

Министерство науки и высшего образования Российской  
Федерации Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение высшего образования  
«СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»  
Невинномысский технологический институт (филиал) СКФУ

## **МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ**

по выполнению практических работ  
по дисциплине «Основы промышленной  
безопасности»

для студентов заочной формы обучения  
направления подготовки

18.03.02 Энерго- и ресурсосберегающие процессы в химической технологии, нефтехимии  
и биотехнологии

Методические указания разработаны в соответствии с требованиями ФГОС ВО и рабочей программы дисциплины «Основы промышленной безопасности». Указания предназначены для студентов заочной формы обучения направления подготовки 18.03.02 Энерго- и ресурсосберегающие процессы в химической технологии, нефтехимии и биотехнологии.

Содержат основные разделы изучаемого теоретического материала, перечень вопросов необходимых для проработки, а также список рекомендуемой литературы.

Составитель                      М.В. Должикова, старший преподаватель кафедры ХТМиАХП

## Содержание

ПРЕДИСЛОВИЕ.....	2
ВВЕДЕНИЕ.....	
Практическое занятие №1. Расчет рассеяния химических загрязнений атмосферы от выбросов одиночного источника.....	3
Практическое занятие №2. Расчет циклонного оборудования для очистки газовых выбросов .....	7
Практическое занятие №3. Расчет фильтровального оборудования для очистки газовых выбросов.....	13
Практическое занятие №4. Расчет скруббера для очистки газовых выбросов	16
Практическое занятие №5. Расчеты снижения виброакустических загрязнений окружающей среды .....	18
Практическое занятие №6. Расчет потребной эффективности очистки сточных вод .....	26
Практическое занятие №7. Расчет горизонтальной нефтеловушки для очистки сточных вод.....	30
Практическое занятие №8. Расчет отстойника непрерывного действия с гребковой мешалкой для очистки сточных вод.....	34
Практическое занятие №9. Расчеты предохранительных устройств оборудования и избыточного давления взрыва .....	37
ЛИТЕРАТУРА .....	46

## **Введение**

Дисциплина «Основы промышленной безопасности» относится к дисциплине базовой части. Она направлена на формирование общекультурных и профессиональных компетенций, обучающихся в процессе выполнения работ, определенных ФГОС ВО.

Методические указания составлены на современном научном уровне и рассчитаны на студентов, по направлению 18.03.02 Энерго- и ресурсосберегающие процессы в химической технологии, нефтехимии и биотехнологии.

Последовательность тем соответствует логической структуре ее прохождения. Предлагаемые методические указания содержат материал, который рекомендуется использовать студентам при подготовке к практическим занятиям.

Для подготовки к практическим занятиям студент должен изучить материал по соответствующей теме, используя основную и дополнительную литературу, а также используя периодические издания СМИ.

## Практическое занятие №1. Расчет рассеяния химических загрязнений атмосферы от выбросов одиночного источника

**Цель:** приобретение знаний и умений по практическому определению концентрации загрязняющих веществ в атмосфере при рассеянии выбросов.

Организационная форма занятия – традиционная.

*Целью заданий* является освоение методов расчета количественного содержания загрязняющих веществ в атмосфере на определенном расстоянии от источника.

Примерами одиночных точечных источников – загрязнителей атмосферы являются дымовые трубы трубчатых печей, трубы вывода сбросных и продувочных газов.

Максимальное значение приземной концентрации вредного вещества  $c_m$ , мг/м<sup>3</sup>, при выбросе газовой смеси из трубы с круглым устьем достигается при неблагоприятных метеорологических условиях на расстоянии  $x_m$ , м, от источника и определяется по формуле:

$$c_m = \frac{A M F m n \eta}{H^2 \sqrt[3]{V \Delta T}},$$

где  $A$  – коэффициент, зависящий от температурной стратификации атмосферы (например, для Ставропольского края принимается равным 200);  $M$  – масса вредного вещества, выбрасываемого в атмосферу в единицу времени, г/с;  $F$  – коэффициент, учитывающий скорость оседания вредных веществ в атмосферном воздухе (для газообразного топлива принимается равным 1);  $m$ ,  $n$  – коэффициенты, учитывающие условия выхода газовой смеси из устья источника выброса (определяются по формулам);  $H$  – высота источника выброса, м;  $\eta$  – коэффициент, учитывающий влияние рельефа местности (для ровной или слабопересеченной местности принимается равным 1);  $V$  – расход газовой смеси, м<sup>3</sup>/с;  $\Delta T$  – разность между температурой выбрасываемой газовой смеси и температурой атмосферного воздуха.

Значение коэффициента  $m$  определяется в зависимости от параметра  $f$ :

$$f = \frac{1000 w_o^2 D}{H^2 \Delta T},$$

где  $w_o$  – средняя скорость выхода газовой смеси из устья источника выброса, м/с;  $D$  – диаметр устья источника выброса, м.

При этом средняя скорость выхода газовой смеси из устья источника выброса может быть определена по формуле:

$$w_o = \frac{4 V}{\pi D^2}.$$

Тогда:

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

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

Коэффициент  $n$  определяется в зависимости от параметра  $v_m$ :

$$v_m = 0,65 \sqrt[3]{\frac{V \Delta T}{H}}.$$

Тогда:

$$\text{при } v_m \geq 2 \quad n = 1,$$

$$\text{при } 0,5 \leq v_m < 2 \quad n = 0,532 v_m^2 - 2,13 v_m + 3,13,$$

$$\text{при } v_m < 0,5 \quad n = 4,4 v_m.$$

Расстояние  $x_m$  определяется по формуле:

$$x_m = \frac{(5 - F)}{4} d H,$$

где  $d$  – безразмерный коэффициент.

При  $f < 100$  коэффициент  $d$  находится по формулам:

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

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

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

При  $f \geq 100$  коэффициент  $d$  находится в зависимости от  $v'_m = 1,3 \frac{w_o D}{H}$  по

формулам:

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

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

$$\text{при } v'_m > 2 \quad d = 16 \sqrt{v'_m}.$$

## ЗАДАНИЯ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО ВЫПОЛНЕНИЯ

Задания выполняются по вариантам.

1. По данным, приведенным в таблице 1.1, определите максимальное значение приземной концентрации загрязняющих веществ (диоксида азота и оксида углерода)  $c_m$ , мг/м<sup>3</sup>, при выбросе газовой смеси из печной трубы и расстояние  $x_m$ , м, на котором она достигается при неблагоприятных метеорологических условиях.

Высота трубы  $H$ , диаметр устья  $D$ , расход газовой смеси  $V$ , температура  $T$ , массовый выброс диоксида азота  $M_1$  и оксида углерода  $M_2$ . Источник загрязнений расположен в Ставропольском крае, температура воздуха – 25 °С, местность ровная.  $ПДК_1 = 0,085$ ,  $ПДК_2 = 5 \text{ мг/м}^3$ .

Таблица 1.1 – Исходные данные к заданию

№ варианта	$H$ , м	$D$ , м	$V$ , м <sup>3</sup> /с	$T$ , °С	$M_1$ , г/с	$M_2$ , г/с
1	30	1,0	5,0	160	4,0	11,0
2	35	0,9	5,1	160	4,0	11,0
3	30	1,0	5,2	160	4,0	11,1
4	35	0,9	5,3	155	4,1	11,1
5	40	1,0	5,4	155	4,1	11,2
6	40	0,9	5,5	155	4,1	11,2
7	35	1,0	5,6	160	4,2	11,1
8	30	0,9	5,7	160	4,2	11,1
9	40	1,2	5,8	160	4,2	11,0
10	40	1,0	5,9	155	4,1	11,0
11	50	1,2	6,0	155	4,1	10,8
12	50	1,4	6,1	155	4,1	10,8
13	55	1,2	6,2	160	4,0	10,5

14	55	1,4	6,3	160	4,0	10,5
15	60	1,4	6,4	160	4,0	10,6
16	60	1,3	6,5	155	4,2	10,6
17	45	1,3	6,6	155	4,2	10,7
18	45	1,2	6,7	155	4,2	10,7

2. Проверьте условие безопасности суммирующего действия загрязнителей по формуле:

$$\frac{c_{M1}}{ПДК_1} + \frac{c_{M2}}{ПДК_2} \leq 1,$$

где  $c_{M1}$  и  $c_{M2}$  – максимальные значения приземной концентрации диоксида азота и оксида углерода;  $ПДК_1$  и  $ПДК_2$  – предельно допустимые концентрации соответственно диоксида азота и оксида углерода.

Если условие не выполняется, определите, какой должна быть высота трубы, чтобы была обеспечена экологическая безопасность?

### Контрольные вопросы

1. Приведите примеры одиночных источников загрязнения атмосферы.
2. Как влияет на максимальное значение приземной концентрации вредного вещества высота источника выброса?
3. Как влияет на максимальное значение приземной концентрации вредного вещества разность между температурой выбрасываемой газовой смеси и температурой атмосферного воздуха?
4. Как влияет на максимальное значение приземной концентрации вредного вещества диаметр устья источника выброса?

## Практическое занятие №2. Расчет циклонного оборудования для очистки газовых выбросов

**Цель:** приобретение знаний и умений по практическому использованию расчетного метода определения размеров циклонов для уменьшения загрязнений атмосферы.

Организационная форма занятия – традиционная.

*Целью заданий* является подбор типового циклонного оборудования для реализации процесса газоочистки промышленных выбросов в атмосферу.

Системы и методы очистки атмосферных выбросов от загрязнений можно классифицировать по схеме, показанной на рисунке 2.1.



Рисунок 2.1 – Схема классификации систем и методов очистки атмосферных выбросов

Системы очистки газовых выбросов, чаще всего – использованного воздуха, от пыли делятся на четыре основные группы: сухие и мокрые пылеуловители, а также электрофильтры и фильтры.

При повышенном содержании пыли в воздухе используют пылеуловители и электрофильтры. Фильтры применяют для тонкой очистки воздуха с концентрацией примесей менее 100 мг/м<sup>3</sup>.

Для очистки воздуха от туманов (например, кислот, щелочей, масел и других жидкостей) используют специальные системы фильтров, называемых туманоуловителями.

Выбор средств защиты воздуха от газопарообразных примесей зависит от применяемого метода очистки.

По характеру протекания физико-химических процессов выделяют метод абсорбции (промывка выбросов растворителями примеси), хемосорбции (промывка выбросов растворами реагентов, связывающих примеси химически), адсорбции (поглощение газообразных примесей пористыми твердыми поглотителями) и термической нейтрализации.

Все процессы извлечения из воздуха взвешенных частиц включают, как правило, две операции:

- осаждение частиц пыли или капель жидкости на сухих или смоченных поверхностях;
- удаление осадка с поверхностей осаждения.

Основной операцией является осаждение, по ней, собственно, и классифицируют все пылеуловители. Однако вторая операция, несмотря на кажущуюся простоту, связана с преодолением ряда технических трудностей, часто оказывающих решающее влияние на эффективность очистки или применимость того или иного метода.

Выбор того или иного пылеулавливающего устройства предопределяется дисперсным составом улавливаемых частиц промышленной пыли.

Эффективность процесса очистки от вредных примесей характеризуется степенью снижения вредных примесей выброса в применяемом средстве очистки и определяется коэффициентом, определяемым по формуле:

$$\eta = \frac{C_{вх} - C_{вых}}{C_{вх}},$$

где  $C_{вх}$  и  $C_{вых}$  – концентрации вредных примесей до и после использования средства очистки.

При использовании комплекса газоочистного оборудования для улавливания твердых взвесей широкого фракционного состава процессы ведут по схеме:

пылеосадительная камера/отстойный газопход → циклон → фильтр → скруббер.

Основные размеры одиночного циклона определяются в зависимости от его диаметра  $D$ .

Диаметр циклона определяют по условной скорости газа  $w_{ц}$ , отнесенной к полному поперечному сечению цилиндрической части циклона:

$$D = \sqrt{\frac{V}{2826 w_{ц} \rho}},$$

где  $V$  – расход газа, проходящего через циклон, кг/ч;  $\rho$  – плотность очищаемого газа, кг/м<sup>3</sup>.

Так, например плотность воздуха в зависимости от температуры ( $t$ , °C) можно определить по формуле:

$$\rho = 1,29 \frac{273}{(273 + t)}.$$

Условная скорость газа будет равна:

$$w_{ц} = \sqrt{\frac{2 \Delta p}{\xi \rho}},$$

где  $\Delta p$  – гидравлическое сопротивление циклона, Па;  $\xi$  – коэффициент гидравлического сопротивления.

Для определения скорости задаются оптимальным соотношением  $\Delta p/\rho$ , которое изменяется в пределах 550...750 м<sup>2</sup>/с<sup>2</sup>.

Другие размеры циклона (в долях от диаметра  $D$ ) определяются по соотношениям, приведенным в таблице 2.1.

Расчет батарейного циклона сводится к определению числа циклонных элементов исходя из требуемого расхода очищаемого газа и его скорости.

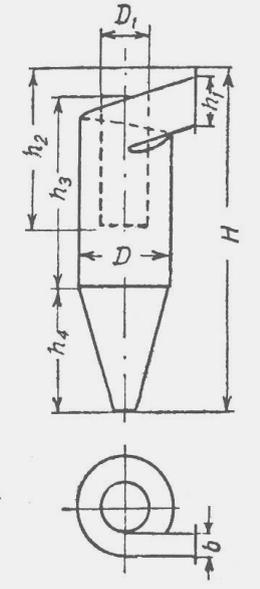
Скорость газа в цилиндрической части циклонного элемента ( $w_{ц}$ , м/с)

можно определить по формуле:

$$w_{ц} = \sqrt{\frac{2 \Delta p}{\xi \rho}},$$

где  $\Delta p$  – гидравлическое сопротивление циклона, Па;  $\xi$  – коэффициент гидравлического сопротивления;  $\rho$  – плотность очищаемого газа, кг/м<sup>3</sup>.

Таблица 2.1 – Соотношения размеров циклона

	Характеристика циклона	Тип циклона		
		ЦН-24	ЦН-15	ЦН-11
Диаметр выходного патрубка $D_1$	0,6	0,6	0,6	
Ширина входного патрубка $b$	0,26	0,26	0,26	
Высота входного патрубка $h_1$	1,11	0,66	0,48	
Высота выходного патрубка $h_2$	2,11	1,74	1,56	
Высота цилиндрической части $h_3$	2,11	2,26	2,08	
Высота конической части $h_4$	1,75	2,0	2,0	
Общая высота циклона $H$	4,26	4,50	4,38	
Коэффициент сопротивления $\xi$	60	105	180	

Расход газа на один элемент батарейного циклона ( $V_1$ , м<sup>3</sup>/ч) составит:

$$V_1 = 900 \pi d^2 w_{ц},$$

где  $d$  – диаметр циклонного элемента, м.

Требуемое число элементов:

$$n = \frac{Q}{V_1},$$

где  $Q$  – производительность циклона, м<sup>3</sup>/ч.

Найденное число элементов можно распределить по 4, 6 или 8 штук в одном ряду.

### ЗАДАНИЯ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО ВЫПОЛНЕНИЯ

Задания выполняются по вариантам. Исходные данные приведены в таблицах 2.2, 2.3

Таблица 2.2 – Данные к расчету циклона

№ варианта	Тип циклона	$V, \text{кг/ч}$	$\frac{\Delta p}{\rho}, \text{м}^2/\text{с}^2$	$t, \text{°C}$
1	ЦН-24	3000	550	100
2	ЦН-15	2500	600	110
3	ЦН-11	2000	650	120
4	ЦН-24	3200	700	130
5	ЦН-15	2700	750	140
6	ЦН-11	2200	550	130
7	ЦН-24	3400	600	120
8	ЦН-15	2900	650	110
9	ЦН-11	2400	700	100
10	ЦН-24	2800	750	105
11	ЦН-15	2300	550	115
12	ЦН-11	1800	600	125
13	ЦН-24	2600	650	135
14	ЦН-15	2100	700	145
15	ЦН-11	1600	750	155
16	ЦН-24	2150	720	118

1. По исходным данным, приведенным в таблице 2.2, рассчитайте размеры циклона для выделения частиц сухого материала из воздуха, выходящего из распылительной сушилки.

2. Изобразите схему циклона, указав на ней полученные в результате расчета размеры.

3. По исходным данным, приведенным в таблице 2.3, определите число элементов батарейного циклона типа БЦ, используемого для очистки газа от слабо слипающейся пыли. Диаметр элемента  $d = 150 \text{ мм}$ .

Гидравлическое сопротивление батарейного циклона не должно превышать значения  $\Delta p$ .

Таблица 2.3 – Данные к расчету батарейного циклона

№ варианта	$Q, \text{м}^3/\text{ч}$	$\xi$	$\rho, \text{кг/м}^3$	$\Delta p, \text{Па}$
1	8000	90	0,65	540
2	8200	65	0,60	560
3	8400	90	0,55	580
4	8600	65	0,50	600
5	8800	90	0,65	620
6	9000	65	0,60	640
7	9200	90	0,55	660

8	9400	65	0,50	680
9	9600	90	0,65	700
10	9800	65	0,60	720
11	7800	90	0,55	700
12	7400	65	0,50	680
13	7200	90	0,65	660
14	7000	65	0,60	640
15	6800	90	0,55	620
16	6600	65	0,50	600

4. Составьте схему расположения элементов батарейного циклона.

### **Контрольные вопросы**

1. Какие классы оборудования используются для очистки газов от пылей (туманов, газообразных примесей)?
2. Какие операции включают, как правило, все процессы извлечения из воздуха взвешенных частиц?
3. Как определяется эффективность процесса очистки воздуха от твердых или жидких примесей?
4. На основе каких данных рассчитывается диаметр циклона?
5. К определению каких данных сводится расчет батарейного циклона?
6. В каких случаях принимают решение об использовании мокрой очистки газов?

### Практическое занятие №3. Расчет фильтровального оборудования для очистки газовых выбросов

**Цель:** приобретение знаний и умений по практическому использованию расчетного метода определения характеристик фильтров для очистки газов от твердых взвесей.

Организационная форма занятия – традиционная.

*Целью заданий* является подбор типового фильтровального оборудования для реализации процесса газоочистки.

Фильтры применяют на второй и третьей ступенях очистки газовых потоков (пылеосадительная камера, циклон) с концентрацией твердых примесей не более  $100 \text{ мг/м}^3$  (см. материал занятия №2).

Среди конструкций *фильтров* для очистки газов наиболее часто применяют рукавные аппараты, выпускаемые в соответствии с рядом каталогов. Для подбора типового фильтра предварительно необходимо определить размер необходимой площади фильтрования по формуле:

$$F = (V_1 + V_2)/v_{\text{ф}} + F_c, \text{ м}^2,$$

где  $V_1$  – расход газа с учетом его подсоса,  $\text{м}^3/\text{мин}$ ;  $V_2$  – расход продувочных газов,  $\text{м}^3/\text{мин}$ ;  $v_{\text{ф}}$  – газовая нагрузка на фильтр (удельная производительность),  $\text{м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{мин})$ ;  $F_c$  – площадь фильтра в регенерируемой секции,  $\text{м}^2$ .

Величину подсоса газа принимают  $\sim 10\%$  от его расхода, а расход продувочного газа принимают из соотношения:

$$V_2 / V_1 = 1,5 \dots 2.$$

Другие данные принимают по справочным данным с учетом типа фильтра и вида перегородки.

Как правило, рассматривают несколько вариантов подходящих типов фильтров и выбирают аппарат с лучшими показателями.

#### ЗАДАНИЯ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО ВЫПОЛНЕНИЯ

Задания выполняются по вариантам.

1. Подобрать типовой рукавный фильтр для очистки воздуха, устанавли-

ваемый после распылительной сушилки и циклона. Расход газовой смеси  $G$ , температура  $t$ . Диаметр улавливаемых частиц  $d_{\text{ч}} > 0,3$  мкм, а их концентрация не превышает  $100 \text{ мг/м}^3$ . Материал частиц – аммофос и другие минеральные удобрения.

Исходные данные к расчетам приведены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 - Исходные данные к заданию

№ варианта	$G, \text{ кг/ч}$	$t, \text{ }^\circ\text{C}$	№ варианта	$G, \text{ кг/ч}$	$t, \text{ }^\circ\text{C}$
1	3000	100	9	2400	100
2	2500	110	10	2800	105
3	2000	105	11	2300	95
4	3200	90	12	1800	90
5	2700	95	13	2600	105
6	2200	105	14	2100	110
7	3100	100	15	1700	100
8	2900	110	16	1900	90

2. В качестве возможного типа фильтра рекомендуется рассмотреть:

- СМЦ – фильтр со встряхиванием и продувкой ( $v_{\text{ф}} = 0,6 \dots 0,75 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{мин})$ );

- ФРКИ или ФРКДИ - фильтр с импульсной продувкой ( $v_{\text{ф}} = 1,5 \dots 2 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{мин})$ );

- ФРО или ФР - фильтр с обратной продувкой ( $v_{\text{ф}} = 0,45 \dots 0,55 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{мин})$ ).

3. По результатам расчетов рекомендуется выбрать типовой фильтр с наименьшей площадью поверхности фильтрования и представить его эскиз.

### Контрольные вопросы

1. В каких случаях для очистки газов применяют фильтры?
2. В каких случаях для очистки газов применяют электрофильтры?
3. Приведите классификацию фильтров для очистки газов.
4. На основе каких данных проводится выбор фильтра и фильтрующего материала?
5. Как подобрать оптимальный типоразмер фильтровального оборудования?

ния?

6. Приведите описание конструкции и принципа действия подобранного фильтра.

## Практическое занятие №4. Расчет скруббера для очистки газовых выбросов

**Цель:** приобретение знаний и умений по практическому освоению расчетного метода.

Организационная форма занятия – традиционная.

*Целью заданий* является выбор оптимального варианта проекта аппарата для реализации процесса технологического узла.

Расчетный диаметр  $D$  полого форсуночного скруббера зависит от скорости газа в его сечении и определяется по формуле:

$$D = \sqrt{\frac{V_2}{900 \pi w_2}},$$

где  $V_2$  – расход подаваемого на очистку газа, м<sup>3</sup>/ч;  $w_2$  – скорость газа, м/с.

Скорость газа, движущегося внутри скруббера, рекомендуется принимать равной около 1 м/с. Высота рабочей (цилиндрической) части скруббера принимается равной  $\sim 2,5D$ . Общая высота аппарата принимается конструктивно.

Расход рабочей жидкости  $V_{ж}$  определяют по соотношению:

$$V_{ж} = m V_2,$$

где  $m$  – удельный расход жидкости, принимаемый в зависимости от концентрации дисперсных частиц очищаемой пыли в пределах 0,5...8 л/м<sup>3</sup>.

Расчетный диаметр штуцеров для подачи газа и жидкости определяется по формуле:

$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot V}{\pi w}},$$

где  $V$  – расход газа или жидкости, м<sup>3</sup>/с;  $w$  – скорость газа (8...20) или жидкости (1..2) в штуцере, м/с. Размеры штуцеров согласуют с размерами ГОСТ на трубы.

### ЗАДАНИЯ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО ВЫПОЛНЕНИЯ

Задания выполняются по вариантам. Исходные данные приведены в таб-

лице 4.1.

Таблица 4.1 - Исходные данные к заданию

№ варианта	$G_2, \text{кг/ч}$	$t, ^\circ\text{C}$	№ варианта	$G_2, \text{кг/ч}$	$t, ^\circ\text{C}$
1	5000	60	9	4000	60
2	5500	50	10	4500	50
3	6000	45	11	3500	45
4	6500	40	12	3000	40
5	7000	55	13	2500	55
6	7500	45	14	2000	45
7	8000	60	15	9500	60
8	8500	50	16	9000	50

1. Определите основные размеры (диаметр и высоту рабочей части) и расход жидкости для полого форсуночного скруббера при расходе очищаемого газа равном  $G_2, \text{кг/ч}$  при температуре  $t, ^\circ\text{C}$  и очистке пыли средней концентрации.
2. Постройте зависимость расчетного диаметра скруббера от скорости газа в пределах её изменения  $0,8 \dots 1,2 \text{ м/с}$ .
3. Определите размеры штуцеров для подачи газа и жидкости.
4. Представьте эскиз скруббера.

### Контрольные вопросы

1. Что понимают под «мокрой» очисткой газов?
2. Запишите формулу для определения диаметра полого форсуночного скруббера.
3. От каких факторов зависит расход орошающей жидкости в скруббере?
4. Как определить диаметр штуцера для подачи жидкого или газового потока в скруббер?
5. Куда следует направить поток шлама из скруббера для утилизации?

## Практическое занятие №5. Расчеты снижения виброакустических загрязнений окружающей среды

**Цель:** приобретение знаний и умений по практическому освоению расчетных методов снижения виброакустических загрязнений окружающей среды.

Организационная форма занятия – традиционная.

*Целью заданий* является выбор оптимального варианта проекта аппарата для реализации процесса технологического узла.

Всякий нежелательный для человека звук является шумом. Обычные промышленные шумы характеризуются хаотическим сочетанием звуков. В производственных условиях источниками шума являются работающие станки и механизмы, ручные, механизированные и пневмоинструменты, электрические машины, насосы и компрессоры, трубопроводные системы, вспомогательное оборудование (вентиляционные установки, кондиционеры) и т.д.

*Интенсивность звука*, ( $I$ , Вт/м<sup>2</sup>) связана со звуковым давлением ( $p$ , (МПа·с)/м) зависимостью:

$$I = \frac{p^2}{\rho c},$$

где  $p$  – звуковое давление, Па;  $\rho$  – плотность среды (газа), кг/м<sup>3</sup>;  $c$  – скорость распространения звука (волны), м/с.

При частоте колебаний 1 кГц человеческое ухо воспринимает шум со звуковым давлением  $2 \cdot 10^{-5}$  Па, что соответствует *порогу слышимости*. При давлении в 200 Па возникает *порог болевого ощущения*. Интенсивность звука, соответствующая порогу слышимости равна  $10^{-12}$  Вт/м<sup>2</sup>, а порогу болевого ощущения – 100 Вт/м<sup>2</sup>.

Для характеристики акустических явлений принята специальная измерительная система интенсивности звука и звукового давления, учитывающая приближенную логарифмическую зависимость между раздражением и слуховым восприятием, – шкала логарифмических единиц – децибелов (дБ), в которых измеряют уровни  $I$  и  $p$ .

Уровень интенсивности звука равен:

$$L_I = 10 \lg \frac{I}{I_0},$$

где  $I_0$  – интенсивность звука, соответствующая порогу слышимости, а уровень звукового давления определяется формулой:

$$L_p = 20 \lg \frac{p}{p_0}.$$

Подставив значения порога слышимости и порога болевого ощущения в эти формулы, получим, что изменение  $I$  и  $p$  составляет всего 140 дБ.

Любой источник шума характеризуется звуковой мощностью, которая определяет общее количество звуковой энергии, излучаемой источником в окружающее пространство за единицу времени. Уровень акустической мощности источника шума может быть определен по формуле:

$$L_W = 10 \lg \frac{W}{W_0},$$

где  $W$  – мощность звука;  $W_0$  – условный порог акустической мощности ( $W_0 = 10^{-12}$  Вт).

Если в производственном помещении находится  $n$  одинаковых источников шума, равноудаленных от расчетной точки и обладающих одинаковым уровнем шума  $L$ , то общий уровень будет равен:

$$L_{\Sigma} = L_1 + 10 \lg n,$$

где  $L_1$  – уровень шума одного источника, дБ;  $n$  – число источников.

На производстве такое условие часто невыполнимо, поскольку износ технологического оборудования неодинаков, поэтому расчет ведут по формуле:

$$L_{\Sigma} = L_i + 10 \lg (10^{0,1L_1} + 10^{0,1L_2} + \dots + 10^{0,1L_n}),$$

где  $L_1, L_2, L_n$  – уровни звукового давления, создаваемого источниками в расчетной  $i$ -той точке.

Различают следующие методы защиты от шума.

*Уменьшение шума в источнике возникновения:* замена ударных механиз-

мов безударными, возвратно-поступательных движений вращательными, подшипников качения на подшипники скольжения, совершенствование кинематических схем, применение пластмассовых деталей, использование глушителей из звукопоглощающего материала, виброизоляция шумных узлов и частей машин, покрытие издающих шум поверхностей вибродемпфирующим материалом, статическая и динамическая балансировки.

*Звукопоглощение:* метод основан на поглощении звуковой энергии волн, распространяющихся по воздуху звукопоглощающими материалами, которые трансформируют ее в тепловую.

Звукопоглощающие материалы и конструкции подразделяют на: волокнисто-пористые (войлок, минеральная вата, фетр, акустическая штукатурка и др.); мембранные (пленка, фанера, закрепленные на деревянные обрешетки); резонаторные (классический резонатор Гельмгольца); комбинированные.

Звукопоглощающие свойства материалов определяются коэффициентом звукопоглощения, равным отношению количества поглощенной звуковой энергии ( $E_{\text{погл}}$ ) к общему количеству падающей энергии ( $E_{\text{пад}}$ ):

$$\alpha = \frac{E_{\text{погл}}}{E_{\text{пад}}},$$

причем при  $\alpha = 0$  вся звуковая энергия отражается без поглощения; при  $\alpha = 1$  вся энергия поглощается.

Коэффициенты звукопоглощения некоторых материалов имеют следующие значения: бетон – 0,015; стекло – 0,02; дерево – 0,1; войлок – 0,3...0,5.

Коэффициент поглощения стенки, состоящей из разных материалов, будет равен:

$$\alpha = \frac{\sum_1^n \alpha_i \delta_i}{\sum_1^n \delta_i},$$

где  $\alpha_i$  и  $\delta_i$  – коэффициент поглощения и толщина слоя соответствующего ма-

териала.

*Звукоизоляция:* метод основан на отражении звуковой волны, падающей на ограждение (экран). Звукоизолирующие свойства ограждения (экрана) характеризуются коэффициентом звукопроницаемости – отношением прошедшей

звуковой мощности ( $P_{прош}$ ) к падающей ( $P_{пад}$ ):

$$\tau = \frac{P_{прош}}{P_{пад}}.$$

*Увеличение расстояния от машин (аппаратов), производящих сильный шум:* суммарный уровень шума, дБ, на расстоянии  $r$ , м, от источника в свободном пространстве будет равен:

$$L_{\Sigma} = L_0 - 20 \lg r - 11,$$

где  $L_0$  – уровень шума источника, дБ.

*Индивидуальные средства защиты.* Суммарный уровень шума можно снизить на 5...20 дБ, используя вкладыши в ушные раковины: беруши, вату, губку и др. При уровне шума выше 120 дБ применяют наушники (антифоны) и специальные шлемы. Существуют шумопоглощающие кабины, внедряется дистанционное управление сверхшумными процессами или испытаниями.

Общий уровень аэродинамического шума ( $L_p$ , дБ), создаваемого паром, движущимся через вентиль в технологический аппарат, можно определить по формуле:

$$L_p = L_{\Delta p} + L_c + \Delta L_p,$$

где  $L_{\Delta p}$  – общий уровень звукового давления, дБ, определяемый в зависимости от перепада давления ( $\Delta p$ ) по формуле:

$$L_{\Delta p} = 7,5187 \ln \Delta p + 95,3950;$$

$L_c$  – коррекция для размерного коэффициента  $C_g$  скорости потока пара, дБ (определяется по диаграмме на рисунке 5.1);  $\Delta L_p$  – коррекция в зависимости от перепада давления, дБ (определяется по диаграмме на рисунке 5.2);

$\Delta p = p_m - p_n$  – разность между давлением пара в магистрали ( $p_m$ , МПа) и дав-

лением пара ( $p_n$ , МПа), поступающего в аппарат, МПа.

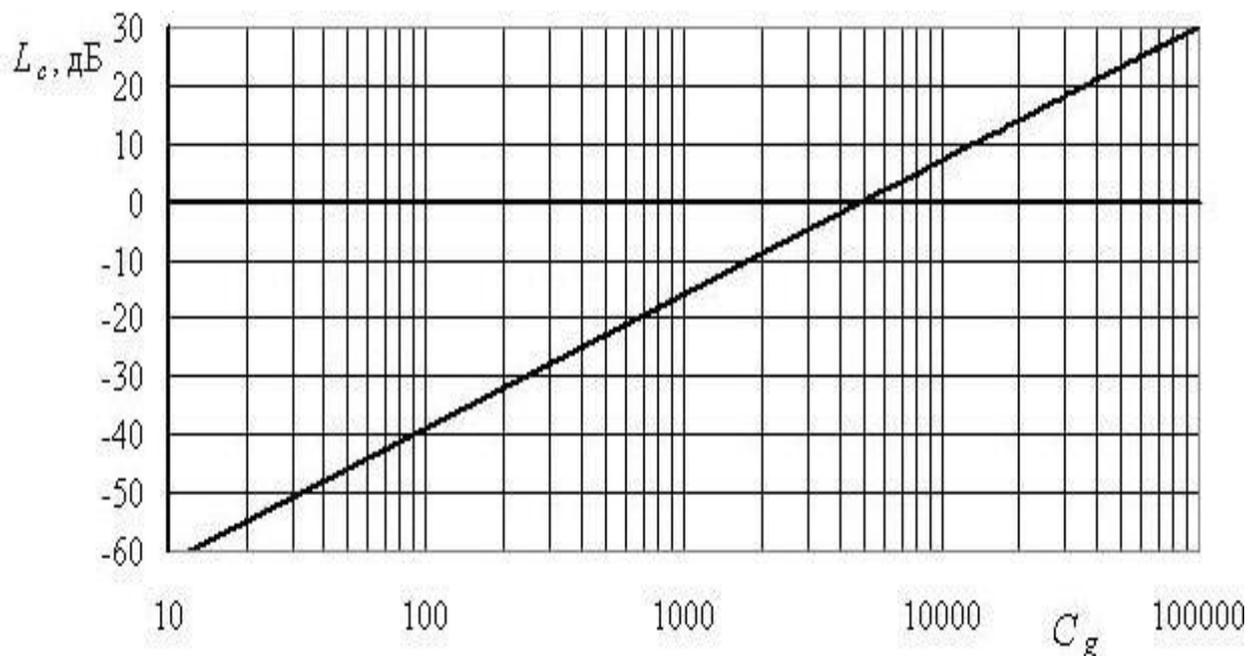


Рисунок 5.1 – Изменение звукового давления в зависимости от скоростного коэффициента

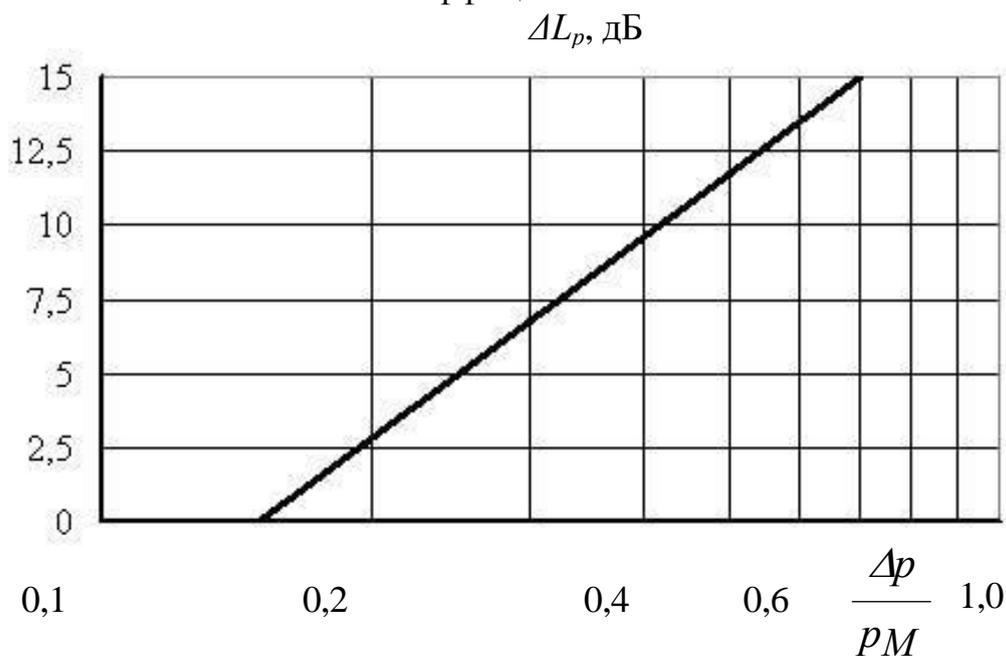


Рисунок 5.2 – Изменение звукового давления в зависимости от перепада давления пара

Скоростной коэффициент  $C_g$ , в свою очередь, определяется по формуле:

$$C_g = \frac{G_1 \cdot 10^3}{0,32 \sqrt{\rho_n p_M}} \cdot \frac{1}{\sin \left( 97,63 \sqrt{\frac{\Delta p}{p_M}} \right)},$$

где  $G_1$  – расход греющего пара, т/ч;  $\rho_n$  – плотность пара, кг/м<sup>3</sup>, поступающего в аппарат (2,2 кг/м<sup>3</sup>).

$$\text{При } \frac{\Delta p}{P_m} \leq 0,15 \quad \Delta L_p = 0, \quad \text{при } \frac{\Delta p}{P_m} > 0,7 \quad \Delta L_p = 15 \text{ дБ.}$$

### ЗАДАНИЯ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО ВЫПОЛНЕНИЯ

1. Определить, как изменится уровень акустической мощности (в %), если мощность звука возрастет с  $3 \cdot 10^{-12}$  Вт до  $4 \cdot 10^{-12}$  Вт?
2. На сколько дБ возрастет уровень шума от двух, пяти и десяти одинаковых источников по сравнению с уровнем шума каждого из них? На основе полученных данных постройте зависимость возрастания уровня шума от числа источников.
3. В производственном помещении имеется 5 источников шума, из которых три имеют уровень 20 дБ, а по одному, соответственно, 30 и 40 дБ. Как изменится общий уровень шума в точке наиболее шумного источника (в %), если в результате соответствующих мероприятий удалось снизить уровень шума каждого источника на 10%?
4. Каким будет коэффициент звукопоглощения, если между двумя бетонными стенами, толщиной 20 см, уложить слой войлока толщиной 10 см?
5. Во сколько раз суммарный уровень шума от источника с уровнем 50 дБ меньше на расстоянии 10 м, чем на расстоянии 1 м?
6. Определите общий уровень аэродинамического шума, создаваемого паром, движущимся через вентиль в технологический аппарат. Давление пара в магистрали составляет 0,6 МПа, в аппарате – 0,4 МПа. Расход пара – 6500 кг/ч.
7. Произвести оценку снижения уровня шума. Шум создает вентиляционная установка, расположенная на расстоянии  $L$  от административно-бытовых зданий. Уровень звукового давления, создаваемый вентиляционной установкой, составляет  $L_A$ . Между источником шума и расчетной точкой расположена зеленая зона.

Расчеты выполняются по вариантам. Исходные данные для расчетов приведены в таблице 5.1.

Таблица 5.1 – Исходные данные к расчетам

№ варианта	Расстояние до источника шума $L$ , м	Уровень звукового давления, $L_A$ , дБА	Полоса зеленых насаждений	Ширина полосы, м
1	500	100	однорядная	12
2	450	110	однорядная	18
3	400	105	двухрядная	23
4	350	95	двухрядная	28
5	300	115	однорядная	14
6	250	108	однорядная	19
7	200	107	двухрядная	24
8	150	104	двухрядная	29
9	100	102	трехрядная	28
10	50	112	однорядная	13

Уровень звука в расчетной точке на территории определяется по формуле:

$$L_{Атерр} = L_A - L_{Арасст} - L_{Азел} ,$$

где  $L_A$  – уровень звукового давления, создаваемый источником шума, дБА;  
 $L_{Арасст}$  – снижение уровня звука в зависимости от расстояния между источником шума и расчетной точкой, дБА (рисунок 5.3);  $L_{Азел}$  – снижение уровня звука полосами зеленых насаждений, дБА (таблица 5.2).

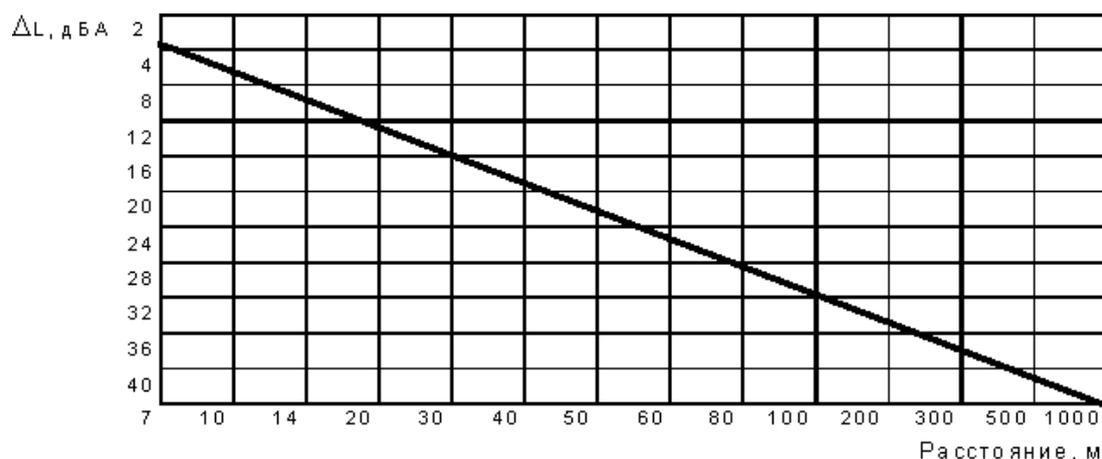


Рисунок 5.3 – Снижение уровня звукового давления в зависимости от расстояния между источником шума и расчетной точкой.

Таблица 5.2 - Снижение уровня звука полосами зеленых насаждений

Полоса зелёных насаждений	Ширина полосы, м	Снижение уровня звука, $\Delta L_A$ , дБА
---------------------------	------------------	---

Однорядная	12	5
Однорядная	18	8
Двухрядная	23	10
Двух-трехрядная	28	12

### **Контрольные вопросы**

1. Как интенсивность звука связана со звуковым давлением?
2. Какому звуковому давлению соответствует порог слышимости и порог болевого ощущения?
3. Как определяется уровень интенсивности звука (уровень звукового давления)?
4. Перечислите методы защиты от шума.
5. Какие индивидуальные средства защиты от шума вы знаете?
6. Как давление пара в магистрали влияет на уровень аэродинамического шума?

## Практическое занятие №6. Расчет потребной эффективности очистки сточных вод

**Цель:** приобретение знаний и умений по практическому освоению расчетных методов снижения вредных выбросов в гидросферу.

Организационная форма занятия – традиционная.

*Целью заданий* является расчет необходимой эффективности очистки сточных вод и концентраций сбрасываемых веществ в водоеме.

Выделяют два основных пути очистки сточных вод: разбавление сточных вод и очистка их от загрязнений.

*Разбавление* представляет собой паллиативную меру, которая не ликвидирует воздействие сточных вод, а лишь ослабляет его на локальном участке водоема. Основной путь – *очистка* сточных вод от загрязнений.

Методы очистки промышленных стоков подразделяют на механические, физико-химические, химические, биологические и термические.

Механические методы включают *отстаивание в гравитационном или центробежном поле, фильтрацию, флотацию, осветление во взвешенном слое осадка.*

Физико-химические и химические методы очистки включают *нейтрализацию минеральных кислот или щелочей, очистку окислителями, например, хлорирование и озонирование, мембранные методы* разделения (микрофильтрация, ультрафильтрация, обратный осмос и электродиализ).

Биологические методы основаны на очистке сточных вод *микроорганизмами* в аэробных (насыщение кислородом воздуха) условиях.

*Термическое сжигание* применяют для уничтожения *высококонцентрированных сточных вод*, содержащих минеральные и органические элементы.

По своей сути эти методы могут быть рекуперационными и деструктивными.

Первые предусматривают извлечение из сточных вод всех ценных веществ и последующую их переработку, а вторые – разрушение загрязняющих

веществ путем их окисления или восстановления, в результате чего образуются газы или осадки.

Общая схема очистки сточных вод показана на рисунке 6.1.

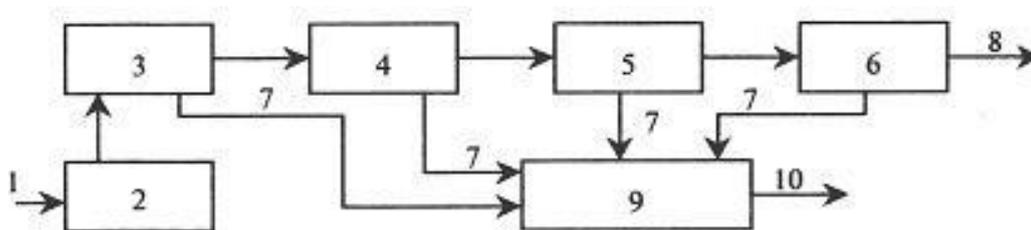


Рисунок 6.1 – Общая схема очистки сточных вод: 1 – необработанные сточные воды; 2 – устройство для регулирования состава и расхода сточных вод; 3 – сооружения механической очистки; 4 – сооружения других методов очистки; 5 – сооружения глубокой очистки; 6 – сооружения по обеззараживанию сточных вод; 7 – осадок или избыточная биомасса; 8 – очищенные сточные воды; 9 – сооружения по обработке осадка; 10 – обработанный осадок

Концентрацию взвешенных веществ в очищенной сточной воде ( $C_{оч}$ , мг/л), разрешенной к сбросу в водный объект, определяют по формуле:

$$C_{оч} = P \left( \frac{\gamma \cdot Q}{q} + 1 \right) + C_{\phi},$$

где  $P$  – разрешенное санитарными нормами увеличение содержания взвешенных веществ в воде водного объекта в расчетном створе, мг/л;  $\gamma$  – коэффициент разбавления;  $Q$  – расход водотока, м<sup>3</sup>/с;  $q$  – расход очищенных сточных вод, м<sup>3</sup>/с;  $C_{\phi}$  – концентрация взвешенных веществ в воде до места сброса, мг/л.

В соответствии с «Правилами охраны поверхностных вод» допустимое увеличение содержания взвешенных веществ в водном объекте после сброса сточных вод  $P = 0,25$  мг/л.

Потребная эффективность очистки сточных вод от взвешенных веществ будет равна:

$$\mathcal{E}_{взв} = \frac{C_{ст} - C_{оч}}{C_{ст}} \cdot 100\%,$$

где  $C_{ст}$  – концентрация взвешенных веществ в сточной воде, поступающей на очистные сооружения, мг/л.

Расчетную концентрацию загрязнений ( $L_{полн}^{ст}$ ) по полному биохимическому потреблению кислорода (БПК<sub>полн</sub>) в очищенных сточных водах из усло-

вия сохранения в расчетном створе допустимой концентрации кислорода опре-

деляют по формуле:

$$L_{полн}^{ст} = \frac{\gamma Q (O^B - 0,4 L_{полн}^B - O) - Q}{0,4 q},$$

где  $O^B$  – содержание растворенного кислорода в водотоке до места выпуска сточных вод, г/м<sup>3</sup>;  $L_{полн}^B$  – полное биохимическое потребление кислорода водой водотока, г/м<sup>3</sup>;  $O$  – минимальное содержание растворенного кислорода водного объекта, г/м<sup>3</sup>.

Необходимая степень очистки сточных вод от загрязнений по содержанию растворенного кислорода будет равна:

$$\varepsilon_{БПК_{полн}} = \frac{БПК_{полн}^{ст} - L_{полн}^{ст}}{БПК_{полн}^{ст}} 100 \%,$$

где  $БПК_{полн}^{ст}$  – полное биохимическое потребление кислорода сточной водой, поступающей на очистную станцию, г/м<sup>3</sup>.

## ЗАДАНИЯ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО ВЫПОЛНЕНИЯ

Задания выполняются по вариантам.

1. В водоток с расходом  $Q$  после очистных сооружений сбрасываются очищенные сточные воды с расходом  $q$ . Концентрация взвешенных веществ в сточной воде, поступающей на очистные сооружения, составляет  $C_{ст}$ . Концентрация взвешенных веществ в воде водного объекта до места сброса составляет

$C_{ф}$ . Коэффициент разбавления –  $\gamma$ .

2. Определите концентрацию взвешенных веществ в сточной воде, разрешенной к сбросу в водоток после очистных сооружений, а также необходимую эффективность очистки сточной воды от взвешенных веществ по исходным данным, указанным в таблице 6.1.

3. Определите необходимую степень очистки сточных вод, которые сбрасываются в водоток, от загрязнений по содержанию растворимого кислорода.

Содержание растворенного кислорода в воде водотока до места сброса

сточных вод  $O^B = 6,5 \text{ мг/л}$ . Полное биохимическое потребление кислорода в водо-  
 потоке до места сброса  $L_{\text{полн}}^B = 2,0 \text{ мг/л}$ .

Минимальное содержание растворенного кислорода водного объекта со-  
 ставляет  $O = 4 \text{ г/м}^3$ . Полное биохимическое потребление кислорода сточной во-  
 дой, поступающей на очистную станцию  $\text{БПК}_{\text{полн}}^{\text{ст}} = 300 \text{ г/м}^3$ .

Таблица 6.1 – Исходные данные к заданию

№ варианта	$Q, \text{ м}^3/\text{с}$	$q, \text{ м}^3/\text{с}$	$C_{\text{ст}}, \text{ мг/л}$	$C_{\text{ф}}, \text{ мг/л}$	$\gamma$
1	15	0,5	130	3	0,67
2	15	0,6	230	3	0,68
3	15	0,7	230	4	0,69
4	15	0,8	150	4	0,70
5	15	0,9	250	2	0,71
6	30	1,0	250	6	0,67
7	30	1,1	180	6	0,68
8	30	1,2	180	5	0,69
9	30	1,3	180	5	0,70
10	30	1,4	190	7	0,71
11	40	0,5	190	5	0,67
12	40	0,6	190	4	0,68
13	40	0,7	200	4	0,69
14	40	0,8	200	3	0,70
15	40	0,9	200	3	0,71
16	45	1,0	210	2	0,67
17	45	1,1	220	2	0,68
18	45	1,2	230	3	0,69
19	45	1,3	140	3	0,70
20	45	1,4	140	4	0,71

### Контрольные вопросы

1. Как подразделяются методы очистки сточных вод?
2. На чем основаны биологические методы очистки сточных вод?
3. Когда применяется термическое сжигание сточных вод?
4. От чего зависит концентрация взвешенных веществ в очищенных сточ-  
ных водах?
5. Как определяется потребная эффективность очистки сточных вод от  
взвешенных веществ?

## **Практическое занятие №7. Расчет горизонтальной нефтеловушки для очистки сточных вод**

**Цель:** приобретение знаний и умений по практическому освоению расчетных методов снижения вредных выбросов в гидросферу.

Организационная форма занятия – традиционная.

*Целью заданий* является практический расчет размеров нефтеловушки для очистки сточных вод.

Механическая очистка применяется для выделения из сточных вод нерастворенных минеральных и органических примесей. Поэтому для удаления взвешенных частиц из сточных вод используют гидромеханические процессы (периодические и непрерывные) *процеживания* и *отстаивания* (гравитационное и центробежное), а также *фильтрацию*.

Выбор метода зависит от размера частиц примесей, физико-химических свойств и концентрации взвешенных частиц, расхода сточных вод и необходимой степени очистки.

*Процеживание* - первичная стадия обработки сточных вод для извлечения из них крупных нерастворимых примесей, а также более мелких волокнистых фракций, которые в процессе дальнейшей обработки стоков препятствуют нормальной работе очистного оборудования. Для этого сточные воды пропускают через *решетки* (сита) и *волокнуловители*, которые устанавливаются перед отстойниками.

При эксплуатации решетки должны периодически или непрерывно очищаться. Во избежание затруднений с очисткой решеток такие устройства созданы в форме цилиндрического барабана. Средний размер измельченных ими примесей не превышает 10 мм.

Для удаления более мелких взвесей, а также ценных продуктов применяют сита, которые могут быть двух типов: *барабанные* и *дисковые*.

Сито барабанного типа представляет собой сетчатый барабан с отверстиями 5...10 мм. При вращении барабана сточная вода фильтруется через его

внешнюю или внутреннюю поверхность в зависимости от подвода воды – снаружи или внутри. Задерживаемые примеси смываются с сетки водой и отводятся в желоб.

Принцип действия волокнуловителей, применяемых для задерживания волокнистых веществ, основан на процеживании сточной воды через конусообразные диски с перфорацией или специальные фильтры.

*Отстаивание* - удаление из сточных вод взвешенных веществ, которые под действием гравитационных сил оседают на дно отстойника, а под воздействием выталкивающих сил всплывают на его поверхность. Очистку сточных вод отстаиванием осуществляют в *песколовках, отстойниках, осветлителях и нефтеуловителях (нефтеловушках)*.

*Песколовки*, применяемые для выделения из сточных вод тяжелых минеральных примесей (в основном песка), устанавливают перед отстойниками, что упрощает эксплуатацию последних, а также сооружений по обработке осадка.

Время пребывания сточных вод в песколовке – 0,5...2 мин.

Песколовки, представляющие собой горизонтальные (прямоугольные или круглые в плане) резервуары из сборного или монолитного железобетона, рассчитываются так, чтобы в них отделялись только минеральные примеси.

Выпавший осадок собирается в приямок и удаляется либо в песковые бункеры, либо на песковые площадки. При надежном обеззараживании обезвоженный песок можно использовать при дорожных работах и изготовлении строительных материалов.

Отстойники делятся на вертикальные и горизонтальные (разновидностью последних являются радиальные).

Для очистки сточных вод, содержащих нефть, применяют *нефтеловушки*. Эти сооружения представляют собой прямоугольные резервуары, аналогичные горизонтальным отстойникам, в которых нефть и вода разделяются из-за разности их плотностей. Применяются также сооружения цилиндрического типа с круговым движением воды. Всплывшая на поверхность нефть собирается и удаляется на утилизацию, а сточная вода направляется для дальнейших ступе-

ней очистки.

Скорость всплывания частиц в нефтеловушке ( $w_{вс}$ , м/с) будет равна:

$$w_{вс} = \frac{1}{18} g \frac{\rho_в - \rho_н}{\rho_в \nu_в} d_q^2 \xi_ч \xi_н \xi_{нд}$$

где  $\rho_в, \rho_н$  – плотность воды и нефти при температуре очистки воды, кг/м<sup>3</sup>;  $\nu_в$  – кинематическая вязкость воды, м<sup>2</sup>/с;  $d_q$  – наименьший диаметр улавливаемых капель (частиц), м;  $\xi_ч$  – поправка на вязкость жидкости, образующей дисперсную фазу (нефти);  $\xi_{нд}$  – поправка на полидисперсность частиц (0,125...0,150).

Поправка на вязкость нефти может быть определена по формуле:

$$\xi_н = \frac{3(\rho_в \nu_в + \rho_н \nu_н)}{3\rho_в \nu_в + 2\rho_н \nu_н}$$

где  $\nu_н$  – кинематическая вязкость нефти при температуре очистки сточной воды, м<sup>2</sup>/с.

Количество выделяемой нефти ( $V$ , м<sup>3</sup>/сут) будет равно:

$$V_н = \frac{10^{-3} C V_в}{\rho_н}$$

где  $C$  – разность концентраций нефти в очищаемой и очищенной воде, мг/л;  $V_в$  – расход очищаемой воды, м<sup>3</sup>/сут.

Площадь отстаивания ( $F$ , м<sup>2</sup>) можно определить по формуле:

$$F = \frac{V_в - V_н}{86,4 \cdot 10^3 w_{вс}}$$

Число секций нефтеловушки ( $n$ ) будет равно:

$$n = \frac{F}{B L}$$

где  $B$  – ширина секции, м;  $L$  – длина секции, м.

Полученное значение округляют до целого числа, как правило, в большую сторону.

## ЗАДАНИЯ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО ВЫПОЛНЕНИЯ

Задания выполняются по вариантам. По данным таблицы 7.1 определите

размеры и количество секций горизонтальной нефтеловушки глубиной проточной части  $h_n = 1,5$  м и производительностью по очищаемой сточной воде  $V$ . Концентрация нефти в воде –  $C$ , наименьший диаметр улавливаемых частиц –  $d_c$ . Для расчета принять плотность и кинематическую вязкость воды соответственно  $998,2$  кг/м<sup>3</sup> и  $1 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с, а плотность и вязкость нефти –  $851,6$  кг/м<sup>3</sup> и  $6,65 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с. Ширину секции принять равной  $3 \dots 4$  м, длину –  $5 \dots 6$  м.

Таблица 7.1 – Данные к расчету нефтеловушки

№ варианта	$V_{в}, м^3/сут$	$C, мг/л$	$d_c, м$
1	50000	2000	$2,2 \cdot 10^{-4}$
2	48000	2200	$2,1 \cdot 10^{-4}$
3	46000	2400	$2,0 \cdot 10^{-4}$
4	44000	2600	$2,2 \cdot 10^{-4}$
5	42000	2800	$2,1 \cdot 10^{-4}$
6	40000	3000	$2,0 \cdot 10^{-4}$
7	38000	2000	$2,4 \cdot 10^{-4}$
8	36000	2200	$2,5 \cdot 10^{-4}$
9	34000	2400	$2,3 \cdot 10^{-4}$
10	32000	2600	$2,5 \cdot 10^{-4}$
11	30000	2800	$2,2 \cdot 10^{-4}$
12	31000	3000	$2,4 \cdot 10^{-4}$
13	33000	2000	$2,5 \cdot 10^{-4}$
14	35000	2200	$2,2 \cdot 10^{-4}$
15	37000	2400	$2,0 \cdot 10^{-4}$
16	39000	2600	$2,1 \cdot 10^{-4}$
17	41000	2800	$2,6 \cdot 10^{-4}$
18	43000	3000	$2,2 \cdot 10^{-4}$
19	45000	2300	$2,3 \cdot 10^{-4}$
20	47000	2100	$2,0 \cdot 10^{-4}$

### Контрольные вопросы

1. Что собой представляет очистка сточных вод процеживанием и как конструктивно устроены решетки и сита?
2. Какие аппараты используются для отстаивания сточных вод?
3. Что собой представляют песколовки и нефтеловушки?
4. Как утилизируют выделенные из сточных вод загрязнения?
5. От каких параметров зависит площадь отстаивания в нефтеловушке?

## **Практическое занятие №8. Расчет отстойника непрерывного действия с гребковой мешалкой для очистки сточных вод**

**Цель:** приобретение знаний и умений по практическому освоению расчетных методов снижения вредных выбросов в гидросферу.

Организационная форма занятия – традиционная.

*Целью заданий* является практический расчет размеров отстойника для очистки сточных вод.

*Отстойник непрерывного действия с гребковой мешалкой* представляет собой невысокий цилиндрический резервуар с плоским слегка коническим днищем и внутренним кольцевым желобом вдоль верхнего края аппарата. В резервуаре установлена мешалка с наклонными лопастями, на которых имеются гребки для непрерывного перемещения осаждающегося материала к разгрузочному отверстию в центре днища.

Одновременно гребки слегка взбалтывают осадок, способствуя этим более эффективному его обезвоживанию. Мешалка делает от 0,015 до 0,5 об/мин, т.е. вращается настолько медленно, что не нарушает процесса осаждения.

Исходная жидкая смесь непрерывно подается через трубу в середину резервуара. Осветленная жидкость переливается в кольцевой желоб и удаляется через штуцер. Осадок (шлам) удаляется из резервуара при помощи насоса. Вал мешалки вращается от электродвигателя через коническую зубчатую передачу.

Теоретическая скорость осаждения в отстойнике определяется по форму-

$$v_{oc} = \frac{d^2 (\rho_1 - \rho_2) g}{18 \mu}$$

где  $d$  – диаметр дисперсных частиц, м;  $\rho_1, \rho_2$  – плотности дисперсных частиц и жидкости, кг/м<sup>3</sup>;  $g$  – ускорение силы тяжести, м/с<sup>2</sup>;  $\mu$  – динамический коэффициент вязкости жидкости, Па·с.

Действительная скорость осаждения будет равна:

$$v'_{oc} = 0,5 v_{oc}$$

Площадь отстойника непрерывного действия составит:

$$F_{oc} = \frac{G_n (1 - \frac{c_n}{c_k})}{3600 \rho_2 v_{oc}'} \text{ м}^2,$$

где  $G_n$  – расход исходной жидкости, кг/ч;  $c_n, c_k$  – содержание дисперсных частиц в исходной жидкости и шламе.

Диаметр отстойника будет равен (м):

$$D = \sqrt{\frac{4 F_{oc}}{\pi}}.$$

### ЗАДАНИЯ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО ВЫПОЛНЕНИЯ

Задания выполняются по вариантам. По данным, приведенным в таблице 8.1, определите основной диаметр ( $D$ , м) отстойника непрерывного действия. Производительность отстойника –  $G_n$ . Исходное содержание частиц в суспензии –  $c_n$ , влажность шлама – 70 %, диаметр наименьшей частицы –  $d = 30 \text{ мкм}$ , коэффициент динамической вязкости суспензии –  $\mu = 1,1 \cdot 10^{-3} \text{ Па}\cdot\text{с}$ , плотность частиц –  $\rho_1$ , плотность жидкости –  $\rho_2$ .

Таблица 8.1 – Данные к расчету отстойника

№ варианта	$G_n$ м/ч	$c_n$ %	$\rho_1$ , кг/м <sup>3</sup>	$\rho_2$ , кг/м <sup>3</sup>
1	80	8	2100	1000
2	82	8	2200	1000
3	84	6	2300	1010
4	86	6	2400	1010
5	88	7	2500	1020
6	90	7	2600	1020
7	92	8	2100	1000
8	94	8	2200	1000
9	96	6	2300	1010
10	98	6	2400	1010
11	78	7	2500	1020
12	74	7	2600	1020
13	72	8	2100	1000
14	70	8	2200	1000
15	68	6	2300	1010
16	66	6	2400	1010
17	64	7	2500	1020

18	62	7	2600	1020
19	60	6	2450	1015
20	58	6	2550	1015

### **Контрольные вопросы**

1. Какие ступени очистки сточных вод применяют на практике?
2. Какие аппараты используются для очистки сточных вод?
3. Какие разновидности отстойников для очистки сточных вод применяют на практике?
4. Дайте описание конструкции отстойника непрерывного действия с гребковой мешалкой.
5. От каких параметров зависит диаметр отстойника?

## **Практическое занятие №9. Расчеты предохранительных устройств оборудования и избыточного давления взрыва**

**Цель:** приобретение знаний и умений по практическому освоению расчетных методов подбора предохранительных устройств для технологического оборудования и методов оценки избыточного давления взрыва при авариях оборудования.

Организационная форма занятия – традиционная.

*Тема 1. Целью заданий является практический подбор предохранительных клапанов и мембран, защищающих оборудование от возрастания давления сверх регламентного.*

Предохранительные устройства (ПУ) – вид арматуры, используемой для автоматического выпуска рабочей среды из аппарата при чрезмерном повышении давления в нем.

*По кратности использования ПУ подразделяют на две основные группы:*

- 1) многократно используемые устройства – предохранительные клапаны (ПК) с самодействующим замыкающим элементом;
- 2) устройства одноразового действия – предохранительные мембраны (ПМ) – специально ослабленные элементы с точно рассчитанным порогом разрушения по давлению.

*Клапаны пружинные предохранительные* предназначены для работы на аппаратах, сосудах и в резервуарах, содержащих среду под давлением, и служат для быстрого сброса (выпуска) ее в случае превышения установленного давления.

Наиболее часто используют две основные разновидности клапанов: типа СППК4Р и СППКМР с рычажным механизмом для контрольной продувки; типа СППК4 и СППКМ без рычажного механизма для контрольной продувки.

Предохранительные пружинные клапаны типа СППК4Р (рисунок 9.1) предназначены для установки на сосудах, аппаратах и трубопроводах, работающих в различных средах. Клапан представляет собой механизм автоматического действия. Давлению среды на золотник клапана (затвор) противодействует сила давле-

ния пружины, прижимающая его к седлу через опору и шток.

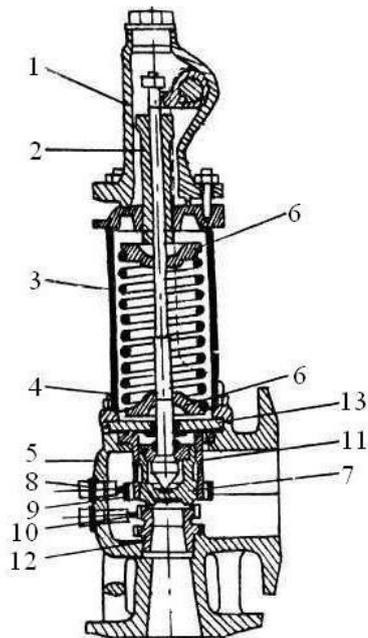


Рисунок 9.1 – Клапан предохранительный пружинный типа СППК4Р (до 450 °С): 1 – колпак; 2 – регулировочный винт; 3 – крышка; 4 – шпилька; 5 – корпус; 6 – опорные шайбы; 7 – золотник; 8 – стопорные винты; 9 – регулировочная втулка верхняя; 10 – регулировочная втулка нижняя; 11 – направляющая втулка; 12 – сопло; 13 – перегородка

При возрастании давления в сосуде выше допустимого сила давления среды преодолевает усилие пружины, золотник поднимается, и происходит сброс среды.

Клапаны являются полноподъемными, так как золотники поднимаются на высоту, равную или больше четверти диаметра седла. Высокий подъем золотника достигается использованием кинетической энергии потока, выходящего с большой скоростью из сопла.

Клапаны снабжены верхней и нижней регулировочными втулками, которые, обеспечивая подъем золотника и, следовательно, производительность клапана, регулируют давление полного открытия и обратной посадки золотника на седло.

Регулировочные втулки фиксируются в определенном положении стопорными винтами.

Клапаны СППК4Р и СППК4 изготавливаются в двух исполнениях: исполнение 1 – с корпусом из углеродистой стали для работы при температуре до 450 °С; исполнение 2 – с корпусом из коррозионностойкой стали для работы при температуре до 600 °С.

*Пропускная способность клапанов.* Количество рабочих клапанов, их пропускная способность должны быть выбраны так, чтобы в сосуде или аппарате при полном открытии клапана не могло образоваться давление, превышаю-

щее расчетное более чем на 0,05 МПа включительно или на 10% для сосудов и аппаратов с давлением более 0,3 МПа.

Расчетное давление сосудов и аппаратов, оборудованных предохранительными клапанами (без учета гидростатического давления), должно превышать рабочее давление следующим образом:

- для сосудов и аппаратов, содержащих нейтральные продукты, на 10%, но не менее чем на 0,1 МПа;
- для сосудов и аппаратов со взрывоопасными, взрывопожароопасными и высокотоксичными продуктами с рабочим давлением до 4 МПа на 20%, но не менее, чем на 0,3 МПа;
- для сосудов и аппаратов со взрывоопасными, взрывопожароопасными и высокотоксичными продуктами с рабочим давлением свыше 4 МПа на 15%.

Регулировка предохранительных клапанов перед установкой должна определяться на давление начала открытия. Давление начала открытия рабочих предохранительных клапанов следует принимать равным расчетному давлению сосудов и аппаратов.

Давление начала открытия контрольных клапанов, устанавливаемых на сосудах и аппаратах с расчетным давлением до 6 МПа, следует принимать на 10%, но не менее чем на 0,15 МПа ниже их расчетного давления, а для сосудов и аппаратов с расчетным давлением 6 МПа на 11% ниже их расчетного давления.

При наличии противодействия системы сброса от контрольного клапана давление начала открытия увеличивается на величину этого противодействия.

Правилами Ростехнадзора по устройству и безопасной эксплуатации сосудов, работающих под давлением, установлена единая формула для расчета пропускной способности предохранительных клапанов. Для газов она имеет

вид, кг/ч:

$$G = 3,16 \alpha F B \sqrt{(P_1 + 0,1) \cdot \rho_t},$$

где  $\alpha$  – коэффициент расхода среды через клапан;  $F$  – площадь сечения клапана, равная наименьшей площади сечения в проточной части, мм<sup>2</sup>;  $P_1$  – максимальное избыточное давление перед предохранительным клапаном, МПа;  $\rho_t$  – плот-

ность среды,  $\text{кг/м}^3$ ;  $t$  – температура среды перед клапаном,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $B$  – коэффициент, определяемый по справочным таблицам.

Формула (9.1) дает возможность с достаточной для практики точностью рассчитывать пропускную способность предохранительных клапанов или определять размеры клапанов для конкретных условий работы оборудования.

Плотность  $\rho_t$  газа или пара принимается при рабочих температуре и давлении.

Диаметры сопла  $d_c$  и площади  $F$  проходных сечений, соответствующие определенному условному диаметру  $D_y$  пружинных предохранительных клапанов, изготавливаемых для химической промышленности, регламентированы ГОСТ 31294-2005\*.

*Предохранительные мембраны.* В зависимости от характера разрушения мембраны подразделяют на следующие типы:

1) *разрывные*; мембраны изготавливают из тонколистового проката (сталь, цветные металлы) и устанавливают во фланцевых соединениях при помощи специальных зажимных колец;

2) *хлопающие*; мембраны имеют форму сферического купола, выпуклая сторона которого обращена к зоне повышенного давления. При срабатывании купол выворачивается в обратную сторону, ударяется о крестообразный нож и разрушается. Используют для низких давлений и изготавливают из пластичного материала;

3) *ломающиеся*; мембраны изготавливают из хрупких материалов (чугуна, графита). Эти ПМ наименее инерционны, поскольку их срабатыванию не предшествует пластическая деформация;

4) *срезные*; мембраны при срабатывании срезаются по острой кромке прижимного кольца; изготавливаются из мягких материалов. Во избежание деформаций прогиба мембрана имеет утолщение по всей рабочей части. Недостатком является большой разброс давления срабатывания;

5) *отрывные*; мембраны имеют форму колпачков с ослабленным сечением в виде канавки или проточки;

Наиболее широко используют *разрывные мембраны*, изготавливаемые из тонколистового проката. Конструктивное оформление зажима мембраны может быть различным шип – паз, конический или линзовый зажим (рисунок 9.2).

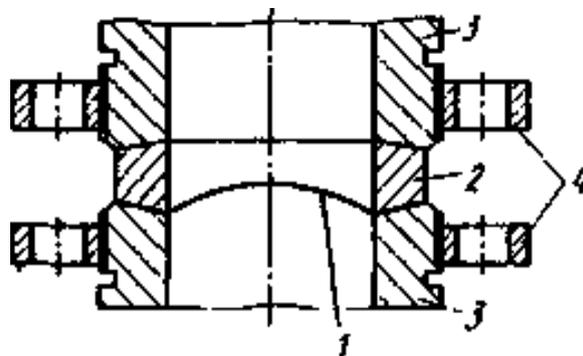


Рисунок 9.2 – Линзовый зажим разрывной мембраны: 1 – мембрана, 2 – коническая шайба, 3 – торцы сбросной магистрали, 4 – соединительные фланцы

При нагружении рабочим давлением мембрана испытывает большие пластические деформации и приобретает ярко выраженный купол, по форме очень близкий к сферическому сегменту. Чаще всего куполообразную форму мембране придают заранее при изготовлении, подвергая ее нагружению давлением, составляющим около 90 % разрывного. При этом фактически исчерпывается почти весь запас пластических деформаций материала, что еще больше увеличивает быстродействие мембраны.

Разрывное усилие  $P_c$ , МН, такой оболочки (срабатывания мембраны): определяется по формуле:

$$P_c = 2 \cdot \Delta_0 \cdot \sigma_{вр} \cdot r,$$

где  $\Delta_0$  – толщина материала мембраны, м;  $\sigma_{вр}$  – временное сопротивление материала при растяжении (предел прочности), МПа;  $r$  – радиус купола, м.

Минимальный (на пределе разрыва мембраны) радиус купола,  $r$ , м равен:

$$r = \frac{D}{4} \cdot \left[ \sqrt{(1+0,01\delta)} / (\sqrt{1+0,01\delta} - 1) \right]^{0,5},$$

где  $D$  – рабочий диаметр мембраны, м;  $\delta$  – относительное удлинение при разрыве, %.

Время полного раскрытия мембраны  $\tau_0$ , с определяется по формуле:

$$\tau_0 = 0,75 \cdot a,$$

где  $a$  предварительно рассчитывается по формуле:

$$a = \sqrt{\frac{\pi \cdot D \cdot \rho \cdot \Delta_0}{P_c}},$$

где  $\rho$  – плотность материала мембраны, (для стали  $\rho = 7900$ ) кг/м<sup>3</sup>.

Величина предельного избыточного давления в аппарате составит:

$$P_{пр} = 4P_c/(\pi D^2), \text{ МПа.}$$

**Пример 9.1.** Определить время полного раскрытия мембраны из мягкой тонколистовой коррозионностойкой стали марки 08Х18Н10Т толщиной  $\Delta_0=0,12$  мм при рабочем диаметре мембраны  $D=400$  мм. Относительное удлинение при разрыве принять равным  $\delta = 40$  %.

Решение

Радиус купола мембраны составит:

$$r = \frac{400 \cdot 10^{-3}}{4} \cdot [\sqrt{(1+0,4)} / (\sqrt{1+0,4} - 1)]^{0,5} = 254,1 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

При значении  $\sigma_{вр} = 540$  МПа для материала мембраны получим величину разрывного усилия равной:

$$P_c = 2 \cdot 0,12 \cdot 10^{-3} \cdot 540 \cdot 254,1 \cdot 10^{-3} = 0,033 \text{ МН.}$$

Тогда

$$a = \sqrt{\frac{3,14 \cdot 400 \cdot 10^{-3} \cdot 7900 \cdot 0,12 \cdot 10^{-3}}{0,033}} = 6,01;$$

$$\tau_0 = 0,75 \cdot 6,01 = 4,5 \text{ с.}$$

Время срабатывания мембраны составляет 4,5 с, что дает основания полагать безопасность и практичность внедрения такой степени взрывозащиты.

При этом величина предельного избыточного давления в аппарате составит:

$$P_{пр} = 4 \cdot 0,033 / (3,14 \cdot 0,4^2) = 0,26 \text{ МПа.}$$

## ЗАДАНИЯ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО ВЫПОЛНЕНИЯ

1. Определить расход легких углеводородных газов ( $C_1 \dots C_3$ ) через предохранительный прямооточный клапан с номинальным диаметром DN при темпе-

ратуре среды  $t^{\circ}\text{C}$  и давлении  $P_1$ , МПа перед клапаном. Исходные данные для расчетов приведены в таблице 9.1. В расчетах следует использовать методику ГОСТ 31294-2005\*.

Таблица 9.1 – Исходные данные к заданию

№ варианта	Номинальный диаметр, DN	Температура перед клапаном, $t^{\circ}\text{C}$	Давление перед клапаном, $P_1$ , МПа
1	50	10	0,1
2	80	20	0,2
3	100	30	0,3
4	150	40	0,4
5	200	50	0,5
6	15	60	0,8
7	25	70	0,9
8	40	80	1,0
9	80	90	1,2
10	100	100	1,4

2. Сформулируйте условия применения рассмотренного варианта клапана для защиты оборудования.

3. Определить предельное давление в аппарате и время полного раскрытия мембраны из тонколистового материала толщиной  $\Delta_0$ , мм при рабочем диаметре мембраны  $D$ , мм. Относительное удлинение при разрыве принять равным  $\delta$ , %. Исходные данные для расчетов приведены в таблице 9.2.

Таблица 9.2 – Исходные данные к заданию

№ варианта	Толщина мембраны, мм	Рабочий диаметр, $D$ , мм	Материал мембраны
1	0,12	50	сталь мягкая
2	0,1	50	никель полутвердый
3	1,0	100	монель-металл полутвердый
4	0,16	100	латунь полутвердая
5	2,0	150	алюминий мягкий
6	1,0	150	алюминий мягкий
7	0,3	200	сталь полунагартованная
8	0,2	250	алюминий твердый
9	0,3	300	сталь полунагартованная
10	0,25	250	медь мягкая

4. Сформулируйте условия применения рассмотренного варианта мембра-

ны для защиты оборудования.

### Контрольные вопросы

1. Для чего предназначены предохранительный клапан и разрывная мембрана?
2. На каких видах оборудования предусмотрена установка предохранительных устройств?
3. Какие разновидности предохранительных клапанов используются в отрасли?
4. Как подобрать предохранительный клапан с необходимой пропускной способностью?
5. Как определить рабочие параметры мембраны?

*Тема 2. Целью заданий является практический расчет избыточного давления при возможном взрыве сосуда, который содержит взрывоопасные вещества.*

Избыточное давление взрыва определяется по формуле, кПа:

$$\Delta P = (P_{\max} - P_0) \frac{mz}{V_{св} \rho_{г.п.}} \cdot \frac{100}{C_{ст}} \cdot \frac{1}{K_n},$$

где  $P_{\max}$  – максимальное давление взрыва стехиометрической смеси или вещества в замкнутом объеме (обычно принимается равным 900), кПа;  $P_0$  – начальное давление, кПа;  $m$  – масса ЛВЖ, кг;  $z$  – коэффициент участия горючего во взрыве;  $V_{св}$  – свободный объем помещения, м<sup>3</sup>;  $C_{ст}$  – стехиометрическая концентрация вещества;  $M$  – молярная масса, кг/кмоль;  $\rho_{г.п.}$  – плотность газа или пара вещества при расчетной температуре, кг/м<sup>3</sup>.

Для разрушения армированных деревянных строений  $\Delta P \approx 10 \dots 20$  кПа, для кирпичных зданий - 25...30 кПа, для железобетонных конструкций стен цеха - 100...150 кПа. Таким образом, оценив возможную степень разрушения, необходимо позаботиться о безопасности эксплуатации промышленного объекта.

### ЗАДАНИЯ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО ВЫПОЛНЕНИЯ

Расчеты выполняются по вариантам.

1. Рассчитать избыточное давление возможного взрыва вещества, хранящегося в сосуде при расчетной температуре  $t_p$ , °С. Свободный объем помещения  $V_{св}$ , м<sup>3</sup>, масса вещества  $m$ , кг. Молярную массу вещества принять по справочным данным согласно химической формуле. Максимальное давление взрыва  $P_{max}$  принять 900 кПа, начальное давление  $P_0$  принять 101 кПа. Коэффициент участия горючего во взрыве  $z = 0,3$ ; коэффициент, учитывающий негерметичность помещения и неадиабатичность процесса горения,  $K_n = 3$ .

Исходные данные для расчетов приведены в таблице 10.1.

Таблица 10.1 - Исходные данные к заданию

№ варианта	Вещество	$t_p$ , °С	$V_{св}$ , м <sup>3</sup>	$m$ , кг
1	изопентан	30	12	10
2	пентан	35	10	5
3	диэтиловый эфир	25	8	6
4	ацетон	32	14	8
5	бутанол	45	11	12
6	этанол	50	7	9
7	гексан	60	6	11
8	гептан	61	9	15
9	изопропиловый спирт	62	13	7
10	бутилацетат	55	14	13

### Контрольные вопросы

1. Что может служить причиной взрывов сосудов с ЛВЖ?
2. В чем опасность взрывов сосудов с ЛВЖ?
3. Как определяется избыточное давление от взрывов сосудов с ЛВЖ?
4. Как учитываются данные о возможных взрывах сосудов с ЛВЖ?
5. Как предотвратить возможные взрывы сосудов с ЛВЖ?

## ЛИТЕРАТУРА

1. Свидченко А.И., Чеботарев Е.А., Чеботарева Н.Г. Промышленная экология: Учебное пособие. – Ставрополь: СевКавГТУ, - 2008. -146 с.
2. Чеботарева Н.Г. Промышленная экология. Методические указания к практическим занятиям для студентов специальности 240801 – Машины и аппараты химических производств. – Невинномысск: НТИ СевКавГТУ, 2008. - 51 с.
3. Ковалева Е.А., Рожановский Г.И.. Методические указания к выполнению практических работ по дисциплине «Безопасность жизнедеятельности» для студентов всех специальностей и направлений. – Невинномысск: НТИ СевКавГТУ, 2009. - 24 с.
4. Процессы и аппараты нефтегазопереработки и нефтехимии. / Скобло А.И. и др. – М.: ООО «Недра – Бизнес - центр», 2000. – 677 с.
5. Павлов К.Ф., Романков П.Г., Носков А.А. Примеры и задачи по курсу "Процессы и аппараты химической технологии". - Л.: Химия, 1981. – 552 с.
6. Варгафтик Н.Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. – М.: Наука, 1972. – 720 с.
7. Алиев Г.М.-А. Техника пылеулавливания и очистки промышленных газов. Справочник. – М.: Металлургия, 1986. – 544 с.
8. Смирнов Г.Г., Толчинский А.Р., Кондратьева Т.Ф. Конструирование безопасных аппаратов для химических и нефтехимических производств. Справочник. - Л.: Машиностроение, 1988. – 303 с.

