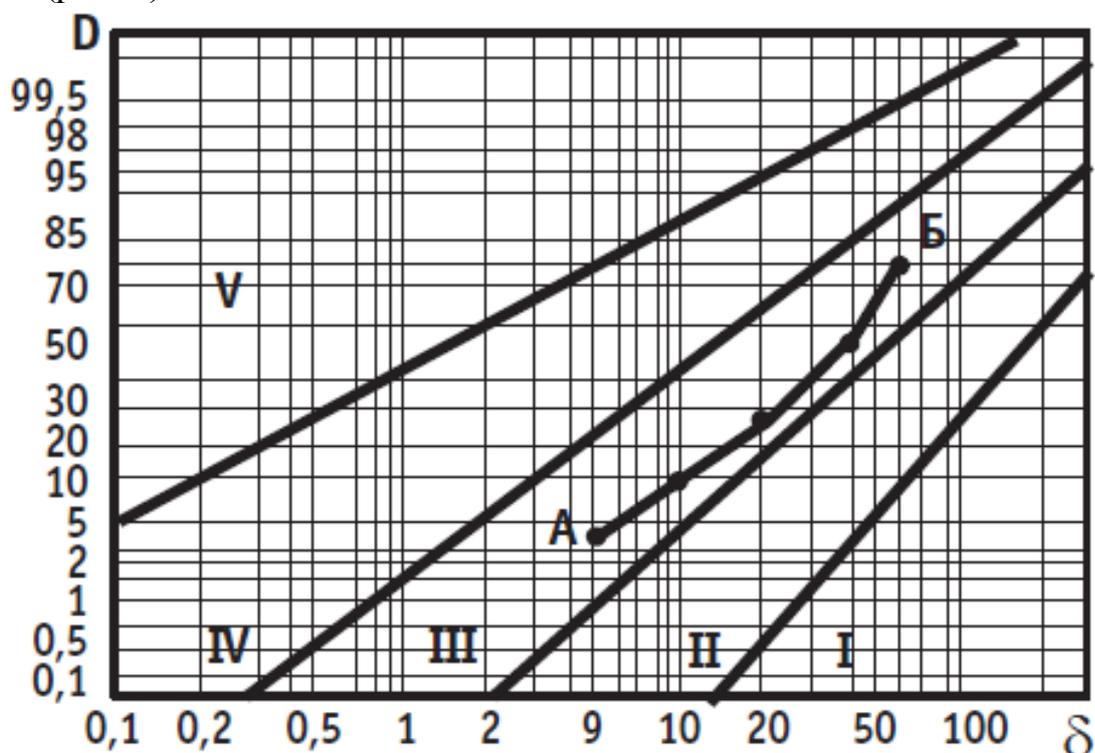


Рис. 1. Номограмма для определения группы дисперсности пыли:

$\sigma$  – размер частиц пыли, мкм;  $D$  – суммарная масса всех частиц пыли, имеющих размер менее данного  $\sigma$ , % (от общей массы частиц пыли);

I–V – зоны, характеризующие группы дисперсности пыли

По дисперсности различают следующие виды пыли:

- зона I – очень крупнодисперсная пыль с медианным размером диаметра более 150 мкм. Определяется при условии, что количество частиц крупнее или мельче указанного медианного размера в пыли составляет 50%;
- зона II – крупнодисперсная пыль диаметром от 40 до 150 мкм (например, кормовые дрожжи, моющие синтетические средства, мелкозернистый строительный песок для строительных растворов);
- зона III – среднедисперсная пыль диаметром от 10 до 40 мкм (например, белково-витаминные концентраты, цемент);
- зона IV – мелкодисперсная пыль от 1 до 10 мкм (например, сахарная пудра, крахмал, порошок какао, кварц пылевидный);
- зона V – очень мелкодисперсная пыль диаметром менее 1 мкм.

Группу дисперсности пыли определяют при помощи номограммы, представленной на рис. 1, на основании данных о фракционном составе пы-

лей, полученных опытным путем. Номограмма разбита на 5 зон (I–V), которые соответствуют классификационным группам пыли. Для определения группы заданной пыли на номограмму наносят точки, соответствующие содержанию отдельных фракций пыли.

Соединяя эти точки, получают прямую или ломаную линию, расположение которой в той или иной зоне номограммы обозначает принадлежность пыли к классификационной группе, соответствующей этой зоне.

Если линия дисперсности, нанесенная на номограмму, не укладывается в пределах одной зоны, пересекая границы зон, пыль следует относить к классификационной группе верхней зоны.

**Пример.** Определить классификационную группу пыли, если она имеет следующий дисперсный состав, определенный по «частным остаткам».

|                                                           |     |      |       |       |       |      |
|-----------------------------------------------------------|-----|------|-------|-------|-------|------|
| Размер частиц, мкм.....                                   | < 5 | 5-10 | 10-20 | 20-40 | 40-60 | > 60 |
| Содержание фракций по «частным остаткам», % по массе..... | 6   | 8    | 22    | 26    | 23    | 15   |

**Решение.** Находим дисперсный состав пыли по «полным проходам»:

|                                                          |     |     |     |     |     |
|----------------------------------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|
| Размер частиц, мкм.....                                  | < 5 | <10 | <20 | <40 | <60 |
| Содержание фракций по «полным проходам», % по массе..... | 6   | 14  | 36  | 62  | 85  |

Наносим точки, соответствующие содержанию фракций по «полным проходам», на номограмму (рис. 1) и, соединив их, получаем ломаную линию АБ.

Вся линия расположилась в зоне III, следовательно, данная пыль относится к классификационной группе III.

## 2. Определение скорости витания частиц

Скорость витания сферических частиц – это скорость вертикального потока воздуха, при которой частица находится во взвешенном состоянии («витают»), можно определить по графику (рис. 2) или рассчитать по формуле (1).

Для частиц диаметром до 50–60 мкм ( $0 < Re < 1$ ) скорость витания, м/с:

$$v_s = \frac{d^2 \gamma}{18 \mu_v}, \quad (1)$$

где  $d$  – диаметр пылевой частицы, м;

$\gamma$  – удельный вес частицы, кгс/м<sup>3</sup>;

$\mu_v$  – динамическая вязкость воздуха в данных условиях, кгс·с/м<sup>2</sup>.

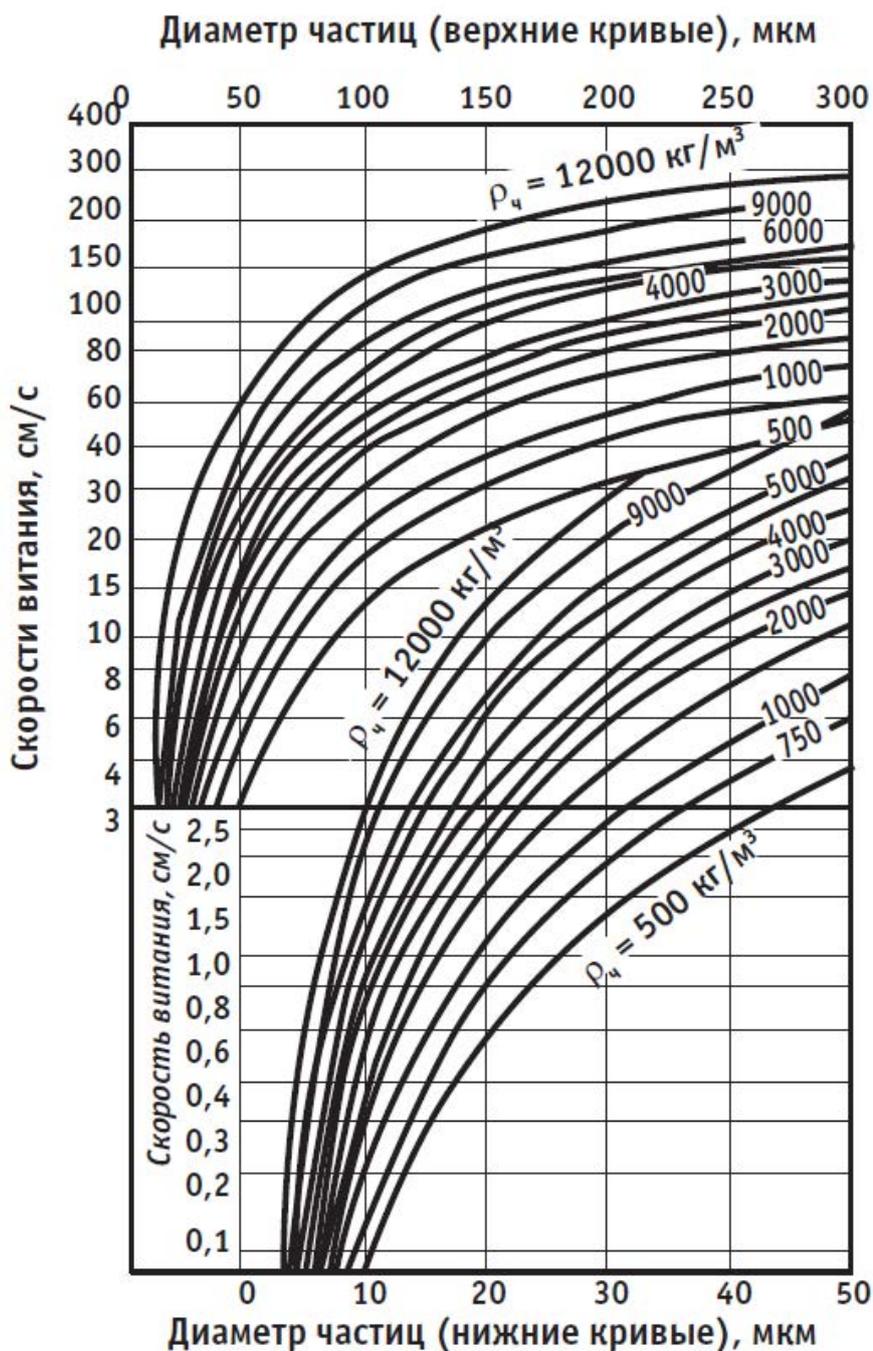


Рис. 2. График для определения скорости витания  $v_s$  частиц различного размера  $d$  и удельного веса  $\gamma$  при температуре воздуха 20°C

**Пример.** Определить, пользуясь графиком на рис. 2 и формулой (1), скорость витания частицы диаметром  $10 \text{ мкм} = 10 \cdot 10^{-6} \text{ м}$  при ее удельном весе  $\gamma = 2,5 \text{ г/см}^3$  и температуре воздуха 50°C.

**Решение.** По графику на рис. 2 скорость витания  $v_s = 0,76 \text{ см/с}$ . Для учета истинного значения вязкости воздуха  $\mu_v$  при  $t = 50^\circ\text{C}$  умножаем полученное значение на поправочный коэффициент  $K$ , определенный с помощью следующих данных (табл. 1):

Таблица 1

| Температура воздуха, °С                                                                         | -30  | -20  | -10  | 0    | 10   | 20   | 30   | 40   | 50   | 60   | 70   |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Динамическая вязкость воздуха при давлении 760 мм рт.ст. $10^{-6} \mu_B$ , кгс·с/м <sup>2</sup> | 1,56 | 1,61 | 1,66 | 1,71 | 1,76 | 1,81 | 1,86 | 1,91 | 1,95 | 2,00 | 2,04 |

Значение коэффициента  $K$  рассчитывается по формуле

$$K = \frac{\mu_{820}}{\mu_{820}} = \frac{1,81 \cdot 10^{-6}}{1,95 \cdot 10^{-6}} = 0,928, \quad (2)$$

и тогда

$$v_{s50} = 0,76 \cdot 0,928 = 0,705 \text{ см/с}. \quad (3)$$

По формуле (1) получаем

$$v_{s50} = \frac{(10 \cdot 10^{-6})^2 \cdot 2500}{18 \cdot 1,95 \cdot 10^{-6}} = 0,7 \cdot 10^{-2} \text{ м/с} = 0,7 \text{ см/с}. \quad (4)$$

### 3. Расчет параметров пылесадочной камеры

Расчет пылесадочных камер проводят в следующей последовательности. Сначала задаются минимальные размеры пылевых частиц, которые необходимо уловить в пылесадочной камере, и находится скорость их витания  $v_v$ , м/с, по номограмме (рис. 2).

Затем определяется площадь поперечного сечения пылесадочной камеры, м<sup>2</sup>

$$S = bh = Q/(3600v), \quad (5)$$

где  $b$ ,  $h$  – соответственно ширина и высота камеры, м;

$Q$  – объем загрязненного воздуха, проходящего через камеру, м<sup>3</sup>/ч;

$v$  – скорость движения воздуха в камере должна быть в пределах 0,2–0,5 м/с, выбирается из условий обеспечения ламинарного режима течения.

Задавая высоту камеры  $h$ , находят ее ширину  $b$ , м:

$$b = Sh. \quad (6)$$

Длина камеры, м:

$$l \geq hv/v_v. \quad (7)$$

**Пример расчета.** Рассчитать размеры пылеосадочной камеры для очистки воздуха, загрязненного пылью, проходящего через камеру объемом  $4500 \text{ м}^3/\text{ч}$ , плотность частиц которой  $700 \text{ кг}/\text{м}^3$ , а средний диаметр  $2 \cdot 10^{-5} \text{ м}$ . Температура удаляемого воздуха  $20^\circ\text{C}$ .

**Решение.** По номограмме (рис. 2) находится скорость витания частиц пыли:  $v_c = 0,8 \text{ м}/\text{с}$ . Если температура удаляемого воздуха отличается от  $20^\circ\text{C}$ , вводится поправка в соответствии с формулой (2).

Приняв скорость движения воздуха в пылеосадочной камере  $v = 0,5 \text{ м}/\text{с}$ , находится площадь ее поперечного сечения:

$$S = 4500 / (3600 \cdot 0,5) = 2,5 \text{ м}^2.$$

Задавая высоту камеры  $h = 2,5 \text{ м}$ , рассчитывается ее ширина:

$$b = S/h = 2,5/2,5 = 1 \text{ м}.$$

Минимальная длина камеры:

$$l = 2,5 \cdot 0,5 / 2,8 = 1,563 \text{ м}.$$

Приняв  $l = 1,6 \text{ м}$ , проверяется выполнение условия  $v < \frac{lv_c}{h}$ :

$$0,5 < \frac{1,6 \cdot 0,8}{2,5}, \text{ или } 0,5 < 0,512.$$

Условие выполняется, следовательно, размеры пылеосадочной камеры определены правильно.

### 3 Задания для самостоятельного решения

Задания выполняются в соответствии с вариантом (табл. 2).

#### **Задание 1.**

а) Определить группу дисперсности пыли при помощи номограммы (рис. 1).

б) Определить скорость витания частицы по номограмме, приведенной на рис. 2, с учетом поправки на температуру, и по формуле (1). Сравните полученные значения.

#### **Задание 2.**

Рассчитать параметры пылеосадочной камеры для условий задания 2.

Таблица 2 – Задания для самостоятельного решения

| Параметры |                                          | Номер варианта                                       |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
|-----------|------------------------------------------|------------------------------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
|           |                                          | 1                                                    | 2   | 3   | 4   | 5   | 6   | 7   | 8   | 9   | 10  |
| Задание 1 | Размер частиц, мкм                       | Содержание фракций по «частным остаткам», % по массе |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
|           | < 5                                      | 5                                                    | 6   | 5   | 8   | 6   | 7   | 5   | 10  | 4   | 8   |
|           | 5-10                                     | 9                                                    | 8   | 8   | 12  | 10  | 15  | 10  | 12  | 8   | 8   |
|           | 10-20                                    | 22                                                   | 25  | 22  | 20  | 15  | 18  | 25  | 20  | 17  | 20  |
|           | 20-40                                    | 26                                                   | 26  | 29  | 22  | 21  | 22  | 18  | 24  | 30  | 28  |
|           | 40-60                                    | 24                                                   | 20  | 20  | 22  | 23  | 25  | 18  | 16  | 17  | 20  |
|           | > 60                                     | 14                                                   | 15  | 15  | 16  | 15  | 13  | 24  | 21  | 24  | 16  |
| Задание 2 | Диаметр пылевой частицы, мкм             | 10                                                   | 15  | 10  | 15  | 10  | 20  | 10  | 20  | 15  | 10  |
|           | Удельный вес частицы, кгс/м <sup>3</sup> | 1,5                                                  | 2,5 | 3,8 | 1,2 | 2,0 | 4,0 | 0,9 | 1,0 | 1,5 | 2,5 |
|           | Температура воздуха, °С                  | 10                                                   | 20  | 30  | 50  | 70  | 40  | 60  | 20  | 50  | 30  |

### Практическая работа 3

#### ВЫБОР ЦИКЛОНА И ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ОЧИСТКИ ГАЗОВ В ЦИКЛОНЕ

##### 1 Цель работы

Освоить процедуру выбора типа и размера циклона для очистки выбросов от взвешенных частиц и определения гидравлического сопротивления циклона и эффективности очистки выбросов от пыли в циклоне.

##### 2 Теоретические положения

Циклоны являются одними из наиболее широко распространенных устройств пылеочистой техники благодаря простоте конструкции, малым габаритам и надежности в работе.

Принцип действия циклона основан на выделении частиц пыли из газового потока под воздействием центробежных сил, возникающих вследствие вращения потока в корпусе аппарата.

Наибольшее распространение в технике получили циклоны с изменением основного потока газа, называемые возвратно-поточными.

Расчет циклонов ведется методом последовательных приближений, при этом определяются тип и размер циклона, его гидравлическое сопротивление и эффективность очистки газа.

Расчет начинается с циклона, для которого диаметр частиц пыли должен быть ориентировочно больше удвоенного диаметра частиц, удаляемых циклоном с эффективностью 50% ( $d_M > 2d_{50}^f$ ). Медианный размер частиц  $d_M$

представляет такой размер, при котором количество частиц крупнее  $d_m$ , равно количеству частиц мельче  $d_m$ .

Задавшись типом циклона, определяется оптимальная скорость движения газа  $\omega_{оп}$  в сечении циклона диаметром  $D$  с учетом данных табл. 1.

Таблица 1 – Параметры, определяющие эффективность работы циклонов

| Параметр             | Тип циклона |        |       |       |           |          |           |
|----------------------|-------------|--------|-------|-------|-----------|----------|-----------|
|                      | ЦН-24       | ЦН-15У | ЦН-15 | ЦН-11 | СДК-ЦН-33 | СК-ЦН-34 | СК-ЦН-34м |
| $\omega_{оп}$        | 4,5         | 3,5    | 3,5   | 3,5   | 2,0       | 1,7      | 2,0       |
| $d_{50}^T$           | 8,5         | 6,0    | 4,5   | 3,65  | 2,31      | 1,95     | 1,3       |
| $lg \delta_{\eta}^T$ | 0,308       | 0,283  | 0,352 | 0,352 | 0,364     | 0,308    | 0,340     |

Примечания:  $\omega_{оп}$  – оптимальная скорость движения газа в циклоне, м/с;  $d_{50}^T$  – диаметр частиц удаляемых с эффективностью 50%, мкм;  $lg \delta_{\eta}^T$  – стандартное отклонение функции распределения парциальных коэффициентов очистки.

Диаметр циклона  $D$ , м, рассчитывается по формуле

$$D = \sqrt{4Q/(\pi\omega_{оп})}. \quad (1)$$

Для расчета расход газа  $Q$  принимается в м<sup>3</sup>/с. Полученное значение  $D$  следует округлять до ближайшего типового значения внутреннего диаметра циклона (табл. 2). Если диаметр циклона превышает его максимально допустимое значение, то необходимо применять два или более параллельно установленных циклона.

По диаметру циклона находят действительную скорость движения газа, м/с, в циклоне по следующей формуле:

$$\omega = 4Q/(\pi n D^2), \quad (2)$$

где  $n$  – число циклонов.

Действительная скорость в циклоне не должна отклоняться от оптимальной более чем на 15%.

Коэффициент гидравлического сопротивления одиночного циклона определяется по формуле

$$\xi = k_1 k_2 \xi_{500}, \quad (3)$$

где  $k_1$  – поправочный коэффициент, учитывающий диаметр циклона (табл. 2);

$k_2$  – поправочный коэффициент, учитывающий запыленность газа (табл. 3);

$\xi_{500}$  – коэффициент гидравлического сопротивления одиночного циклона диаметром 500 мм (табл. 4).

Значение гидравлического сопротивления циклона, Па, определяется по формуле

$$\Delta P = P_{вх} - P_{вых} = \xi \rho \omega^2 / 2, \quad (4)$$

где  $\rho$  – плотность газа в расчетном сечении аппарата;

$\omega$  – скорость газа в расчетном сечении аппарата.

Таблица 2 – Поправочные коэффициенты  $k_1$ , учитывающие диаметр циклона

| Тип циклона                    | Диаметр циклона $D$ , мм |      |      |      |     |
|--------------------------------|--------------------------|------|------|------|-----|
|                                | 150                      | 200  | 300  | 450  | 500 |
| ЦН-11                          | 0,94                     | 0,95 | 0,96 | 0,99 | 1,0 |
| ЦН-15, ЦН-24, ЦН-15У           | 0,85                     | 0,9  | 0,93 | 1,0  | 1,0 |
| СДК-ЦН-33, СК-ЦН-34, СК-ЦН-34м | 1,0                      | 1,0  | 1,0  | 1,0  | 1,0 |

Таблица 3 – Поправочные коэффициенты  $k_2$ , учитывающие запыленность газа

| Тип циклона | Исходные концентрации СВХ, г/м <sup>3</sup> |      |       |      |       |      |       |
|-------------|---------------------------------------------|------|-------|------|-------|------|-------|
|             | 0                                           | 10   | 20    | 40   | 80    | 120  | 150   |
| ЦН-11       | 1                                           | 0,96 | 0,94  | 0,92 | 0,9   | 0,87 | –     |
| ЦН-15       | 1                                           | 0,93 | 0,92  | 0,91 | 0,9   | 0,87 | 0,86  |
| ЦН-15У      | 1                                           | 0,93 | 0,92  | 0,91 | 0,89  | 0,88 | 0,87  |
| ЦН-24       | 1                                           | 0,95 | 0,93  | 0,92 | 0,9   | 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 | 0,9   |
| СК-ЦН-34м   | 1                                           | 0,99 | 0,97  | 0,95 | –     | –    | –     |

Таблица 4 – Коэффициенты гидравлического сопротивления одиночного циклона диаметром 500 мм

| Тип циклона   | Значение $\xi_{500}$    |                                   | Тип циклона | Значение $\xi_{500}$    |                                   |
|---------------|-------------------------|-----------------------------------|-------------|-------------------------|-----------------------------------|
|               | при выхлопе в атмосферу | при выхлопе в гидравлическую сеть |             | при выхлопе в атмосферу | при выхлопе в гидравлическую сеть |
| ЦН-11         | 245                     | 250                               | СДК-ЦН-33   | 520                     | 600                               |
| ЦН-15, ЦН-15У | 155                     | 163                               | СК-ЦН-34    | 1050                    | 1150                              |
| ЦН-24         | 75                      | 80                                | СК-ЦН-34м   | -                       | 2000                              |

Эффективность очистки газов в циклоне определяется по формуле

$$\eta = 0,5[1 + \Phi(X)], \quad (5)$$

где  $\Phi(X)$  – табличная функция параметра  $X$ , определяемого по формуле

$$X = \lg(d_m/d_{50}) \frac{1}{\sqrt{\lg^2 \delta_\eta^T + \lg^2 \delta_u}}. \quad (6)$$

Значения  $d_{50}^T$  и  $lg^2 \delta_\eta^T$  для разных типов циклонов приведены в табл. 1.

Значения  $d_{50}^T$ , приведенные в табл. 1, определены по условиям работы типового циклона, для которого справедливы следующие значения:  $D_T = 0,6$  м;  $\rho_{чт} = 1930$  кг/м<sup>3</sup>;  $\mu_\tau = 22,2 \cdot 10^{-6}$  Па · с;  $\omega_\tau = 3,5$  м/с.

Рассчитывается значение параметра  $d_{50}$  при рабочих условиях (диаметре циклона, скорости потока, плотности пыли, динамической вязкости газа) при помощи следующей формулы:

$$d_{50} = d_{50}^T \sqrt{(D/D_T)(\rho_{чм}/\rho_ч)(\mu/\mu_m)(\omega_m/\omega)}. \quad (7)$$

Определив значение  $X$ , находим параметр  $\Phi(X)$  из табл. 5.

Если расчетное значение  $\eta$  окажется меньше значения, требуемого по условиям допустимого выброса пыли, то необходимо выбрать другой тип циклона с большим значением коэффициента гидравлического сопротивления.

Для ориентировочных расчетов можно воспользоваться следующей формулой:

$$\frac{\xi_1}{\xi_2} = \left( \frac{1-\eta_1}{1-\eta_2} \right) \frac{\omega_1 D_1}{\omega_2 D_2}, \quad (8)$$

где коэффициенты 1 и 2 соответствуют двум разным циклонам.

Таблица 5 – Значения нормальной функции распределения  $\Phi(X)$

| $X$    | $\Phi(X)$ | $X$    | $\Phi(X)$ | $X$  | $\Phi(X)$ | $X$  | $\Phi(X)$ |
|--------|-----------|--------|-----------|------|-----------|------|-----------|
| - 2,20 | 0,0139    | - 0,96 | 0,1685    | 0,10 | 0,5398    | 1,18 | 0,8810    |
| - 2,10 | 0,0179    | - 0,94 | 0,1736    | 0,12 | 0,5478    | 1,20 | 0,8849    |
| - 2,00 | 0,0228    | - 0,92 | 0,1788    | 0,14 | 0,5557    | 1,22 | 0,8888    |
| - 1,98 | 0,0239    | - 0,90 | 0,1841    | 0,16 | 0,5636    | 1,24 | 0,8925    |
| - 1,96 | 0,0250    | - 0,88 | 0,1894    | 0,18 | 0,5714    | 1,26 | 0,8962    |
| - 1,94 | 0,0262    | - 0,86 | 0,1949    | 0,20 | 0,5793    | 1,28 | 0,8997    |
| - 1,92 | 0,0274    | - 0,84 | 0,2005    | 0,22 | 0,5871    | 1,30 | 0,9032    |
| - 1,90 | 0,2880    | - 0,82 | 0,2061    | 0,24 | 0,5948    | 1,32 | 0,9066    |
| - 1,88 | 0,0301    | - 0,80 | 0,2119    | 0,26 | 0,6026    | 1,34 | 0,9099    |
| - 1,86 | 0,0314    | - 0,78 | 0,2177    | 0,28 | 0,6103    | 1,36 | 0,9131    |
| - 1,84 | 0,0329    | - 0,76 | 0,2236    | 0,30 | 0,6179    | 1,38 | 0,9162    |
| - 1,82 | 0,0344    | - 0,74 | 0,2297    | 0,32 | 0,6255    | 1,40 | 0,9192    |
| - 1,80 | 0,0359    | - 0,72 | 0,2358    | 0,34 | 0,6331    | 1,42 | 0,9222    |
| - 1,78 | 0,0375    | - 0,70 | 0,2420    | 0,36 | 0,6406    | 1,44 | 0,9251    |
| - 1,76 | 0,0392    | - 0,68 | 0,2483    | 0,38 | 0,6480    | 1,46 | 0,9279    |
| - 1,74 | 0,0409    | - 0,66 | 0,2546    | 0,40 | 0,6554    | 1,48 | 0,9306    |
| - 1,72 | 0,0427    | - 0,64 | 0,2611    | 0,42 | 0,6628    | 1,50 | 0,9332    |
| - 1,70 | 0,0446    | - 0,62 | 0,2676    | 0,44 | 0,6700    | 1,52 | 0,9357    |
| - 1,68 | 0,0465    | - 0,60 | 0,2743    | 0,46 | 0,6772    | 1,54 | 0,9382    |
| - 1,66 | 0,0485    | - 0,58 | 0,2810    | 0,48 | 0,6844    | 1,56 | 0,9406    |
| - 1,64 | 0,0505    | - 0,56 | 0,2877    | 0,50 | 0,6915    | 1,58 | 0,9429    |
| - 1,62 | 0,0526    | - 0,54 | 0,2946    | 0,52 | 0,6985    | 1,60 | 0,9452    |

продолжение таблицы 5

| $X$    | $\Phi(X)$ | $X$    | $\Phi(X)$ | $X$  | $\Phi(X)$ | $X$  | $\Phi(X)$ |
|--------|-----------|--------|-----------|------|-----------|------|-----------|
| - 1,60 | 0,0548    | - 0,52 | 0,3015    | 0,54 | 0,7054    | 1,62 | 0,9474    |
| - 1,58 | 0,0571    | - 0,50 | 0,3085    | 0,56 | 0,7123    | 1,64 | 0,9495    |
| - 1,56 | 0,0594    | - 0,48 | 0,3156    | 0,58 | 0,7190    | 1,66 | 0,9515    |
| - 1,54 | 0,0618    | - 0,46 | 0,3228    | 0,60 | 0,7257    | 1,68 | 0,9535    |
| - 1,52 | 0,0643    | - 0,44 | 0,3300    | 0,62 | 0,7324    | 1,70 | 0,9554    |
| - 1,50 | 0,0668    | - 0,42 | 0,3372    | 0,64 | 0,7389    | 1,72 | 0,9573    |
| - 1,48 | 0,0694    | - 0,40 | 0,3446    | 0,66 | 0,7454    | 1,74 | 0,9591    |
| - 1,46 | 0,0721    | - 0,38 | 0,3520    | 0,68 | 0,7517    | 1,76 | 0,9608    |
| - 1,44 | 0,0749    | - 0,36 | 0,3594    | 0,70 | 0,7580    | 1,78 | 0,9625    |
| - 1,42 | 0,0778    | - 0,34 | 0,3669    | 0,72 | 0,7642    | 1,80 | 0,9641    |
| - 1,40 | 0,0808    | - 0,32 | 0,3745    | 0,74 | 0,7703    | 1,82 | 0,9656    |
| - 1,38 | 0,0838    | - 0,30 | 0,3821    | 0,76 | 0,7764    | 1,84 | 0,9671    |
| - 1,36 | 0,0869    | - 0,28 | 0,3897    | 0,78 | 0,7823    | 1,86 | 0,9686    |
| - 1,34 | 0,0901    | - 0,26 | 0,3974    | 0,80 | 0,7881    | 1,88 | 0,9699    |
| - 1,32 | 0,0934    | - 0,24 | 0,4052    | 0,82 | 0,7939    | 1,90 | 0,9713    |
| - 1,30 | 0,0968    | - 0,22 | 0,4129    | 0,84 | 0,7995    | 1,92 | 0,9726    |
| - 1,28 | 0,1003    | - 0,20 | 0,4207    | 0,86 | 0,8051    | 1,94 | 0,9738    |
| - 1,26 | 0,1038    | - 0,18 | 0,4286    | 0,88 | 0,8106    | 1,96 | 0,9750    |
| - 1,24 | 0,1075    | - 0,16 | 0,4364    | 0,90 | 0,8159    | 1,98 | 0,9761    |
| - 1,22 | 0,1112    | - 0,14 | 0,4443    | 0,92 | 0,8212    | 2,00 | 0,9772    |
| - 1,20 | 0,1151    | - 0,12 | 0,4522    | 0,94 | 0,8264    | 2,10 | 0,9821    |
| - 1,18 | 0,1190    | - 0,10 | 0,4602    | 0,96 | 0,8315    | 2,20 | 0,9861    |
| - 1,16 | 0,1230    | - 0,08 | 0,4681    | 0,98 | 0,8365    | 2,30 | 0,9893    |
| - 1,14 | 0,1271    | - 0,06 | 0,4761    | 1,00 | 0,8413    | 2,40 | 0,9918    |
| - 1,12 | 0,1314    | - 0,04 | 0,4840    | 1,02 | 0,8461    | 2,50 | 0,9938    |
| - 1,10 | 0,1357    | - 0,02 | 0,4920    | 1,04 | 0,8508    | 2,60 | 0,9953    |
| - 1,08 | 0,1401    | - 0,00 | 0,5000    | 1,06 | 0,8554    | 2,70 | 0,9965    |

### Пример расчета циклона

**Задача.** Подобрать циклон и оценить эффективность очистки газа в циклоне для следующих исходных данных:

|              |                          |
|--------------|--------------------------|
| $Q$          | 2000 м <sup>3</sup> /ч   |
| $\rho$       | 1,29 кг/м <sup>3</sup>   |
| $\mu$        | 22·10 <sup>-6</sup> Па·с |
| $lg\delta_c$ | 0,4                      |
| $C_{вх}$     | 10 г/м <sup>3</sup>      |
| $\rho_c$     | 1600 кг/м <sup>3</sup>   |
| $d_m$        | 8 мкм                    |
| $\eta$       | 0,70                     |

**Решение.** По медианному размеру частиц выбирается циклон типа ЦН-11 (табл. 1; 8>2·3,65). Оптимальная скорость движения газа  $\omega_{оп}$  в сечении циклона составляет 3,5 м/с.

Диаметр циклона равен

$$D = \sqrt{4 \cdot 0,556 / (3,14 \cdot 3,5)} = 0,449 \text{ м.}$$

Полученное значение  $D$  округляется до ближайшего типового значения внутреннего диаметра циклона (табл. 2). Принимается один циклон диаметром  $D = 450$  мм.

Действительная скорость движения газа в циклоне выражается следующей формулой:

$$\omega = 4 \cdot 0,556 / (3,14 \cdot 1 \cdot 0,452) = 3,49 \text{ м/с.}$$

Действительная скорость в циклоне отклоняется от оптимальной не более чем на 15%.

Определяется коэффициент гидравлического сопротивления одиночного циклона с помощью следующей формулы:

$$\xi = 0,99 \cdot 0,96 \cdot 245 = 232,8.$$

Находится значение гидравлического сопротивления циклона по формуле (4):

$$\Delta P = P_{ex} - P_{вых} = 232,8 \cdot 0,60 \cdot 3,52 / 2 = 855,5 \text{ Па.}$$

По формуле (7) рассчитывается значение параметра  $d_{50}$  при рабочих условиях (диаметре циклона, скорости потока, плотности пыли, динамической вязкости газа):

$$d_{50} = 3,65 \sqrt{(0,45/0,6)(1930/1600)(22 \cdot 10^{-6} / 22,2 \cdot 10^{-6})(3,5/3,49)} = 3,28.$$

Рассчитывается параметр  $X$ :

$$X = \lg(8/3,28) \frac{1}{\sqrt{0,353^2 + 0,4^4}} = 0,7267.$$

По табл. 5 определяется, что параметру  $X$  соответствует значение функции  $\Phi(X) = 0,7642$ .

Эффективность очистки газов в циклоне выражается следующей формулой:

$$\eta = 0,5[1 + 0,7642] = 0,88.$$

Выбранный циклон обеспечивает эффективность очистки газа, равную  $\eta = 0,88$  при требуемой степени очистки 0,7.

Следовательно, циклон выбран правильно.

### 3 Задания для самостоятельного решения

По исходным данным, приведенным в табл. 6, подобрать циклон для очистки газа, определить его гидравлическое сопротивление и эффективность очистки. Циклон работает с выхлопом в гидравлическую сеть.

Таблица 6 – Исходные данные для расчета циклона

| №  | Наименование оборудования   | $Q$ | $\rho$ | $\mu$ | $d_m$ | $lg\delta_u$ | $C_{ex}$ | $\rho_u$ | $H$  |
|----|-----------------------------|-----|--------|-------|-------|--------------|----------|----------|------|
| 1  | Клинкерно-обжиговая печь    | 20  | 1,29   | 17,3  | 23    | 0,501        | 30       | 2000     | 0,85 |
| 2  |                             | 26  | 1,29   | 17,3  | 20    | 0,602        | 10       | 2000     | 0,80 |
| 3  |                             | 10  | 1,29   | 17,3  | 14    | 0,535        | 25       | 2000     | 0,80 |
| 4  | Шахтная мельница            | 0,1 | 1,29   | 17,3  | 56    | 0,97         | 100      | 2240     | 0,80 |
| 5  | Крекинг-установка           | 2   | 1,29   | 17,3  | 16    | 0,250        | 10       | 2600     | 0,85 |
| 6  |                             | 10  | 1,29   | 17,3  | 14    | 0,250        | 20       | 2600     | 0,85 |
| 7  |                             | 10  | 1,29   | 17,3  | 7     | 0,301        | 15       | 2600     | 0,85 |
| 8  | Углесушильный барабан       | 5   | 1,29   | 17,3  | 15    | 0,334        | 50       | 1350     | 0,80 |
| 9  | Шаровая мельница            | 1   | 1,29   | 17,3  | 6     | 0,468        | 20       | 2900     | 0,80 |
| 10 | Вращающаяся цементная печь  | 10  | 1,29   | 17,3  | 18    | 0,652        | 20       | 2000     | 0,85 |
| 11 | Электролизер алюминия       | 5   | 1,29   | 17,3  | 10    | 0,352        | 1        | 2700     | 0,85 |
| 12 | Вращающаяся цементная обжиг | 3   | 1,29   | 17,3  | 8     | 0,506        | 40       | 2650     | 0,80 |
| 13 | Распылительная сушилка      | 10  | 1,29   | 17,3  | 8     | 0,210        | 4        | 1800     | 0,80 |
| 14 | Барабанная сушилка          | 10  | 1,29   | 17,3  | 15    | 0,360        | 10       | 1800     | 0,80 |
| 15 | Барабанная сушилка          | 8   | 1,29   | 17,3  | 20    | 0,352        | 10       | 2700     | 0,85 |
| 16 | Цементная мельница          | 5   | 1,29   | 17,3  | 12    | 0,468        | 60       | 2900     | 0,85 |
| 17 | Наждачный станок            | 0,5 | 1,29   | 17,3  | 38    | 0,214        | 10       | 2500     | 0,85 |
| 18 | Шаровая мельница            | 3   | 1,29   | 17,3  | 9     | 0,385        | 10       | 2900     | 0,80 |
| 19 | Электролизер алюминия       | 8   | 1,29   | 17,3  | 10    | 0,468        | 2        | 2700     | 0,85 |
| 20 | Наждачный станок            | 0,6 | 1,29   | 17,3  | 30    | 0,312        | 15       | 2500     | 0,85 |

## Практическая работа 4

### РАСЧЕТ ЭЛЕКТРОФИЛЬТРА

#### 1 Цель работы

Научиться подбирать электрофильтр для очистки газа от взвешенных примесей и рассчитывать его основные параметры. Оценить эффективность очистки газа в электрофильтре.

#### 2 Теоретические положения

Электрофильтры широко применяются при очистке выбросов для улавливания твердых и жидких частиц. Они универсальны и обеспечивают высокую степень очистки газов при сравнительно низких электрозатратах, способны работать при высоких температурах, а также фильтры могут работать как под разрежением коррозионных сред. Электрофильтры могут работать как под разрежением, так и под давлением очищаемых газов. Гидравлическое сопротивление электрофильтров не превышает 100–150 Па. Применение электрофильтров экономически оправдано в установках производительностью по газу от нескольких тысяч до миллиона кубометров в час. В химической и смежных отраслях промышленности широко используются электрофильтры следующих типов: УГМ, УГГ, ОГП, ЭГТ и др.

Расчет электрофильтра сводится к определению величины активного сечения электрофильтра, его эффективности и мощности электроагрегата.

Определяется величина скорости дрейфа частиц максимального и минимального размеров ( $v_{д\ min}$  и  $v_{д\ max}$ ), м/с, по формулам:

$$\begin{aligned}v_{д\ min} &= 0,059 \cdot 10^{-10} E^2 \cdot d_{T\ min} / \mu, \\v_{д\ max} &= 0,059 \cdot 10^{-10} E^2 \cdot d_{T\ max} / \mu\end{aligned}\quad (1)$$

где  $E$  – напряженность электрического поля осаждения, Вт/м;  
 $\mu$  – динамическая вязкость газа при рабочей температуре, Па·с;  
 $d_{T\ min}$ ,  $d_{T\ max}$  – минимальный и максимальный размер улавливаемых частиц, м;

Предварительно выбирается электрофильтр (табл. 1). Определяется время, с, необходимое для осаждения частиц минимального размера, так как они имеют меньшую скорость дрейфа:

$$\tau_{oc(min)} = \frac{\Delta R}{v_{д\ min}}\quad (2)$$

где  $\Delta R$  – расстояние между коронирующим и осадительным электродами, м.

Необходимая площадь активного сечения электрофильтра, м<sup>2</sup>, может быть найдена по формуле

$$S_{расч} = 1,75 \frac{V}{3600 \cdot v_{д}} \frac{\Delta R}{l}\quad (3)$$

где  $V$  – объем очищаемого потока газа, м<sup>3</sup>/ч;

1 – путь движения запыленного потока в электрофильтре (активная длина поля), м.

По найденной величине активного сечения из каталога (табл. 1) выбирается электрофильтр и определяется общая площадь осаждения  $f$ .

Таблица 1 – Характеристики электрофильтров разных марок

| Показатели                                                          | Марка электрофильтра |          |           |           |           |           |
|---------------------------------------------------------------------|----------------------|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
|                                                                     | ОГП-4-8              | ОГП-4-10 | УГТ1-3-30 | УГТ1-3-40 | УГТ1-3-60 | УГТ1-3-80 |
| Площадь активного сечения, м <sup>2</sup> (S)                       | 8                    | 16       | 30        | 40        | 60        | 80        |
| Число полей, шт.                                                    | 4                    | 4        | 3         | 3         | 3         | 3         |
| Шаг между одноименными электродами, мм (2ΔR)                        | 260                  | 260      | 260       | 260       | 260       | 260       |
| Активная высота электродов, м                                       | 4,5                  | 4,5      | 7,5       | 7,5       | 7,5       | 7,5       |
| Активная длина поля, м (1)                                          | 1,5                  | 1,5      | 2,58      | 2,58      | 2,58      | 2,58      |
| Общая площадь осаждения осадительных электродов, м <sup>2</sup> (f) | 380                  | 760      | 1860      | 2560      | 3720      | 5120      |
| Электрофильтры работают до температуры 425°С                        |                      |          |           |           |           |           |

Степень очистки запыленного газа в электрофильтре определяется по формуле

$$\varepsilon = 1 - e^{-\frac{v_{дmin} l}{v_{д} \Delta R}} \quad (4)$$

Если полученная величина степени очистки выше заданной, то выбранный электрофильтр обеспечивает необходимую степень пылеочистки.

Проверяется необходимое условие осаждения частиц в данном электрофильтре. Средняя скорость в электрофильтре потока запыленного газа в горизонтальном направлении лежит в пределах  $v_l = 0,51$  м/с. Для проверки необходимого условия осаждения принимается верхний предел скорости движения газового потока ( $v_l = 1$  м/с), тогда

$$\tau_{п} = \frac{l}{v_1} \quad (5)$$

Если  $\tau_{ос} < \tau_{п}$ , то фильтр выбран правильно.

При установке электрофильтров необходимо определить их число и подобрать тип электрического питания. Оптимальный режим достигается при питании каждого электрического поля от отдельного электроагрегата.

Таким образом, число электроагрегатов соответствует числу полей в электрофильтре. Типоразмер электроагрегата определяется средней силой тока, потребляемой одним полем электрофильтра, которая равна произведению удельного тока короны на площадь поверхности одного поля. Средняя сила тока мА вычисляется по следующей формуле:

$$I_{cp} = i/S. \quad (6)$$

где  $i$  – удельная сила тока на  $1 \text{ м}^2$  поверхности осаждения (для пластинчатых электродов ее принимают равной  $0,3\text{--}0,4 \text{ мА/м}^2$ );

$S$  – поверхность осаждения одного поля, м.

Потребляемая мощность электрофилтра, кВт, рассчитывается по формуле:

$$N = \frac{U_{\text{ср}} K_{\text{ф}} \cos \varphi}{1,4 \eta \cdot 10^3} + \sum N_1, \quad (7)$$

где  $U$  – максимальное выпрямленное напряжение ( $20\text{--}30 \text{ кВ}$ );

$K_{\text{ф}}$  – коэффициент формы кривой тока (принимают равным  $1,2\text{--}1,5$ );

$\cos \varphi$  – коэффициент мощности электроагрегата ( $0,8\text{--}0,9$ );

$1,4$  – коэффициент перехода от амплитудного значения напряжения к эффективному;

$\eta$  – КПД электроагрегата;

$\sum N_1$  – мощности, потребляемые механизмами встряхивания и нагревательными элементами изоляторных коробок, кВт.

### Пример расчета электрофилтра

**Задание.** Подобрать электрофилтр для очистки газа, запыленного цементной пылью, имеющего температуру  $120^\circ\text{C}$ . Расход газа составляет  $30 \text{ тыс. м}^3/\text{с}$ . Размер частиц, улавливаемой пыли  $2\text{--}40 \text{ мкм}$ , динамическая вязкость газа –  $2,25 \cdot 10^{-5} \text{ Па} \cdot \text{с}$ . Напряженность электрического поля  $2 \cdot 10^6 \text{ В/м}$ , КПД электроагрегата –  $0,9$ ; мощность, потребляемая механизмами встряхивания и нагревательными элементами, равна  $3 \text{ кВт}$ . Необходимая степень очистки должна быть не менее  $99,8\%$ .

**Решение.** Величины скорости дрейфа частиц максимального и минимального размеров определяются по формулам:

$$v_{\text{д min}} = 0,059 \cdot 10^{-10} \cdot (3 \cdot 10^5)^2 \cdot 5 \cdot 10^{-6} / 2,25 \cdot 10^{-5} = 0,118 \text{ м/с}$$

$$v_{\text{д max}} = 0,059 \cdot 10^{-10} \cdot (3 \cdot 10^5)^2 \cdot 40 \cdot 10^{-6} / 2,25 \cdot 10^{-5} = 0,944 \text{ м/с}$$

Предварительно выбирается электрофилтр типа УГ (табл. 1) с расстоянием между коронирующим и осадительным электродами  $130 \text{ мм}$  и путем движения запыленного потока в электрофилтре  $l = 2,58 \text{ м}$  и определяется время, необходимое для осаждения частиц минимального размера:

$$\tau_{\text{ос (min)}} = \frac{0,13}{0,118} = 1,1 \text{ с}$$

Необходимая площадь активного сечения электрофилтра выражается следующей формулой:

$$S = 1,75 [30000 / (3600 \cdot 0,118)] \cdot 0,13 / 2,58 = 6,23 \text{ м}^2.$$

По найденной величине активного сечения из каталога (табл. 1) выбирается электрофилтр ОГП-4-8 с общей площадью осаждения  $380 \text{ м}^2$ .

Степень очистки запыленного газа в электрофилтре выражается следующей формулой:

$$\varepsilon = 1 - e^{-\frac{0,118 \cdot 4,5}{1 \cdot 0,13}} = 0,98.$$

Полученная величина степени очистки выше заданной, значит, выбранный электрофильтр обеспечивает необходимую степень пылеочистки.

Проверяется необходимое условие осаждения частиц в данном электрофильтре. Средняя скорость движения в электрофильтре потока запыленного газа в горизонтальном направлении лежит в пределах  $V_I = 0,5 \text{ м/с}$ .

Для проверки необходимого условия осаждения принимается верхний предел скорости движения газового потока ( $V_I = 1 \text{ м/с}$ ), тогда:

$$\tau_{II} = \frac{2,58}{1} = 2,58 \text{ с}$$

$$2,58 < 1,1$$

Так как  $\tau_{oc} < \tau_{II}$  – фильтр выбран правильно.

Средняя сила тока, потребляемая одним полем электрофильтра, выражается следующей формулой:

$$I_{cp} = 0,35 \cdot 8 = 2,8 \text{ мА}$$

Потребляемая мощность электрофильтра выражается с помощью следующей формулы:

$$N = 25 \cdot 2,8 \cdot 1,4 \cdot 0,85 / (1,4 \cdot 0,9 \cdot 10^5) + 3 = 3,066 \text{ кВт.}$$

### 3 Задания для самостоятельного решения

Подобрать электрофильтр для очистки газа, запыленного цементной пылью, имеющего температуру  $120^\circ\text{C}$ . Напряженность электрического поля  $3 \cdot 10^5 \text{ В/м}$ ; динамическая вязкость газа  $2,25 \cdot 10^{-5} \text{ Па} \cdot \text{с}$ .

Исходные данные взять из табл. 2.

Таблица 2 – Варианты задания для самостоятельного решения

| Показатели                                                                        | № варианта |      |      |      |       |      |      |       |      |      |
|-----------------------------------------------------------------------------------|------------|------|------|------|-------|------|------|-------|------|------|
|                                                                                   | 1          | 2    | 3    | 4    | 5     | 6    | 7    | 8     | 9    | 10   |
| Размер частиц, мкм                                                                | 5-40       | 7-35 | 6-42 | 5-45 | 10-40 | 5-35 | 8-30 | 10-35 | 5-45 | 6-40 |
| Расход газа, тыс. м <sup>3</sup> /с                                               | 30         | 32   | 40   | 42   | 33    | 29   | 31   | 35    | 34   | 28   |
| КПД электроагрегата                                                               | 0,9        | 0,85 | 0,88 | 0,79 | 0,82  | 0,91 | 0,9  | 0,85  | 0,87 | 0,8  |
| Мощности, потребляемые механизмами встряхивания и нагревательными элементами, кВт | 3          | 2,5  | 1,7  | 3,2  | 1,8   | 4    | 3    | 3,2   | 2,7  | 3,1  |

## Практическая работа 5

### ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ РУКАВНЫХ ФИЛЬТРОВ

#### 1 Цель работы

Определить параметры рукавных фильтров для очистки газов: площадь фильтрования, гидравлическое сопротивление аппарата и мощность электродвигателя вентилятора, необходимого для транспортирования очищаемых газов через фильтр.

#### 2 Теоретические положения

Технологические расчеты фильтровальных аппаратов сводятся к определению площади фильтровальной перегородки, гидравлического сопротивления фильтровальной перегородки и аппарата в целом, частоты и продолжительности циклов регенерации фильтровальных элементов.

Для определения количества фильтров, необходимых для фильтрации, сначала находится общая площадь фильтрации:

$$S_{\phi} \frac{v_1' + v_2'}{v_{\phi}} + S_c \text{ м}^2. \quad (1)$$

где  $v_1'$  – расход газа, подаваемого на продувку, в  $\text{м}^3/\text{мин}$ , с учетом подсоса:

$$v_1' = 1,1v_1. \quad (2)$$

$v_2'$  – расход продувочных газов, в  $\text{м}^3/\text{мин}$ , определяется из удельного расхода продувочных газов ( $v^2 = 90 - 110 \text{ м}^3/(\text{ч} \cdot \text{м}^2)$ ):

$$v_2' = v_2 \cdot S_c. \quad (3)$$

где  $S_c$  – площадь ткани в секции, отключенной на регенерацию.

Разработаны три типоразмера фильтров. Каждый из пылеуловителей состоит из двух секций, в которых размешено по 18 рукавов диаметром  $d = 200$  мм. Суммарная площадь поверхности фильтров приведена в табл. 1.

Таблица 1 – Площади секций фильтров

| Тип фильтра  | Площадь фильтров, $\text{м}^2$ | Сопротивление перед регенерацией, Па |
|--------------|--------------------------------|--------------------------------------|
| СМЦ-100      | 57                             | 1900                                 |
| СМЦ-100 – I  | 108                            |                                      |
| СМЦ-100 – II | 210                            |                                      |

Количество фильтров, необходимых для фильтрации:

$$n = \frac{S_{\phi}}{S} \quad (4)$$

Для фильтратов с импульсной продувкой, в связи с кратковременностью процесса регенерации, поверхностью фильтра, выключаемой на время регенерации, и объемом газа, расходуемого на обратную продувку, можно пренебречь.

Удельная газовая нагрузка на фильтровальную перегородку колеблется для рукавных фильтров от 0,3 до 6 м<sup>3</sup>/(м<sup>2</sup>·мин). Внутри этого диапазона выбор оптимального значения зависит от многих факторов, к которым в первую очередь относятся свойства улавливаемой пыли, способ регенерации фильтровальных элементов, концентрации пыли в газе, структура фильтровального материала, температура очищаемого газа, требуемая степень очистки.

Удельная газовая нагрузка в рукавных фильтрах (в м<sup>1</sup>/(м<sup>2</sup>·мин) определяется из следующего выражения:

$$q = q_0 \cdot C_1 \cdot C_2 \cdot C_3 \cdot C_4 \cdot C_5, \quad (5)$$

где  $q$  – нормативная удельная нагрузка, зависящая от вида пыли и ее склонности к агломерации (определяется из табл. 2);

**Таблица 2 – Значение нормативной удельной газовой нагрузки для разных видов пыли**

| Значение $q$ , м <sup>1</sup> /(м <sup>2</sup> ·мин) |                                                                            |                        |                        |                                   |
|------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|------------------------|------------------------|-----------------------------------|
| 3,5                                                  | 2,6                                                                        | 2                      | 1,7                    | 1,2                               |
| Комбикорм                                            | Асбест                                                                     | Глинозем               | Кокс                   | Активированный уголь              |
| Мука                                                 | Волокнистые и целлюлозные материалы                                        | Цемент                 | Летучая зола           | Технический углерод               |
| Зерно                                                | Пыль при выбивке отливок                                                   | Керамические красители | Металлопорошки         | Моющие средства                   |
| Жмыховая смесь                                       | Пыль при выбивке отливок из форм, гипс, известь гашеная, пыль от полировки | Уголь                  | Оксиды металлов        | Порошковое молоко                 |
| Пыль кожи                                            | Соль, песок                                                                | Плавленый шпат         | Пластмассы             | Возгоны цветных и черных металлов |
| Опилки                                               | Пыль пескоструйных аппаратов, тальк                                        | Резина                 | Красители              |                                   |
| Табак                                                | Кальцинированная сода                                                      | Каолин                 | Силикаты               |                                   |
| Картонная пыль                                       |                                                                            | Известняк              | Крахмал                |                                   |
| Поливинилхлорид после распылительной сушилки         |                                                                            | Сахар                  | Смолы сухие            |                                   |
|                                                      |                                                                            | Пыль горных пород      | Химикаты их нефтесырья |                                   |

$C_1$  – коэффициент, характеризующий особенность регенерации фильтровальных элементов;

$C_2$  – коэффициент, учитывающий влияние концентрации пыли на удельную газовую нагрузку (определяется по рис. 1);

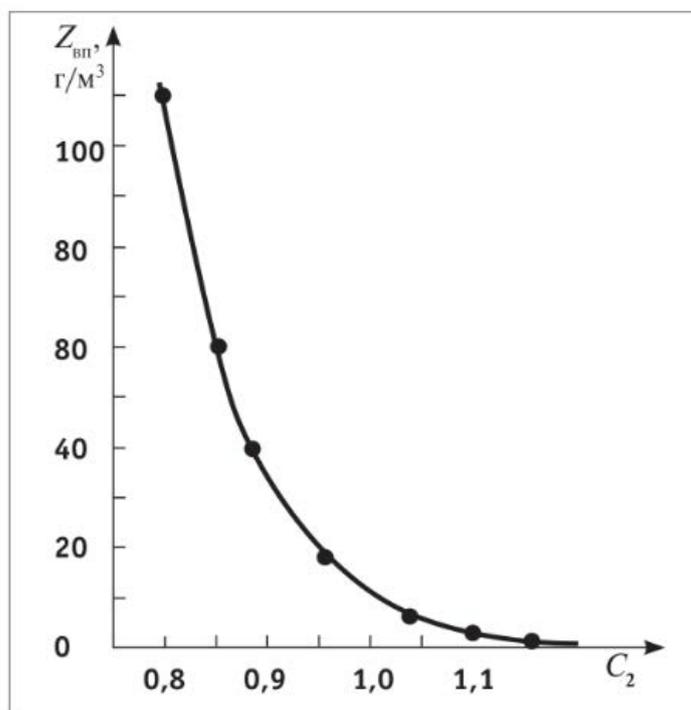
$C_3$  – коэффициент, учитывающий влияние дисперсности состава пыли в газе (определяется по табл. 3);

$C_4$  – коэффициент, учитывающий влияние температуры газа (определяется по табл. 4);

$C_5$  – коэффициент, учитывающий требования к качеству отчистки.

Для коэффициента, учитывающего влияние особенностей регенерации фильтровальных элементов, в качестве базового элемента применяется фильтр с импульсной продувкой сжатым воздухом с рукавами из ткани. Для этого аппарата коэффициент  $C_1 = 1$ . При использовании рукавов из нетканых материалов значение коэффициентов может увеличиваться на 5–10%.

Для фильтров с регенерацией путем обратной продувки и одновременного встряхивания или покачивания рукавов применяется коэффициент  $C_1 = 0,70/0,85$ . Меньшее из этих значений применяется для фильтров с рукавами из плотной ткани и элементами, выполняемыми в виде конвертов.



**Рис. 1.** Зависимость коэффициента  $C_2$  от концентрации пыли

Для фильтров с регенерирующей путем обратной продувки коэффициент  $C_1 = 0,55/0,70$ . Меньшее из этих значений применяется для рукавов из стеклоткани и фильтров, снабженных фильтровальными элементами, выполненных в виде конвертов.

**Таблица 3 – Значение коэффициента  $C_3$ , учитывающего влияние дисперсного состава пыли**

| Медианный диаметр частиц пыли, мкм | Коэффициент $C_3$ |
|------------------------------------|-------------------|
| Свыше 100                          | 1,2–1,4           |
| 50–100                             | 1,1               |
| 10–50                              | 1                 |
| 3–10                               | 0,9               |
| Меньше 3                           | 0,7–0,9           |

**Таблица 4 – Значения коэффициента  $C_4$ , учитывающего влияние температуры  $t^\circ$**

| $t^\circ$ | 20 | 40  | 60   | 80   | 100  | 120  | 140  | 160  |
|-----------|----|-----|------|------|------|------|------|------|
| $C_4$     | 1  | 0,9 | 0,84 | 0,78 | 0,75 | 0,73 | 0,72 | 0,70 |

Коэффициент, учитывающий требования к качеству очистки, оценивается по концентрации пыли в очищенном газе. Как показывают эксперименты, с увеличением скорости фильтрования концентрация пыли в очищенных газах увеличивается. Принято считать, что в исправно действующем фильтре концентрация пыли на выходе из фильтра не должна превышать  $30 \text{ мг/м}^3$ , для всех этих условий принимается значение  $C_3 = 1$ . Если к качеству очистки предъявляются более жесткие требования, коэффициент  $C_3$  снижается. В случае, если концентрация пыли в очищенных газах не должна превышать  $10 \text{ мг/м}^3$ , коэффициент применяется равным 0,95.

При подборе рукавных фильтров важной является оценка ожидаемого *гидравлического сопротивления*, определяющего энергетические затраты на фильтрование.

Гидравлическое сопротивление установки складывается из гидравлического сопротивления фильтровальной перегородки ( $\Delta P_{\text{п}}$ ), гидравлического сопротивления корпуса аппарата ( $\Delta P$ ) и сопротивление системы без пыли ( $\Delta P_{\text{т}}$ ). Гидравлическое сопротивление фильтровальной перегородки состоит из суммарного сопротивления слоя пыли, осевшего в порох пыли, и сопротивления слоя пыли.

Гидравлическое сопротивление фильтровальной перегородки ( $\Delta P_{\text{п}} = \Delta P_{\text{п1}} + \Delta P_{\text{п2}}$ ) можно определить, используя номограммы (рис. 2 и 3 соответственно).

Гидравлическое сопротивление корпуса аппарата  $\Delta P$  определяется коэффициентом гидравлического сопротивления корпуса  $\xi = 2$ , приведенным к скорости во входном патрубке:

$$v_{as} = \frac{V}{3600 S_{max}}, \frac{\text{м}}{\text{с}}; \quad (6)$$

тогда

$$\Delta P_c \Delta P_c = \xi_c v_m^2 \rho / 2, \text{Па} \quad (7)$$

Общее гидравлическое сопротивление аппарата выражается следующей формулой:

$$\Delta P_{\text{общ}} = \Delta P_c + \Delta P_c + \Delta P_c \quad (8)$$

Общее сопротивление рукавных фильтров не должно превышать 2800 Па, а сопротивление слоя пыли на перегородке 600–800 Па.

Мощность электродвигателя вентилятора, необходимого для транспортирования очищаемых газов через фильтр, подсчитывается по следующему выражению:

$$N = \frac{KV \Delta P_{\text{общ}}}{3600 \cdot 1000 \eta_m \eta_s} \text{ кВт} \quad (9)$$

где  $K$  – коэффициент запаса мощности электродвигателем на пусковой момент (применяется равным 1,1–1,15);

$\eta_m$  – КПД передачи (для клиноременной передачи принимается равным 0,92–0,95);

$\eta$  – КПД вентилятора (применяется равным 0,65–0,8).

### 3 Задание для самостоятельного решения

Рассчитать площадь фильтровальной поверхности и количество секций фильтра; определить гидравлическое сопротивление аппарата и мощность электродвигателя вентилятора (в соответствии с вариантами, приведенными в табл. 5).

Таблица 5 – Задание для самостоятельного решения

| Показатели                                             | № варианта |         |      |        |           |      |         |        |           |      |
|--------------------------------------------------------|------------|---------|------|--------|-----------|------|---------|--------|-----------|------|
|                                                        | 1          | 2       | 3    | 4      | 5         | 6    | 7       | 8      | 9         | 10   |
|                                                        | Вид пыли   |         |      |        |           |      |         |        |           |      |
|                                                        | известняк  | известь | зола | цемент | известняк | зола | известь | цемент | известняк | Зола |
| Объем газа, поступающего на очистку, м <sup>3</sup> /ч | 5000       | 4000    | 6000 | 5500   | 6800      | 7000 | 5000    | 6500   | 5800      | 4200 |
| Концентрация пыли, г/м <sup>3</sup>                    | 8          | 8       | 10   | 20     | 20        | 10   | 30      | 30     | 50        | 8    |
| Средний условный диаметр частиц пыли, мкм              | 1          | 0,8     | 1,5  | 2      | 1         | 0,5  | 0,8     | 3      | 1,5       | 2    |
| Температура, °С                                        | 20         | 30      | 40   | 50     | 80        | 20   | 30      | 120    | 80        | 50   |
| Скорость фильтрации, м/мин                             | 0,6        | 0,2     | 0,4  | 0,3    | 0,15      | 0,6  | 0,5     | 0,2    | 0,6       | 0,3  |
| Вязкость газа, ×10 <sup>-5</sup> Па·с                  | 25         | 30      | 30   | 25     | 15        | 20   | 20      | 20     | 15        | 25   |
| Пористость ткани                                       | 0,6        | 0,8     | 0,45 | 0,5    | 0,6       | 0,8  | 0,6     | 0,35   | 0,4       | 0,7  |
| Пористость пылевого слоя                               | 0,93       | 0,85    | 0,9  | 0,85   | 0,8       | 0,9  | 0,93    | 0,8    | 0,9       | 0,75 |
| Время фильтрации, мин                                  | 15         | 40      | 20   | 20     | 40        | 5    | 10      | 20     | 10        | 40   |
| Плотность пыли, ×10 <sup>3</sup> кг/м <sup>3</sup>     | 2          | 4       | 2    | 1      | 3         | 4    | 4       | 1      | 5         | 6    |

Гидравлическое сопротивление системы без пыли составляет 1300 Па. КПД вентилятора 0,75, передача к вентилятору – клиноременная.

Продувка импульсная обратная, фильтровальная площадь одной секции ( $S_1$ ) 57 м<sup>2</sup>.  $S = 2,4 \cdot 0,55$  м. Плотность газа  $\rho_1 = 1,02$  кг/м<sup>3</sup>.

В номограммах (рис. 6.2, 6.3) приняты следующие обозначения:  $d$  – средний условный диаметр в частице, мкм;  $\mu$  – вязкость газа, Па·с;  $v$  – скорость фильтрации, м/мин;  $m_n$  – пористость пылевого слоя, доли ед.;  $m_1$  – пористость ткани, доли ед.;  $q$  – запыленность газа, кг/м<sup>3</sup>;  $t$  – время фильтрации (промежуток между регенерациями тканей), мин;  $\rho$  – плотность пыли, кг/м<sup>3</sup>.

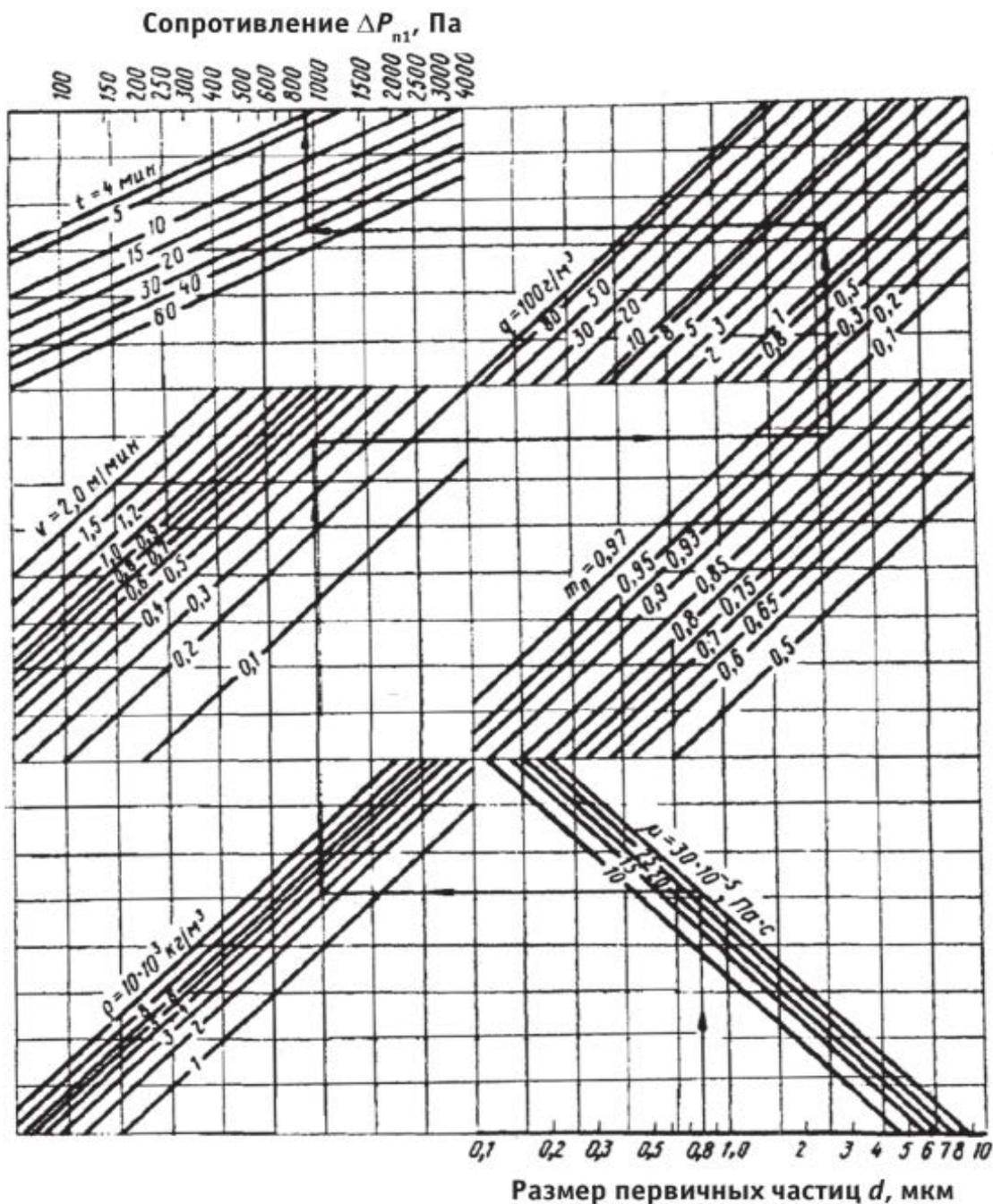


Рис. 2 Номограмма для определения гидравлического сопротивления слоя пыли, осевшей на поверхности фильтра ( $\Delta P_{n1}$ )

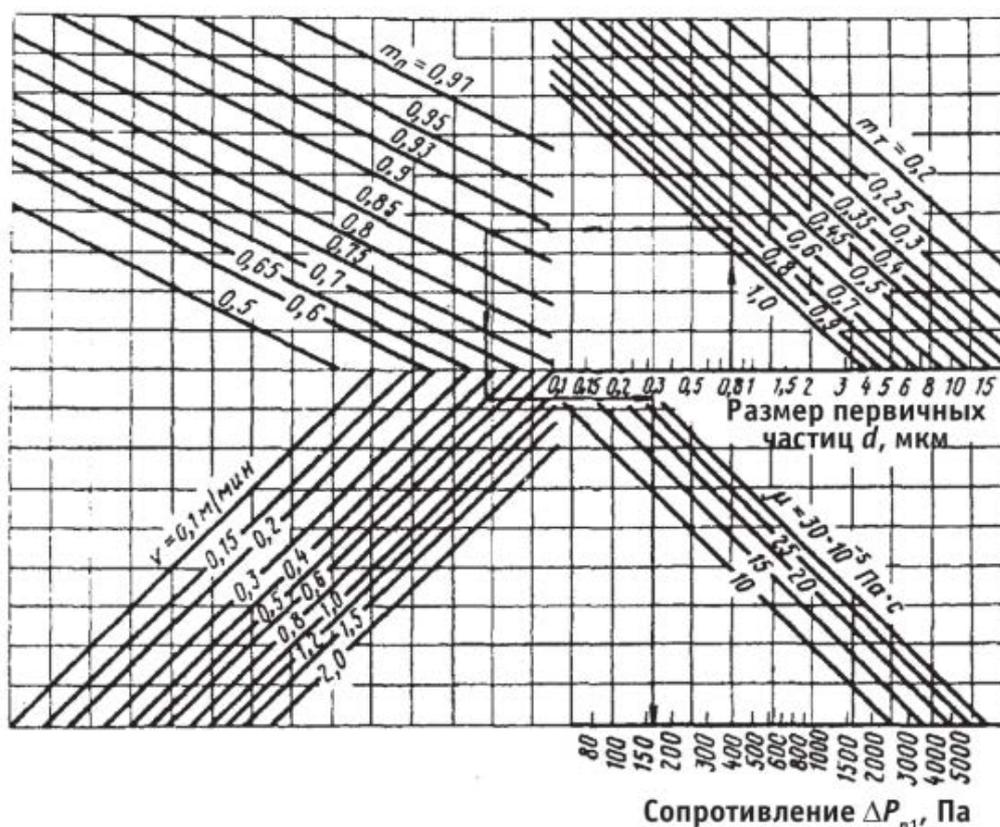


Рис. 3 Номограмма для определения гидравлического сопротивления слоя пыли, осевшей на поверхности фильтра ( $\Delta P_{n1}$ )

## Практическая работа 6

### РАСЧЕТ МОКРЫХ ПЫЛЕУЛОВИТЕЛЕЙ. ПОЛЫЙ ФОРСУНОЧНЫЙ СКРУББЕР

#### 1 Цель работы

Выполнить расчет основных параметров полого форсуночного скруббера и оценить эффективность очистки газов от взвешенных примесей в мокром пылеуловителе.

#### 2 Теоретические положения

Полый оросительный газопромыватель (скруббер) представляет собой пустотелый корпус, в который подают запыленный газ. В верхней части расположены оросительные форсунки для подачи воды. Газ движется противотоком навстречу падающим каплям воды. Бывают конструкции с прямоточным и поперечным потоком газа. Капли должны быть достаточно крупными, чтобы не было их уноса очищаемым газом. При скорости потока газа более 5 м/сек часто, после газопромывателем устанавливают каплеотделитель. Степень улавливания частиц более 10 мкм составляет 99%, но для частиц меньшего размера она резко снижается. Эти аппараты широко используют для улавливания крупной пыли, а также при охлаждении газов и кондиционирования воздуха.

Расчет полого форсуночного скруббера сводится к определению размеров основной конструкции элементов.

Площадь поперечного сечения скруббера  $S$ ,  $\text{м}^2$  рассчитывается по формуле:

$$S = \frac{Q}{v_{\epsilon}}, \quad (1)$$

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

$v_{\epsilon}$  – скорость газа в аппарате,  $\text{м}/\text{с}$ ;

Диаметр скруббера  $D$ ,  $\text{м}$ , равен:

$$D = \sqrt{\frac{4S}{\pi}}, \quad (2)$$

Высота скруббера  $H$ ,  $\text{м}$ , рассчитывается по формуле:

$$H = 2,5 \cdot D, \quad (3)$$

Объемный расход жидкости, подаваемый на орошение в аппарат,  $\text{м}^3/\text{ч}$ , равен:

$$V_x = m \cdot Q, \quad (4)$$

где  $m$  – удельный расход жидкости,  $\text{м}^3/\text{м}^3$ ;

$Q$  – объемный расход газа,  $\text{м}^3/\text{ч}$ .

Величина  $n$  применяется в пределах от 0,5 до 8  $\text{дм}^3/\text{м}^3$  газов. При больших концентрациях пыли на входе (10 – 12  $\text{г}/\text{м}^3$ )  $n$  применяется равной 6 – 8  $\text{дм}^3/\text{м}^3$ .

Гидравлическое сопротивление полого скруббера при отсутствии встроенного каплеуловителя и газораспределительной тарелки обычно не превышает 250 Па.

Коэффициент эффективности захвата  $\eta_{mx}$  каплями частиц определенного диаметра вычисляется по следующим формулам:

при удельном расходе жидкости  $m < 2 \text{ дм}^3/\text{м}^3$

$$\eta_{mx} = \frac{S_m}{(S_m + 0,35)^2}, \quad (5)$$

при удельном расходе жидкости  $m > 2 \text{ дм}^3/\text{м}^3$

$$\eta_{mx} = 1 - 0,15S_{tk}^{-1,24}, \quad (6)$$

где  $S_{tk}$  – критерий Стокса, зависит от размера капель очищающей жидкости и дисперсности частиц пыли. Он может применяться по справочным данным или рассчитывается по формуле:

$$S_{tk} = \frac{\rho_u d_u^2 v_{ul}}{18\mu_1 d_u}, \quad (7)$$

где  $\rho_u$  – плотность частиц,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;

$d_u$  – диаметр частиц,  $\text{м}$ ;

$v_{ul}$  – скорость газового потока относительно поверхности обтекания или препятствия (или скорость движения капли относительно газа),  $\text{м}/\text{с}$ , рассчитывается по формуле:

$$v_{ul} = \sqrt{\frac{4gd_K p}{3p_T \zeta}}, \quad (8)$$

где  $\zeta = 0.44$  при  $Re > 500$ ;  $p_T$ ,

$p$  – соответственно плотность газа и плотность воды;

$g$  – ускорение свободного падения;

$\eta_T$  – коэффициент динамической вязкости газа, Па · с;

$d_K$  – диаметр капли.

Эффективность пылеулавливания  $\eta$  в аппарате рассчитывается по формуле:

$$\eta = 1 - \exp\left[-\frac{3V_m \eta_T (v_1 + v_2) H}{2Q d_1 v}\right]. \quad (9)$$

где  $v_K$  – скорость осаждения капли, м/с.

Может приниматься по справочным данным зависимости от  $d_K$  и в  $v_T$  или рассчитываться по формуле:

$$v_K = v_{os} - v_t, \quad (10)$$

### Пример расчета полого форсуночного скруббера

**Задание.** Определить геометрические размеры полого форсуночного противоточного скруббера и эффективность его работы. Исходные данные: объемный расход газов – 17000 м<sup>3</sup>/ч; размер частиц 4 мкм; скорость газа – 1 м/с; диаметр капель 200 мкм; удельный расход жидкости – 3 дм<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>; температура газа – 18°C.

**Решение.** Площадь поперечного сечения скруббера:

$$S = \frac{17000}{3600 \cdot 1} = 4,72 \text{ м}^2.$$

Диаметр скруббера определяется с помощью следующей формулы:

$$D = \sqrt{\frac{4 \cdot 4,72}{\pi}} = 2,45 \text{ м}.$$

Высота скруббера определяется с помощью следующей формулы:

$$H = 2,5 \cdot 2,45 = 6,1 \text{ м}.$$

Объемный расход жидкости подаваемой на орошение в аппарат, рассчитывается по следующей формуле:

$$v_K = 17000 \cdot 0,003 = 51 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

Скорость газового потока относительно поверхности обтекания или препятствие (или скорость движения капли относительно газа) равна:

$$v_{OI} = \sqrt{\frac{4 \cdot 9,8 \cdot 200 \cdot 10^0 \cdot 1000}{3 \cdot 1,29 \cdot 0,44}} = 2,146 \text{ м/с}$$

Скорость движения капли рассчитывается по формуле

$$v_n = 2,146 - 1 = 1,146 \text{ м/с}.$$

Критерий Стокса, зависящий от размера капель очищающей жидкости и дисперсности частиц пыли, определяется формулой:

$$S_{tk} = \frac{1800 \cdot (4 \cdot 10^{-6})^2 \cdot 2.146}{18 \cdot 22 \cdot 10^{-6} \cdot 200 \cdot 10^{-6}} = 0.78.$$

Коэффициент эффективности захвата каплями частиц равен:

$$\eta = 1 - 0,15 \cdot 0,78 - 1,24 = 0,836.$$

Эффективность пылеулавливания в аппарате составит:

$$\eta = \left[ -\frac{3 \cdot 51 \cdot 0.836(1+1.146)6.1}{2 \cdot 17000 \cdot 140 \cdot 10^{-6} \cdot 1.146} \right] 1 - \exp = 0.9999$$

### 3 Задания для самостоятельного решения

Определить геометрические размеры полого форсуночного противоточного скруббера и эффективности его работы.

Исходные данные: скорость газа – 1 м/с; диаметр капель 200 мкм; температура газа – 18°C.

Остальные исходные данные принять в соответствии с вариантом (табл. 1).

Таблица 1 – Задания для выполнения работы

| Показатели                                               | № варианта |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|----------------------------------------------------------|------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                                                          | 1          | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     | 7     | 8     | 9     | 10    |
| Объемный расход газа                                     | 18500      | 20000 | 18000 | 20500 | 21000 | 15000 | 25000 | 19500 | 18000 | 17000 |
| Размер частиц мкм                                        | 4          | 5     | 6     | 7     | 4     | 5     | 6     | 8     | 5     | 6     |
| Плотность частиц кг/м <sup>3</sup>                       | 1800       | 1950  | 2000  | 1640  | 1800  | 1870  | 1900  | 22100 | 1790  | 1990  |
| Удельный расход жидкости дм <sup>3</sup> /м <sup>3</sup> | 3          | 3     | 4     | 4,5   | 3,5   | 4     | 3     | 3     | 5     | 4     |

## Практическая работа 7

### РАСЧЕТ ТАРЕЛЬЧАТОГО ПЕННО-БАРБОТАЖНОГО АППАРАТА

#### 1 Цель работы

Ознакомиться с очисткой газов в пенно-барботажных аппаратах, рассчитать параметры аппарата для очистки технологических газов, оценить эффективность очистки газа.

#### 2 Теоретические положения

В основе этих аппаратов лежит взаимодействие газов с жидкостью на тарелках различной конструкции. Характер взаимодействия определяется в значительной степени скоростью газового потока. При малых скоростях

(-1 м/с) газы проникают через слои жидкости в виде пузырей – происходит барботаж.

С ростом скорости газов взаимодействие газового и жидкостного потоков протекает более интенсивно и сопровождается образованием высокотурбулизированной пены, в которой происходит непрерывное разрушение, слияние, образование новых пузырьков. Поэтому газопромыватели такого типа называют пенными аппаратами.

Расчет аппарата сводится к определению геометрических размеров корпуса аппарата, его полного гидравлического сопротивления и общей степени очистки газа от внешних частиц.

В качестве базовой конструкции можно принять аппарат типа ПАСС – пенный аппарат со стабилизатором слоя (табл. 1). Скорость газа в сечении аппарата, исходя из условий стабилизации пены, принимается равной 3 м/с.

Таблица 1 – Нормализованный ряд аппаратов типа ПАСС

| Тип аппарата | Расход газа, тыс. м <sup>3</sup> /ч | Скорость газа в свободном сечении аппарата, м/с | Основные размеры аппарата, мм |            |                                            |                                            |
|--------------|-------------------------------------|-------------------------------------------------|-------------------------------|------------|--------------------------------------------|--------------------------------------------|
|              |                                     |                                                 | высота, Н                     | диаметр, D | диаметр выходного патрубка, D <sub>1</sub> | диаметр выходного патрубка, D <sub>2</sub> |
| ПАСС-Т(Д)-3  | 2,5-3,4                             | 2,9                                             | 3670                          | 600        | 285                                        | 100                                        |
| ПАСС-Т(Д)-4  | 3,4-4,5                             | 2,85                                            | 3790                          | 700        | 355                                        | 100                                        |
| ПАСС-Т(Д)-5  | 4,5-6,2                             | 2,96                                            | 3910                          | 800        | 400                                        | 100                                        |
| ПАСС-Т(Д)-7  | 6,2-8,4                             | 3,05                                            | 4160                          | 920        | 450                                        | 100                                        |
| ПАСС-Т(Д)-10 | 8,4-11,7                            | 2,94                                            | 4300                          | 1100       | 500                                        | 100                                        |
| ПАСС-Т(Д)-14 | 11,7-16,5                           | 2,95                                            | 4860                          | 1300       | 560                                        | 100                                        |
| ПАСС-Т(Д)-20 | 16,5-23,2                           | 3,12                                            | 5300                          | 1500       | 630                                        | 100                                        |
| ПАСС-Т(Д)-30 | 23,2-32,6                           | 3,05                                            | 6050                          | 1800       | 800                                        | 150                                        |
| ПАСС-Т(Д)-40 | 32,6-45,7                           | 3,14                                            | 6710                          | 2100       | 900                                        | 150                                        |
| ПАСС-Т(Д)-50 | 45,7-64,0                           | 3,10                                            | 7630                          | 2500       | 1020                                       | 150                                        |

Площадь сечений корпуса аппарата, м<sup>2</sup>, находится по формуле:

$$S = V / (3600v^0). \quad (1)$$

где V – общий расход газа, м<sup>3</sup>/ч;

v<sup>0</sup> – скорость газа в корпусе аппарата, м/с.

Диаметр скорости аппарата:

$$D_0 = \sqrt{\frac{4S}{\pi}} \quad (2)$$

Принимается действительный диаметр корпуса  $D$  (табл. 1) и находится действительная площадь сечения корпуса аппарата:

$$S_D = \pi D^2 / 4 \quad (3)$$

Уточняется действительная скорость газа в сечении аппарата:

$$v_\partial = v^0 \cdot D_0^2 / D^2. \quad (4)$$

Расход жидкости, м<sup>3</sup>/ч, принимается с учетом оптимально работы аппарата при плотности орошения  $L_0 = 1 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ :

$$L_{жк} = L_0 S_\partial. \quad (5)$$

Живое сечение дырчатой решётки  $S_p$ , м<sup>2</sup>, вычисляется для высоты пены  $H_n = 100 \text{ мм}$  (в расчете взять в м), диаметре отверстий  $d_0 = 5 \text{ мм}$  (в расчете взять в м), и плотности жидкости  $\rho_{жк} = 1000 \text{ кг/м}^3$  по следующей формуле:

$$S_p = 1,37 \cdot v_p^{0,458} \cdot L_0^{0,152} / \Delta H_0^{0,152} \cdot d_0^{0,085} \cdot \rho_{жк}^{0,61}. \quad (6)$$

Проверяется действительная высота слоя пены, м:

$$H_n = 4,8 \cdot v_e^{0,79} \cdot m^{0,2} / (d_0^{0,14} \cdot S_0^{1,9}). \quad (7)$$

где  $m = L_0 / V_e$ ,  $L_0$  взять в л/м<sup>3</sup>,  $V_e = 1000 \text{ л/м}^3$ .

Шаг между отверстиями в случае ромбической разбивки:

$$I = d_0 (0,91 / S_0)^{0,5}. \quad (8)$$

Полное гидравлическое сопротивление, Па аппарата определяется с помощью следующей формулы:

$$\Delta P = \Delta P_p + \Delta P_n + \Delta P_o + \Delta P_a. \quad (9)$$

где величины  $\Delta P_p$ ,  $\Delta P_n$ ,  $\Delta P_o$ ,  $\Delta P_a$  (все в Па) – потери напора соответственно сухой решетки, слоя пены, за счет сил поверхностного натяжения корпуса аппарата:

$$\Delta P_p = 1,82 (v^0)^2 \rho_p / 2. \quad (10)$$

$$\Delta P_n = 0,447 H_n \rho_{жк} g / (v_p^0)^{0,5}. \quad (11)$$

где  $H_n$  найдено по формуле (7).

$$\Delta P_o = 4\sigma / d_n. \quad (12)$$

где  $\sigma$  – коэффициент поверхностного натяжения жидкости, принять равным  $6 \cdot 10^{-3} \text{ Н/м}^2$ .

$$\Delta P_a = \xi_\partial v_e^0 \rho_e / 2. \quad (13)$$

где  $\xi_\partial = 25-28$  – коэффициент гидравлического сопротивления аппарата.

Степень фракционной очистки (в %) может быть рассчитана по формуле для плохосмачиваемых пылей:

$$\eta_\phi = 100 [1 - 87,1 (1,37 - d_m^{0,1}) / (H_n^{1,9} v_e^{0,79})]. \quad (14)$$

где  $d_m$  – средний эквивалентный размер частиц фракций, мкм.

Средний эквивалентный диаметр частиц фракции находятся как

$$d_m = (d_{m1} + d_{m2}) / 2.$$

Степень фракционной очистки вычисляется для каждой фракции.

Общая степень очистки находится как

$$\eta_{\phi} = (\sum \eta_{\phi} \cdot \Delta R) / 100, \quad (15)$$

где  $\Delta R$  – процентное содержание каждой фракции пыли.

### 3 Задания для самостоятельного решения

Рассчитать пенный аппарат для очистки технологических газов, удаляемых после сушки с кипящим слоем и содержащих фосфоритовую пыль.

Температура газа  $75^{\circ}\text{C}$ ; температура орошающей воды  $25^{\circ}\text{C}$ , начальная концентрация пыли  $2 \text{ г/м}^3$ . Остальные данные взять из табл. 2 в соответствии с вариантами.

Таблица 2 – Исходные данные для расчета

| Показатели                              | № варианта                               |      |    |    |      |      |      |    |      |    |
|-----------------------------------------|------------------------------------------|------|----|----|------|------|------|----|------|----|
|                                         | 1                                        | 2    | 3  | 4  | 5    | 6    | 7    | 8  | 9    | 10 |
| Общий расход газа $\text{м}^3/\text{ч}$ | 20                                       | 25,2 | 30 | 19 | 19,5 | 20,7 | 22,6 | 23 | 19,4 | 19 |
| Дисперсный состав фракции. $d_1$ , мкм  | Процентное содержание фракции $\Delta R$ |      |    |    |      |      |      |    |      |    |
| 0-5                                     | 24                                       | 20   | 25 | 19 | 23   | 28   | 22   | 27 | 20   | 24 |
| 5-10                                    | 26                                       | 17   | 28 | 28 | 20   | 15   | 17   | 28 | 19   | 13 |
| 10-15                                   | 17                                       | 19   | 16 | 15 | 24   | 12   | 15   | 18 | 19   | 19 |
| 15-20                                   | 6                                        | 13   | 7  | 16 | 12   | 20   | 14   | 7  | 13   | 18 |
| 20-30                                   | 13                                       | 9    | 15 | 7  | 6    | 16   | 11   | 15 | 9    | 9  |
| >30                                     | 14                                       | 22   | 9  | 15 | 15   | 9    | 11   | 9  | 20   | 17 |

### Практическая работа 8

#### УКРУПНЕННЫЙ РАСЧЕТ МЕХАНИЧЕСКОЙ ВЕНТИЛЯЦИИ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ПОМЕЩЕНИЯ

##### 1 Цель работы

Познакомиться с укрупненным расчетом общеобменной вентиляции производственного помещения, подобрать вентилятор и мощность вентилятора.

##### 2 Теоретическое положение

Для проведения укрупненного расчета механической вентиляции необходимы следующие данные: назначение помещения и его размеры; характер загрязнений; назначение и количество оборудования, материалов, выделяющих вредные вещества и теплоизлучения; характеристика загрязнений по пожароопасности; пожарная опасность помещения; предельно до-

пустимая концентрация вредных веществ в помещении, концентрация загрязнении в приточном воздухе.

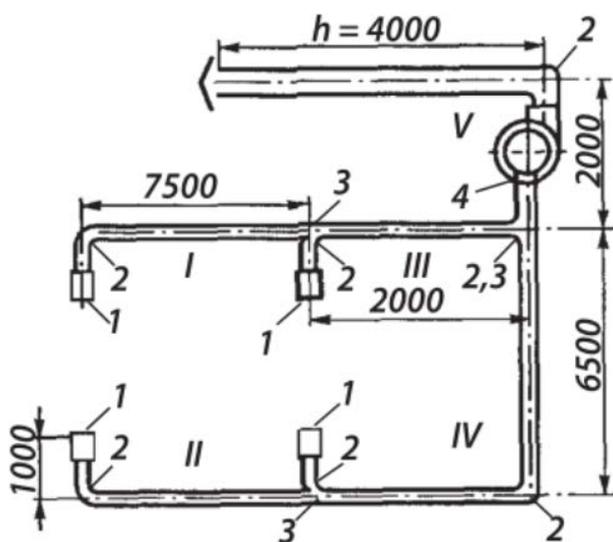
Сначала выбирают способ устранения и предупреждения образования токсических пожаро- и взрывоопасных концентраций, назначают систему вентиляции. Затем разрабатывают схему общеобменной системы вентиляции и схемы местных систем вентиляции.

Далее вычисляется количество вредных веществ, выделяющихся в помещении в течение 1 часа. Из производственного помещения с помощью вентиляции удаляется воздух, содержащий вредные вещества, избыточное количество влаги или избыточное количество тепла.

После оценки объема удаляемого воздуха оценивается общее сопротивление движению воздуха в воздуховоде.

По необходимой производительности и полному расчетному давлению выбирается вентилятор для общественной и местной систем вентиляции тип, номер и технические характеристики вентилятора, а также их исполнение:

обычное – для перемещения неагрессивных сред с температурой не выше 423К, не содержащих липких веществ, при концентрации пыли и других твердых примесей не более  $150 \text{ мг/м}^3$ ; антикоррозионные – для перемещения агрессивных сред; взрывобезопасное – для перемещения взрывоопасных смесей; пылевое – для перемещения воздуха с содержанием пыли более  $150 \text{ мг/м}^3$ .



**Рис. 1.** Схема к расчету вытяжной сети системы вентиляции

В качестве примера рассматривается расчет вытяжной вентиляции в сварочном отделении ремонтной мастерской.

**Пример.** В сварочном отделении ремонтной мастерской на каждом из имеющихся четырех сварочных постов расходуется 0,6 кг/ч электродов марки ОМА-2.

При сжигании 1 кг электродов удельные выделения марганца составляют 830 мг/кг (табл. 1). Рассчитывать вытяжную сеть общественно-приточно-вытяжной вентиляции (рис. 1), обеспечивающую требуемое состояние воздушной среды при условии одновременной работы всех сварщиков, температуру воздуха в помещении принять  $22^\circ\text{C}$ .

**Таблица 1 – Удельные выделения вредных веществ, мг/кг, при сварке и наплавке**

| Технологическая операция                                                      | Сварочные материалы         | Удельные выделения вредных веществ на 1 кг расходуемого сварочного материала q, мг/кг |        |
|-------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|--------|
|                                                                               |                             | наимен.                                                                               | кол-во |
| Ручная дуговая сварка углеродистых и низколегированных конструкционных сталей | Электроды с покрытием типа: |                                                                                       |        |
|                                                                               | ОМА-2                       | Марганец                                                                              | 830    |
|                                                                               | ОЗС-6                       | -                                                                                     | 860    |
|                                                                               | АНО-5                       | -                                                                                     | 1870   |
|                                                                               | К-5                         | -                                                                                     | 1530   |
|                                                                               | АНО-6                       | -                                                                                     | 1950   |
| Ручная дуговая сварка теплоустойчивой стали                                   | Электроды типа:<br>ЦЛ-17    | Хромовый ангидрид                                                                     | 166    |
| Ручная дуговая сварка коррозионно-стойкой жаропрочной и жаростойкой сталей    | Электроды типа:             |                                                                                       |        |
|                                                                               | ОЗЛ-14                      | Хром. ангидрид                                                                        | 640    |
|                                                                               | ОЗЛ-6                       | -                                                                                     | 595    |
|                                                                               | ЭА-606/11                   | Марганец                                                                              | 340    |
|                                                                               | ЦТ-36                       | -                                                                                     | 1190   |
| Ручная дуговая сварка высокопрочных сталей                                    | Электроды типа:             | Хром. ангидрид                                                                        |        |
|                                                                               | ЭА-395/9                    | -                                                                                     | 425    |
|                                                                               | ЭА-981/15                   | -                                                                                     | 450    |
|                                                                               | ВИ-10-6                     |                                                                                       | 720    |
| Ручная дуговая сварка и наплавка чугуна                                       | Электроды типа:             |                                                                                       |        |
|                                                                               | ЦЧ-4                        | Марганец                                                                              | 435    |
|                                                                               | МНЧ-2                       | -                                                                                     | 920    |

**Решение.** Часовой объем воздуха, удаляемого вытяжной вентиляцией одного сварочного поста:

$$L_1 = \frac{Gq}{g_{\text{ндк}} - g_0} = \frac{0.6 \cdot 830}{0.2 - 0} = 2490 \frac{\text{м}^3}{\text{ч}} \quad (1)$$

где  $G$  – масса израсходованных электродов, кг/ч;

$q$  – удельное выделение вредных веществ, мг/кг, при сварке и наплавке (табл. 1);

$g_{\text{ндк}}$  – предельно допустимая концентрация вредного вещества в наружном воздухе, мг/м<sup>3</sup>.

Общее количество воздуха удаляемого вытяжной вентиляцией:

$$L_{\text{общ}} = 4L_1 = 4 \cdot 2490 = 9960 \text{ м}^3/\text{ч}. \quad (2)$$

Диаметры воздуховодов на первом и втором участках сети при скорости движения воздуха  $v = 10$  м/с:

$$d_1 = d_2 = 0,033 \cdot \sqrt{L_1 / (\pi v)} = 0,033 \cdot \sqrt{2490 / (3,14 \cdot 10)} = 0,249 \text{ м}. \quad (3)$$

Полученное значение  $d$  округляется до ближайшего из следующего стандартизированного ряда, мм: 180, 200, 225, 250, 280, 315, 355, 400, 450,

500, 560, 630 и т.д. Принимается  $d_1-d_2=0,28$  м, после чего уточняется скорость движения воздуха в воздуховодах на первом и втором участках сети:

$$v_1 = v_2 = \frac{0.033^2 L_1}{\pi d^2} = \frac{0.00109 \cdot 2490}{3.14 \cdot 0.28^2} = 11 \text{ м/с.} \quad (4)$$

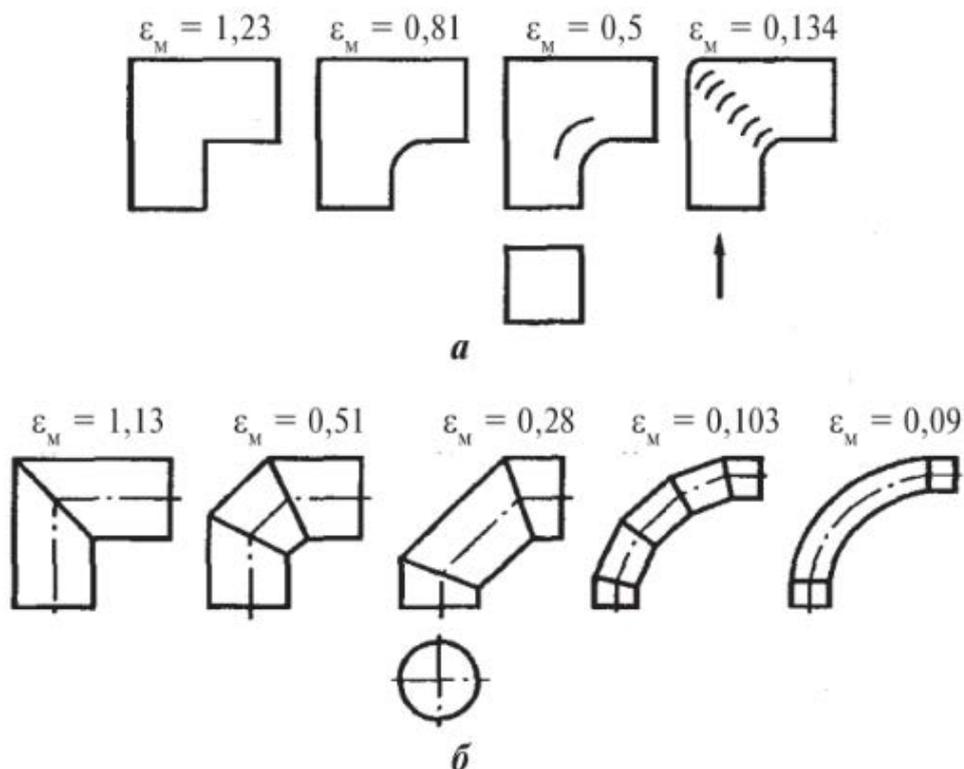
Сопротивление движению воздуха на первом и втором участках сети вытяжной вентиляции выражается следующей формулой:

$$H_1 = H_2 = \frac{\rho v^2}{2} \left( \lambda \frac{l}{d} + \sum_{1-0}^n E_n \right) = \frac{1,197 \cdot 11^2}{2} \left( 0,02 \frac{7,5+1}{0,28} + 0,5 + 1,13 + 0,1 \right) = 169 \text{ Па.} \quad (5)$$

Здесь  $\rho = \frac{353}{273+22} = 1,197 \text{ кг/м}^3$  – плотность воздуха при заданной температуре в помещении;  $\lambda = 0,02$  для воздуховодов из металлических труб; коэффициент местных потерь напора приняты:  $\varepsilon_{м3} = 0,5$  для жалюзи на входе (табл. 2);  $\varepsilon_{м2} = 1,13$  для колена круглого сечения при  $\alpha = 90^\circ$  (рис. 2);  $\varepsilon_{м3} = 0,1$  для внезапного расширения отверстия при отношении площади воздуховодов на последующем участке сети к площади воздуховода на предыдущем участке сети, равном 0,7 (табл. 2).

**Таблица 2 – Значение коэффициента  $\varepsilon_n$  для различных местных сопротивлений**

| Наименование местного сопротивления                 | Значение $\varepsilon_n$ |
|-----------------------------------------------------|--------------------------|
| Жалюзи на входе                                     | 0,5                      |
| Диффузор вентилятора                                | 0,15                     |
| Жалюзи на выходе                                    | 3,0                      |
| Внезапное сужение отверстия при $F_2/F_1$ равном    |                          |
| 0,1                                                 | 0,47                     |
| 0,3                                                 | 0,38                     |
| 0,5                                                 | 0,3                      |
| 0,7                                                 | 0,2                      |
| Внезапное расширение отверстия при $F_2/F_1$ равном |                          |
| 0,1                                                 | 0,81                     |
| 0,3                                                 | 0,49                     |
| 0,5                                                 | 0,25                     |
| 0,7                                                 | 0,1                      |
| Колено с углом поворота $\alpha = 120^\circ$        | 0,5                      |
| Колено с углом поворота $\alpha = 150^\circ$        | 0,2                      |



**Рис. 2.** Значения коэффициентов местных потерь напора в поворотных коленах: *а* – квадратного сечения; *б* – круглого сечения

Диаметры воздуховодов на третьем и четвертом участках сети:

$$d_1 = d_4 = d_1/0,7 = 0,28/0,7 = 0,4 \text{ м.}$$

Скорость движения воздуха в воздуховодах на третьем и четвертом участках сети:

$$v_3 = v_4 = \frac{0.033^2 L_3}{\pi d^2} = \frac{0.00109 \cdot 4980}{3.14 \cdot 0.4^2} = 10.8 \text{ м/с.}$$

где  $L_1=L_2=2L_1=4980 \text{ м}^3/\text{ч}$  – количество воздуха, проходящего за 1 ч через воздуховоды третьего и четвертого участков вентиляционной сети.

Сопротивления движению воздуха на третьем и четвертом участках гидравлической сети вытяжной вентиляции:

$$H_3 = \frac{1.197 \cdot 10.8^2}{2} \left( 0.02 \frac{1+2}{0.4} + 0.5 + 2 \cdot 1.13 + 0.1 \right) = 210 \text{ Па}$$

$$H_4 = \frac{1.197 \cdot 10.8^2}{2} \left( 0.02 \frac{1+2+6.5}{0.4} + 0.5 + 2 \cdot 1.13 + 0.1 \right) = 232 \text{ Па}$$

Диаметр воздуховода на пятом участке вентиляционной сети:

$$d_1 = d\sqrt{0,7} = 0,4/0,7 = 0,57 \text{ м.}$$

Из стандартизированного ряда значений принимаются  $d_5 = 0,56 \text{ м.}$

Скорость движения воздуха в трубопроводе пятого участка

$$v_3 = \frac{0.033^2 L_5}{\pi d_5} = \frac{0.00109 \cdot 9960}{3.14 \cdot 0.56^2} = 11 \text{ м/с.}$$

где  $L_3 = L_{общ} = 9960 \text{ м}^3/\text{ч}$  – количество воздуха, проходящего за час через воздуховоды пятого участка вентиляционной сети.

Сопротивление движению воздуха на пятом участке вытяжной вентиляции

$$H_5 = \frac{1.197 \cdot 11^2}{2} \left( 0.02 \frac{2+4}{0.56} + 0.15 + 1.13 \right) = 110 \text{ Па}$$

где  $\varepsilon_{м4} = 0,15$  – коэффициент местных потерь напора для диффузора вентилятора.

Общее сопротивление воздуховодов сети, Па, равно

$$H_c = \sum_{m1}^5 H_{yr} = 2 \cdot 169 + 210 + 232 + 110 = 890 \text{ Па.} \quad (6)$$

Далее рассчитывается производительность вентилятора с учетом подсосов воздуха в вентиляционной сети:

$$L_r = k_0 L = 1,1 \cdot 9960 = 1956 \text{ м}^3/\text{ч.} \quad (7)$$

По известным  $H_0$  и  $L_n$ , используется рис. 3, выбирается центробежный вентилятор серии Ц4-70 №6 обычного исполнения с КПД  $\eta_3 = 0,59$  и параметром  $A = 4800$ .

Частота вращения вентилятора

$$n_3 = A/N = 4800/6 = 800 \text{ мин}^{-1}. \quad (8)$$

Так как частота вращения электродвигателей, указанных в табл. 3, не совпадает с расчетом частотой вращения вентилятора, то привод его осуществляется через клиноременную передачу с КПД  $\eta_{п} = 0,95$ .

Далее проверяются условия снижения шумности вентиляционной установки:

$$\pi D_r n_n = 3,14 \cdot 0,6 \cdot 800 = 1507,2 < 1800.,$$

т.е. при выбранном вентиляторе и принятых его характеристиках выполняется условие

$$\pi D_r n_n < 1800. \quad (9)$$

где  $D_r$  – диаметр колеса вентилятора, м.

Мощность электродвигателя системы вентиляции

$$P = \frac{L_0 H_0}{3.6 \cdot 10^6 \eta_n \eta_m} = \frac{10956 \cdot 890}{3.6 \cdot 10^6 \cdot 0.59 \cdot 0.59} = 4.85 \text{ кВт.} \quad (10)$$

Установленная мощность электродвигателя для вытяжной системы вентиляции

$$P_{ver} = PK_{...} = 4,85 \cdot 1,15 = 5,58 \text{ кВт.} \quad (11)$$

где  $K_{...} = 1,15$  (табл. 3).

**Таблица 3 – Технические характеристики центробежных вентиляторов серии Ц4-70**

| Номер вентилятора | Диаметр колеса, мм | Подача, тыс. м <sup>3</sup> /ч | Асинхронный электродвигатель закрытого исполнения |                       |               |
|-------------------|--------------------|--------------------------------|---------------------------------------------------|-----------------------|---------------|
|                   |                    |                                | Марка*                                            | Частота вращения, мин | Мощность, кВт |
| 3                 | 300                | 0,55...6,8                     | 4AA63A4Y3                                         | 1380                  | 0,2           |
|                   |                    |                                | 4AA63B4Y3                                         | 1365                  | 0,37          |
|                   |                    |                                | 4A80A2Y3                                          | 2850                  | 1,5           |
|                   |                    |                                | 4A80B2Y3                                          | 2850                  | 2,2           |
| 4                 | 400                | 0,95...11,5                    | 4A71A4Y3                                          | 910                   | 0,37          |
|                   |                    |                                | A471A4Y3                                          | 1390                  | 0,55          |
|                   |                    |                                | A471B4Y3                                          | 1390                  | 0,35          |
|                   |                    |                                | 4A80A4Y3                                          | 1420                  | 1,1           |
|                   |                    |                                | 4A100S2Y3                                         | 2880                  | 4             |
|                   |                    |                                | A4112L2Y3                                         | 2880                  | 5,5           |
|                   |                    |                                | 4A112M2Y3                                         | 2900                  |               |
|                   |                    |                                | 4A71B6Y3                                          | 900                   | 7,5           |
|                   |                    |                                | 4A80A6Y3                                          | 915                   | 0,55          |
|                   |                    |                                | 4A80B4Y3                                          | 1415                  | 0,75          |
|                   |                    |                                | 4A90L4Y3                                          | 1425                  | 1,5           |
|                   |                    |                                | 4A100S4Y3                                         | 1435                  |               |
| 6                 | 600                | 2,5...26                       | 4A90L6Y3                                          | 935                   | 2,2           |
|                   |                    |                                | 4A100L6Y3                                         | 950                   | 4             |
|                   |                    |                                | 4A100L4Y3                                         | 1430                  | 5,5           |
|                   |                    |                                | 4A112M4Y3                                         | 1445                  | 7,5           |
|                   |                    |                                | 4A132S4Y3                                         | 1455                  |               |

\* Условные обозначения 4А – серия, 63, 132 – высота оси вращения, мм,

А, В – первая и вторая длины сердечника: S, M, L – соответственно малая, средняя и большая длина корпуса, 2, 4, 6 – число пар полюсов ( $6000/2 = 3000 \text{ мин}^{-1}$ ,  $6000/4=1500 \text{ мин}^{-1}$ ,  $6000/6=1000 \text{ мин}^{-1}$ ). У – климатическое исполнение (для районов с умеренным климатом); 3 – категория размещения.

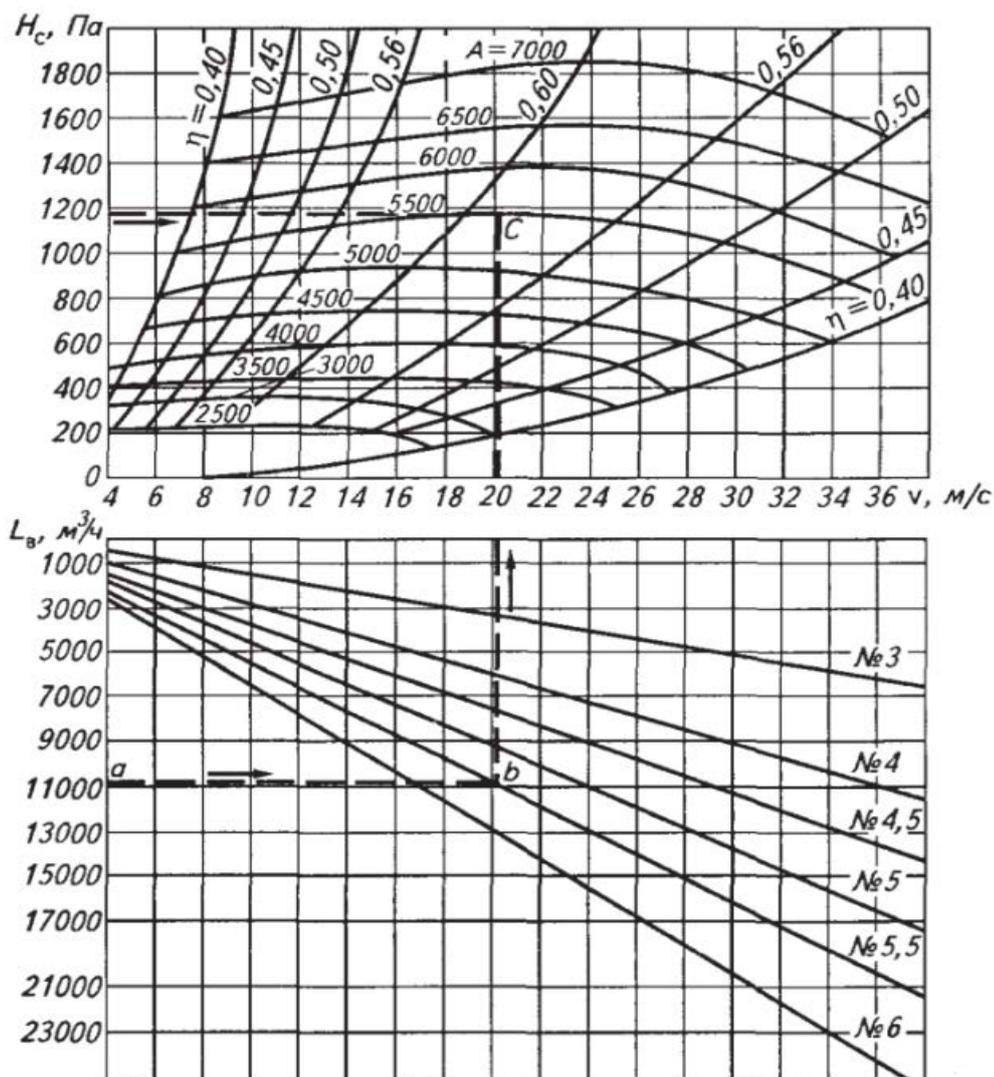


Рис. 3. Номограмма для выбора вентиляторов Ц4-70

Вентиляторы подбирают по аэродинамическим характеристикам (рис. 3). Зная производительность вентилятора, проводят горизонтальную прямую (например, из точки  $a$  на оси ординат  $b$  нижней части графика при  $L_0=11\ 000\ \text{м}^3/\text{ч}$ ) до пересечения с линией номера вентилятора (точка  $b$ ).

Затем из точки  $b$  поднимают вертикаль до пересечения с линией расчетного давления, равного суммарным потерям напора в вентиляционной КПД вентилятора  $\eta$  и безразмерный параметр  $A$ .

При этом следует обеспечить воздухообмен с наибольшим КПД.

#### Вопросы для самопроверки:

1. Что такое эффект суммации? Как учитывается эффект суммации при расчете концентрации загрязняющих веществ в атмосферном воздухе?
2. Что определяет норматив ПДВ?
3. Как изменяется характер рассеивания вредных веществ, содержащихся в выбросах, в зависимости от их температуры и высоты источника выброса?

4. Как изменяются величина максимальной приземной концентрации загрязняющего вещества и расстояние, на котором достигается максимальная концентрация, при увеличении дымовой трубы?
5. Изменится ли величина ПДВ при увеличении высоты дымовой трубы?
6. Какие характеристики пыли определяют выбор способа пылеулавливания?
7. Назовите основные физико-химические характеристики пыли. Охарактеризуйте их.
8. Что такое дисперсность пыли? Как классифицируются пыли по дисперсности?
9. Как определяется дисперсионная группа пыли?
10. Назовите основные механизмы пылеулавливания.
11. Назовите аппараты, в которых пылеулавливание происходит под действием силы гравитации. Для улавливания каких пылей они применяются?
12. Что называется эффективностью пылеулавливания? Какие характеристики пылесадочных камер определяют эффективность пылеулавливания?
13. Каковы механизмы улавливания взвешенных примесей в циклоне?
14. От чего зависит эффективность улавливания взвешенных частиц в циклонах?
15. Какие циклоны являются высокоэффективными, а какие – высокопроизводительными?
16. Какие типы циклонных аппаратов вы знаете? Для улавливания каких типов взвешенных примесей они применяются?
17. Охарактеризуйте принцип работы и область применения групповых циклонов.
18. Охарактеризуйте особенности работы и дайте сравнительные характеристики батарейных циклонов.
19. Что такое гидравлическое сопротивление газоочистного аппарата? Как оно находится?
20. Охарактеризуйте принцип работы электрофильтра.
21. Какие примеси можно удалять из промышленных выбросов с помощью электрофильтров? Какова эффективность очистки выбросов в электрофильтрах от взвешенных частиц разных размеров?
22. Назовите области применения электрофильтров.
23. Чем ограничивается применение электрофильтров?
24. Перечислите основные преимущества и недостатки электрофильтров по сравнению с другими методами очистки газов.
25. Как классифицируются пыли по величине удельного электрического сопротивления пылевого слоя? В чем заключается особенность осаждения пыли каждого типа в электрофильтрах?
26. Охарактеризуйте особенности конструкций и принципа действия однозонных и двухзонных электрофильтров.
27. Охарактеризуйте методы очистки газов от внешних частиц с помощью фильтрования.
28. Назовите механизмы очистки газов от взвешенных частиц в процессе фильтрования.
29. Какие фильтровальные материалы применяются для очистки газов от пыли и туманов?
30. Чем определяется эффективность очистки газов в фильтрах?
31. Как классифицируется фильтр для очистки воздуха от взвешенных частиц?

32. Какие материалы используются в тканевых фильтрах? Охарактеризуйте их свойства.
33. Где применяются рукавные фильтры? Какова их конструкция и принцип работы? Назовите механизмы регенерации рукавных фильтров.
34. Какие аппараты пылеулавливания называются мокрыми? Приведите примеры и охарактеризуйте принцип работы аппаратов.
35. Каковы механизмы улавливания взвешенных частиц в мокрых пылеуловителях?
36. Взвешенные частицы каких размеров эффективно удаляются в мокрых пылеуловителях?
37. В чем заключаются преимущества и недостатки мокрого пылеулавливания по сравнению с сухими методами?
38. Какие требования предъявляются к оборудованию, применяющемуся для мокрой очистки газов?
39. На чем основан процесс мокрого пылеулавливания?
40. Назовите преимущества и недостатки мокрого пылеуловителя перед аппаратами других типов.
41. Как классифицируются аппараты мокрой пылеочистки в зависимости от способа организации поверхности контакта газа и жидкости и от принципа их действия?
42. В чем преимущества и недостатки насадочных аппаратов по сравнению с полыми газопромывателями?
43. Какие вы знаете типы насадок и какие требования к ним предъявляются?
44. Охарактеризуйте принцип пылеочистки в тарельчатых газопромывателях.
45. Охарактеризуйте принцип действия ударно-инерционных аппаратов.
46. Охарактеризуйте принцип действия центробежных газопромывателей.
47. Охарактеризуйте принцип пылеочистки в скрубберах Вентури.

## Раздел 2

### ЗАЩИТА ГИДРОСФЕРЫ

---

#### *Практическая работа 9*

#### ОПРЕДЕЛЕНИЕ НЕОБХОДИМОЙ СТЕПЕНИ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД

##### 1 Цель работы

Определить необходимую степень очистки сточной воды по взвешенным веществам, температуре и БПК<sub>полн</sub> перед выпуском их в водоток.

##### 2 Теоретические положения

Необходимая степень очистки сточных вод определяется в соответствии с санитарными требованиями к условиям спуска их в водоем.

Санитарные правила («Правила охраны поверхностных вод от загрязнения сточными водами») допускают выпуск сточных вод в водные объекты только в тех случаях, когда они не оказывают существенного неблагоприятного влияния на качество воды в водоемах.

Приведенные в правилах нормативы качества воды в водоемах относятся к створам, расположенным на проточных участках на 1 км выше ближайшего пункта водопользования, на непроточных участках и водохранилищах – к створам в 1 км в обе стороны от пункта водопользования.

Уточнение категорий водоемов или участков производится органами санитарно-эпидемиологической службы и рыбохозяйственных организаций.

Общие требования к составу и свойствам воды в водоемах и водотоках соответствующих категорий после выпуска в них сточных вод, подвергшихся необходимой очистке, приведены в табл. 1:

Таблица 1

| Показатели состава и свойств воды в водоеме после выпуска сточных вод | Требования к составу и свойствам воды в водоеме                                                                                                                                                                                                                  |           |                                                                                                                                                                                                                                      |                                                                      |
|-----------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|
|                                                                       | Категории хозяйственно-питьевого и культурно-бытового назначения                                                                                                                                                                                                 |           | Категории рыбохозяйственного назначения                                                                                                                                                                                              |                                                                      |
|                                                                       | I                                                                                                                                                                                                                                                                | II        | I                                                                                                                                                                                                                                    | II                                                                   |
| Содержание взвешенных веществ                                         | Допускается увеличение не более чем на                                                                                                                                                                                                                           |           |                                                                                                                                                                                                                                      |                                                                      |
|                                                                       | 0,25 мг/л                                                                                                                                                                                                                                                        | 0,75 мг/л | 0,25 мг/л                                                                                                                                                                                                                            | 0,75 мг/л                                                            |
|                                                                       | Для водоемов, содержащих в межень более 30 мг/л природных минеральных веществ, допускается увеличение содержания на 5% (взвешенные вещества со скоростью осаждения более 0,4 мм/с для проточных водоемов и более 0,2 мм/с для водохранилищ к спуску запрещаются) |           |                                                                                                                                                                                                                                      |                                                                      |
| Пленки нефтепродуктов масел, жиров и других плавающих примесей        | Не допускаются                                                                                                                                                                                                                                                   |           |                                                                                                                                                                                                                                      |                                                                      |
| Запахи, привкусы, окраска                                             | Допускаются запахи и привкусы интенсивностью не более 2 баллов (непосредственно или после хлорирования).<br>Окраска не должна обнаруживаться в столбике воды высотой                                                                                             |           | Посторонние запахи, привкусы и окраска воды, влияющие на мясо рыб, не допускается                                                                                                                                                    |                                                                      |
|                                                                       | 20 см                                                                                                                                                                                                                                                            | 10 см     |                                                                                                                                                                                                                                      |                                                                      |
| Температура воды                                                      | Допускается повышение не более чем на 3 °С по отношению к среднемесячной температуре самого жаркого месяца.                                                                                                                                                      |           | Допускается повышение не более чем на 5°С к естественной температуре воды (при наличии холодноводных рыб – лососевые, сиговые – общая температура воды не должна превышать 20°С летом и 5°С зимой; в остальных случаях – 28°С и 8°С) |                                                                      |
| Водородный показатель                                                 | Не должен выходить за пределы 6,5–8,5                                                                                                                                                                                                                            |           |                                                                                                                                                                                                                                      |                                                                      |
| Минеральный состав воды                                               | Сухой остаток должен быть не более 1000 мг/л (в том числе хлориды до 300 и сульфаты до 100 мг/л)                                                                                                                                                                 |           | Не нормируется                                                                                                                                                                                                                       |                                                                      |
| Наличие растворенного кислорода                                       | Должно быть не менее 4 мг/л                                                                                                                                                                                                                                      |           | Должно быть не менее 6 мг/л                                                                                                                                                                                                          | Зимой под льдом должно быть не менее 4 мг/л, летом – не менее 6 мг/л |

Окончание таблицы 1

| Показатели состава и свойств воды в водоеме после выпуска сточных вод             | Требования к составу и свойствам воды в водоеме                                                                                                 |        |                                                                                                                                                                                      |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
|                                                                                   | Категории хозяйственно-питьевого и культурно-бытового назначения                                                                                |        | Категории рыбохозяйственного назначения                                                                                                                                              |    |
|                                                                                   | I                                                                                                                                               | II     | I                                                                                                                                                                                    | II |
| Биохимическая потребность в кислороде – БПК <sub>полн.</sub> при температуре 20°C | Не должна превышать                                                                                                                             |        |                                                                                                                                                                                      |    |
|                                                                                   | 3 мг/л                                                                                                                                          | 6 мг/л | 3 мг/л (если в зимний период содержание кислорода в воде снижается для водоемов I категории до 6 мг/л, II категории до 4 мг/л, то разрешается только сброс воды, не влияющий на БПК) |    |
| Возбудители заболеваний                                                           | Не допускаются (после обеззараживания биологически очищенных вод колииндекс не должен превышать 1000 при содержании остаточного хлора 1,5 мг/л) |        | -                                                                                                                                                                                    |    |
| Токсичные вещества                                                                | Не допускаются в концентрациях, которые могут оказывать прямо или косвенно вредное воздействие на живые организмы.                              |        |                                                                                                                                                                                      |    |

В общем виде связь между необходимой степенью очистки сточных вод перед спуском их в водоем и санитарными требованиями к условиям спуска сточных вод в водоем выражается формулой

$$K_{cm}q + K_aQ \leq (aQ + q)K_{np.дон}$$

или после алгебраического преобразования

$$K_{cm} \leq \frac{aQ}{q} (K_{np.дон} - K_p) + K_{np.дон}$$

где  $K_{ст}$  – концентрация загрязнения в сточных водах, при которой последние могут быть спущены в водоем без нарушения санитарных требований, г/м<sup>3</sup>;

$K_p$  – концентрация этого загрязнения в воде водоема выше места выпуска сточных вод, г/м<sup>3</sup>;

$K_{пр.дон}$  – предельно допустимое содержание загрязнения в воде водоема, г/м<sup>3</sup>;

$Q$  – наименьший среднемесячный расход воды в водоеме 95%-ной обеспеченности, м<sup>3</sup>/с;

$q$  – расчетный расход сточных вод, м<sup>3</sup>/с;

$a$  – коэффициент смешения, который определяет часть расчетного расхода водоема  $Q$ , смешивающегося со сточными водами.

### 1. Определение степени смешения и разбавления сточных вод в водоеме у расчетного створа (на 1 км выше по течению от ближайшего пункта водопользования)

Коэффициент смешения  $\gamma$  определяется по методу В.А.Фролова и И.Д. Родзиллера:

$$\gamma = \frac{1 - e^{-a\sqrt[3]{L}}}{1 + \frac{Q}{q} e^{-a\sqrt[3]{L}}}$$

где  $Q$  – наименьший среднемесячный расход водоема года 95%-ной обеспеченности (по данным гидрометеослужбы), м<sup>3</sup>/с;

$q$  – расход сточных вод, м<sup>3</sup>/с;

$e$  – основание натурального логарифма;

$a$  – коэффициент, учитывающий гидравлические факторы смешения и

определяемый по формуле  $a = \varphi \xi^3 \sqrt{\frac{D}{q}}$ ;

здесь  $\varphi$  – коэффициент извилистости;

$\varphi = L / L_{\text{пр}}$  ( $L$  – расстояние от места выпуска сточных вод до расчетного створа по фарватеру (по течению);

$L_{\text{пр}}$  – расстояние от места выпуска сточных вод до расчетного створа по прямой (между центрами конечных створов);

$\xi$  – коэффициент, зависящий от места выпуска сточных вод в водоем ( $\xi = 1$  для берегового выпуска,  $\xi = 1,5$  – для выпуска в фарватер реки);

$D$  – коэффициент турбулентной диффузии; для равнинных рек определяется по формуле М.В. Потапова:  $D = \frac{q \cdot v_{\text{ср}} \cdot H_{\text{ср}}}{37 \cdot n_{\text{ш}} \cdot C^2}$ ;

где  $g$  – ускорение свободного падения;

$v_{\text{ср}}$  – средняя скорость течения реки, м/с;

$H_{\text{ср}}$  – средняя глубина реки, м;

$n_{\text{ш}}$  – коэффициент шероховатости ложа реки, определяемый по справочным данным (по табл. М.Ф. Срибного);

Полученную по расчетам  $T_{\text{ст}}$  сопоставляют с температурой исходных стоков  $T_{\text{исх}}$  и при необходимости намечают мероприятия по их охлаждению.

### 2. Расчет необходимой степени очистки сточных вод по БПК<sub>полн</sub>

Расчет учитывает самоочищение сточных вод в водоеме за счет биохимических процессов, а также разбавление сточных вод водами водоема. Допустимую величину БПК<sub>полн</sub> сточной жидкости при выпуске в водоем  $L_{\text{ст}}$  определяют по формулам:

$$L_{\text{ср}} = n[(L_{\text{ПД}} - L_{\text{см}})e^{k_0} - L_p] + L_p;$$
$$L_{\text{ср}} = \frac{\gamma Q + q}{q} [(L_{\text{ПД}} - L_{\text{см}})e^{k_0} - L_p] + L_p$$

где  $k_0$  – осредненное значение коэффициента неконсервативности органических веществ, обуславливающих БПК<sub>полн</sub> фона и сточных вод, сут<sup>-1</sup>;

$Q$  – расход воды в водоеме, м<sup>3</sup>/с;

$\gamma$  – коэффициент смешения;

$L_{\text{ПД}}$  – предельно допустимая БПК<sub>полн</sub> речной воды до места выпуска сточных вод, мг/л;

$L_{\text{см}}$  – БПК<sub>полн</sub>, обусловленная метаболитами и органическими веществами, смываемыми в водоток атмосферными осадками с площади водосбора на последнем участке пути перед контрольным створом длиной 0,5 суточного пробега;

$k_0$  – примите равным 1;

$t$  – продолжительность перемещения воды от места выпуска сточных вод до расчетного створа, равная отношению расстояния по фарватеру от места выпуска вод до расчетного створа к средней скорости течения воды в реке на данном участке  $v_{\text{ср}}$ , сут;

$L_p$  – БПК<sub>полн</sub> речной воды до места выпуска сточных вод.

Необходимую степень очистки  $\mathcal{E}$  определяют в %:  $\mathcal{E} = \frac{L_{\text{общ}} - L_{\text{см}}}{L_{\text{общ}}} \cdot 100$ .

### 3 Порядок выполнения работы

1. Внимательно изучите теоретические положения.

2. В соответствии с заданием выполните расчеты, подготовьте отчет.

**Задание.** Определить необходимую степень очистки сточной воды по взвешенным веществам, температуре и БПК<sub>полн</sub> до выпуска их в водоем при следующих исходных данных:

Таблица 2

| Показатели                                                                                                 | Значения                                     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------|
| - наименьший среднемесячный расход водоема года 95%-ной обеспеченности (по данным гидрометеослужбы)        | $Q = 21 \text{ м}^3/\text{с}$                |
| - средняя скорость течения на расчетном участке реки                                                       | $v_{\text{ср}} = 0,3 \text{ м/с}$            |
| - средняя глубина реки на расчетном участке                                                                | $H_{\text{ср}} = 1,2 \text{ м}$              |
| - расстояние от места выпуска сточных вод до расчетного створа по фарватеру (по течению)                   | $L = 1100 \text{ м}$                         |
| - расстояние от места выпуска сточных вод до расчетного створа по прямой (между центрами конечных створов) | $L_{\text{пр}} = 1000 \text{ м}$             |
| - содержание взвешенных веществ в сточной воде                                                             | $b_{\text{общ}} = 42 \text{ г/м}^3$          |
| - БПК <sub>полн</sub> сточной воды                                                                         | $L_{\text{общ}} = 8,9 \text{ г/м}^3$         |
| - содержание взвешенных веществ в воде водоема до спуска сточных вод                                       | $b_p = 20 \text{ г/м}^3$                     |
| - средняя температура воды в реке летом                                                                    | $T_m = 16 \text{ }^\circ\text{C}$            |
| - БПК <sub>полн</sub> речной воды до места выпуска сточных вод                                             | $L_p = 3,1 \text{ г/м}^3$                    |
| - температура сточных вод                                                                                  | $T_{\text{исх}} = 50 \text{ }^\circ\text{C}$ |
| Водоем относится к водному объекту хозяйственно-питьевого водопользования.                                 | $L_{\text{см}} = 1,5 \text{ г/м}^3$          |
| Выпуск сточных вод предусматривается у берега.                                                             |                                              |
| Русло естественное в благоприятных условиях, с камнями                                                     |                                              |

Таблица 3

| Показатель           | № варианта |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
|----------------------|------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
|                      | 1          | 2   | 3   | 4   | 5   | 6   | 7   | 8   | 9   | 10  |
| q, м <sup>3</sup> /с | 0,5        | 0,2 | 0,8 | 0,3 | 1,2 | 2,0 | 1,9 | 0,1 | 0,7 | 1,0 |

### Приложение

#### **Водный кодекс Российской Федерации от 03.06.2006 №73-ФЗ**

Приказ Министерства природных ресурсов Российской Федерации от 17.12.2007 № 333 «Об утверждении методики разработки нормативов допустимых сбросов веществ и микроорганизмов в водные объекты для водопользователей».

Таблица 4

| Характеристика русла                                                                                                                                                                                 | Коэффициенты шероховатости $n_{ш}$ естественных водотоков |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|
| Естественное русло в благоприятных условиях (чистое, прямое, незасоренное, земляное, со свободным течением)                                                                                          | 0,025 – 0,033                                             |
| То же, с камнями                                                                                                                                                                                     | 0,03 – 0,04                                               |
| Периодические потоки (большие и малые) при хорошем состоянии поверхности и формы ложа                                                                                                                | 0,033                                                     |
| Земляные русла сухих логов в относительно благоприятных условиях                                                                                                                                     | 0,04                                                      |
| Русла периодических водотоков, несущих во время паводка заметное количество наносов с крупно-галичниковым или покрытым растительностью ложем, периодические водотоки, сильно засоренные и извилистые | 0,05                                                      |
| Чистое извилистое ложе с небольшим числом промоин и отmelей                                                                                                                                          | 0,033 – 0,045                                             |
| То же, но слегка заросшее и с камнями                                                                                                                                                                | 0,035 – 0,05                                              |
| Заросшие участки рек с очень медленным течением и глубокими промоинами                                                                                                                               | 0,05 – 0,08                                               |
| Заросшие участки рек болотного типа (заросли, кочки, во многих местах почти стоячая вода и пр.)                                                                                                      | 0,075 – 0,15                                              |
| Поймы больших и средних рек, сравнительно разработанные, покрытые растительностью (трава, кустарники)                                                                                                | 0,05                                                      |
| Значительно заросшие поймы со слабым течением и большими глубокими промоинами                                                                                                                        | 0,08                                                      |
| То же, с неправильным косоструйным течением и большими завоями и др.                                                                                                                                 | 0,1                                                       |
| Поймы лесистые со значительными мертвыми пространствами, местными углублениями, озерами и др.                                                                                                        | 0,133                                                     |
| Глухие поймы, сплошные заросли (лесные, таежного типа)                                                                                                                                               | 0,2                                                       |

## Практическая работа 10

### РАСЧЕТЫ РЕШЕТОК

#### 1 Цель работы

Рассчитать параметры решетки для улавливания крупных фракций загрязняющих веществ в сточных водах.

#### 2 Теоретические положения

Для улавливания сточных вод крупных нерастворенных загрязнений применяются решетки. Их выполняют из круглых, прямоугольных или имеющих другую форму металлических стержней. Зазоры между стержнями равны 16:19 мм. Решетки, устанавливаемые на насосных станциях, имеют и большие зазоры, которые зависят от количества протекающей сквозь них воды.

Решетки подразделяют на подвижные и неподвижные, с механической или ручной очисткой; устанавливаемые вертикально или наклонно (как при самотечном, так и при напорном поступлении сточных вод).

Для удобства съема загрязнений решетки обычно устанавливают под углом к горизонту  $\alpha = 60^\circ$ .

Решетки, требующие ручной отчистки, устанавливают в случае, если количество загрязнений не превышает  $0,1 \text{ м}^3/\text{сут}$ . При большем количестве загрязнений устанавливаются решетки с механическими граблями. Уловленные на решетках загрязнения измельчают в специальных дробилках и возвращают в поток воды. Решетки размещают в специальных помещениях, снабженных грузоподъемными приспособлениями. Расчетную температуру в здании с решетками принимают равной  $16^\circ\text{C}$ , кратность обмена воздуха – 5.

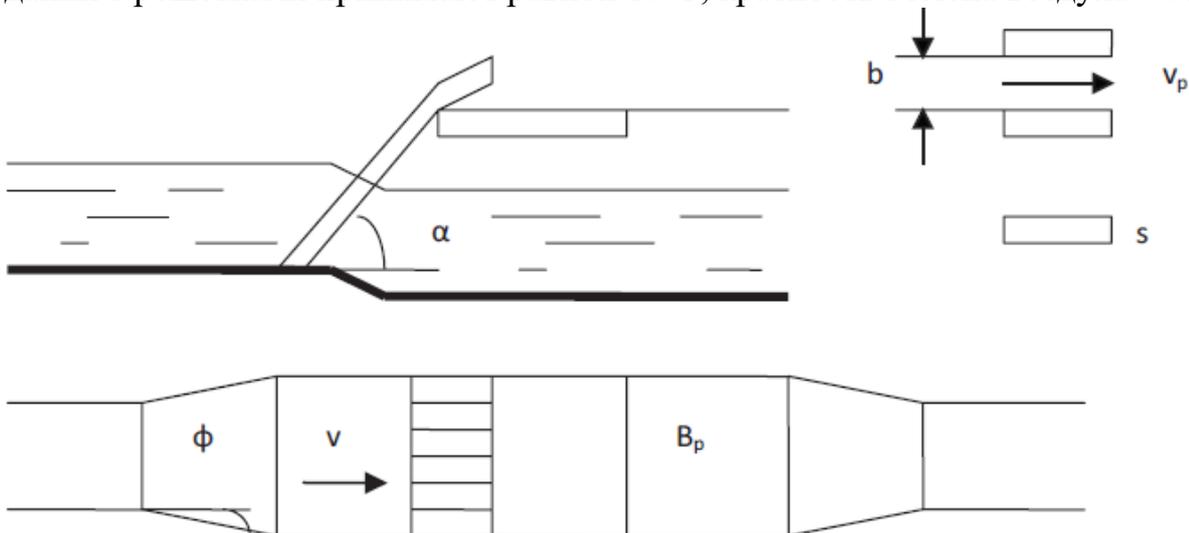


Рис. 1. Схема решетки:

$b$  – ширина прозора;  $v_p$  – средняя скорость потока в прозорах решетки;  $s$  – толщина стержней решетки;  $B_p$  – ширина решетки;  $\alpha$  – угол наклона решетки

**Пример.** Определить размеры решеток и количество улавливаемых загрязнений для очистной станции со средней производительностью  $Q_{\text{ср.сут.}} = 120\,000 \text{ м}^3/\text{сут.}$

Средний секундный расход

$$q_{\text{ср}} = \frac{Q_{\text{ср.сут.}}}{24 \cdot 3600} = 1,39 \frac{\text{м}^3}{\text{с}}$$

Принимаем глубину воды в камере решетки  $h_1 = 1,5 \text{ м}$ , среднюю скорость воды в прозорах между стержнями  $v_p = 1 \text{ м/с}$  и ширину прозоров  $b = 16 \text{ мм}$  (0,016 м).

Количество прозоров решетки определим по формуле

$$n = \frac{1,05 \cdot q_{\text{ср}}}{b h_1 v_p}; \quad n = \frac{1,39 \cdot 1,05}{0,016 \cdot 1,5 \cdot 1} = 61.$$

Принимаем толщину стержней решетки  $s = 0,008 \text{ м}$  и рассчитываем общую ширину решетки:

$$B_p = s(n - 1) + nb \quad B_p = 0,008 \cdot (61 - 1) + 0,016 \cdot 61 = 1,46 \text{ м}$$

Установлено, что с решеток, имеющих ширину прозоров  $b=16 \text{ мм}$  (0,016 м), снимается количество отходов, равное 8 л/год на 1 чел. Принимая норму водоотведения на 1 чел.  $n = 250 \text{ л/ (чел.-сут.)}$ , определим примерное число жителей:

$$N_{\text{нр}} = \frac{Q_{\text{ср.сут.}}}{n} = \frac{120000 \cdot 1000}{250} = 480\,000 \text{ чел.}$$

Объем улавливаемых загрязнений:

$$V_{\text{сут}} = \frac{N_{\text{нр}} \cdot 8}{1000 \cdot 365} = \frac{480000 \cdot 8}{1000 \cdot 365} = 10,52 \text{ м}^3/\text{сут.}$$

При плотности загрязнений  $\rho = 750 \text{ кг/м}^3$  масса загрязнений составит

$$M = 10,52 \cdot 750 = 7890 \text{ кг} = 7,89 \text{ т/сут.}$$

Для задержания и измельчения загрязнений непосредственно в потоке сточной воды без извлечения их на поверхность применяют решетки-дробилки (типа РД).

Решетка-дробилка состоит из щелевого барабана с трепальными граблями и приводного механизма. Сточная вода поступает на вращающийся барабан. Мелкие фракции загрязнений вместе с потоком воды проходят через щели внутри барабана, а крупные задерживаются в нем и измельчаются. Измельченные отбросы с водой также поступают внутрь барабана и затем выходят из решетки-дробилки. Такая конструкция является компактной, а процесс можно полностью автоматизировать.

Кроме комбинированных решеток-дробилок типа РД, промышленность выпускает круглые решетки-дробилки КРД, радиальные РРД, вертикальные ВРД. Характеристики комбинированных решеток-дробилок приведены в табл. 1.

Таблица 1 – Основные характеристики комбинированных решеток-дробилок

| Марка  | Производительность, м <sup>3</sup> /ч | Размер решетки, мм | Суммарная площадь зазоров, см <sup>2</sup> | Мощность, кВт | Масса, кг |
|--------|---------------------------------------|--------------------|--------------------------------------------|---------------|-----------|
| РД-200 | 60,90                                 | 180 (диаметр)      | 190                                        | 0,6           | 320       |
| РД-600 | 2000                                  | 635 –“–            | 450                                        | 1             | 1800      |
| КРД    | 2000                                  | 760 –“–            | 8350                                       | 4,6           | 750       |
| РРД-1  | 3000                                  | 1400×900           | 9600                                       | 17,6          | 2635      |
| РРД-2  | 6000                                  | 2×1400×900         | 19 200                                     | 18,2          | 3500      |
| ВРД-1  | 3000-4000                             | 1024×1640          | 7000                                       | 14,5          | 2430      |
| ВРД-2  | 3500-5000                             | 1024×2040          | 9000                                       | 16            | 1880      |

При выборе решетки по заданному расходу сточных вод ( $Q_{max}$ ) и скорости движения жидкости (обычно  $v = 0,8-1$  м/с) определяют необходимую суммарную площадь зазоров по зависимости

$$F = \frac{Q_{max}}{v}$$

Выбрав из табл. 1 тип решетки с суммарной площадью зазоров  $F_1$ , определяют необходимое число решеток:

$$n = \frac{F}{F_1}$$

Потери напора в решетках составляют:

$$h_p = \beta(s/b)^4 \sin \alpha \frac{v^2}{2g} P,$$

где  $\beta$  – коэффициент, равный 2,42 для прямоугольных и 1,72 для круглых стержней;

$s$  – толщина стержней решетки, мм;

$b$  – ширина зазоров решетки, мм;

$\alpha$  – угол наклона решетки к горизонту;

$g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;

$P$  – коэффициент, учитывающий увеличение потерь напора вследствие засорения решетки; принимают  $P = 3$ .

### 3 Порядок выполнения работы

1. Внимательно изучите теоретические положения.

2. В соответствии с заданием выполните расчеты и подготовьте отчет.

**Задание 1.** Рассчитать параметры решетки для улавливания крупных фракций загрязняющих веществ в сточных водах по исходным данным, приведенным в табл. 2, и определить количество улавливаемых загрязнений.

**Задание 2.** Выбрать комбинированную решетку-дробилку и определить потери напора в решетках.

Таблица 2 – Исходные данные

| Показатели                                | № варианта   |              |                   |                   |              |                   |              |                   |              |              |
|-------------------------------------------|--------------|--------------|-------------------|-------------------|--------------|-------------------|--------------|-------------------|--------------|--------------|
|                                           | 1            | 2            | 3                 | 4                 | 5            | 6                 | 7            | 8                 | 9            | 10           |
| Расход сточных вод<br>м <sup>3</sup> /сут | 120000       | 100000       | 80000             | 90000             | 130000       | 98000             | 50000        | 85000             | 180000       | 200000       |
| Вид стержней                              | Круг-<br>лый | Круг-<br>лый | Прямо-<br>угольн. | Прямо-<br>угольн. | Круг-<br>лый | Прямо-<br>угольн. | Круг-<br>лый | Прямо-<br>угольн. | Круг-<br>лый | Круг-<br>лый |
| Толщина стержней<br>решетки, мм           | 8            | 8            | 6                 | 8                 | 8            | 6                 | 6            | 6                 | 8            | 8            |

Примечание. Плотность осадка 750 кг/м<sup>3</sup>.

## Практическая работа 11

### ВЫБОР УСТРОЙСТВ ДЛЯ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД ОТ ВЗВЕШЕННЫХ ЧАСТИЦ И РАСЧЕТ ИХ ЭФФЕКТИВНОСТИ. РАСЧЕТ ГОРИЗОНТАЛЬНОГО ОТСТОЙНИКА

#### 1 Цель работы

Определить параметры горизонтального отстойника для очистки производственных сточных вод.

#### 2 Теоретические положения

Нерастворимые загрязнения улавливаются из сточных вод с помощью отстойников, которые подразделяются на отстойники *периодического действия* (контактные) и *непрерывного действия* (проточные).

По направлению движения жидкости в сооружении отстойники подразделяют на два основных типа: *горизонтальные* и *вертикальные*. Для очистки сточных вод используют также радиальные отстойники, которые являются разновидностью горизонтальных отстойников.

В зависимости от назначения в технологической схеме очистной станции отстойники подразделяют на первичные и вторичные. Первичные отстойники служат для предварительного осветления сточных вод, поступающих на биологическую или физико-химическую очистку. Вторичные – для осветления сточных вод, прошедших биологическую или физико-химическую очистку.

**Задача.** Рассчитать горизонтальный отстойник для очистной станции для исходных данных, приведенных в табл. 4.

#### Порядок расчета

Определяется средний секундный расход на очистной станции:

$$q_{с.р.} = \frac{Q_{ср.сут}}{24 \cdot 3600}, м^3/с. \quad (1)$$

Максимальный секундный расход с учетом коэффициента неравномерности  $K_{об.макс.}$  (табл.1) равен

$$q_{макс} = q_{с.р.} \cdot K_{об.макс.}, м^3/с. \quad (2)$$

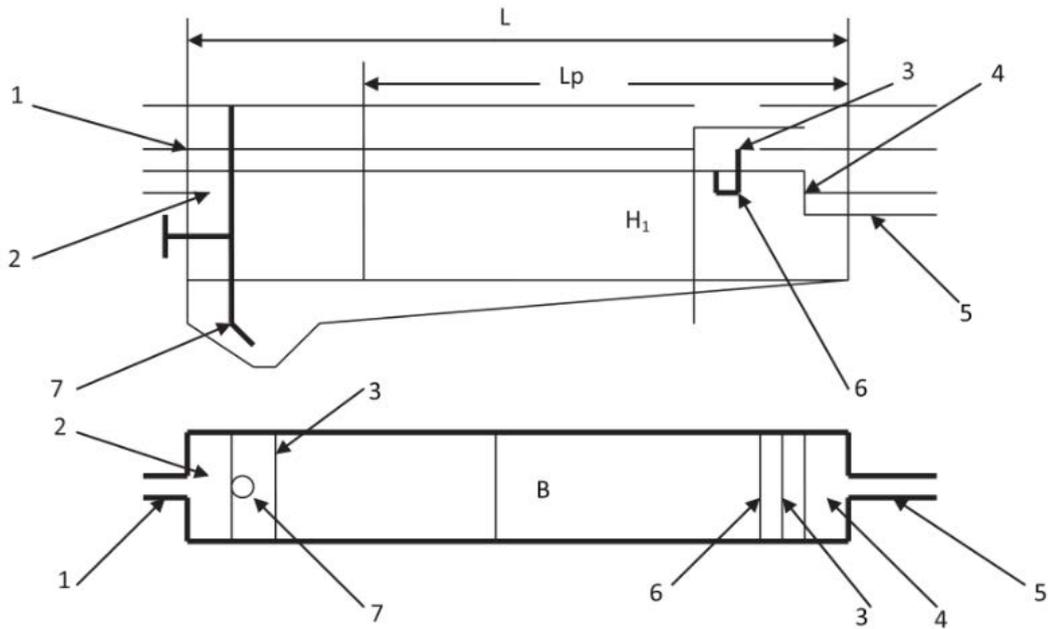
Ширина каждого отделения отстойника определяется по формуле

$$B = \frac{q_{max}}{NH_1 v}. \quad (3)$$

где N – количество отделений.

Для проектирования ширина отделений округляется до целых, и уточняется скорость движений воды в отстойнике:

$$v = \frac{q_{max}}{NBH_1} = \frac{0,699}{6 \cdot 9 \cdot 2,5} = 0,0052, м/с. \quad (4)$$



**Рис. 1.** Горизонтальный отстойник:

1 – подводной лоток, 2 – распределительный лоток, 3 – полупогружные доски, 4 – сборный лоток, 5 – отводной лоток, 6 – лоток для сбора и удаления плавающих веществ, 7 – трубопровод для удаления осадка, В – ширина отделения отстойника,  $H_1$  – глубина проточной части отстойника, L – общая длина отстойника,  $L_p$  – длина рабочего участка отстойника

Для нахождения длины отстойника определим условную гидравлическую крупность частиц  $u_0$ . Для этого при известном содержании взвешенных веществ и  $t=20^\circ\text{C}$  и соответствующем требуемом эффекте осветления воды по табл. 2 определяется показатель степени n. Тогда условная гидравлическая крупность  $u$  будет равна

$$u_0 = \frac{kH_1}{\tau\left(\frac{kH_1}{0,5}\right)^n} \quad (5)$$

Коэффициент использования объема k принимаем из табл. 3 (для горизонтального отстойника).

Вертикальная турбулентная составляющая w определяется по формуле

$$w = 0,05v \quad (6)$$

Длину отстойника определяем по формуле

$$L = \frac{vH_1}{k(u_0 - w)}. \quad (7)$$

Общий объем проточной (рабочей) части сооружения равен

$$V_{\text{омст.}} = N \cdot B \cdot H_1 \cdot L, \text{ м}^3. \quad (8)$$

Масса уловленного осадка за сутки составит

$$Q_{\text{сух}} = \frac{1,2C_0 \Delta Q_{\text{ср.сут}}}{1000 \cdot 1000}, \text{ т}. \quad (9)$$

Объем выпавшего осадка

$$V_{\text{ос}} = \frac{100Q_{\text{сух}}}{(100 - W_{\text{ос}})\rho}, \text{ м}^3 / \text{сут.}, \quad (10)$$

где  $W_{\text{ос}}$  – влажность осадка, %;

$\rho$  – плотность осадка, т/сут.

Для накопления осадка в начале сооружения проектируется бункер в виде перевернутой усеченной пирамиды, верхнее основание которой имеет размер  $4,0 \times 2,5$  м, а нижнее –  $1,0 \times 0,5$  м, высота пирамиды равна 2,5 м, объем бункера одного отделения

$$V_6 = 1/3h(s_1 + \sqrt{s_1s_2} + s_2), \text{ м}^3. \quad (11)$$

В основании отстойника также предусматривается емкость для накопления осадка. Высота ее в конце сооружения равна 0,2 м при уклоне дна  $i$  (табл. 3) высота ее в начале сооружения равна

$$h_{oc} = 0,2 + L \cdot i, \text{ м}. \quad (12)$$

Объем осадочной части в основании одного отделения

$$V_{ocн} = 4 \cdot L \frac{h_{oc} + 0,2}{2}, \text{ м}^3. \quad (13)$$

Общий объем осадочных частей

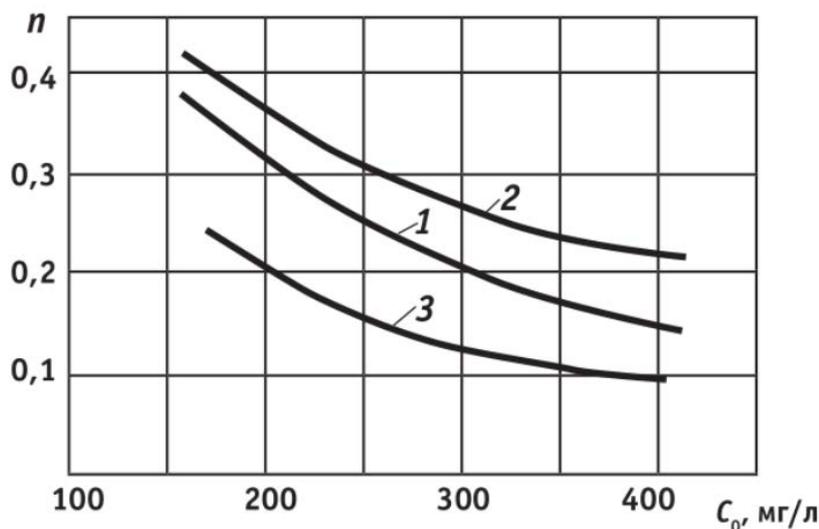
$$V'_{oc} = (V_6 + V_{ocн})N, \text{ м}^3. \quad (14)$$

Осадочные части будут заполняться осадком за время, равное

$$t_1 = V'_{oc}/V_{oc}, \text{ сут}. \quad (15)$$

### 3 Порядок выполнения задания

1. Внимательно изучите теоретические положения и пример расчета.
2. В соответствии с заданием выполните расчет. Исходные данные принять из приведенных таблиц и сведений.
3. Подготовьте отчет.



**Рис. 2.** Зависимость показателя степени  $n$  от исходной концентрации взвешенных веществ в городских сточных водах при эффекте оттаивания  
1-Э = 50%; 2-Э = 60%; 3-Э = 70%

**Таблица 1 – Общий коэффициент неравномерности притока сточных вод**

| Общий коэффициент неравномерности притока сточных вод | Средний расход сточных вод, л/с |      |     |      |      |      |      |      |              |
|-------------------------------------------------------|---------------------------------|------|-----|------|------|------|------|------|--------------|
|                                                       | 5                               | 10   | 20  | 50   | 100  | 300  | 500  | 1000 | 5000 и более |
| Максимальный $K_{0n \text{ ма}}$                      | 2,5                             | 2,1  | 1,9 | 1,7  | 1,6  | 1,55 | 1,5  | 1,47 | 1,44         |
| Минимальный $K_{pe \text{ min}}$                      | 0,38                            | 0,45 | 0,5 | 0,55 | 0,59 | 0,62 | 0,66 | 0,69 | 0,71         |

**Таблица 2 – Продолжительность отстаивания воды  $\tau$  в зависимости от эффекта ее осветления  $t = 20^\circ\text{C}$**

| Эффект осветления,<br>% | Продолжительность отстаивания (секунды) при концентрации взвешенных веществ, мг/дм <sup>3</sup> |      |      |      |
|-------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|------|------|------|
|                         | 100                                                                                             | 200  | 300  | 400  |
| 10                      | 100                                                                                             | 200  | 300  | 400  |
| 20                      | 600                                                                                             | 300  | -    | -    |
| 30                      | 900                                                                                             | 540  | 320  | 266  |
| 40                      | 1320                                                                                            | 650  | 450  | 390  |
| 50                      | 1900                                                                                            | 900  | 540  | 450  |
| 60                      | 3800                                                                                            | 1200 | 870  | 680  |
| 70                      | -                                                                                               | 3600 | 2600 | 1830 |

**Таблица 3 – Расчетные параметры первичных отстойников**

| Первичные отстойники                               | Коэффициент использования, k | Рабочая глубина отстойной части, Н <sub>1</sub> , м | Ширина В <sub>1</sub> , м | Скорость потока, V, мм/с | Уклон днища, i | Угол наклона пластин, град |
|----------------------------------------------------|------------------------------|-----------------------------------------------------|---------------------------|--------------------------|----------------|----------------------------|
| Горизонтальный                                     | 0,5                          | 1,5-4                                               | (2-5)H                    | 5-10                     | 0,005          |                            |
| Радиальный                                         | 0,45                         | 1,5-5                                               |                           | 5-10                     | 0,05           |                            |
| Вертикальный                                       | 0,35                         | 2,7-3,8                                             |                           |                          |                |                            |
| С вращающимся сборно-распределительным устройством | 0,85                         | 0,8-1,2                                             |                           |                          | 0,05           |                            |
| С нисходяще-восходящим потоком                     | 0,65                         | 2,7-3,8                                             |                           | (2-3)                    |                |                            |
| Тонкослойный;                                      |                              |                                                     |                           |                          |                |                            |
| Противоточная                                      | 0,5-0,7                      | 0,025-0,2                                           | 2-6                       |                          |                | 45-60                      |
| Прямоточная                                        | 0,5-0,7                      | 0,025-0,2                                           |                           |                          |                | 45-60                      |
| Перекрестная схема                                 | 0,8                          | 0,025-0,2                                           |                           | 1,5                      | 0,005          | 45-60                      |

**Таблица 4 – Варианты заданий**

| Показатели                                                          | № варианта |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|---------------------------------------------------------------------|------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                                                                     | 1          | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     | 7     | 8     | 9     | 10    |
| Суточный расход сточной вод Q <sub>ср,сут</sub> м <sup>3</sup> /сут | 40000      | 45000 | 50000 | 40000 | 60000 | 55000 | 70000 | 30000 | 65000 | 80000 |
| Содержание взвешенных веществ в воде C <sub>0</sub> , мг/л          | 200        | 400   | 350   | 400   | 350   | 280   | 400   | 390   | 320   | 360   |
| Требуемый эффект осветления воды Э, %                               | 45         | 50    | 50    | 70    | 40    | 50    | 60    | 70    | 70    | 50    |

*Примечание.* Средняя скорость движения воды в отстойнике  $v = 5$  мм/с, глубина проточной части сооружения  $H_1 = 2,5$  м.

## Практическая работа 12

### РАСЧЕТ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ГИДРОЦИКЛОНА

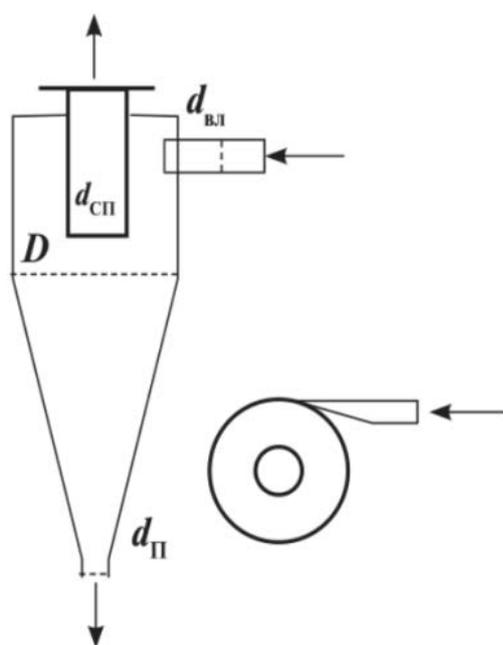
#### 1 Цель работы

Определить геометрические размеры гидроциклона, рассчитать эффект очистки и диаметр граничного зерна, задерживаемого гидроциклоном.

#### 2 Теоретические положения

Для интенсификации процессов механической очистки сточных вод путем использования аппаратов, использующих центробежную силу, наиболее широкое распространение получили однокорпусные батарейные многоярусные напорные гидроциклоны. На рис. 1 приведена схема одиночного гидроциклона.

Напорный гидроциклон состоит из цилиндрической и конической частей. Рабочий поток сначала поступает в цилиндрическую часть гидроциклона по тангенциально расположенному вводу, и двигаясь по винтовой спирали возле стенок аппарата, направляется в его коническую часть. При этом возникают значительные центробежные силы, под действием которых более тяжелые взвешенные частицы, содержащиеся в сточной воде, перемещаются от осей гидроциклона к его стенкам по спиральной траектории вниз и через шламовую насадку, которая находится в нижней части, отводятся из гидроциклона. В конечной части на уровне, соответствующем  $0,7D$  ( $D$  – диаметр цилиндрической части), поток поворачивает к центральной оси и затем движется по цилиндрической спирали вверх к сливной насадке, через которую удаляется из аппарата. Осветленная вода выводится через сливной патрубком, расположенный по оси циклона в верхней части.



Примеси отделяются за счет центробежных сил, поэтому эффективность разделения высока при незначительных габаритах аппарата.

Благодаря простоте конструкции и малой стоимости, удобству в обслуживании и надежности в работе, малогабаритности и высокой производительности на единицу объема напорные гидроциклоны имеют преимущества перед аналогичными аппаратами и вытесняют другие виды механической очистки.

Рис. 1. Напорный гидроциклон

Гидроциклоны широко применяются для осветления высокомутных речных вод, для выделения грубодисперги-

рованных веществ из сточных вод прокатных производств, огнеупорных и керамических заводов, мясокомбинатов и животноводческих комплексов, для очистки шахтных и буровых вод, мощных вод транспортных предприятий и сахарных заводов, для отмывки осадка из песколовков.

Основными критериями, позволяющим судить о работе гидроциклона, является производительность, крупность граничного зерна, степень очистки воды и потери воды через шламовое отверстие.

Под крупностью граничного зерна понимается размер таких частиц, которые, находясь в равновесии под действием центробежной силы и силы сопротивления жидкости, вращается на определенном радиусе гидроциклона, а затем распределяется поровну между продуктами разделения. Все частицы большей крупности поступают в шламовый насадок, а меньшей – в верхние слои.

Эффективность работы гидроциклона зависит от расхода и свойств осветляемой воды, концентрация взвешенных частиц в воде и их гранулометрического состава, плотности и вязкости воды, от геометрических размеров гидроциклона и их соотношений диаметра цилиндрической части  $D$  и ее высота  $h$ , площади входного отверстия  $F$  и диаметра сливной  $d_{сл}$  и шламовой насадок  $d_n$ , угла конической части и ее высоты  $h$ .

Исходными данными для расчета основных конструктивных параметров гидроциклона являются: общий расход сточных вод  $Q_0$ ; фракционный состав загрязнений в исходной воде: концентрация взвешенных веществ в исходной  $k_0$  и осветленной воде  $k$ .

В табл. 1 приведены основные размеры гидроциклонов.

**Таблица 1 – Основные размеры гидроциклонов**

| Внутренний диаметр, мм | Угол конической части $\alpha$ , град | Диаметр сливного патрубка $d_{сл}$ , мм | Размер патрубка, $b \times h$ мм×мм | Диаметр шламового насадка, $d_{мл}$ , мм | Диаметр подводящей трубы, мм | Производительность, $м^3/ч$ | Масса конструкции, кг |              |
|------------------------|---------------------------------------|-----------------------------------------|-------------------------------------|------------------------------------------|------------------------------|-----------------------------|-----------------------|--------------|
|                        |                                       |                                         |                                     |                                          |                              |                             | литой                 | футерованной |
| 75                     | 20                                    | 28                                      | 10×30                               | 9,12,17                                  | 15                           | 5-7                         | -                     | -            |
| 150                    | 20                                    | 50                                      | 22×50                               | 12,17,24,34                              | 30,5                         | 12-35                       | 116                   | 94           |
| 250                    | 20                                    | 80                                      | 40×80                               | 24,34,48,75                              | 60                           | 30-86                       | 50                    | 209          |
| 350                    | 20                                    | 115                                     | 50×135                              | 34,48,75,96                              | 71,4                         | 55-160                      | 426                   | 344          |
| 500                    | 20                                    | 160                                     | 80×160                              | 48,75,96,150                             | 106,7                        | 98-280                      | 724                   | 605          |

Последовательность расчетов технологических и конструктивных параметров гидроциклона сводится к следующему:

1. Определяется требуемый эффект очистки в %:

$$\mathcal{E} = \frac{k_0 - k_1}{k_0} 100. \quad (1)$$

2. По фракционному составу загрязнений в исходной воде требуемому эффекту очистки определяется требуемый диаметр граничного зерна  $\delta_{гр}$ .

3. Задается диаметр гидроциклона  $D$ . Если требуемый диаметр граничного зерна  $\delta_{гр}$  задан, то предварительно диаметр гидроциклона и другие его геометрические параметры можно выбрать исходя из заданной крупности разделения  $\delta_{гр}$  (табл. 2).

Таблица 2 – Крупность слива для разных типов циклонов

| Показатель             | Тип циклона |                    |                   |                   |                   |
|------------------------|-------------|--------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
|                        | ГЦ-75       | ГЦ-150<br>ГЦК-150* | ГЦ-250<br>ГЦК-250 | ГЦ-350<br>ГЦК-350 | ГЦ-500<br>ГЦК-500 |
| Внутренний диаметр, мм | 75          | 150                | 250               | 350               | 500               |
| Крупность слива, мкм   | 22-60       | 28-95              | 37-135            | 44-180            | 52-249            |

\*В обозначении гидроциклонов, футерованных каменным литьем, добавляется буква К.

4. Производительность одного гидроциклона при оптимальных значениях эквивалентного диаметра питающего патрубка  $d_{nx} = (0,1 \div 0,4)D$  и давления на входе  $\rho_{nx} = 0,3 \div 2,5 \cdot 10^5$  Па определяют по формуле в м<sup>3</sup>/ч

$$Q_1 = kd_{nx}^2 \sqrt{P_{vc} \cdot 10^{-5}}. \quad (2)$$

где  $k = 1,5 \cdot 2,5$ ;

$d_{nx}$  – диаметр входного патрубка, см;

$\rho_{nx}$  – давления на входе, Па.

5. Число гидроциклонов в блоке находят по формуле

$$n = Q_n / Q. \quad (3)$$

Полученное число гидроциклонов округляется до ближайшего целого числа  $n_0$ , а затем уточняются производительность одного гидроциклона и давление на входе по формулам:

$$Q = Q_0 / Q_{n0}. \quad (4)$$

$$P_{rx} = Q_2 / (k). \quad (5)$$

6. Выбирают оптимальные геометрические размеры гидроциклона: диаметр сливного патрубка  $d_{сл} = (0,2 \div 0,6)D$ ; диаметр шламовой насадки  $d_{ш} = (0,1 \div 0,3)D$ ; угол конусности  $\alpha = 10 \div 30^\circ$ ; высота цилиндрической части  $h_{ц} = (1 \div 2)D$ ; глубина погружения сливного патрубка  $h_{сл} = (0,15 \div 1)D$  (табл.1).

7. Расход, проходящий через сливной и шламовый патрубки, определяют по формулам в м<sup>3</sup>/ч:

$$q_{cj} = Q \frac{d_{cj}^2}{d_{cj}^2 + d_c^2}; \quad (6)$$

$$q_w = Q \frac{d_{cj}^2}{d_{cj}^2 + d_w^2}; \quad (7)$$

8. Скорость на входе и тангенциальная скорость у стенки гидроциклона вычисляются по формулам, в м/с; ( $Q$  – в м<sup>3</sup>/с;  $d_m$  – в м):

$$v_{nf} = \frac{4Q}{\pi d_{nf}^2}; \quad (8)$$

$$v_{dl} = 0,94^4 \sqrt{F_{nl}/F_{cl} v_{cx}}, \quad (9)$$

где  $F_{ex}$  и  $F_{cl}$  – площадь входного и сливного отверстий в м<sup>2</sup>.

9. Тангенциальная скорость на радиусе сливного отверстия определяется по формуле, в м/с:

$$v_{tcl} = v_{l0} \frac{\left(1 + \frac{1}{A}\right) J^{\frac{1}{A}}}{1 + \frac{1}{A} r^{\frac{1}{A} + 1}}; \quad (10)$$

$$A = 0,55 \left(\frac{d_{cl}}{d_{cl}}\right)^2 - 1; \quad (11)$$

где  $r_{cl} = r_{cl} / R$  – относительный радиус сливного отверстия ( $R$  – радиус циклона).

10. Радиальная скорость на радиусе сливного отверстия гидроциклона при радиальной скорости у стенки  $v_{r0} = (0,25 \div 0,3)v_{r0}$  находится по формуле, в м/с:

$$v_{cm} = v_1 \left[ \frac{1 - r_{cm}}{r_{cl}(1 - r_{cl}r_{cm})} \right]; \quad (12)$$

где  $r_{cl}$  – относительный радиус стенки конической части гидроциклона.

$$r_{cm} = 1 - 0,5(1 - d_{cl})tg^a. \quad (13)$$

где  $d_{cl} = d_{cl} / D$ .

11. Диаметр граничного зерна определяют по формуле, в м:

$$\delta = \frac{3}{8} \frac{C}{Rc_{\delta}^n} \frac{\rho_{ж} d_{cl}}{(\rho_{тв} - \rho_{ж})} \frac{v_{тв}^2}{v_{tcl}^2}, \quad (14)$$

где  $Re_0$  – критерий Рейнольдса по частице:

$$Re_0 = v_{r_{cl}} \delta_{гр} / \nu. \quad (15)$$

где  $\nu$  – коэффициент кинематической вязкости:

$C$  и  $n$  – постоянные величины, зависящие от области сопротивления:

$$Re_{\delta} \leq 1, C = 24, n = 1;$$

$$1 < Re_{\delta} \leq 50, C = 23,4, n = 0,723;$$

$$50 < Re_{\delta} \leq 700, C = 7,8, n = 0,425;$$

$$700 < Re_{\delta} \leq 2 \cdot 10^6, C = 0,48, n = 0;$$

$$Re_{\delta} > 2 \cdot 10^6, C = 0,18, n = 0;$$

$\rho_{тв}$  и  $\rho_{ж}$  – плотность твердой и жидкой фаз.

Диаметр граничного зерна вычисляют методом последовательных приближений. В качестве первого приближения задается требуемый диаметр граничного зерна  $\delta_{гр}$ .

12. При несоответствии полученного диаметра граничного зерна заданному изменяется диаметр гидроциклона  $D$  согласно равенству

$$\delta_1 / \delta_2 = \sqrt{D_1 / D_2}. \quad (16)$$

и расчет повторяется.

### 3 Порядок выполнения работы

1. Внимательно изучите порядок выполнения расчетов.
2. В соответствии с заданием выполните расчет и подготовьте отчет.

**Задание 1.** Определить эффект очистки и диаметр граничного зерна, задерживаемого гидроциклоном из мочных вод автопредприятия с исходной концентрацией взвесей  $k_0$ .

Общее количество мочных вод, исходная концентрация взвеси и требуемые размеры взвешенных веществ в осветленной воде ( $\delta_{гр}$ ) приведены в табл. 3.

Концентрация взвешенных веществ в очищенной воде не должна превышать  $k_1 = 1500$  мг/л, плотности твердой и жидкой фаз равны  $\rho_{ТВ} = 2,56$  и  $\rho_{Ж} = 1$  г/см<sup>3</sup>; коэффициент кинематической вязкости  $\nu = 1,01 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с. Принять  $k = 1,5$ .

Задание выполнить в соответствии с вариантами, приведенными в табл. 3.

Таблица 3

| Показатель                                           | № варианта |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|------------------------------------------------------|------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                                                      | 1          | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     | 7     | 8     | 9     | 10    |
| Расход сточных вод, м <sup>3</sup> /ч                | 75         | 72    | 74    | 70    | 73    | 74    | 71    | 72    | 73    | 71    |
| Давление на ходе · 10 <sup>5</sup> Па                | 2,0        | 2,1   | 2,2   | 2,0   | 2,15  | 2,05  | 2,0   | 1,9   | 1,95  | 2,1   |
| Требуемый диаметр граничного зерна $\delta_{гр}$ мкм | 60         | 55    | 50    | 65    | 55    | 60    | 50    | 65    | 60    | 55    |
| Исходная концентрация взвеси $k_0$ , мг/л            | 13000      | 15000 | 14000 | 13000 | 14500 | 13500 | 13000 | 14000 | 13500 | 15000 |

### Практическая работа 13

#### РАСЧЕТ УСТАНОВОК ХИМИЧЕСКОЙ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД

##### 1 Цель работы

Изучить установки химической очистки сточных вод, рассчитать хлораторную установку и установку нейтрализации сточных вод.

## 2 Теоретические положения

Обезвреживание патогенной микрофлоры в природной воде, используемой для питьевого водоснабжения, а также очищенных сточных вод проводится на хлораторных установках. При очистке сточных вод используют установки нейтрализации. Рассмотрим алгоритм установок.

### 1. Расчет хлораторной установки

Расчет хлораторной установки сводится к определению количества хлора, размеров установки и времени контакта воды с хлором.

Средний секундный расход воды на очистную станцию:

$$q_{\text{ср}} = Q_{\text{ср.сут}} / (24 \cdot 3600) \text{ м}^3/\text{с}. \quad (1)$$

Максимальный часовой расход с учетом общего коэффициента неравномерности  $K_{\text{общ.мах}}$  (табл. 1)

$$Q_{\text{мах ч}} = \frac{Q_{\text{ср.сут}}}{24} K_{\text{общ.мах}} \text{ м}^3/\text{ч}. \quad (2)$$

Таблица 1

| Общий коэффициент неравномерности притока сточных вод | Средний расход сточных вод, л/с |      |     |      |      |      |      |      |              |
|-------------------------------------------------------|---------------------------------|------|-----|------|------|------|------|------|--------------|
|                                                       | 5                               | 10   | 20  | 50   | 100  | 300  | 500  | 1000 | 5000 и более |
| Максимальный $K_{\text{gen max}}$                     | 2,5                             | 2,1  | 1,9 | 1,7  | 1,6  | 1,55 | 1,5  | 1,47 | 1,44         |
| Минимальный $K_{\text{gen min}}$                      | 0,38                            | 0,45 | 0,5 | 0,55 | 0,59 | 0,62 | 0,66 | 0,69 | 0,71         |

Доза хлора для дезинфекции воды принимается  $D_{\text{хл}} = 3 \text{ г/м}^3$ . Расход хлора за 1 час при максимальном расходе:

$$q_{\text{хл}} = \frac{D_{\text{хл}} Q_{\text{мах ч}}}{1000} \text{ кг/ч}. \quad (3)$$

Расход хлора в сутки:

$$q_{\text{хл}} = \frac{D_{\text{хл}} Q_{\text{ср.сут}}}{1000} \text{ кг/сут}. \quad (4)$$

Для обеспечения полученной производительности в 1 ч необходимо иметь следующее количество баллонов-испарителей:

$$n_{\text{бал}} = q_{\text{хл}} / S_{\text{бал}} \text{ шт.} \quad (5)$$

где  $S_{\text{бал}} = 0,5 \dots 0,7 \text{ кг/ч}$  – съем хлора с одного баллона. Примем баллоны объемом 20 л, содержащие  $m = 25 \text{ кг}$  жидкого хлора.

Проектом предусматриваются две самостоятельные установки для испарения и дозирования хлора. В хлораторной предусматривается установка двух хлораторов ЛО-НИИ-100 с ротаметром типа РС-5. Один хлоратор – рабочий, а другой – резервный.

Всего за сутки будет израсходовано

$$N = \frac{q'_{\text{хл}}}{m} \text{ шт. баллонов}. \quad (6)$$

Для обработки сточной воды предварительно подготавливается хлорная вода, которая смешивается со сточной водой. Для этого хлордозаторная обеспечивается подводом воды питьевого качества с давлением не менее 300 кПа и расходом

$$Q = g_{\text{хл}} \cdot q_{\text{хл}} \text{ м}^3/\text{ч}, \quad (7)$$

где  $g_{\text{хл}} = 0,6 \text{ м}^3/\text{кг}$  хлора – норма водопотребления на подготовку хлорной воды.

Подача хлорной воды для дезинфекции сточной воды производится перед смесителем. Для обеспечения контакта хлора со сточной водой контактные резервуары проектируются по типу горизонтальных отстойников.

$$\text{Их объем} \quad V_{\text{гр}} = Q_{\text{max ч}} T / 60 \text{ м}^3. \quad (8)$$

где  $Q_{\text{max ч}}$  – максимальный часовой расход сточных вод;

$T = 30$  мин – продолжительность контакта хлора со сточной водой.

При скорости движения сточных вод в контактных резервуарах  $v = 10$  мм/с длина резервуара

$$L = 1000 v T, \text{ м}. \quad (9)$$

$T$  взять в секундах.

Площадь поперечного сечения

$$F = V_{\text{к.р.}} / L \text{ м}^2. \quad (10)$$

При глубине  $H = 2,8$  м и ширине каждой секции  $b = 6$  м количество секций

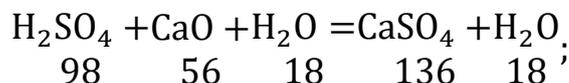
$$n = F / bH \text{ шт.} \quad (11)$$

### **1. Расчет нейтрализационной установки**

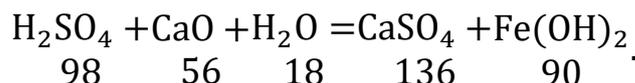
Рассчитать установку для нейтрализации сточных вод металлургического завода. Если поступление сточных вод на очистку неравномерное, то предусматривается приемный регулирующий резервуар вместимостью, равной количеству сточных вод за одну смену.

Если сточные воды металлургического завода содержат серную кислоту и сульфат железа, то предусматривается нейтрализация отработавших травильных растворов негашеной известью в виде известкового молока, при этом происходят следующие реакции:

с серной кислотой –



с сульфатом железа –



На основании вышеприведенных реакций и исходных данных по содержанию свободной кислоты и связанного железа в сточных водах определяется расход извести на нейтрализацию кислых сточных вод и осаждение железа по формуле

$$G = K_3 \frac{100}{B} (aA + b_1 C_1) Q \text{ кг/сут.} \quad (12)$$

где  $A$  – концентрация серной кислоты, кг/м<sup>3</sup>;

$C_1$  – концентрация сульфата железа, кг/м<sup>3</sup>.

Для известкового молока  $K_3 = 1,1$ ;  $B = 50\%$ . По табл. 2 определяется удельный расход реагента (негашеной извести) на нейтрализацию серной кислоты ( $a$ ), а по табл. 3 – количество негашеной извести ( $b$ ), требуемое для перевода железа из растворенного состояния в осадок.

Величина  $b$  приведена для иона железа, поэтому ее необходимо перевести на сульфат железа ( $b_1$ ).

$$b_1 = \frac{M_{Fe}}{bM_{FeSO_4}}, \quad (13)$$

где  $M_{Fe}$  – молярная масса железа;

$M_{FeSO_4}$  – молярная масса сульфата железа.

**Таблица 2 – Количество реагентов для нейтрализации 100%-ных кислот и щелочей**

| Щелочи                | Кислоты |         |         |          |
|-----------------------|---------|---------|---------|----------|
|                       | средняя | соляная | азотная | уксусная |
| Негашеная известь     | 0,59    | 0,77    | 0,46    | 0,47     |
|                       | 1,79    | 1,30    | 2,2     | 2,15     |
| Гашеная известь       | 0,76    | 1,01    | 0,59    | 0,62     |
|                       | 1,32    | 0,99    | 1,70    | 1,62     |
| Кальцинированная сода | 1,08    | 1,45    | 0,84    | 0,84     |
|                       | 0,93    | 0,69    | 1,19    | 1,14     |
| Каустическая сода     | 0,82    | 1,1     | 0,64    | 0,67     |
|                       | 1,22    | 0,91    | 1,57    | 1,50     |
| Аммиак                | 0,36    | 0,47    | 0,27    |          |
|                       | 2,88    | 2,12    | 3,71    |          |

*Примечание.* В числителе показан расход щелочи 1 г кислоты, в знаменателе – расход кислоты на 1 г щелочи.

**Таблица 2 – Количество реагентов, требуемое для удаления металлов**

| Металлы | Реагенты |                     |                                 |      |
|---------|----------|---------------------|---------------------------------|------|
|         | 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  | 1,0      | 1,32                | 1,9                             | 1,34 |
| Свинец  | 0,27     | 0,36                | 0,51                            | 0,38 |

Площадь закрытого склада для извести  $F$  определяется исходя из необходимости хранения месячного запаса ( $t_{\text{ма}} - 30$  сут), высоты слоя извести при сухом способе хранения  $h_{\text{КТ}} = 1,5$  м и ее насыпной плотности  $\rho = 1$  т/м<sup>3</sup>;

$$F = \frac{G t_{\text{нм}}}{h_{\text{атр}}} \text{ м}^2. \quad (14)$$

Для гашения извести применяется механическая лопастная известега-силка С-322 производительностью 1 т/ч, которая устанавливается рядом со складом извести.

Известь приготавливается в виде известкового молока в растворных баках общей емкостью

$$V_p = \frac{G}{n \xi} 100 \text{ м}^3. \quad (15)$$

где  $n$  – число заготовок известкового молока в сутки (принять равным 6);

$\xi$  – концентрация известкового молока по гашеной извести (7,5%),

$G$  принять в т/сут.

Известковое молоко из растворных баков подается в дозатор. Расход известкового молока

$$q_{\text{мг}} = (n V_r \cdot 1000) / 86\,400 \text{ л/с}. \quad (16)$$

Общий расход нейтрализуемого отработавшего травильного раствора и известкового молока

$$q_{\text{общ}} = q_{\text{сл}} + q_{\text{м}} \text{ л/с}. \quad (17)$$

где  $q_{\text{ст}}$  – расход сточных вод л/с.

Смешение нейтрализуемого раствора с известковым молоком производится в смесителе, время перемешивания  $t_{\text{сл}} = 5$  мин, вместимость смесителя

$$V_{\text{сл}} = q_{\text{общ}} \cdot 60 t_{\text{сл}} / 1000 \text{ м}^3. \quad (18)$$

Смеситель принимается круглым со следующими размерами  $D_{\text{см}} = 1,4$  м;  $H_{\text{см}} = 1$  м. В смесителе устанавливают лопастную мешалку с частотой вращения  $40 \text{ мин}^{-1}$ .

Из смесителя сточные воды поступают в проточную камеру нейтрализации, объем которой рассчитывают исходя из продолжительности нейтрализации  $t_a = 30$  мин.

$$V_a = q_{\text{общ}} \cdot 60 t_{\text{сл}} / 1000 \text{ м}^3. \quad (19)$$

Размеры нейтрализационной камеры в плане  $2,4 \times 2,4$  м, глубина 1,5 м, камера нейтрализации оборудуется мешалкой с частотой вращения  $40 \text{ мин}^{-1}$ .

После нейтрализации сточные воды попадают в отстойники вертикального типа с продолжительностью отстаивания не менее 2 ч.

Приняв скорость восходящего потока  $v = 0,2$  мм/с, площадь отстойника определяется как

$$F_{oi} = \frac{q_{\text{общ}}}{v} \text{ м}^2. \quad (20)$$

Диаметр отстойника

$$D_{ox} = \sqrt{\frac{4F_{om}}{\pi}} \text{ м.} \quad (21)$$

Высоту отстойной части отстойника  $h_1$  принимаем равной 1,5 м. Продолжительность пребывания сточных вод в отстойнике

$$t = h_1/v \text{ ч.} \quad (22)$$

( $v$  – в м/ч).

Днище отстойника принимают конусным с углом наклона к горизонту, равным  $45^\circ$ . Объем  $V_{oc}$  осадочной части принимают из расчета суточного объема осадка, объем осадка составляет 25% суточного расхода сточных вод:

$$V_{oc} = 0,25 Q \text{ м}^3. \quad (23)$$

Объем конической части отстойника при высоте конической части, равной  $h_1 = R$

$$V_1 = \frac{1}{3} \pi R^2 h_1 \text{ м.} \quad (24)$$

где  $R$  – радиус отстойника.

Высота накопления осадка в цилиндрической части отстойника

$$h_1 = \frac{V_{oc} - V_1}{\pi R^2} \text{ м.} \quad (25)$$

Высота нейтрального слоя в отстойнике принимается равной  $h_2 = 0,2$  м. Общая высота отстойника:

$$H_{ax} = h_1 + h_2 + h_3 + h_4 \text{ м.} \quad (26)$$

Масса полученного за сутки влажного осадка составит

$$m_{oc.кл} = V_{oc} \cdot \rho_{oc} \text{ т.} \quad (27)$$

где  $\rho_{oc}$  – плотность влажного осадка, принять равным  $1,28 \text{ т/м}^3$ .

Масса полученного за сутки сухого осадка составит

$$m_{oc.сут} = \frac{(100 - \omega)m_{oc.сут}}{100} \text{ т.} \quad (28)$$

где  $\omega$  – влажность осадка в %.

### 3 Порядок выполнения работы

1. Внимательно изучите алгоритм расчета.
2. В соответствии с заданием выполните расчеты установок и подготовьте отчет.

**Задание 1.** Рассчитать хлораторную установку и сооружения для смешения и контакта воды с хлором для очистной станции на полную биологическую очистку. Исходные данные приведены в табл. 4.

Таблица 4

| Показатель                                                                | № варианта |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
|---------------------------------------------------------------------------|------------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
|                                                                           | 1          | 2  | 3  | 4  | 5  | 6  | 7  | 8  | 9  | 10 |
| Среднесуточный расход сточных вод, $Q_{со.сут}$ , тыс.м <sup>3</sup> /сут | 20         | 18 | 22 | 25 | 19 | 27 | 24 | 30 | 17 | 33 |

**Задание 2.** рассчитать установку нейтрализации сточных вод металлургического завода, содержащих отработанные травильные растворы, регенерация которых экономически нецелесообразна, промывные воды и смывы с полов. Поступление стоков на нейтрализацию носит периодический характер, сточные воды содержат серную кислоту и сульфат железа, которые необходимо нейтрализовать известковым молоком, исходные данные взять из табл. 5.

Таблица 5

| Показатель                                       | № варианта |     |     |     |      |     |     |     |     |     |
|--------------------------------------------------|------------|-----|-----|-----|------|-----|-----|-----|-----|-----|
|                                                  | 1          | 2   | 3   | 4   | 5    | 6   | 7   | 8   | 9   | 10  |
| Расход сточных вод, Q м <sup>3</sup> /сут        | 315        | 300 | 290 | 330 | 320  | 260 | 360 | 810 | 340 | 325 |
| Содержание серной кислоты, А кг/м <sup>3</sup>   | 12         | 11  | 13  | 14  | 10   | 10  | 12  | 9   | 16  | 11  |
| Содержание сульфата железа, С1 кг/м <sup>3</sup> | 10         | 9   | 8   | 8,5 | 10,8 | 11  | 14  | 10  | 12  | 9,5 |
| Влажность осадка, ω %                            | 83         | 80  | 84  | 82  | 78   | 85  | 87  | 86  | 81  | 79  |

### **Практическая работа 14**

#### **РАСЧЕТ СОРБЦИОННОЙ УСТАНОВКИ**

##### **1 Цель работы**

Рассчитать количество ступеней абсорбционной установки; определить эффективность очистки сточной воды методом абсорбции.

##### **2 Теоретические положения**

Сорбция – это равновесный динамический процесс поглощения веществ из окружающей среды твердым телом, жидкостью или газом. Поглощающее вещество называется сорбентом, а поглощаемое – сорбатом. Различают поглощение всей массой жидкого или газообразного вещества (абсорбция) и поверхностным слоем твердого или жидкого сорбента (адсорбция). Сорбция, сопровождающаяся химическим взаимодействием сорбента с поглощаемым веществом, называется хемосорбцией.

В технологии очистки сточных вод в основном используют адсорбционный процесс на развитой твердой поверхности сорбента.

Адсорбция растворенных веществ – результат перехода молекулы растворенного вещества из раствора на поверхность твердого сорбента под действием силового поля поверхности. При этом наблюдается два вида межмолекулярного взаимодействия: молекул растворенного вещества с молекулами (или атомами) поверхности сорбента и молекул растворенного вещества с молекулами воды в растворе (гидратация). Разность этих двух сил межмолекулярного взаимодействия и есть та сила, с которой удерживаются извлеченное из раствора вещество на поверхности сорбента.

Сорбционная очистка может применяться совместно с биологической очисткой как метод подготовки и как самостоятельный метод. Сорбционные методы очень эффективны для извлечения из сточных вод ценных растворенных веществ с их последующей регенерацией и использованием очищенных стоков в системе оборотного водоснабжения промышленных предприятий. Адсорбция используется для глубокой очистки вод замкнутого водоснабжения и доочистки сточных вод от органических веществ.

В качестве сорбентов используются искусственные и природные материалы – вода, коксовая мелочь, торф, силикагель, активные глины и др. наиболее эффективными являются активные (активированные) угли разных марок.

Основными показателями сорбентов являются пористость, структура пор, химический состав.

Активность сорбентов характеризуется количеством поглощаемого вещества на единицу объема или массы сорбентов ( $\text{кг}/\text{м}^3$ ,  $\text{кг}/\text{кг}$ ).

Сорбция может осуществляться в статических или динамических условиях.

Наиболее простой конструкцией является насыпной фильтр – колонна с неподвижным слоем сорбентов, через который фильтруется обрабатываемая сточная вода. Скорость фильтрации зависит от растворенных в сточных водах веществ и может составлять от 1 – 2 до 5 – 6 м/ч.

Крупность зерен сорбента от 1,5 – 2 до 4 – 5 мм. Жидкость движется снизу вверх. Содержание взвешенных в воде, поступающей на очистку, не должно превышать 5 мг/л.

Обычно сорбционная установка представляет собой несколько параллельно работающих секций, состоящих из 3–5 последовательно расположенных фильтров.

По достижению предельного насыщения первый фильтр отключается на регенерацию, а обрабатываемая вода подается на следующий фильтр. После регенерации первый фильтр включается в схему очистки последним.

В настоящее время используется цилиндрические одноярусные адсорберы, в которые загружается активированный уголь с высотой слоя 2,5–2,7 м, крупность зерен сорбента составляет 0,25–1,9 мм (табл. 1).

*Таблица 1 – Характеристика активных углей*

| Марка угля  | Полная емкость пор, $\text{см}^3/\text{г}$ | Емкость микропор, $\text{см}^3/\text{г}$ | Размер зерен, мм | Насыпная плотность, $\text{кг}/\text{м}^3$ |
|-------------|--------------------------------------------|------------------------------------------|------------------|--------------------------------------------|
| АГ-2        | 0,6                                        | 0,3                                      | 1-3,5            | 600                                        |
| АГ-3        | 0,8-1,06                                   | 0,37                                     | 1,5-2,8          | 450                                        |
| БАУ         | 1,5                                        | 0,32                                     | 1-3,5            | 260                                        |
| АР-3        | 0,7                                        | 0,19                                     | 1-5,5            | 550                                        |
| КАД-йодный  | 1                                          | 0,23                                     | 1-5              | 380                                        |
| КАД-молотый | 0,42                                       | 0,12                                     | <0,04            | -                                          |
| СКГ         | 0,98                                       | 0,51                                     | 1,5-2            | 420                                        |

Расчет сорбционной установки сводится к определению числа последовательно работающих адсорбентов и эффективности очистки.

## I. Определение числа адсорбентов.

1. Определяется площадь загрузки адсорбционной установки:

$$F_{lds} = \frac{qn}{V} \text{ м}^2, \quad (1)$$

где  $q$  – среднечасовой расход сточных вод, м<sup>3</sup>/ч;

$V$  – скорость движения потока, не более 12 м/ч.

При выключении одного адсорбера на регенерацию скорость не должна увеличиваться более чем на 10%.

2. Определяется число последовательно работающих адсорберов:

$$N_{nh} = \frac{H_{kd}}{H_{mb}} \text{ шт.} \quad (2)$$

где  $H_{kd}$  – высота загрузки одного фильтра (2,5 – 2,7 м);

$H_{mb}$  – общая высота сорбционного слоя, м.

$$H_{кл} = H_1 + H_2 + H_3 \text{ м.} \quad (3)$$

здесь  $H_1$  – высота сорбционного слоя, в котором за время  $t_{adc}$  адсорбционная емкость исчерпывается до степени  $k_1$ :

$$H_1 = \frac{D_{xh}^{man} q_w t_{dxb}}{F_{ab} V_{th}} \text{ м.} \quad (4)$$

здесь  $V_{th}$  – насыпной вес активированного угля, г/м<sup>3</sup>;

$q_w$  в литрах;

$$D_{ch}^{mad} = \frac{C_{cn} - C_{cl}}{k_{nh} a_{vh}^{cam}} \text{ г/л.} \quad (5)$$

где  $D_{ch}^{mad}$  – минимальная доза активированного угля, выгружаемого из сорбента при коэффициенте исчерпания емкости  $k_{адс}$ ;

$C_{cn}, C_{cl}$  – концентрации сорбируемого вещества до и после очистки, мг/л;

$k$  – принимается равным 0,6 – 0,8;

минимальная сорбционная емкость сорбента (мг/г) определяется экспериментально;

$t_{adc}$  – время адсорбции, ч;

$H_2$  – высота загрузки сорбционного слоя, обеспечивающего работу установки до концентрации  $C_{cl}$ , в течение времени  $t_{adc}$ , принимаемого по условиям эксплуатации.

$$H_2 = \frac{D_{lh}^{mdx} q_w t_{adc}}{F_{ah} V_{ck}} \text{ м.} \quad (6)$$

где  $D_{lh}^{mdx}$  – максимальная доза активного угля, г/л;

$$D_{ch}^{mad} = \frac{C_{cn} - C_{cl}}{a_{cl}^{mex}} \text{ г/л.} \quad (7)$$

$H_1$  – резервный слой сорбента, рассчитанный на время регенерации слоя, м:  $H_1 = H_2$ .

## II. Определение эффективности адсорбционной очистки.

1. Определяется расход сорбента для очистки при одноступенчатой работе установки:

$$m_1 = D_{sh}^{pnn} \cdot q_a \text{ кг/ч.} \quad (8)$$

( $q_a$  – в м<sup>3</sup>/ч).

2. Определяется концентрация сорбата в сточных водах при одноступенчатой очистке:

$$C_{d1} = \frac{q_n C_{cm}}{q_n + k_{ech} m_4} \text{ г/л.} \quad (9)$$

( $q_n$  – в л/ч;  $C_{cm}$  – в г/л;  $m_4$  – в кг/ч).

3. Определяется расход сорбента на каждой ступени ( $m_2$  и  $m_4$ ) при двухступенчатой ( $n = 2$ ) и четырехступенчатой ( $n=4$ ) очистке:

$$m_4 = \frac{m_1}{n} \text{ кг/ч.} \quad (10)$$

где  $n$  – число ступеней сорбционной установки

4. Находится концентрация сорбата  $C_{ex2}$  и  $C_{ex4}$  после двух- и четырехступенчатой очистки

$$C_{ex2} = \left( \frac{q_w}{q_m + k_{mh} m_2} \right)^2 C_{em} \text{ г/л.} \quad (11)$$

$$C_{ex4} = \left( \frac{q_w}{q_m + k_{mh} m_4} \right)^4 C_{em} \text{ г/л.} \quad (11a)$$

5. Определяется эффективность очистки  $\mathcal{E}$  на каждой ступени:

$$\mathcal{E}_1 = \frac{C_{cn} - C_{ck}}{C_{en}} 100\%. \quad (12)$$

Аналогично находится  $\mathcal{E}_1$  и  $\mathcal{E}_2$ .

### III. Расчет установки статической сорбции сводится к определению времени защитного действия фильтра.

1. Подача сорбента  $m$  находится по формуле, полученной из уравнения материального баланса:

$$m = \frac{Q(C_0 - C)}{k_{ack} C} \text{ кг/ч.}$$

где  $Q$  – количество обрабатываемых сточных вод, м<sup>3</sup>/ч

$C_0, C$  – концентрации загрязняющих веществ и очищенной воде, мг/м<sup>3</sup>;

$k_{ack}$  – константа адсорбционного равновесия.

2. Если процесс адсорбции осуществляется по одноступенчатой схеме, то концентрация вещества после очистки определяется по формуле

$$C = \frac{Q C_0}{Q + k m} \text{ мг/ч.}$$

3. При числе ступеней очистки, равном  $n$ , концентрация загрязнений в сточной воде после очистки  $n$ -й ступени определяется по формуле

$$C_a = \left( \frac{Q}{Q + k_1 m} \right)^n C_0 \text{ мг/м}^3.$$

4. Расход сорбента, подаваемого на каждую ступень, определяется по формуле

$$m_1 = \frac{Q}{k_{аск}} \sqrt{\frac{C_6}{C_m}} - 1 \text{ кг.}$$

5. Общее количество сорбента

$$m = n \cdot m_n, \text{ кг.}$$

При проектировании установок с противоточным введением сорбента концентрацию вещества после n-й ступени очистки находят по выражению

$$C_n = \frac{k_n x m / Q - 1}{(m k_{рск} / Q)^{e-1} - 1} \text{ мг/м}^2.$$

Время защитного действия фильтра

$$T_\phi = k_n \cdot H_\phi - \tau_\phi, \text{ час,}$$

где  $k_n$  – коэффициент защитного действия;

$H_\phi$  – высота слоя сорбента, м;

$\tau_\phi$  – потеря времени защитного действия, час.

Введение в уравнение величины  $\tau_\phi$  связано с тем, что работа фильтра до «проскока» загрязнений в фильтре возможна только при условии, что длина слоя адсорбента больше некоторой величины, называемой «мертвым слоем».

### 3 Порядок выполнения работы

1. Внимательно изучите порядок расчета.

2. В соответствии с заданием выполните расчет и подготовьте отчет.

**Задание 1.** Рассчитать адсорбционную установку для очистки фенолсодержащих сточных вод при следующих исходных данных: в качестве сорбента используется активированный уголь марки КАД-йодный; требуемая концентрация фенола после очистки 10 мг/л; максимальная сорбционная емкость сорбента 100 мг/г, время адсорбции 10 ч; минимальная сорбционная емкость сорбента 10 мг/г. Остальные данные принять по табл. 2.

Таблица 2

| Показатель                                | № варианта |      |      |     |     |      |      |      |     |     |
|-------------------------------------------|------------|------|------|-----|-----|------|------|------|-----|-----|
|                                           | 1          | 2    | 3    | 4   | 5   | 6    | 7    | 8    | 9   | 10  |
| Расход сточных вод, м <sup>3</sup> /ч     | 200        | 250  | 210  | 190 | 230 | 180  | 260  | 220  | 200 | 210 |
| Концентрация фенола в сточных водах, мг/л | 1000       | 1100 | 1050 | 920 | 980 | 1050 | 1150 | 1250 | 950 | 900 |
| Скорость движения потока жидкости, м/ч    | 5          | 6    | 5,5  | 5   | 6,5 | 5    | 5,25 | 6    | 4,8 | 5   |

**Задание 2.** Определить эффект очистки сточных вод на одно- двух- и четырехступенчатой адсорбционной установке при следующих исходных данных: максимальная активная доза сорбента на 1 м<sup>3</sup> сточных вод = 1,3 кг/м<sup>3</sup>; адсорбционная константа  $k_{\text{ад}}$  = 8000. Остальные данные принять из табл. 3.

Таблица 3

| Показатель                                                   | № варианта |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
|--------------------------------------------------------------|------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
|                                                              | 1          | 2   | 3   | 4   | 5   | 6   | 7   | 8   | 9   | 10  |
| Исходная концентрация загрязняющих веществ, г/м <sup>3</sup> | 350        | 380 | 340 | 370 | 320 | 330 | 390 | 300 | 400 | 420 |
| Расход сточных вод, м <sup>3</sup> /ч                        | 15         | 17  | 13  | 16  | 14  | 15  | 17  | 13  | 16  | 14  |

## **Практическая работа 15**

### **РАСЧЕТ ФЛОТАЦИОННОЙ УСТАНОВКИ**

#### **1 Цель работы**

*Освоить методику расчета флотационной установки.*

#### **2 Теоретические положения**

**Флотация** – это процесс молекулярного прилипания частиц флотируемого материала к поверхности раздела двух фаз, обычного газа (чаще воздуха) и воды, обусловленный избытком слоев, а также поверхностными явлениями смачивания.

Процесс очистки сточных вод, содержащих поверхностно-активные вещества, нефть, нефтепродукты, масла, волокнистые материалы, методом флотации заключается в образовании комплексов «частица – пузырек», всплывании этих комплексов и удалении образовавшегося пенного слоя с поверхности обрабатываемой воды.

Можно выделить следующие способы флотационной обработки сточных вод.

- флотация с выделением воздуха из раствора (вакуумные, напорные и эрлифтные флотационные установки);
- флотация с механическим диспергированием воздуха (импеллерные, безнапорные и пневматические флотационные установки);
- флотация с подачи воздуха через пористые материалы;
- электрофлотация;
- биологическая и химическая флотация.

Различные способы флотации отличаются конструкцией установок и способом разделения жидкой и всплывающей фаз.

Пневматические флотационные установки применяют при очистке сточных вод, содержащих растворенные примеси, агрессивные к механизмам (насосам, импеллерам и др.), имеющим движущиеся части.

### **Расчет пневматической флотационной установки**

Расчет флотационной установки очистки сточных вод сводится к определению размеров флотатора и характеристики устройства для подачи воздуха во флотационную камеру.

Объем флотатора,  $\text{м}^3$ , определяется по формуле

$$V_{\text{ф}} = Q t_{\text{ф}} / [60 (1 - K_{\text{ф}})]. \quad (1)$$

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

$t_{\text{ф}}$  – время флотации, мин;

$K_{\text{ф}}$  – коэффициент аэрации.

Площадь флотатора,  $\text{м}^2$ , рассчитывается по формуле

$$F_{\text{ф}} = V_{\text{ф}} / H_{\text{ф}}. \quad (2)$$

где  $H_{\text{ф}}$  – рабочая глубина флотатора

Требуемый расход воздуха на проведение процесса флотации,  $\text{м}^3/\text{ч}$ , находится по формуле

$$Q_{\text{а}} = I F_{\text{ф}}. \quad (3)$$

где  $I$  – интенсивность аэрации,  $\text{м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ .

Количество флотаторов ( $n_{\text{ф}}$ ) для проведения процесса флотации принимается исходя из ширины  $B_{\text{ф}} = 3$  м и длины  $l_{\text{ф}} = 7,5$  м. По дну флотаторов поперек секций располагаются воздухораспределительные трубы на расстоянии  $l_{\text{тр}} = 0,25$  м друг от друга, общее число труб в каждой флотаторе

$$n_{\text{тр}} = l_{\text{ф}} / l_{\text{тр}} = 7,5 / 0,25 = 30. \quad (4)$$

Общее число сопел во флотаторе

$$n_1 = Q_{\text{в}} / (3600 \int_{\text{к}} v_{\text{с}}). \quad (5)$$

где  $\int_{\text{к}}$  – площадь отверстия каждого сопла,  $\int_{\text{с}} = 0,000000785 \text{ м}^2$  (если диаметр отверстия сопла  $d_{\text{к}} = 1$  мм);

$v_{\text{с}}$  – скорость выхода струи воздуха из сопел,  $v_{\text{с}} = 100$  м/с

Число сопел на каждой воздухораспределительной трубе  $n'_{\text{с}}$  находится по формуле

$$n'_{\text{с}} = n_1 / (2 n_{\text{тр}}). \quad (6)$$

Расстояние между соплами на воздухораспределительной трубе

$$l_{\text{с}} = B_{\text{ф}} / n'_{\text{с}}. \quad (7)$$

### **Пример расчета флотационной установки**

**Задача.** Рассчитать пневматическую флотационную установку при следующих исходных данных:

|                           |                                |
|---------------------------|--------------------------------|
| Расход сточных вод        | $Q = 400 \text{ м}^3/\text{ч}$ |
| Время флотации            | $t_{\text{ф}} = 15$ мин        |
| Коэффициент дэрации       | $K_{\text{ф}} = 0,25$          |
| Рабочая глубина флотатора | $H_{\text{ф}} = 3$ м           |

Интенсивность аэрации  $l = 20 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$

Определяется объем флотатора по формуле

$$V_{\text{ф}} = 400 \cdot 15 / [60(1 - 0,25)] = 133,3 \text{ м}^3.$$

Площадь флотатора равна  $F_{\text{ф}} = 133,3/3 = 44,4 \text{ м}^2$ .

Требуемый расход воздуха на проведение флотации

$$Q_{\text{ф}} = 20 \cdot 44,4 = 888 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

Количество флотаторов ( $n_{\text{ф}}$ ) для проведения процесса флотации принимается исходя из ширины  $B_{\text{ф}} = 3 \text{ м}$  и длины  $l_{\text{ф}} = 7,5 \text{ м}$ . Общее число труб в каждом флотаторе, исходя из расстояния между ними  $l_{\text{гр}} = 0,25 \text{ м}$  друг от друга, рассчитывается как

$$n_{\text{гр}} = 7,5/0,25 = 30$$

Общее число сопел во флотаторе

$$n_t = 888 / (3600 \cdot 0,000000785 \cdot 100) = 3142.$$

Число сопел на каждой воздухораспределительной трубе

$$n'_t = 3142 / (2 \cdot 30) = 52.$$

Расстояние между соплами на воздухораспределительной трубе

$$l_c = 3/52 = 0,058.$$

### 3 Порядок выполнения работы

1. Внимательно изучите порядок расчета
2. В соответствии с заданием выполните расчет и подготовьте отчет.

#### *Задание.*

Рассчитать пневматическую флотационную установку при следующих исходных данных:

| № варианта | $Q, \text{ м}^3/\text{ч}$ | $T_{\text{ф}}, \text{ мин}$ | $K_{\text{нф}}$ | $H_{\text{ф}}, \text{ м}$ | $H_0, \text{ М}$ |
|------------|---------------------------|-----------------------------|-----------------|---------------------------|------------------|
| 1          | 350                       | 15                          | 0,25            | 4                         | 3                |
| 2          | 310                       | 25                          | 0,25            | 4,5                       | 2,5              |
| 3          | 290                       | 20                          | 0,3             | 5                         | 4                |
| 4          | 250                       | 35                          | 0,35            | 4                         | 3                |
| 5          | 20                        | 30                          | 0,40            | 3,5                       | 3                |

### *Практическая работа 16*

#### РАСЧЕТ РАСПЫЛИТЕЛЬНОЙ ЭКСТРАКЦИОННОЙ КОЛОННЫ

##### 1 Цель работы

Закрепить знания по теме «Экстракция» и определить размеры распылительной колонны для извлечения фенола из воды экстракцией бензолом.

##### 2 Теоретические положения

**Жидкостная экстракция** – это процесс извлечения веществ из водного раствора в жидкую органическую фазу, не смешивающуюся с водой. Процессы жидкостной экстракции используют при относительно высоком содержании в сточных водах растворенных органических веществ, представляющих техническую ценность (фенолы, органические кислоты, масла), а также тяжелых цветных металлов (меди, никеля, цинка, кадмия, ртути и др.).

Органические вещества, в которые переходят загрязнения, называются экстрагентами. В качестве экстрагентов используются органические кислоты, спирты, эфиры, кетоны, амины и др.

При проведении экстракции ионов металлов экстрагент образует с ними соединения, способные переходить в органическую фазу. Экстракция большинства неметаллических загрязнений протекает за счет физических процессов (избирательного растворения). В этом случае экстрагент играет роль селективного (избирательного) растворителя неметаллических загрязнений.

Органическая и водная фракция после проведения экстракционной стадии называются соответственно **экстрактом** и **рафинатом**. Загрязняющие компоненты выделяются из экстракта двумя путями – либо регенерацией, либо реэкстракцией, в результате которых обычно достигается и регенерация экстрагента. В качестве реэкстрагирующих растворов (реэкстрагентов) используют водные растворы кислот, солей и оснований.

Основным физико-химическим процессом экстракции является обмен между органической и водной фазами до достижения равновесия. Массообмен осуществляется на межфазной границе. Массообмен лимитируется встречным диффузионным транспортом компонентов от границы в объем фазы и наоборот. Очень медленный процесс молекулярной диффузии должен быть дополнен конвективной диффузией в объеме фазы, для чего необходимо создать в ней интенсивные вихревые токи с помощью гидродинамических воздействий.

Основными количественными характеристиками экстракционного процесса являются коэффициент распределения экстрагируемого вещества между фазами  $k_p$ , коэффициент разделения, или коэффициент селективности,  $\beta$  и степень извлечения  $E$ .

Коэффициент равновесия – это отношение общей концентрации загрязняющего вещества в органической и водной фазах при установлении равновесия:

$$k_p = C_o / C_{ст} \approx const.$$

где  $C_o$  и  $C_{ст}$  – концентрации экстрагируемого вещества соответственно в экстрагенте и сточной воде при установившемся равновесии, мг/м<sup>3</sup>.

Коэффициент распределения зависит от температуры, наличия примесей, величин рН и окислительно-восстановительного потенциала. В табл. 1 приведены данные о некоторых коэффициентах распределения.

*Таблица 1* – Значения коэффициента распределения  $k_p$  некоторых загрязняющих веществ между экстрагентами и водой при комнатной температуре

| Экстрагируемое из воды вещество | Экстрагент  | $k_p$ |
|---------------------------------|-------------|-------|
| Анилин                          | Бутилацетат | 27    |
|                                 | Толуол      | 8-19  |

Окончание таблицы 1

| Экстрагируемое из воды вещество | Экстрагент      | $k_p$    |
|---------------------------------|-----------------|----------|
| Бензойная кислота               | Диэтиловый эфир | 71-91    |
|                                 | Бутилацетат     | 30       |
|                                 | Толуол          | 6-12     |
| Муравьиный альдегид             | Амиловый спирт  | 3        |
| Пикриновая кислота              | Толуол          | 1,7-8,7  |
|                                 | Бензол          | 0,7-5,3  |
|                                 | Хлороформ       | 1,2-2,6  |
| Пиридин                         | Толуол          | 1,4-9,3  |
| Салициловая кислота             | Ацетон          | 126      |
|                                 | Толуол          | 1,7-2,5  |
|                                 | Бензол          | 1,7-4,5  |
|                                 | Хлороформ       | 2,9-4,3  |
| n-Толуидин                      | Бензол          | 51-60    |
| Фенол                           | Бутилацетат     | 51       |
|                                 | Амиловый спирт  | 14-16    |
|                                 | Толуол          | 1,7-9,4  |
|                                 | Бензол          | 2,3-12,5 |
|                                 | Хлороформ       | 3,4-12,5 |
| Хлоруксусная кислота            | Амиловый спирт  | 3,6      |

Степень извлечения  $E$  – это процент извлечения вещества в органическую фазу от общего его количества в обеих фазах.

При одинаковых объемах водной и органических фаз

$$E = \frac{C_j 100}{C_3 + C_{cm}} = \frac{k_p 100}{k_p + 1}$$

При разных объемах водной  $V_{\text{вода}}$  и органической  $V_{\text{орг}}$  фаз степень извлечения может быть рассчитана по формуле

$$E = \frac{C_3 V_{\text{орг}} 100}{C_3 V_{\text{орг}} + C_{cm} V_{\text{водк}}} = \frac{k_p 100}{k_p + \frac{V_{\text{водк}}}{V_{\text{орг}}}}$$

Коэффициент распределения, или коэффициент селективности,  $\beta$  характеризует отношение коэффициентов распределения двух разделяемых компонентов А и В. Так, селективность какого либо экстрагента по отношению к компоненту В определяется из выражения  $\beta = k_{pB}/k_{pA}$ .

При прочих равных условиях скорость массообмена для системы в целом пропорциональна величине межфазной границы. Поэтому аппаратура экстракционных процессов должна обеспечить быстрое дисперирование органической и водной фаз для получения эмульсии с достаточно большой межфазной границей. Кроме того, она должна позволять поддерживать та-

кое состояние системы до необходимого приближения к равновесию и одновременно создавать гидродинамические условия, способствующие возникновению интенсивных вихревых потоков жидкости в объемах диспергированных фаз. Такие условия достигаются диспергированием экстрагента в водную фазу через мелкие отверстия.

**Расчет экстракционной колонны включает определение размеров капель экстрагента, объем органической фазы, диаметра колонны.**

#### **Алгоритм расчета**

1. Для оценки равновесия между фазами рассчитывается эффективность колонны и расход экстрагента.

Коэффициент распределения фенола между бензолом и водой при малых концентрациях фенола является практически постоянной величиной, при 25°C, равной 2,22, равновесие между фазами в данном случае определяется уравнением

$$N_T = \frac{\ln \frac{C_{y.k} - mC_{x.m} - m_0}{C_{y.k} - mC_{x.m} - m_0}}{\ln(mV_y/V_x)}. \quad (1)$$

где  $N_1$  – число теоретических ступеней

$C_{y.k}$  – конечная концентрация фенола в экстракте, кг/м<sup>3</sup>;

$C_{x.n}$  – начальная концентрация фенола в воде, кг/м<sup>3</sup>;

$C_{y.n}$  – начальная концентрация фенола в экстрагенте, кг/м<sup>3</sup>;

$C_{x.k}$  – конечная концентрация фенола в воде, кг/м<sup>3</sup>;

$V_x$  – расход исходной сточной воды, м<sup>3</sup>/с;

$V_y$  – расход экстрагента (бензола) м<sup>3</sup>/с;

$M$  – коэффициент распределения фенола между бензолом и водой;

$m_0 = 0$ .

2. Определяется расход экстрагента. Ввиду малой концентрации фенола изменением плотностей фаз и их расходов в процессе экстракции можно пренебречь. Конечная концентрация фенола в экстрагенте не может превышать концентрации, равновесной с концентрацией исходной смеси, поэтому минимальный расход экстрагента равен

$$V_{y.min} = \frac{V_x(C_{x.n} - C_{x.k})}{m(C_{x.n} - C_{x.k})} \text{ м}^3/\text{с}. \quad (2)$$

Реальный расход экстрагента должен быть больше минимального. Эффективность полых распылительных колонн обычно невелика (ввиду большого продольного перемешивания в сплошной фазе) и, как правило, не превышает одной теоретической тарелки. Поэтому определяют расход экстрагента исходя из условия, что необходимое число теоретических тарелок должно быть близко к единице. Число теоретических ступеней рассчитывается по формуле (1). Если принять расход экстрагента в 2 раза больше минимального ( $V_y/2V_{y.min}$ ), то конечная концентрация фенола в экстракте составит:

$$C_{y.k} = C_{y.n} + (V_x/V_y)(C_{x.n} - C_{x.k}). \quad (3)$$

Подставив это значение в уравнение (1), получим эффективность колонны (число теоретических ступеней). Если полученное значение  $N_T$  отличаются от 1, необходимо произвести расчет для  $V_y / V_{y.min} = 3, 4, 5, 6, 7$ , по полученным данным составить таблицу:

|                      |   |   |   |   |   |
|----------------------|---|---|---|---|---|
| $a = V_x / V_{ymin}$ | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| $C_{y.k}$            |   |   |   |   |   |
| $N_T$                |   |   |   |   |   |

Из полученных значений выбирается кратность отношения объемов фаз ( $V_y / V_{ymin}$ ), соответствующая или близкая к эффективности колонны к одной теоретической ступени ( $N_T \approx 1$ ), находятся объемы органической фазы ( $V_y / V_{ymin} \cdot a$ ) и конечная концентрация фенола в органической фазе ( $C_{y.k}$ ).

### 3. Расчет диаметра экстренной колонны.

Для определения скорости захлебывания необходимо знать размеры капель экстрагента и скорости их осаждения. Размеры капель зависят от скорости дисперсной фазы в отверстиях распределителя. Скорость зависит от числа этих отверстий, которое необходимо для равномерного распределения дисперсной фазы.

Определим приближенный диаметр капель при капельном истечении бензола в воду:

$$d = \gamma(6V / \pi)^{1/3} \text{ мм.} \quad (4)$$

где  $\gamma = \sqrt{\frac{2\sigma}{g\Delta\rho}}$  м (для расчет R и d необходимо  $\gamma$  перевести в мм); (5)

$$V = \pi R f(R); \quad (6)$$

$$R = d_0 / 2\gamma; \quad (7)$$

$f(R)$  находится по графику (рис. 1).

Скорость свободного осаждения ( $w_0$ ) капель диаметра  $d$  находится следующим образом:

$$P = \frac{\rho_x^2 \sigma^3}{g \Delta \rho \mu_x^4}. \quad (8)$$

$$T = 4 \Delta \rho g d^2 p^{0,15} / 3 \sigma, \quad (d - \text{в метрах}); \quad (9)$$

$$Q = (22 T)^{0,42}; \quad (10)$$

$$e = (Q - 0,75) p^{0,15}; \quad (11)$$

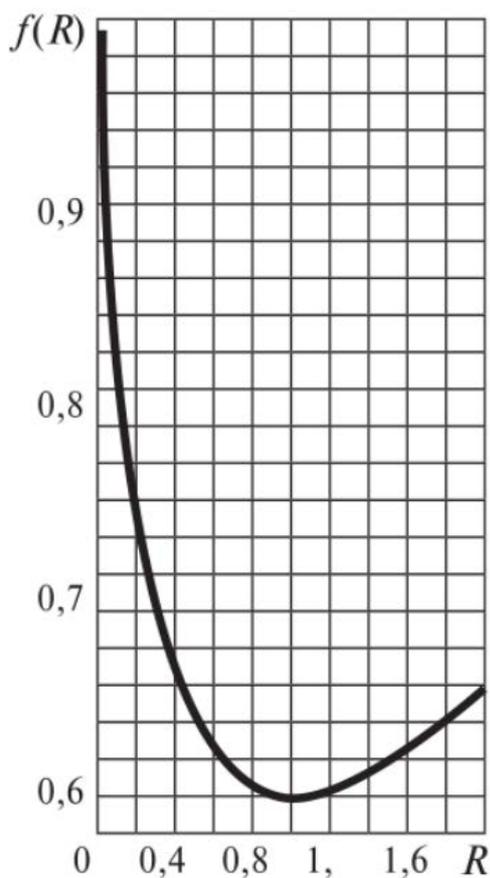
$$w_0 = Re \mu_x / (\rho_{xd}), \quad (d - \text{в метрах}). \quad (12)$$

Далее определяется суммарная эффективная скорость фаз при захлебывании. Для этого находится удерживающая способность при захлебывании для  $b = V_v / V_x$ ;

$$\Phi_3 = \frac{\sqrt{b^2 + 8b} - 3b}{4(1-b)}, \quad (13)$$

Принимая характеристическую скорость капель в распылительной колонне скорости свободного осаждения, находим:

$$(w_x + w_y)_3 = (1 - 4\Phi_3 + 7\Phi_3^2 - 4\Phi_3^3) w_0 \text{ м/с.} \quad (14)$$



**Рис. 1.** Функция  $f(R)$  для расчета размеров капель при истечении из отверстий

Минимально возможный диаметр колонны равен

$$D_{min} = \sqrt{\frac{4(V_x + V_y)}{\pi(w_x + w_y)}} \text{ м.} \quad (15)$$

### 3 Порядок выполнения работы

1. Внимательно изучите порядок расчета.
2. В соответствии с заданием выполните расчет и подготовьте отчет.

**Задание.** Определить необходимый объем органической фазы, конечную концентрацию фенола в органической фазе и размеры распылительной колонны для извлечения фенола из воды экстракцией бензолом при следующих условиях: температура в экстракторе  $25^\circ\text{C}$ , при этой температуре плотность водной фазы  $\rho_x = 997 \text{ кг/м}^3$ ;  $\mu_x = 0,894 \cdot 10^{-3} \text{ Па}\cdot\text{с}$ ;  $\sigma = 0,0341 \text{ Н/м}$ ; плотность органической фазы (бензола)  $\rho_y = 874 \text{ кг/м}^3$ ;  $\mu_y = 0,6 \cdot 10^{-3} \text{ Па}\cdot\text{с}$ , диаметр отверстий распределителя дисперсной фазы  $d_0 = 4 \text{ мм}$ .

Остальные исходные данные взять из табл. 2.

Таблица 2

| Показатель                                                     | № варианта |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|----------------------------------------------------------------|------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                                                                | 1          | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     | 7     | 8     | 9     | 10    |
| Расход очищаемой воды, м <sup>3</sup> /ч                       | 5,0        | 6,0   | 4,5   | 5,2   | 5,4   | 4,8   | 5,0   | 6,0   | 4,6   | 4,9   |
| Начальная концентрация фенола в воде, кг/м <sup>3</sup>        | 0,3        | 0,32  | 0,35  | 0,28  | 0,26  | 0,31  | 0,29  | 0,33  | 0,30  | 0,34  |
| Конечная концентрация фенола в воде, кг/м <sup>3</sup>         | 0,060      | 0,055 | 0,060 | 0,050 | 0,060 | 0,055 | 0,050 | 0,060 | 0,055 | 0,050 |
| Начальная концентрация фенола в экстрагенте, кг/м <sup>3</sup> | 0,012      | 0,010 | 0,015 | 0,018 | 0,011 | 0,015 | 0,010 | 0,010 | 0,009 | 0,013 |

### **Практическая работа 17**

#### **РАСЧЕТ УСТАНОВКИ ИОННОГО ОБМЕНА**

##### **1 Цель работы**

Закрепить знания по теме «Ионный обмен» и рассчитать требуемое количество катионитовых и анионитовых фильтров для очистки сточной воды гальванического производства.

##### **2 Теоретические положения**

Ионообменная очистка сточных вод позволяет извлекать и утилизировать следующие загрязняющие вещества: тяжелые цветные металлы (медь, никель, цинк, свинец, кадмий и др.), хром, ПАВ, цианистые соединения и радиоактивные вещества, при этом достигается высокая степень очистки воды (на уровне ПДК), а также обеспечивается возможность ее повторного использования в технологических процессах или в системах оборотного водоснабжения. Кроме того, иониты используют для обессоливания воды в процессе водоподготовки.

Гетерогенный ионный обмен, или ионообменная сорбция, представляет собой процесс обмена между ионами, находящимся в растворе, и ионами, присутствующими на поверхности твердой фазы – **ионита**.

Иониты практически нерастворимы в воде. Те из них, которые способны поглощать из растворов электролитов положительные ионы, являются **катионитами**, способные поглощать отрицательные ионы – **анионитами**. Катиониты обладают кислотными свойствами, а аниониты – основными свойствами. Если иониты обменивают и катионы, и анионы, их называют амфотерными.

Различают следующие виды ионитов:

- сильнокислые катиониты, содержащие сульфогруппы  $\text{SO}_3\text{H}$  и сильноосновные анионы, содержащие четвертичные аммониевые основания;
- слабоосновные катиониты, содержащие карбоксильные  $\text{COOH}$  и фенольные группы, диссоциирующие при  $\text{pH} > 7$ , а также слабоосновные аниониты, содержащие первичные  $\text{NH}_2$  и вторичные  $\text{NH}$  аминогруппы, диссоциирующие при  $\text{pH} < 7$ ;
- иониты смешанного типа, проявляющие свойства смеси сильных и слабых кислот и оснований.

Различают неорганические (минеральные) и органические иониты. Ионитами могут быть как природные вещества, так и вещества, полученные искусственно (синтетические).

К природным неорганическим ионитам относятся следующие вещества: цеолиты, глинистые материалы, полевые шпаты и др., они обладают катионообменными свойствами, обусловленными наличием в их структуре алюмосиликатов типа  $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot n\text{SiO}_2 \cdot m\text{H}_2\text{O}$ . Кроме того, ионообменными свойствами обладают фторапатит  $[\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3]\text{F}$ , гидроксидапатит  $[\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3]\text{OH}$ , а также различные неорганические синтетические иониты, к которым можно отнести силикагели, труднорастворимые оксиды и гидроксиды некоторых металлов (алюминия, хрома, циркония) и другие вещества.

К органическим природным ионитам относятся гуминовые кислоты углей и почв, обладающие слабокислотными свойствами, для усиления кислотных свойств и повышения обменной емкости угли обрабатываются концентрированной серной кислотой, при этом образуется катиониты – сульфогли.

Наибольшее значение для очистки сточных вод и процессов водоподготовки в настоящее время имеют синтетические иониты, к которым относятся ионообменные смолы, представляющие собой высокомолекулярные соединения кислого или основного характера.

Пространственная углеводородная сетка ионита (каркас) носит название матрицы (обозначается R). Обменивающиеся ионы называются противоионами, в состав ионита входит также активная группа, способная к обмену. В ее состав входят противоионы, а также противоположно ему заряженные ионы, которые называют фиксированными, или анкерными. Например, в формуле сульфокатионита  $\text{RSO}_3\text{H}$ , R – матрица, H – противоион,  $\text{SO}_3$  – анкерный ион.

Основные требования к ионитам, используемым для очистки сточных вод, следующие: высокая обменная емкость, хорошие кинетические свойства (высокая скорость ионного обмена), достаточная устойчивость по отношению к кислотам, щелочам, окислителям и восстановителям, нерастворимость в воде, органических растворителях и растворах электролитов, а также ограниченная набухаемость.

Способность ионита к ионному обмену характеризуется обменной емкостью, которая равна числу его активных групп, принимающих участие в

обмене. Для количественной характеристики ионообменных свойств определяют их полную, статическую и рабочую (динамическую) *обменные емкости*.

**Полная емкость ионита** – количество находящихся в сточной воде грамм-эквивалентов ионов, которое может поглотить 1 м<sup>3</sup> до полного насыщения.

**Статическая емкость ионита** – это обменная емкость ионита при равновесии в данных рабочих условиях, статическая емкость обычно меньше полной емкости.

**Рабочая (динамическая) емкость ионита** – количество находящихся в воде грамм-эквивалентов ионов, которые может поглотить 1 м<sup>3</sup> ионита до начала проскока в фильтр поглощаемых ионов. Динамическая емкость соответственно меньше статической емкости.

Ионный обмен происходит в эквивалентных отношениях, реакции протекают вследствие разности химических потенциалов обменивающихся ионов до установления ионообменного равновесия. Реакция ионного обмена протекает следующим образом:

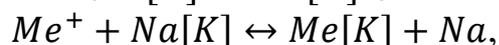
при контакте с катионитом –



при контакте с анионитом –



Если катионы находятся в H- или Na- форме, обмен катионов будет проходить по реакции:



где Me<sup>+</sup> – катион, находящийся в сточной воде;

[K] – сложный комплекс катионита.

Поскольку в сточных водах, как правило, содержится несколько катионов, больше значение имеет селективность их поглощения. Для каждого вида катионита установлены ряды катионов по энергии их вытеснения.

Характерной особенностью ионитов является их обратимость, т.е. возможность проведения реакции в обратном направлении, что и лежит в основе их регенерации.

Катиониты регенерируют 2–8%-ными растворами кислот. Регенерационные растворы – *элюаты* содержат катионы. Затем после рыхления и промывки катиониты заряжают, пропуская через них раствор NaCl.

Отработанные аниониты регенерируют 2–6%-ным раствором щелочи. Аниониты при этом переходят в OH-форму.

Сточные воды, подаваемые на очистку, не должны содержать солей > 3000 мг/л, взвешенных веществ > 8 мг/л, ХПК должно быть < 8 мг/л.

## Алгоритм расчета

### I. Расчет катионитового фильтра.

1. Определяется объемом катионита

$$V_{\text{кат}} = \frac{K_{\text{св}} Q_{\text{под}} [\Sigma K]}{n_{\text{фи}} E_{\text{раб.к}}} \text{ м}^3. \quad (1)$$

где  $K_{\text{св}} = 1,1-1,35$  – коэффициент для учета воды на собственные нужды;

$Q_{\text{под}}$  – расход обрабатываемой сточной воды,  $\text{м}^3/\text{сут}$ ;

$[\Sigma K]$  – суммарная концентрация катионов в сточной воде,  $\text{г-экв}/\text{м}^3$ ;

$n_{\text{фи}}$  – число регенераций каждого фильтра (не более двух);

$E_{\text{раб.к}}$  – рабочая обменная емкость катионита,  $\text{г-экв}/\text{м}^3$ ;

$$E_{\text{раб.к}} = a_{\text{эф}} \cdot K_{\text{общ}} \cdot E_{\text{полн}} - K_{\text{ион}} \cdot q_{\text{к}} \cdot [\Sigma K], \quad (2)$$

где  $a_{\text{эф}}$  – коэффициент эффективности регенерации, учитывающий полноту регенерации и принимаемый равным при удельных расходах  $\text{H}_2\text{SO}_4$  в  $\text{г}/\text{г-экв}$  поглощаемых катионов;

Расход  $\text{H}_2\text{SO}_4$ .....50      100      150      200;

Величина  $a_{\text{эф}}$ ...    ...0,68    0,85    0,91    0,93;

$K_{\text{обм}}$  – коэффициент снижения обменной способности катионита, принимается равным 0,8 – 0,9;

$E_{\text{полн}}$  – полная обменная емкость катионита  $\text{г-экв}/\text{м}^3$ , определяемая по заводским паспортным данным (для катионита КУ-1 = 300  $\text{г-экв}/\text{м}^3$ ; для КУ-2 = 800  $\text{г-экв}/\text{м}^3$ );

$K_{\text{ион}} = 0,5$  – коэффициент, учитывающий тип ионита;

$q_{\text{к}}$  – удельный расход воды на промывку ионита,  $\text{м}^3/\text{м}^3$  (на промывку 1  $\text{м}^3$  Н-катионита принимается 4–6  $\text{м}^3/\text{м}^3$ );

$[\Sigma K]$  – суммарная концентрация катионов в сточной воде,  $\text{г-экв}/\text{м}^3$ .

2. Определяется площади катионитовых фильтров,  $\text{м}^2$ , принимая высоту загрузки  $H_{\text{к}} = 2,5 \text{ м}$ ;

$$F_{\text{кат}} = V_{\text{кат}}/H_{\text{к}} \text{ м}^2.$$

Примем диаметр катионитовых фильтров равным  $D_{\text{к}} = 2 \text{ м}$  и определим количество рабочих фильтров:  $n = F_{\text{кат}}/(\pi r^2)$ .

Число округляется до целого, после чего уточняется общая площадь катионитовых фильтров:

$$F_{\text{общ}} = n\pi r^2, \text{ м}^2 \quad (3)$$

Принимается  $n$  рабочих фильтров и 1 резервный.

3. Определяется скорость фильтрования воды через катионитовые фильтры:

$$v_{\text{к}} = Q_{\text{под}}/(24F_{\text{общ}}), \text{ м}/\text{ч}. \quad (4)$$

Регенерация катионитового фильтра производится 7–10%-ными растворами кислот (соляной или серной), затем катионит промывают водой со скоростью 6–8  $\text{м}^3/\text{ч}$ .

## II. Расчет 1-й ступени анионитового фильтра (очистка от анионов сильных кислот).

1. Определяется расчетная скорость фильтрования воды через фильтры:

$$V_{\text{дн}} = \frac{E_{\text{рабан}} H_{\text{ан}} - 0.5 H_{\text{а}} [A]}{T [A] + 0.02 E_{\text{рабан}} \ln [A] - 0.1 [A] \ln [A]} \text{ м}/\text{ч}. \quad (5)$$

где  $E_{\text{раб.ан}}$  – рабочая обменная емкость анионитов, г-экв/м (для анионита АВ-17  $E_{\text{раб.ан}} = 80$ ; для АН-18 = 1000, для ЭДЭ-1050 = 800);

$H_{\text{ан}}$  – высота загрузки анионитного фильтра, принимается равной 2,5 м;

$[A]$  – содержание анионов сильных кислот в сточной воде ( $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ), г-экв/м<sup>3</sup>;

$T$  – продолжительность работы каждого цикла между регенерациями:

$$T = \frac{24}{n_{\text{рег}}} - (t_1 + t_2 + t_3) \text{ ч.} \quad (6)$$

где  $n_{\text{рег}} = 23$  – число регенерации в сутки;

$t_1 = 0,25$  ч – продолжительность взрыхления анионита;

$t_2 = 1,5$  ч – продолжительность пропускания через анионит регенерационного раствора щелочи;

$t_3 = 3$  ч – продолжительность отмывки анионита после регенерации.

2. Определяется общая площадь анионитовых фильтров:

$$F_{\text{дн}} = \frac{Q_{\text{паз}}}{n_{\text{рег}} T V_{\text{он}}} \text{ м}^2. \quad (7)$$

Примем диаметр анионитовых фильтров равным  $D_{\text{к}} = 2$  м и определим количество рабочих фильтров:

$$n = F_{\text{ан}} / (\pi r^2) \quad (8)$$

Число округляется до целого, после чего уточняется общая площадь катионитовых фильтров:

$$F_{\text{об}} = n \pi r^2 \text{ м}^2. \quad (9)$$

Принимается  $n$  рабочих фильтров и 1 резервный.

3. Определяется фактическая скорость фильтрования воды через анионитовые фильтры:

$$v_{\text{к}} = Q_{\text{бол}} / (n_{\text{рег}} \cdot T \cdot F_{\text{общ}}) \text{ м/ч.} \quad (10)$$

Регенерация анионитовых фильтров осуществляется 4–6%-ным раствором NaOH, кальцинированной соды или аммиака. При необходимости рассчитываются фильтры 2-й ступени.

### 3 Порядок выполнения работы

1. Внимательно изучите порядок расчета.

2. В соответствии с заданием выполнения расчет и подготовьте отчет.

**Задание.** Рассчитать ионообменную установку для обезвреживания сточных вод гальванического цеха после их предварительной механической очистки.

Ионный состав сточных вод приведен в табл. 1;

Таблица 1

| Наименование катиона | Содержание в-ва, г/м <sup>3</sup> | Кол-во в-ва г/м <sup>3</sup> на 1 г-экв/м <sup>3</sup> | Содержание в-ва, г-экв/м <sup>3</sup> | Наименование аниона           | Содержание вещества, г/м <sup>3</sup> | Кол-во в-ва, г/м <sup>3</sup> на 1 г-кв/м <sup>3</sup> | Содержание в-ва, г-экв/м <sup>3</sup> |
|----------------------|-----------------------------------|--------------------------------------------------------|---------------------------------------|-------------------------------|---------------------------------------|--------------------------------------------------------|---------------------------------------|
| Cr <sup>6+</sup>     | 120                               |                                                        |                                       | CN                            | 90                                    |                                                        |                                       |
| Zn <sup>2+</sup>     | 15                                |                                                        |                                       | Cl <sup>-</sup>               | 160                                   |                                                        |                                       |
| Cu <sup>2+</sup>     | 12                                |                                                        |                                       | SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> | 470                                   |                                                        |                                       |
| Ni <sup>2+</sup>     | 90                                |                                                        |                                       | ∑[К]                          | 720                                   |                                                        |                                       |
| ∑[К]                 | 237                               |                                                        |                                       |                               |                                       |                                                        |                                       |

Дополнительные исходные данные принять из табл. 2.

Таблица 2

| Показатель                              | № варианта |       |          |       |       |          |       |       |          |       |
|-----------------------------------------|------------|-------|----------|-------|-------|----------|-------|-------|----------|-------|
|                                         | 1          | 2     | 3        | 4     | 5     | 6        | 7     | 8     | 9        | 10    |
| Расход сточных вод, м <sup>3</sup> /сут | 1200       | 1300  | 1000     | 1100  | 1200  | 1150     | 1050  | 1000  | 1250     | 1300  |
| Марка катионита                         | КУ-1       | КУ-2  | КУ-1     | КУ-2  | КУ-1  | КУ-2     | КУ-1  | КУ-2  | КУ-1     | КУ-2  |
| Марка анионита                          | АВ-17      | АН-18 | ЭДЭ-1050 | АВ-17 | АН-18 | ЭДЭ-1050 | АВ-17 | АН-18 | ЭДЭ-1050 | АВ-17 |

**Решение.** Сначала заполните табл. 1. Для расчета количества вещества в г/м<sup>3</sup> на 1 г-экв/м<sup>3</sup> необходимо молярную массу иона разделить на заряд иона. Содержание вещества в г-экв/м<sup>3</sup> определяется отношением содержания вещества в г/м<sup>3</sup> к найденному значению количества вещества в г/м<sup>3</sup> на 1 г-экв/м<sup>3</sup>. Удельный расход H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> принять равным для нечетных вариантов 100, для четных – 150 г/г-экв поглощаемых катионов.

Таблица 3

| Наименование катиона | Содержание в-ва, г/м <sup>3</sup> | Кол-во в-ва г/м <sup>3</sup> на 1 г-экв/м <sup>3</sup> | Содержание в-ва, г-экв/м <sup>3</sup> | Наименование аниона           | Содержание вещества, г/м <sup>3</sup> | Кол-во в-ва, г/м <sup>3</sup> на 1 г-кв/м <sup>3</sup> | Содержание в-ва, г-экв/м <sup>3</sup> |
|----------------------|-----------------------------------|--------------------------------------------------------|---------------------------------------|-------------------------------|---------------------------------------|--------------------------------------------------------|---------------------------------------|
| Cr <sup>6+</sup>     | 120                               | 8,67                                                   | 13,84                                 | CN                            | 90                                    | 26                                                     | 3,46                                  |
| Zn <sup>2+</sup>     | 15                                | 32,68                                                  | 0,46                                  | Cl <sup>-</sup>               | 160                                   | 35,46                                                  | 4,51                                  |
| Cu <sup>2+</sup>     | 12                                | 31,17                                                  | 0,38                                  | SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> | 470                                   | 48,03                                                  | 9,78                                  |
| Ni <sup>2+</sup>     | 90                                | 29,36                                                  | 3,07                                  | ∑[К]                          | 720                                   | -                                                      | 17,79                                 |
| ∑[К]                 | 237                               | -                                                      | 17,75                                 |                               |                                       |                                                        |                                       |

**Вопросы для самопроверки:**

1. Какие требования предъявляются к составу и свойствам воды в водоемах и водотоках соответствующих категорий после выпуска в них сточных вод, подвергшихся необходимой очистке?
2. Что учитывает расчет необходимой степени очистки сточных вод по  $BPK_{полн}$ ?
3. Что применяют для улавливания сточных вод крупных нерастворенных загрязнений?
4. Расскажите принцип действия решетки-дробилки.
5. С помощью чего улавливаются нерастворимые загрязнения из сточных вод?
6. Расскажите классификацию отстойников.
7. Принцип действия напорного гидроциклона.
8. Что понимается под крупностью граничного зерна?
9. Какие исходные данные являются для расчета основных конструктивных параметров гидроциклона?
10. Дайте определение сорбции.
11. Что используется в качестве сорбентов?
12. Что такое флотация?
13. Какие существуют способы флотационной обработки сточных вод?
14. Дайте понятие жидкостной экстракции.
15. Какие загрязняющие вещества позволяет извлекать и утилизировать ионообменная очистка сточных вод?
16. Что такое рабочая (динамическая) емкость ионита?

## Раздел 3

### ЗАЩИТА ЛИТОСФЕРЫ

---

#### *Практическая работа 18*

#### ОБРАЩЕНИЕ С ОТХОДАМИ ПРОИЗВОДСТВА И ПОТРЕБЛЕНИЯ. РАСЧЕТ НОРМАТИВОВ ОБРАЗОВАНИЯ ОТХОДОВ

##### 1 Цель работы

Систематизировать знания о правилах и принципах нормирования образования отходов, рассчитать нормативы образования отходов различными методами.

##### 2 Теоретические положения

Согласно ФЗ-7 «Об отходах производства и потребления» (2002):

***отходы производства и потребления (далее – отходы)*** – остатки сырья, металлов, полуфабрикатов, иных изделий или продуктов, которые образовались в процессе производства или потребления, а также товары (продукция), утратившие свои потребительские свойства;

***обращение с отходами*** – деятельность, в процессе которой образуются отходы, а также деятельность по сбору, использованию, обезвреживанию, транспортированию, размещению отходов;

***размещение отходов*** – хранение и захоронение отходов;

***хранение отходов*** – содержание отходов в объектах размещения отходов в целях их последующего захоронения, обезвреживания или использования;

***захоронение отходов*** – изоляция отходов, не подлежащих дальнейшему использованию, в специальных хранилищах в целях предотвращения попадания вредных веществ в окружающую природную среду;

***лимитное размещение отходов*** – предельно допустимое количество отходов конкретного вида, которое разрешается размещать определенными способами на установленный срок в объектах размещения отходов с учетом экологической обстановки на данной территории;

***норматив образования отходов*** – установленное количество отходов конкретного вида при производстве единицы продукции;

**вид отходов** – совокупность отходов, которые имеют общие признаки в соответствии с системой классификации отходов;

**предельно допустимое количество отходов (ПДКО)** – допустимое для размещения на территории промплощадки их количество в открытом или закрытом виде при условии возможного выделения вредных веществ в ОС на территории предприятия в концентрациях, не превышающих 30 % ПДК для воздуха рабочей зоны (ПДКР.З.), а также отсутствие загрязнения почв и водных объектов в количествах, не приводящих к превышению санитарных норм.

ПДКО и способы хранения определяются с учетом их физико-химических свойств, агрегатного состояния, летучести, возможностей химических реакций, биологического действия с учетом комбинированных эффектов и класса их опасности. Особое внимание уделяется токсичным химическим биологическим отходам как источникам содержания полициклических ароматических углеводородов (ПАУ) и патогенных микроорганизмов, представляющих особую опасность для человека и ОС.

«Каталог» – федеральный классификационный каталог отходов (ФККО) – перечень образующихся в РФ отходов, систематизированных по совокупности приоритетных признаков: происхождение, агрегатному и физическому состоянию, опасным свойствам, степени вредного воздействия на ОПС, ФККО утвержден приказом Министерства природных ресурсов Российской Федерации от 30.07.2003 №663.

В ФККО введена тринадцатизначная кодировка отходов. Тринадцатизначный код определяет вид отходов, характеризующий их общие классификационные признаки. Первые восемь цифр используются для кодирования происхождения отхода; девятая и десятая цифры используются для кодирования агрегатного состояния и физической формы (0 – данные не установлены, 1 – твердый, 2 – жидкий, 3 – пастообразный, 4 – шлам, 5 – гель, коллоиды, 6 – эмульсия, 7 – суспензия, 8 – сыпучий, 9 – гранулят, 10 – порошкообразный, 11 – пылеобразный, 12 – волокно, 13 – готовое изделие, потерявшее потребительские свойства, 99 – иное); одиннадцатая и двенадцатая цифры используются для кодирования опасных свойств и их комбинаций (0 – данные не установлены (потенциально опасен для ОПС), 1 – токсичность (т), 2 – взрывоопасность (в), 3 – пожароопасность (п), 4 – высокая реакционная способность (р), 5 – содержание возбудителей инфекционных болезней (и), 6 – т + в, 7 – т + п, 8 – т + р, 9 – в + п, 10 – в + р, 11 – в + и, 12 – п + р, 13 – п + и, 14 – р + и, 15 – т + в + п, 16 – т + в + р, 17 – т + п + р, 18 – в + п + р, 19 – в + п + и, 20 – п + р + и, 21 – т + в + п + р, 22 – в + п + р + и, 99 – опасные свойства отсутствуют); тринадцатая цифра используется для кодирования класса опасности для окружающей природной среды (0 – класс опасности не установлен, 1 – I класс опасности, 2 – II класс опасности, 3 – III класс опасности, 4 – IV класс опасности, 5 – V класс опасности).

Схема обращения с отходами включает их классификацию (отнесение к одному из классов), сертификацию, анализ, сбор, учет, хранение и транспортировку на переработку.

На специализированных предприятиях по переработке технические методы обращения с ними включают их сортировку, переработку, сжигание, утилизацию, захоронение. Среди отходов особое место занимают твердые бытовые отходы (ТБО), которые относят к «муниципальным», или непромышленным. Однако такое деление также условно, поскольку в ТБО может содержаться от 15–20% представителей промышленных отходов – полимеров, кожи, резины и др.



Рис. 1. Классификация отходов по их агрегатному состоянию

Особенно серьезный вред ОС наносят несанкционированные свалки, в которых большую часть (до 80%) составляют опасные отходы производств. Поэтому нормирование образования отходов и лимитирование их размещения является первоочередной мерой по обращению с этой разновидностью вторичных ресурсов.

Всю массу образующихся отходов принято классифицировать на токсичные промышленные, радиоактивные и твердые бытовые.

Наиболее точно идентифицируются отходы по агрегатному состоянию, что является важным моментом при выборе технологии обращения с ними (сжигания, утилизации и хранения). На рис. 1 представлена классификация, охватывающая практически все разновидности существующих отходов по их агрегатному состоянию.

Существуют и другие классификации отходов, среди которых особое место занимает классификация по технологическим стадиям производства основного продукта с образованием побочных продуктов, подлежащих утилизации. Всего же по номенклатуре образуется свыше 10 000 видов промышленных отходов.

Характеристикой токсичности веществ, содержащихся в отходах, считается показатель летальности ЛД50, при которой у 50% подопытных индивидуумов наступает летальный исход. Токсичные отходы классифицируются по пяти классам опасности соответственно с критериями, приведены в табл. 1.

Таблица 1

| Степень вредного воздействия | Критерии отнесения опасных отходов к классу опасности | Класс опасности отхода           | Показатели степени опасности, К | Кратность разведения водной вытяжки |
|------------------------------|-------------------------------------------------------|----------------------------------|---------------------------------|-------------------------------------|
| Очень высокая                | Необратимое нарушение экосистем (ЭКС)                 | 1-й класс чрезвычайно опасные    | $10^6 \geq K > 10^4$            | > 10 000                            |
| Высокая                      | Сильно нарушена, период восстановления > 30 лет       | 2-й класс высоко опасные         | $10^4 \geq K > 10^3$            | От 10 000 до 1001                   |
| Средняя                      | Нарушена, период восстановления > 10 лет              | 3-й класс умеренно опасные       | $10^3 \geq K > 10^2$            | От 1000 до 101                      |
| Низкая                       | Нарушена, период восстановления > 3 лет               | 4-й класс мало опасные           | $10^2 \geq K > 10$              | < 100                               |
| Очень низкая                 | Не нарушена                                           | 5-й класс практически не опасные | $K > 10$                        | 1                                   |

Отнесение отходов к классу опасности для окружающей природной среды (ОПС) проводят расчетными или экспериментальными методами. В случае отнесения отходов расчетными методом к 5-му классу опасности необходимо его подтверждение экспериментальным методом. Если это невозможно, то отходы относят к 4-му классу опасности. Отнесение отходов к классу для ОПС расчетным методом осуществляется на основании показателя степени опасности отхода К (табл. 2), рассчитанного по схеме показателей опасности веществ, составляющих отход (или компонентов отхода)  $K_i$ . Перечень компонентов отхода и их количественное содержание устанавливаются по составу исходного сырья и технологическим процессам его переработки или по результатам количественного химического анализа. Показатель К для n-го числа компонентов рассчитывается по формуле

$$K = \sum_1^n K_i = \sum_1^n C_i/W_i,$$

где  $K_i$  – показатель степени опасности отдельного вещества или компонента отхода для ОПС;

$C_i$  – концентрация i-го компонента в отходе (мг/кг отхода);

$W_i$  – коэффициент степени опасности i-го компонента отхода для ОПС (мг/кг).

Для наиболее распространенных компонентов отходов коэффициенты  $W_i$  известны.

Другие рассчитываются по формулам:

$$\begin{aligned} \lg W_i &= 4 - 4/Z_i; \\ \lg W_i &= Z_i; \\ \lg W_i &= 2 + 4/(6 - Z). \end{aligned}$$

где  $Z_i = 4 \cdot X_i/3 - 1/3$ , а  $X_i$  – относительные параметр опасности компонента отхода для ОПС.

Примеры этих параметров приведены в табл. 2.

Таблица 2 – Коэффициент  $W$  для отдельных компонентов опасных отходов

| Компоненты        | $X_i$ | $Z_i$ | $\lg W_i$ | $W_i$  |
|-------------------|-------|-------|-----------|--------|
| Бенз(а)пирен      | 1,6   | 1,8   | 1,778     | 59,97  |
| Бензол            | 2,125 | 2,5   | 2,5       | 316,2  |
| Ди(н)бутилфталат  | 2     | 2,33  | 2,33      | 215,44 |
| Диоксины          | 1,4   | 1,533 | 1,391     | 24,6   |
| Дихлорфенол       | 1,5   | 1,66  | 1,66      | 39,8   |
| Маграец           | 2,30  | 2,37  | 2,73      | 537,0  |
| Медь              | 2,17  | 2,56  | 2,56      | 358,9  |
| Мышьяк            | 1,58  | 1,77  | 1,74      | 55,0   |
| Нафталин          | 2,285 | 2,714 | 2,714     | 517,9  |
| Никель            | 1,83  | 2,11  | 2,11      | 128,8  |
| Пентахлорбифенилы | 1,6   | 1,8   | 1,778     | 59,98  |
| Ртуть             | 1,25  | 1,33  | 1,00      | 10,0   |
| Стронций          | 2,86  | 3,47  | 3,47      | 2951   |
| Серебро           | 2,14  | 2,52  | 2,52      | 331,1  |
| Свинец            | 1,46  | 1,61  | 1,52      | 33,1   |
| Толуол            | 2,5   | 3     | 3         | 100    |
| Фенол             | 2     | 2,33  | 2,33      | 215,44 |
| Хром              | 1,75  | 2,00  | 2,00      | 100,0  |
| Цинк              | 2,25  | 2,67  | 2,67      | 463,4  |

Компоненты отходов, состоящие из таких элементов, как O, N, C, P, S, Si, Al, Fe, Na, K, Ca, Mg, Ti в концентрациях, не превышающих их содержания в основных типах почв, а также отходы природного органического происхождения (клетчатка, крахмал, аминокислоты и др.) относятся к неопасным компонентам со средним баллом ( $X_i$ ), равным 4, и  $W_i$ , равным  $10^6$ . Отнесение отходов к классу опасности для ОПС проводится в соответствии с табл. 1.

Экспериментальный метод отнесения отходов к классу опасности для ОПС основан на биотестировании водной вытяжки отходов и проводится в специализированных аккредитованных лабораториях. Этот метод используется в случаях невозможности определения качественно-количественного состава отхода, а также при отнесении отхода к 5-му классу опасности расчетным методом. Биотестирование водной вытяжки отходов проводится на не менее двух тест-объектах из разных систематических групп (дафнии и инфузории, цериодафнии и бактерии или водоросли), класс опасности уста-

навливается по кратности разведения водной вытяжки, при которой не выявлено воздействия на гидробионты в соответствии с диапазонами кратности разведения, приведенной в табл. 1.

Основные показатели, характеризующие образование и движение токсичных отходов и производстве, отражаются в форме статической отчетности (аналогично выбросами в атмосферу и сбросами в водные объекты) по форме 2-ТП (токсичные отходы) с разнесением отходов по классам опасности и фиксацией количества, переданных на рециклинг или утилизацию, хранение на территориях промплощадок и т.д. с кодированием видом отходов.

Токсичные промышленные отходы (ТПО) представляют собой сложную многокомпонентную систему, для характеристики которой наряду с оценкой объемов необходимо определить физико-химические свойства. Эти свойства составляют основу паспорта отходов, в который, кроме количественных и качественных характеристик, входят параметры, учитывающие экологические факторы.

Паспортизация отходов проводится в трех формах:

1. Учетно-статистическая как свод отраслевых, региональных, государственных данных на основе формы статической отчетности 2-ТП (токсичные отходы).

2. Кадастровая как паспортизация вторичных материальных ресурсов в рамках создания комплексных территориальных кадастров природных ресурсов.

3. Экологическая как неотъемлемая часть экологического паспорта предприятия и всех других форм паспортизации отходов.

Во исполнение Постановления Правительства РФ от 16.06.2000 № 461 «О правилах разработки и утверждения нормативов образования отходов и лимитов на их размещение» существуют Методические указания по разработке проектов нормативов образования отходов и лимитов на их размещение.

Они предназначены для индивидуальных предпринимателей и юридических лиц, осуществляющих деятельность (приступающих к осуществлению деятельности) в области обращения с отходами. Методические указания определяют единый подход к разработке Проекта нормативов образования отходов и лимитов на их размещение (ПНООЛР). Их действие не распространяется на вопросы обращения с радиоактивными отходами.

При разработке ПНООЛР учитывается:

- экологическая обстановка на данной территории;
- предельно допустимые вредные воздействия отходов, предполагаемых к размещению, на окружающую среду;

- наличие имеющихся технологий переработки отхода данного вида, которые включены в банк данных о технологиях использования и обезвреживания отходов, являющихся составной частью государственного кадастра отходов.

ПНООЛР для объекта хранения отходов разрабатывается с учетом:

- площади и вместимости объекта хранения отходов;
- сохранности у размещенного отхода полноценных свойств вторичного сырья;
- экономической целесообразности формирования транспортной партии для вызова размещаемых отходов.

ПНООЛР для объекта захоронения отходов разрабатывается с учетом:

- количества предполагаемых к захоронению отходов (с разбивкой по годам) в соответствии с проектными данными объекта захоронения отходов;
- вместимости объекта захоронения отходов;
- расчетного срока эксплуатации объекта захоронения отходов;
- иных характеристик объекта захоронения отходов;

### ***Методы определения (расчета) нормативов образования отходов***

Для расчета нормативов образования отходов используются различные методы и, соответственно, разные единицы их измерения. В соответствии с технологическими особенностями производства нормативы образования отходов определяются в единицах массы (объема) либо количества производимой продукции.

Нормативы образования отходов, оцениваемые в процентах, определяются по тем видам отходов, которые имеют те же физико-химические свойства, что и первичное сырье. Нормативы образования отходов с измененными по сравнению с первичным сырьем характеристиками предпочтительно представлять в следующих единицах измерения: кг/т, кг/м<sup>3</sup>, м<sup>3</sup>/тыс, м<sup>3</sup> и т.д.

При определении нормативов образования отходов применяются следующие методы.

1. Метод расчета по материально-сырьевому балансу.

2. Метод расчета по удаленным отраслевым нормативам образования отходов.

Отраслевые нормативы образования отходов разрабатываются:

- путем усреднения индивидуальных значений нормативов образования отходов для организации отрасли:

- посредством расчета средних удельных показателей на основе анализа отчетной информации за определенный (базовый) период, выделения важнейших (экспертно устанавливаемых) нормообразующих факторов и определения их влияния на значение нормативов на планируемый период.

3. Расчетно-аналитический метод. Применяется при наличии конструкторско-технологической документации (технологических карт, рецептов, регламентов, рабочих чертежей) на производство продукции, при котором образуются отходы. На основе такой документации в соответствии с установленными нормами расхода сырья (материалов) рассчитывается

норматив образования отходов (НО) как разность между нормой расхода сырья (материалов) на единицу продукции и чистым (полезным) их расходом с учетом неизбежных безвозвратных потерь сырья.

4. Экспериментальный метод. Применяется для технологических процессов, допускающих определенный диапазон изменений составных элементов, сырья (в литейном производстве, химической, пищевой, микробиологической и других отраслях промышленности), а также при большой трудоемкости аналитических расчетов. Он заключается в определении нормативов образования отходов на основе проведения опытных измерений в производственных условиях.

5. Статистический метод. Расчет по фактическим объемам образования отходов для вспомогательных и ремонтных работ. Метод применяется для определения нормативов образования отходов на основе статистической обработки отчетной информации за базовый (трехлетний) период с последующей корректировкой данных в соответствии с планируемыми организационно-техническими мероприятиями, предусматривающими снижение материалоемкости производимой продукции.

### 3 Порядок выполнения работы

1. Внимательно изучите теоретические положения и выполните задания.

2. Представьте результаты полученных расчетов в виде таблиц согласно заданиям. Ответьте на контрольные вопросы. Подготовьте отчет.

**Задание 1.** Используя коды отходов производства и потребления, дать характеристику приведенных отходов. Данные представить в форме табл. 3.

**Задание 2.** Рассчитать класс опасности отхода, состоящего из 50 г/кг бензола, 10 г/кг дихлорофенола, 0,001 г/кг бенз(а)пирента, 0,1 кг/кг мышьяка, 40 г/кг ртути.

**Задание 3.** Произвести расчет норматива образования отхода: ртутные лампы, люминесцентные ртутьсодержащие трубки, отработанные и брак. Расчет проводить по следующей формуле:

$$N = n \cdot t / k, \text{ шт./год};$$

$$M = \frac{n \cdot m \cdot t \cdot 10^{-6}}{k} \text{ т/год},$$

где  $n$  – количество установленных ламп;

$t$  – фактическое количество работы ламп, час/год;

$k$  – эксплуатационный срок службы ламп, час;

$m$  – вес одной лампы, г.

Исходные данные представлены в табл. 4.

Результаты представить в форме приведенной таблицы.

Таблица 3

| Виды отходов                                                               |               | Класс опасности для ОПС | Опасные свойства отхода для ОПС | Агрегатное состояние |
|----------------------------------------------------------------------------|---------------|-------------------------|---------------------------------|----------------------|
| Наименование                                                               | Код по ФККО   |                         |                                 |                      |
| Масло моторное отработанное                                                | 5410020102033 |                         |                                 |                      |
| Аккумуляторы свинцовые отработанные неповрежденные с неслитым электролитом | 9211010113012 |                         |                                 |                      |
| Мусор строительный от разборки зданий                                      | 9120060101004 |                         |                                 |                      |
| Камеры пневматические отработанные                                         | 5750020113004 |                         |                                 |                      |
| Ртутные лампы, люминесцентные ртутьсодержащие трубки отработанные и брак   | 3533010013011 |                         |                                 |                      |
| Масла авиационные отработанные                                             | 5410020402033 |                         |                                 |                      |
| Отходы оксида хрома шестивалентного                                        | 5130060000011 |                         |                                 |                      |
| Мусор от бытовых помещений организаций несортированный                     | 9120040001004 |                         |                                 |                      |
| Отходы лакокрасочных средств                                               | 5550000000000 |                         |                                 |                      |
| Остатки и огарки стальных сварочных электродов                             | 3512160101995 |                         |                                 |                      |
| Стружка натуральной чистой древесины                                       | 1711060201005 |                         |                                 |                      |
| Отходы, содержащие алюминий в кусковой форме                               | 3531011201995 |                         |                                 |                      |
| Обрезки и обрывки тканей смешанных                                         | 5810110801995 |                         |                                 |                      |
| Масла трансформаторные отработанные, содержащие полихлорированные дифенилы | 5810110802071 |                         |                                 |                      |
| Эмульсии и эмульсионные смеси для шлифовки металлов                        | 5440020106033 |                         |                                 |                      |

Таблица 4

| Марка лампы | Кол-во ламп, используемых на предприятии (n), шт | Срок службы ламп (к) час | Кол-во часов работы одной лампы в году (t), час/год | Кол-во, подлежащих замене (N), шт./год | Вес одной лампы (m), г | Вес ламп подлежащих замене (M), т/год |
|-------------|--------------------------------------------------|--------------------------|-----------------------------------------------------|----------------------------------------|------------------------|---------------------------------------|
| ЛБ 20-1     | 1865                                             | 15 000                   | 2000                                                | 249                                    | 170                    |                                       |
| ЛБ 40-1     | 4000                                             | 12 000                   | 2000                                                | 667                                    | 320                    |                                       |
| ЛБ 80-1     | 500                                              | 12 000                   | 2000                                                | 84                                     | 450                    |                                       |
| ДРЛ 250     | 7200                                             | 12 000                   | 2000                                                | 1200                                   | 400                    |                                       |
| ИТОГО:      |                                                  |                          |                                                     |                                        |                        |                                       |

**Задание 4.** Рассчитать количество отработанного моторного масла (5410020102033). Данный вид отхода образуется при эксплуатации автотранспортной техники с карбюраторными двигателями.

Количество отработанного моторного масла от автомобилей определяется согласно «Методика расчета объемов образования отходов. Отработанные моторные и трансмиссионные масла, 1999» по формуле

$$M = \sum N_1 * V_1 * \frac{L_1}{L_{13}} * K * \rho * 0.001 \text{ т, год}$$

где  $N_1$  – количество автомашин  $i$ -й марки;

$V_i$  – объем масла, заливаемого в автомашину  $i$ -й марки при техническом обслуживании, л;

$L_i$  – средний годовой пробег автомобиля  $i$  – марки, тыс, км/год;

$LH_i$  – норма пробега подвижного состава  $i$ -й марки до замены масла, тыс.км;

$K = 0,9$  – коэффициент полноты слива масла;

$\rho = 0,9$  – плотность отработанного масла, кг/л.

Результаты расчетов количества отработанного моторного масла автомобилей привести в виде табл. 5.

Таблица 5

| Марка автомобиля | Кол-во автомашин $i$ -й марки, $N_i$ | Объем масла, $V_i$ | Средний годовой пробег автомобиля, L, тыс. км | Норма пробега до замены масла, $LH_i$ , тыс.км | $K * \rho$ | Кол-во отработанного масла, M, т/год |
|------------------|--------------------------------------|--------------------|-----------------------------------------------|------------------------------------------------|------------|--------------------------------------|
| Лаз 695          | 2                                    | 8                  | 70                                            | 10                                             |            |                                      |
| Гад 3205         | 3                                    | 8                  | 60                                            | 10                                             |            |                                      |
| Паз 3205         | 7                                    | 10                 | 30                                            | 10                                             |            |                                      |
| ЗиЛ 431410       | 1                                    | 8                  | 30                                            | 10                                             |            |                                      |
| ЗиЛ 431412       | 2                                    | 8                  | 30                                            | 10                                             |            |                                      |

Окончание таблицы 5

| Марка автомобиля | Кол-во автомашин i-й марки, Ni | Объем масла, Vi | Средний годовой пробег автомобиля, L, тыс. км | Норма пробега до замены масла, LH <sub>i</sub> , тыс. км | K*ρ | Кол-во отработанного масла, M, т/год |
|------------------|--------------------------------|-----------------|-----------------------------------------------|----------------------------------------------------------|-----|--------------------------------------|
| ЗиЛ 554          | 2                              | 8               | 25                                            | 10                                                       |     |                                      |
| Газ 31029        | 2                              | 5               | 40                                            | 10                                                       |     |                                      |
| УАЗ 3303         | 1                              | 6               | 30                                            | 10                                                       |     |                                      |
| Ваз 2103         | 2                              | 3,75            | 40                                            | 10                                                       |     |                                      |
| Тойота Королла   | 1                              | 4,2             | 50                                            | 10                                                       |     |                                      |
| Маз 54327        | 1                              | 23,5            | 20                                            | 10                                                       |     |                                      |
| ИТОГО:           |                                |                 |                                               |                                                          |     |                                      |

**Задание 5.** Рассчитать нормативы образования бытовых отходов (ТБО) (мусор от бытовых помещений организаций несортированный, исключая крупногабаритный (9210040001004)).

Твердые бытовые отходы (ТБО) чрезвычайно разнообразны по своему составу и зависят от социальных факторов. В их состав входят самые разнообразные компоненты – от пищевых отходов до разновидностей промышленных отходов и изделий. Типичное представление о ТБО крупного города дает их процентное распределение (табл. 6).

Таблица 6 – Состав основных компонентов ТБО крупных городов

| Компоненты отходов                   | Содержание % |
|--------------------------------------|--------------|
| Бумага, картон                       | 37,0         |
| Пищевые отходы                       | 30,6         |
| Дерево                               | 1,9          |
| Кожа, резина                         | 0,5          |
| Текстиль                             | 5,4          |
| Искусственные материалы (полиэтилен) | 5,2          |
| Кости                                | 1,1          |
| Металлы                              | 3,9          |
| Стекло                               | 3,7          |
| Камни                                | 0,8          |
| Прочие                               | 9,2          |

Норматив образования ТБО промышленных предприятий и организации рассчитывается согласно «Рекомендациям по определению норм накопления твердых бытовых отходов для городов РСФСР» (М., АКХ, 1982); Справочнику «Санитарная очистка и уборка населенных мест» (М., АКХ, 1997); Приложению 11 «Нормы накопления бытовых отходов» к СНИП 2.07.01–89) по формуле

$$M = n * H * 10^{-3} \text{ т/год.},$$

где  $n$  – количество работников на предприятии;

$N$  – среднегодовая норма образования отходов на одного работника завода, кг ( $m^3$ ).

Согласно данным табл. 7 рассчитывать нормативы образования ТБО. Данные представить в виде приведенной таблицы.

Таблица 7

| Цех подразделение                                        | Кол-во работников | Удельные нормы образования (Н) |       | Средняя плотность кг/ $m^3$ | Кол-во бытовых отходов, т/год ( $m^3$ ) |
|----------------------------------------------------------|-------------------|--------------------------------|-------|-----------------------------|-----------------------------------------|
|                                                          |                   | кг                             | $m^3$ |                             |                                         |
| Цех 2                                                    | 94                | 100                            | 0,5   | 200                         |                                         |
| Цех 4                                                    | 60                | 100                            | 0,5   | 200                         |                                         |
| Цех 7                                                    | 94                | 100                            | 0,5   | 200                         |                                         |
| БИНС                                                     | 47                | 100                            | 0,5   | 200                         |                                         |
| ЭМО                                                      | 93                | 100                            | 0,5   | 200                         |                                         |
| ЦЗЛ                                                      | 14                | 100                            | 0,5   | 200                         |                                         |
| Заводоуправление                                         | 95                | 332                            | 1,66  | 200                         |                                         |
| Столовая                                                 | 5                 | 100                            | 0,5   | 200                         |                                         |
| Административно-хозяйственный отдел, служба безопасности | 37                | 100                            | 0,5   | 200                         |                                         |
| Арендаторы                                               | 69                | 332                            | 1,66  | 200                         |                                         |
| ИТОГО:                                                   |                   |                                |       |                             |                                         |

### **Практическая работа 19**

#### **ПРЕДЕЛЬНОЕ КОЛИЧЕСТВО НАКОПЛЕНИЯ ТОКСИЧНЫХ ПРОМЫШЛЕННЫХ ОТХОДОВ НА ТЕРРИТОРИИ ПРЕДПРИЯТИЯ (ОРГАНИЗАЦИИ)**

##### **1 Цель работы**

Научиться рассчитывать предельное накопление отходов на территории предприятия.

##### **2 Теоретические положения**

*Предельное количество отходов на территории предприятия* в соответствии с Санитарно-эпидемиологическими правилами и нормативами СанПиН 2.1.7.1322–03 «Гигиенические требования к размещению и обезвреживанию отходов производства и потребления» - количество отходов, которое допускается размещать на территории промышленной площадки в закрытом или открытом виде при условии возможного выделения вредных веществ в воздушную среду территории предприятия в концентрациях, не превышает 30% ПДК воздуха рабочей зоны, и при отсутствии загрязнения почвы и водных объектов в количествах, приводящих к превышению санитарных норм.

При этом нормы предельного содержания вредных веществ в воде на территории предприятия относиться и к подземным водам.

Предельное количество отходов на территории определяются предприятием по согласованию с органами и учреждениями санитарно-эпидемиологической службы на основе классификации отходов: по классу опасности веществ – компонентов отходов, по их физико-химическим свойствами – агрегатному состоянию, летучести, возможности комбинирования воздействия.

Накопление и хранение отходов на территории определяется предприятием допускается временно, как исключение, в следующих случаях:

- при использовании отходов в последующем технологическом цикле с целью их полной утилизации;

- при временном отсутствии полигонов для захоронения, тары для хранения отходов, транспортных средств для вывоза отходов на полигоны обезвреживания и захоронения.

В зависимости от токсикологической и физико-химической характеристики отходов и их компонентов отходы допускается временно хранить:

- в производственном (цех, участок) или вспомогательном (склад, кладовая) помещениях;

- во временном нестационарном складе; на открытой площадке.

**Способ временного хранения отходов** определяется классом опасности веществ – компонентов отходов;

- вещества 1-го класса опасности хранятся в герметизированной таре (контейнеры, бочки)

- вещества 2-го класса опасности хранятся в закрытой таре (закрытые ящики, пластиковые пакеты, мешки);

- вещества 3-го класса опасности хранятся в бумажных мешках, пакетах, в хлопчатобумажных тканевых мешках;

- вещества 4-5-го классов опасности могут храниться открыто – навалом, насыпью.

При наличии в составе отходов веществ различного класса опасности предельное количество накопления, время и способ хранения определяются наличием наиболее опасных веществ.

***Предельное количество отходов не нормируется:***

- для отходов, содержащих вещества 1-го класса опасности, в случае их хранения в герметизированной таре, а также для отходов в жидком или газообразном состоянии, хранимых также в герметизированной таре. Эти отходы, а также токсичные отходы очистных сооружений необходимо удалять с территории в течении суток;

- для отходов в твердом виде, в том числе сыпучем состоянии, которые хранятся в контейнерах, в пластиковых, бумажных пакетах или мешках (если условия хранения соответствуют требованиям п. 7). Эти отходы необходимо удалять с территории в течение суток.

В случае временного хранения отходов в стационарных складах или в производственных помещениях должны быть обеспечены требования ГОСТ 12.1.005–76 «ССБТ. Воздух рабочей зоны. Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны в части ПДК вредных веществ и микроклимата помещений». Хранение отходов в открытом виде в помещениях не допускается.

При временном хранении отходов в нестационарных временных складах и на площадках на территории предприятия в открытом виде (навалом, насыпью) или в негерметизированной, открытой таре должен быть обеспечены следующие условия;

- в воздухе промышленной площадки на высоте до 2,0 м от поверхности земли содержание вредных веществ не должно превышать 30% ПДК для рабочей зоны (0.3 ПДК р.з.);

Содержание вредных веществ в подземных и поверхностных водах и почве на территории предприятия не должно превышать ПДК этих веществ и соответствовать требованиям государственных стандартов системы «Охрана природы» для окружающей среды и Правил охраны поверхностных вод от загрязнения сточными водами;

- предельное количество отходов в указанном случае может быть определено в соответствии с ориентировочным расчетом (см. далее пример). В случае превышения предельного количества отходы должны быть немедленно вывезены;

- площадка для хранения отходов должна располагаться в подветренной зоне территории, покрыта неразрушаемым и непроницаемым для токсичных веществ материалом (керамзитобетон, полимербетон, плитка) с автономными ливнестоками и уклонами в сторону очистных сооружений. При этом попадание поверхностного стока с площадок в общий ливнесток должно быть исключено за счет обваловки и других мероприятий. Для указанного поверхностного стока необходимы специальные очистные сооружения, обезвреживание этого стока. Должна быть предусмотрена эффективная защита от воздействия атмосферных осадков и ветра на массу отходов.

В местах хранения должны быть предусмотрены стационарные или передвижные погрузочно-разгрузочные механизмы для перемещения отходов и приемников, их погрузки для вывоза на полигоны. Конструкция приемников должна обеспечивать возможность их перевозки автотранспортом.

Контроль за состоянием окружающей среды на участках хранения отходов осуществляется лабораториями на промышленном предприятии и санэпидслужбой, органами водного надзора в части охраны вод в соответствии с методическими указаниями по определению низких концентрации вредных веществ в различных средах, с применением стандартизованных методик определения вредных веществ в воздухе, воде, почве. Периодичность контроля, точки замеров и перечень определяемых вредных веществ

согласовываются с местными органами и учреждениями санитарно-эпидемиологической службы.

На предприятиях (в организациях) должны быть разработаны, согласованы с органами санэпидслужбы и утверждены инструкции по удалению токсичных промышленных отходов с их территории.

**Ориентировочный метод определения предельного количества твердых отходов на территории предприятия (организации)**

Предельное количество отходов при их открытом хранении может быть установлено эмпирически по мере накопления массы отходов. В точках замеров определяются концентрации всех вредных веществ, подлежащих контролю, с последующим построением линии регрессии  $y_1$  (М), где  $y_1$  – суммой отношением концентраций вредных веществ  $C_1$  к соответствующим ПДК<sub>1</sub>:

$$y_1 = \sum C_1 / \text{ПДК}_1.$$

где М – масса отходов, определяется по графику (рис. 1) продолжением линии регрессии до ее пересечения с прямой, параллельной оси абсцисс и проходящей через точку  $y = 0,3$ .

Найденная эмпирическая зависимость позволяет осуществить прогнозы выделения М величиной  $M_x$ , соответствующей пересечению линии регрессии с прямой, параллельной оси абсцисс.

**Пример расчета:** на территории предприятия на площадке временного хранения находятся твердые отходы цеха гальванопокрытий в количестве 60 кг, содержащие этилендиамин. Требуется определить предельное количество отходов, допустимое для временного хранения.

**Расчет:** ПДК этилендиамина в воздухе рабочей зоны = 2 мг/м<sup>3</sup>; 0,3 ПДК = 0,6 мг/м<sup>3</sup>.

Результаты анализа воздуха на высоте до 2,0 м над массой отходов, мг/м<sup>3</sup>: 0,4; 0,6; 1,0; 0,2; 1,0.

Средневзвешенная величина  $C_1 = 0,64$ .

$$y = C_1 / \text{ПДК}_1 = 0,64 / 0,60 = 1,06 > 1,0$$

Таким образом, хранимое количество отходов является предельным и подлежит немедленному вывозу.

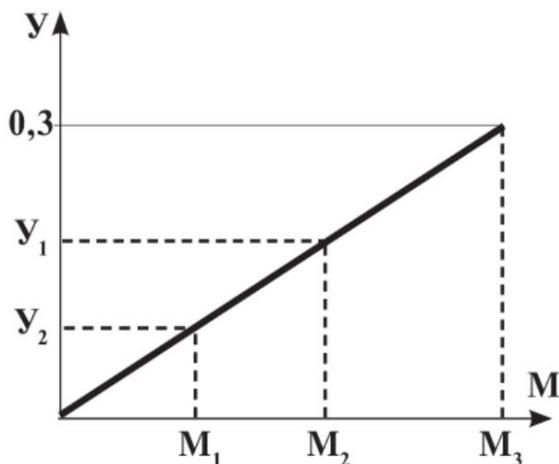


Рис. 1. График определение массы отходов

### 3 Порядок выполнения работы

1. Внимательно изучите теоретические положения и выполните задания.

2. Представьте результаты полученных расчетов в виде таблиц согласно заданиям. Ответьте на контрольные вопросы. Подготовьте отчет.

#### **Задание 1.**

На территории предприятия, на площадке временного хранения, находятся отходы нефтеперерабатывающего завода, хранятся кубовые остатки, содержащие нафталин, бенз(а)пирен, антрацен в количестве 150 кг. Определить предельно допустимое количество для временного хранения.

#### **Задание 2.**

На промплощадке автотранспортного предприятия хранятся отработанные свинцовые аккумуляторы, содержащие по 1,5 л серной кислоты в каждом. Накоплено 250 шт. Определить предельное количество аккумуляторов, допустимое для хранения.

### **Практическая работа 20**

#### **РАСЧЕТ УСТАНОВКИ ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ ТВЕРДЫХ ОТХОДОВ**

##### **1 Цель работы**

Освоить методики расчета установок для измельчения твердых отходов.

##### **2 Теоретическое положение**

При утилизации и переработке отходов используют различное оборудование, среди которого наиболее часто применяют шаровые мельницы.

Рассмотрим алгоритм расчета шаровой мельницы для измельчения твердых отходов.

Расчет шаровой мельницы сводится к определению размеров шаров и барабана.

Число оборотов мельницы определяется по формуле

$$n = \frac{32}{\sqrt{D}} \quad (1)$$

где  $D$  – внутренний диаметр барабана мельницы, м.

Объем барабана мельницы,  $m^3$ , будет равен

$$V_6 = \frac{\pi D^2}{4} L. \quad (2)$$

Размер шаров, мм, загружаемый в барабан, зависит от наибольшего размера кусков питания  $d_n$  и размера частиц измельченного продукта  $d_k$  и определяется по формуле

$$D_m = 6(\lg d_k) \sqrt{d_k}. \quad (3)$$

Масса шаров, загружаемых в мельницу, кг, находится по формуле

$$m_{ш} = \varphi V_6 \rho_{ш}. \quad (4)$$

где  $\varphi$  – степень заполнения барабана шарами;

$\rho_{ш}$  – насыпная масса стальных шаров кг/м<sup>3</sup>.

Производительность мельницы (т/ч) рассчитывается на выход частиц определенной крупности и может быть ориентировочно определена по формуле

$$G = K \cdot V \cdot D^{0,6}, \quad (5)$$

где  $K$  – коэффициент, определяемым по табл. 1;

$V$  – объем барабана, м<sup>3</sup>.

Таблица 1 – Значение коэффициента  $K$  для расчета производительности мельницы

| Крупность исходного материала, мм | Крупность измельченного материала, мм |      |       |
|-----------------------------------|---------------------------------------|------|-------|
|                                   | 0,2                                   | 0,15 | 0,075 |
| 25                                | 1,31                                  | 0,95 | 0,41  |
| 19                                | 1,57                                  | 1,09 | 0,51  |
| 12                                | 1,91                                  | 1,25 | 0,58  |
| 6                                 | 2,4                                   | 1,5  | 0,66  |

Расход энергии на измельчение (кВт) приближенно вычисляется по формуле

$$N = 6,1 m_{ш} \sqrt{d}. \quad (6)$$

где  $m_{ш}$  – масса шаров, т.

**Пример расчета шаровой мельницы для измельчения твердых отходов**

**Задание.** Рассчитать шаровую мельницу с центральной разгрузкой, размеры барабана которой  $D \times L = 1500 \times 3000$  мм, если 85% кусков исходного материала имеют диаметр  $d_{и} = 25$  мм, а 85% зерен измельченного продукта ( $d_{к}$ ) имеют крупность менее 150 мкм, насыпная масса стальных шаров  $\rho_{ш} = 4100$  кг/м<sup>3</sup>. Степень заполнения барабана шарами  $\varphi = 0,4$ .

**Решение.** Число оборотов мельницы:

$$n = \frac{32}{\sqrt{1,5}} = 26 \text{ об/мин.}$$

Объем барабана мельницы:

$$V_6 = \frac{3,14 \cdot 1,5^2}{4} \cdot 3 = 5,3 \text{ м}^3.$$

Размер шаров, загружаемых в барабан:

$$D_{ш} = 6(\lg 150) \sqrt{25} = 63,5 \text{ мм.}$$

Принимаем диаметр шаров 70 мм.

Масса шаров, загружаемых в мельницу, составит

$$m_{ш} = 0,4 \cdot 5,3 \cdot 4100 = 8700 \text{ кг.}$$

Производительность мельницы равна

$$G = 0,95 \cdot 5,3 \cdot 1,5^{0,6} = 642 \text{ т/ч.}$$

Расход энергии на измельчение

$$N = 6,1 \cdot 8,7 \cdot 1,5 = 65 \text{ кВт.}$$

### 3 Порядок выполнения работы

1. Внимательно изучите теоретические положения и выполните задания.

2. Представьте результаты полученных расчетов согласно заданиям. Ответьте на контрольные вопросы. Подготовьте отчет.

**Задание.** Рассчитать шаровую мельницу с центральной разгрузкой, размеры барабана которой  $D \times L = 2500 \times 3500$  мм, если 75% кусков исходного материала имеют диаметр  $d_{и} = 30$  мм, а 65% зерен измельченного продукта ( $d_{к}$ ) имеют крупность не менее 150 мкм, насыпная масса стальных шаров  $\rho_{ш} = 4100$  кг/м<sup>3</sup>. Степень заполнения барабана шарами  $\varphi = 0,4$ .

### *Практическая работа 21*

#### РАСЧЕТ УСТАНОВКИ АЭРОБНОЙ СТАБИЛИЗАЦИИ ОСАДКОВ, ОБРАЗУЮЩИХСЯ ПРИ ОЧИСТКЕ СТОЧНЫХ ВОД

##### 1 Цель работы

Освоить методику расчета установки аэробной стабилизации осадков сточных вод.

##### 2 Теоретические положения

В процессах биохимической обработки сточных вод и других отходов органические вещества преобразуются микроорганизмами и концентрируются в форме синтезируемых микробных твердых веществ.

Эти вещества вместе с определенным количеством адсорбированных и частично окисленных примесей, обрабатываемых вод, отделяются от основной массы очищенной воды и составляют суспензии – вторичные продукты (осадки) биохимических процессов. На долю активного ила приходится 60–70% всех осадков обычных станций водоочистки.

Обработка избыточного активного ила и его смеси с сырым осадком из первичных отстойников заключается в стабилизации, обезвреживании и максимальном снижении его влажности и объема.

Микробиологический процесс уменьшения количества биохимически разложимого вещества осадка (его стабилизацию осуществляют в аэробных или анаэробных условиях).

Метод *аэробной стабилизации* осадков, по сравнению с анаэробным сбразиванием осадков в метатенках, отличается простотой, устойчивостью, взрывобезопасностью, меньшими капитальными вложениями. Главный недостаток метода аэробной стабилизации являются высокие энергетические затраты, необходимые для продувки осадка воздухом, и малоэффективная работа в холодное время года.

Аэробные процессы стабилизации не требуют герметизации сооружения, дополнительного нагрева, успешно реализуются при сравнительно низких концентрациях осадков, дают твердый продукт и жидкий сток с низкой биологической потребностью в кислороде. Аэробно стабилизированный ил характеризуется лучшей водоотдачей при уплотнении и механическом обезвоживании.

**Расчет аэробного стабилизатора избыточного активного ила и его смесей с сырым осадком из первичных отстойников**

Расчет стабилизатора сводится к определению размеров установки и расхода воздуха, необходимого для процесса аэрации.

Среднее количество поступающего в стабилизатор вещества, т/сут., с учетом распада, рассчитывается по формуле:

$$P_3 = (P_1 + P_2) \left[ 1 - \frac{R}{100} \left( 1 - \frac{Z}{100} \right) \right], \quad (1)$$

где  $P_1$  – содержание сухого вещества в избыточном активном иле, т/сут;

$P_2$  – содержание сухого вещества в фугате от центрифугирования сырого осадка, т/сут;

$R$  – распад зольность поступающей смеси.

Расход смеси, поступающей в уплотнитель,  $m^3/сут.$ :

$$Q_3 = \frac{P_3 1000}{C_4}, \quad (2)$$

где  $C_4$  – концентрация уплотнительной смеси, подаваемой на обезвоживание,  $m^3/сут.$  Определяется по формуле

$$Q_4 = \frac{P_3 1000}{C_5}. \quad (3)$$

где  $C_5$  – концентрация уплотненной смеси.

Количество иловой воды, отводящейся из илоуплотнителя,  $m^3/сут.$ ;

$$Q_5 = Q_3 - Q_4. \quad (4)$$

Расход иловой воды, отводящейся из осадкоуплотнителя,  $m^3/сут.$ ;

$$Q_0 = Q_1 + Q_2 - Q_3. \quad (5)$$

где  $Q_1$  – объем избыточного активного ила;

$Q_2$  – объем фугата от центрифугирования сырого осадка.

Объем зоны аэрации,  $m^3$ , определяется по формуле

$$V_1 = \frac{P_3 1000}{C_4} \tau_1. \quad (6)$$

где  $\tau_1$  – период аэрации, сут.

Объем зоны отстаивания,  $m^3$ ;

$$V_2 = \frac{Q_1 + Q_2}{24} \tau_2. \quad (7)$$

где  $\tau_2$  – время осветления иловой воды в отстойной зоне.

Объем зоны уплотнения,  $m^3$ , находится по формуле

$$V_3 = \frac{Q_3}{24} \tau_3. \quad (8)$$

где  $\tau_3$  – время пребывания смеси в осадкоуплотнителе.

Общий объем стабилизатора, м<sup>3</sup>;

$$V = V_1 + V_2 + V_3. \quad (9)$$

Принимается аэробный минерализатор шириной секции  $B = 9$  м, рабочей глубиной  $H = 4,8$  м, с числом секций  $n = 2$ .

Длина минерализатора, м, определяется по формуле

$$L = \frac{V}{B \cdot h \cdot n}. \quad (10)$$

Объем уплотнительной смеси, м<sup>3</sup>;

$$Q = \frac{4V_3(100-w_{acx})}{100-w_{ynz}}. \quad (11)$$

где  $w_{исх}$  – влажность исходной смеси;  $w_{упл}$  – влажность уплотненной смеси.

Расход воздуха на аэрацию, м<sup>3</sup>/ч, находится по формуле

$$Q_B = q_B VI, \quad (12)$$

где  $q$  – удельный расход воздуха на 1 м<sup>3</sup> емкости (м<sup>3</sup>/(м<sup>3</sup>·ч)).

**Пример расчета аэробного стабилизатора избыточного активного ила и его смесей с сырым осадком из первичных отстойников**

**Задание.** Рассчитать аэробный стабилизатор избыточного активного ила и его смесей с сырым осадком из первичных отстойников для следующих исходных данных (табл. 1).

Таблица 1

|                                                                        |                                               |
|------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|
| Содержание сухого вещества в избыточном активном иле                   | $P_1 = 9,12$ т/сут                            |
| Содержание сухого вещества в фугате от центрифугирования сырого осадка | $P_2 = 2,59$ т/сут                            |
| Объем избыточного активного ила                                        | $Q_1 = 1123,4$ м <sup>3</sup> /сут            |
| Объем фугата от центрифугирования сырого осадка                        | $Q_2 = 77,3$ м <sup>3</sup> /сут              |
| Распад беззольного вещества                                            | $R = 30$ %                                    |
| Средняя зольность поступающей смеси                                    | $Z = 27$ %                                    |
| Концентрация сухого вещества смеси в зоне аэрации                      | $C_4 = 20$ г/л                                |
| Концентрация уплотненной смеси                                         | $C_5 = 30$ г/л                                |
| Период аэрации                                                         | № 1 = 10 сут                                  |
| Время осветления иловой воды в отстойной зоне                          | № 2 = 2 ч                                     |
| Время пребывания смеси в осадкоуплотнителе                             | № 3 = 6 ч                                     |
| Влажность исходной смеси                                               | $w_{исх} = 99,8$ %                            |
| Влажность уплотнительной смеси                                         | $w_{упл} = 97$ %                              |
| Удельный расход воздуха на 1 м <sup>3</sup> емкости                    | $q = 1,5$ м <sup>3</sup> /(м <sup>3</sup> ·ч) |

**Решение.** Среднее количество поступающего вещества (с учетом распада) равно

$$P_3 = (9.12 + 2.59) \left[ 1 - \frac{30}{100} \left( 1 - \frac{27}{100} \right) \right] = 9.15 \text{ т/сут.}$$

Расход смеси, поступающей в уплотнитель:

$$Q_3 = \frac{9.15 \cdot 1000}{30} = 457 \text{ м}^3/\text{сут.}$$

Расход уплотненной смеси, подаваемой на обезвоживание, равен

$$Q_4 = \frac{9.15 \cdot 1000}{30} = 305 \text{ м}^3/\text{сут.}$$

Количество иловой воды, отводящейся из илоуплотнителя, равно

$$Q_5 = 457 - 305 = 152 \text{ м}^3/\text{сут.}$$

Расход иловой воды, отводящей из осадкоуплотнителя, составит

$$Q_6 = 1123,4 + 77,3 + 152 = 1084,7 \text{ м}^3/\text{сут.}$$

Объем зоны аэрации будет равен

$$V_1 = \frac{9.15 \cdot 100}{20} \cdot 10 = 4575 \text{ м}^3$$

Объем зоны отстаивания:

$$V_2 = \frac{1123.4 + 77.3}{24} \cdot 2 = 100 \text{ м}^3$$

Объем зоны уплотнения равен

$$V_3 = \frac{457}{24} \cdot 6 = 114.3 \text{ м}^3$$

Общий объем стабилизатора равен

$$V = 4575 + 100 + 114,3 = 4789,3 \text{ м}^3$$

Принимается аэробный минерализатор шириной секции  $B = 9$  м, рабочей глубиной  $H = 4,8$  м, с числом секции  $n = 2$ .

Длина минерализатора

$$L = \frac{4789.3}{9 \cdot 4.8 \cdot 2} = 55.43 \text{ м}$$

Принимается  $L = 66$  м.

Объем уплотненной смеси находится по формуле

$$Q = \frac{4 \cdot 114.3 \cdot (100 - 99.8)}{100 - 97} = 27.84 \text{ м}^3/\text{сут}$$

Расход воздуха на аэрацию составит

$$Q_B = 1,5 \cdot 4575 = 6462,5 \text{ м}^3/\text{ч.}$$

### 3 Порядок выполнения работы

1. Внимательно изучите теоретические положения и выполните задания.

2. Представьте результаты полученных расчетов согласно заданиям. Подготовьте отчет.

**Задание.** Рассчитать аэробный стабилизатор избыточного активного ила и его смесей с сырым осадком из первичных отстойников для исходных данных примера, приняв значение на 30, 80, 100% больше.

***Вопросы для самопроверки:***

1. Что такое отходы? Какие различия между отходами производства и потребления вы можете назвать?
2. Что означает тринадцатизначный код отхода по ФККО?
3. Что такое норматив образования отходов, лимит на размещение отходов?
4. Как определяется класс опасности отходов?
5. На основе какой исходной информации определяются нормативы образования отходов?
6. Какие методы расчета нормативов образования отходов производства вам известны?
7. Как производится расчет норматива образования отходов ртутных ламп, люминесцентных ртутьсодержащих трубок?
8. Как производится расчет норматива образования ТБО промышленных предприятий и организаций?

### *Список литературы*

1. Инженерная защита атмосферы от вредных выбросов: учебно-практическое пособие / А.Г. Ветошкин.– Вологда: Инфра-Инженерия, 2016.– 316 с.:
2. Инженерная защита гидросферы от сбросов сточных вод: учебное пособие/ А.Г. Ветошкин. – Вологда: Инфра-Инженерия, 2016.– 296 с.
3. Инженерная экология: процессы и аппараты очистки сточных вод и переработки осадков: учеб. пособие / А.В. Луканин.– М.: ИНФРА-М, 2017.– 605 с.
4. Промышленная экология / Т.Е. Гридэл, Б.Р. Алленби.– М.:ЮНИТИ-ДАНА, 2015.– 527 с.
5. Экология: учебник / А.Д. Потапов. - 2-е изд., испр. и доп.– М.:НИЦ ИНФРА-М, 2016.– 528 с.
6. Экология: учебное пособие / В.А. Разумов.– М.:НИЦ ИНФРА-М, 2016.– 296 с.
7. Экология: учебное пособие / Л.Н. Ермаков, О.Н. Чернышова.– М.: НИЦ ИНФРА-М, 2013.– 360 с.
8. Экология XXI века (словарь терминов). Справочно-энциклопедическая литература / В.И. Глазко.– М.: КУРС : ИНФРА-М, 2016.– 992 с.
9. Экология и охрана окружающей среды: законы и реалии в США и России: Монография / Л.И. Брославский.– М.: НИЦ Инфра-М, 2013.– 317 с.
10. Экология техносферы: практикум / С.А. Медведева, С.С. Тимофеева.– М.: Форум: НИЦ ИНФРА-М, 2014.– 200 с.

## Содержание

|                                                                                                                                                             |           |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| Введение.....                                                                                                                                               | 3         |
| РАЗДЕЛ 1. ЗАЩИТА АТМОСФЕРЫ.....                                                                                                                             | 4         |
| Практическая работа 1                                                                                                                                       |           |
| <i>Расчет приземных концентраций загрязняющих веществ.....</i>                                                                                              | <i>4</i>  |
| Практическая работа 2                                                                                                                                       |           |
| <i>Определение классификационной группы пыли по дисперсности.<br/>Определение скорости витания частиц и расчет параметров<br/>пылеосадочной камеры.....</i> | <i>10</i> |
| Практическая работа 3                                                                                                                                       |           |
| <i>Выбор циклона и оценка эффективности очистки газов в циклоне.....</i>                                                                                    | <i>16</i> |
| Практическая работа 4                                                                                                                                       |           |
| <i>Расчет электрофильтра.....</i>                                                                                                                           | <i>23</i> |
| Практическая работа 5                                                                                                                                       |           |
| <i>Технологический расчет рукавных фильтров.....</i>                                                                                                        | <i>27</i> |
| Практическая работа 6                                                                                                                                       |           |
| <i>Расчет мокрых пылеуловителей. Полый форсуночный скруббер.....</i>                                                                                        | <i>33</i> |
| Практическая работа 7                                                                                                                                       |           |
| <i>Расчет тарельчатого пенно-барботажного аппарата.....</i>                                                                                                 | <i>36</i> |
| Практическая работа 8                                                                                                                                       |           |
| <i>Укрупненный расчет механической вентиляции производственного<br/>помещения.....</i>                                                                      | <i>39</i> |
| РАЗДЕЛ 2. ЗАЩИТА ГИДРОСФЕРЫ.....                                                                                                                            | 49        |
| Практическая работа 9                                                                                                                                       |           |
| <i>Определение необходимой степени очистки сточных вод.....</i>                                                                                             | <i>49</i> |
| Практическая работа 10                                                                                                                                      |           |
| <i>Расчеты решеток.....</i>                                                                                                                                 | <i>55</i> |
| Практическая работа 11                                                                                                                                      |           |
| <i>Выбор устройств для очистки сточных вод от взвешенных частиц и<br/>расчет их эффективности. Расчет горизонтального отстойника.....</i>                   | <i>59</i> |
| Практическая работа 12                                                                                                                                      |           |
| <i>Расчет основных параметров гидроциклона.....</i>                                                                                                         | <i>63</i> |
| Практическая работа 13                                                                                                                                      |           |
| <i>Расчет установок химической очистки сточных вод.....</i>                                                                                                 | <i>67</i> |
| Практическая работа 14                                                                                                                                      |           |
| <i>Расчет сорбционной установки.....</i>                                                                                                                    | <i>73</i> |
| Практическая работа 15                                                                                                                                      |           |
| <i>Расчет флотационной установки.....</i>                                                                                                                   | <i>78</i> |
| Практическая работа 16                                                                                                                                      |           |
| <i>Расчет распылительной экстракционной колонны.....</i>                                                                                                    | <i>80</i> |
| Практическая работа 17                                                                                                                                      |           |
| <i>Расчет установки ионного обмена.....</i>                                                                                                                 | <i>86</i> |

|                                                                                                                      |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| РАЗДЕЛ 3. ЗАЩИТА ЛИТОСФЕРЫ.....                                                                                      | 93  |
| Практическая работа 18                                                                                               |     |
| <i>Обращение с отходами производства и потребления. Расчет нормативов образования отходов</i> .....                  | 93  |
| Практическая работа 19                                                                                               |     |
| <i>Предельное количество накопления токсичных промышленных отходов на территории предприятия (организации)</i> ..... | 104 |
| Практическая работа 20                                                                                               |     |
| <i>Расчет установки измельчения твердых отходов</i> .....                                                            | 108 |
| Практическая работа 21                                                                                               |     |
| <i>Расчет установки аэробной стабилизации осадков, образующихся при очистке сточных вод</i> .....                    | 110 |
| СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....                                                                                               | 115 |

*Автор надеется, что данное издание помогло Вам в изучении дисциплины  
«Инженерная экология» и желает удачной сдачи зачёта (экзамена)!*

*Учебное издание*

*ЛИТВИНОВ Владимир Игоревич*

## **ИНЖЕНЕРНАЯ ЭКОЛОГИЯ**

*Учебное пособие*

*Технический редактор Ю.И. Чикавинский*

*Корректор Г.Н. Елисеева*

*Дизайн обложки Л. Соколова*

Подписано в печать 04.12.2018 г.  
Объем 7,4 усл. печ. л.  
Заказ № 306-Р

Формат 60/90 1/16  
Тираж 300 экз.

**ФГБОУ ВО Вологодская ГМХА  
160555 г. Вологда, с. Молочное, ул. Шмидта, 2**

ISBN 978-5-98076-283-4

