

Документ подписан простой электронной подписью  
Информация о владельце:  
ФИО: Локтионова Оксана Геннадьевна  
Должность: проректор по учебной работе  
Дата подписания: 15.11.2022 09:29:47  
Уникальный программный ключ:  
0b817ca911e6668abb13a5d426d39e5f1c11eabbf73e943df4a4851fda56d089

## МИНОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования  
«Юго-Западный государственный университет»  
(ЮЗГУ)

Кафедра охраны труда и окружающей среды



### РАСЧЕТ ИОНООБМЕННЫХ УСТАНОВОК ДЛЯ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД

Методические указания к проведению лабораторных работ  
по дисциплинам «Перспективные технологии защиты окружающей  
среды», «Системы защиты воздушной среды» для студентов всех  
специальностей и направлений

Курск 2021

УДК 628.31

Составители: В.В. Юшин

Кандидат технических наук, доцент Г.П. Тимофеев

**Расчет ионообменных установок для очистки сточных вод:** методические указания к проведению лабораторных работ по дисциплинам «Перспективные технологии защиты окружающей среды», «Системы защиты воздушной среды» для студентов всех специальностей и направлений / Юго-Зап. гос. ун-т; сост.: В.В. Юшин, Ю.С. Паукова. Курск, 2021. – 13 с.

Изложена методика расчета и выбора ионообменных установок для очистки сточных вод. Рассмотрены механизм процесса очистки, основные закономерности процесса, ассортимент используемых ионитов.

Предназначены для студентов всех специальностей и направлений.

Текст печатается в авторской редакции

Подписано в печать 06.09.2021. Формат 60x84 1/16.

Усл. печ. л. 0,92. Уч.-изд.л. 0,87. Тираж 30 экз. Заказ . Бесплатно.

Юго-Западный государственный университет.

305040, г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94.

### **Цель работы:**

- 1) изучить технологию ионообменной очистки сточных вод;
- 2) познакомиться с методикой расчёта ионообменных фильтров

### **ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ**

Выбор схемы ионообменной очистки и обессоливания сточных вод производится в зависимости от назначения установки, состава и расходов сточных вод, требований к качеству очищенной воды.

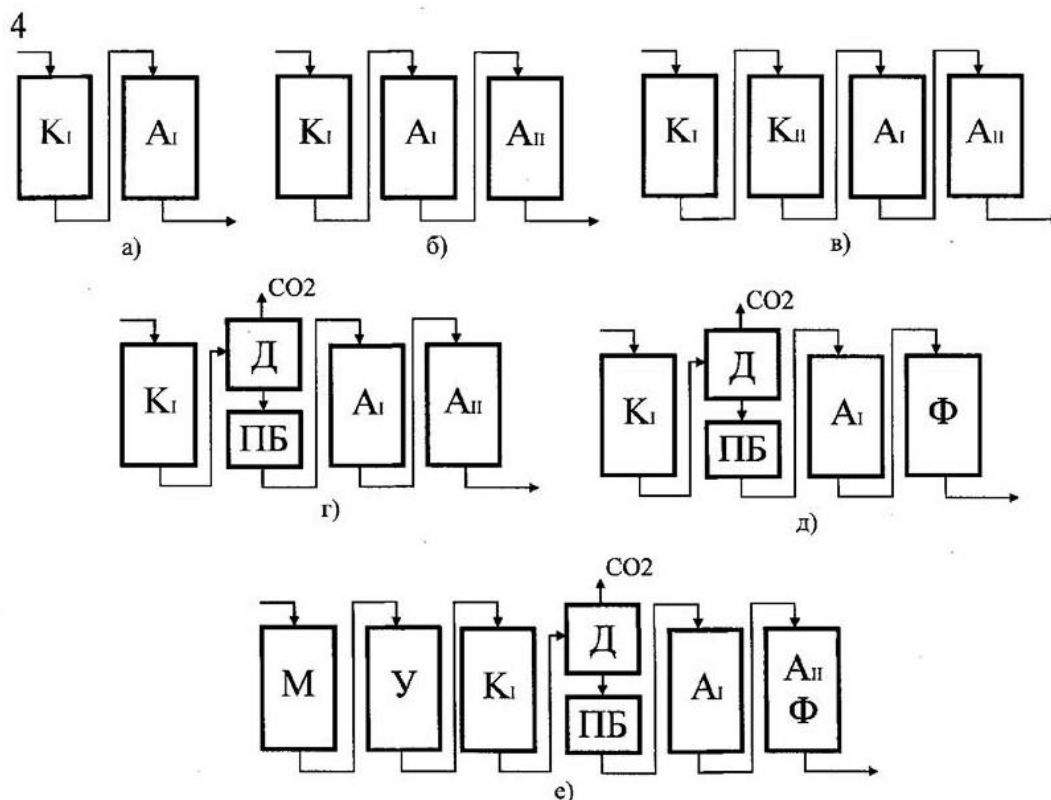
Очистка и частичное обессоливание сточных вод, имеющих слабокислую или нейтральную реакцию, от ионов 2- и 3-валентных металлов, при отсутствии или малом содержании катионов щелочных металлов, а также аммония, анионов слабых кислот (карбонатов, силикатов) или допустимости их присутствия в очищенной воде производится по одноступенчатой схеме последовательным фильтрованием через катионит в водородной форме и слабоосновный анионит в гидроксильной форме (рис. 1, а). При наличии в воде, подвергаемой очистке, окислителей (хромат- и бихроматионов), в качестве анионообменника необходимо применять слабоосновные аниониты АН-18-10П, АН-251 или сильноосновный анионит АВ-17, стойкие к окислительному действию указанных ионов.

Для более глубокой очистки сточных вод от анионов слабых кислот (боратов, силикатов) применяют схему с одноступенчатым Н-катионированием и 2-ступенчатым анионированием (рис. 1, б). На первой ступени анионирование производится с использованием слабоосновных анионитов, на второй ступени используются сильноосновные аниониты.

Для обессоливания и очистки сточных вод при большом содержании катионов щелочных металлов и аммония, а также при наличии ионов 2- и 3-валентных металлов целесообразно применять 2-ступенчатое Н-катионирование (рис. 1, в).

При наличии в обрабатываемой воде большого количества солей угольной кислоты, для предотвращения быстрого истощения емкости сильноосновных анионитов 2-й ступени анионирования, из воды, после Н-катионирования, удаляется углекислота в специальных дегазаторах с насадкой из колец Рашига, с деревянной хордовой насадкой или в других массообменных аппаратах (рис. 1, г). В ряде случаев для стабилизации показателя рН очищенной воды или глубокого обессоливания ее и удаления анионов слабых кислот вместо анионитовых фильтров второй ступени или после них ис-

пользуют фильтры смешанного действия (ФСД), загружаемые сильнокислотными катионитами и сильноосновными анионитами (рис. 1, д).



*а* - одноступенчатая схема для очистки и частичного обессоливания сточных вод; *б* - схема очистки и полного обессоливания сточных вод с двухступенчатым катионированием и двухступенчатым анионированием; *в* - схема очистки и полного обессоливания сточных вод с двухступенчатым катионированием и двухступенчатым анионированием; *г* - схема очистки и полного обессоливания сточных вод с двухступенчатым анионированием и удалением углекислоты дегазацией; *д* - схема очистки и обессоливания сточных вод с удалением углекислоты дегазацией и фильтрами смешанного действия; *е* - схема очистки и полного обессоливания сточных вод с двухступенчатым анионированием, удалением углекислоты дегазацией и предочисткой на механических и сорбционных фильтрах;  $K_I$  и  $K_{II}$  -  $H$ -катионовые фильтры I и II ступени;  $A_I$  и  $A_{II}$  -  $OH$ -анионитовые фильтры I и II ступени;  $D$  - декарбонизатор;  $ПБ$  - промежуточный бак;  $M$  - механические фильтры;  $У$  - сорбционные фильтры;  $F$  - фильтры смешанного действия (ФСД)

**Рисунок 1 - Схемы установок очистки и обессоливания сточных вод ионообменным способом:**

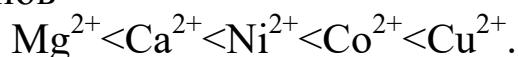
Содержание взвешенных веществ в воде, поступающей на ионообменные фильтры, не должно превышать 8 мг/л. Величина ХПК не должна быть более 8 мг/л. В противном случае в схему ионообменной установки включаются сооружения предочистки с механическими и сорбционными фильтрами (рис. 1, е).

В зависимости от конкретных условий возможны и другие компоновки ионообменных установок с включением различного

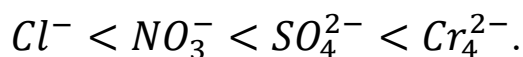
количества ступеней катионирования и анионирования и возможным чередованием их. При наличии в сточных водах сложных смесей катионов большое значение имеет селективное их поглощение катионитами.

Для определения наименее сорбируемых катионов при обмене на сильнокислотном катионите КУ-2 следует принимать во внимание ряд катионов по энергии их вытеснения друг другом  
 $H^+ < Na^+ < NH_4^+ < Mg^{2+} < Zn^{2+} < Co^{2+} < Cu^{2+} < Cd^{2+} < Ni^{2+} < Ca^{2+} < Sr^{2+} < Pb^{2+} < Ba^{2+}$ .

При обмене на слабокислотном катионите КБ-4 установлен следующий ряд катионов



Установлен аналогичный ряд поглощения анионов сильных кислот на сильноосновном и слабоосновном анионитах



Анионы слабых кислот по сорбции к сильноосновным анионитам образуют следующий ряд: силикаты < бораты < фосфаты.

В случае присутствия в воде нескольких катионов и анионов системы рассчитываются как однокомпонентные по наименее сорбируемому или лимитирующему ионам. Расчетные концентрации ионов принимаются равными концентрациям суммы ионов, а емкость ионитов, равной емкости ионитов по наименее сорбируемому или лимитирующему ионам, при сорбции их из индивидуальных растворов.

В ряде случаев ионообменные установки применяются специально с целью извлечения специфических, отдельных компонентов из сточных вод.

## **ИОНИТЫ ДЛЯ ОЧИСТКИ И ОБЕССОЛИВАНИЯ СТОЧНЫХ ВОД**

Для загрузки Н-катионитовых фильтров при очистке сточных вод и их обессоливании в настоящее время преимущественно используются катиониты КУ-1, КУ-2-8, КУ-2-20, КУ-23, КБ-4, КБ-4П- 2, КБ-4-10П.

В качестве слабоосновных анионитов могут применяться: АН-2-ФН, АН-18, АН-22, АН-32, АН-221, АН-251. Аниониты промежуточной основности ЭДЭ-10П. Сильноосновные аниониты АВ-17-8, АВ-29-12П. В табл. 1 дана характеристика некоторых отечественных катионов, в табл. 2 - некоторых отечественных анионитов. Выбор ионитов для очистки сточных вод производится в зависимости от условий ведения процесса и требований к качеству очищенной воды.

Таблица 1 - Характеристика некоторых отечественных катионов

Марка катионита	Размер гранул ионита, мм	Содержание рабочей фракции, %	Содержание влаги, %	Насыпная плотность товарного ионита, т/м <sup>3</sup>	Удельный объём набухшего ионита, м <sup>3</sup> /т	Средняя рабочая обменная ёмкость, г экв/м <sup>3</sup>		Полная обменная ёмкость в динамических условиях, г экв/м <sup>3</sup>	Допустимая температура воды при очистке, °С
						При Н-катионировании	При Na-катионировании		
СМ-1	0,3 - 0,8	-	-	0,65	-	250	400	-	60
СК-1	0,5 - 1,1	-	-	0,65	-	200	350	-	60
КУ-1	0,4 - 2	92,2	40 - 50	0,63 - 0,75	2,9 - 3,2	300	300	550	80
КУ-2-8	0,315 - 1,25	93	40 - 60	0,72 - 0,8	2,9	800	800	1850	120
КУ-2-20	0,315 - 1,25	92	30 - 40	0,8	2	-	-	1300	—
КУ-23	0,315 - 1,25	95	50 - 70	0,72	4,3	400	-	1100	120
КБ-4	0,355 - 1,5	90	35 - 65	0,55 - 0,72	3	-	-	2000	120
КБ-4П-2	0,355 - 1,5	95	60 - 75	0,7 - 0,8	2,8	-	-	2500	150
КБ-4- 10П	0,355 - 1,5	95	55 - 70	-	3,3	-	-	1800	-

Таблица 2 - Характеристика отечественных анионитов

Марка анионита	Фракционный состав набухшего ионита, мм	Содержание рабочей фракции не менее, %	Содержание влаги, %	Насыпная плотность товарного ионита т/м <sup>3</sup>	Удельный объем набухшего ионита не более м <sup>3</sup> /т	Полная объёмная ёмкость, г × экв/м <sup>3</sup>			Обменная ёмкость в динамических условиях, г × экв/м <sup>3</sup>	Допустимая температура при очистке (обсоливание), С°
						по Cl ионам	по SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ионам	по SiO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> ионам		
АН-2ФН	0,4 - 4,2	92	2 - 10	0,65 - 0,68	3,2	500	700	-	1700 - 1750	40
АН-18-8	0,4 - 1,25	92	30 - 50	0,68	2,5	850	1000	-	650	70
АН-18П	0,355 - 1,5	92	35 - 60	-	3,5	1100	-	-		70
АН-22	0,315 - 1,25	90	30 - 50	0,79	2,3 ± 0,5	1800	-	-	1000	100
АН-31	0,4 - 1,2	92	2 - 10	0,7 - 0,8	3,2	1500	-	-	1260	100
АН-221	0,315 - 1,25	90	40 - 60	0,83	3,9	1200	-	-	860	100
АН-251	0,63 - 1,6	90	Не более 50	0,34 - 0,46	3,0 - 3,6	1800	-	-	-	120
ЭДЭ-10П	0,4 - 1,8	92	2 - 10	0,6 - 0,7	3,45	800	1000	50	1020 - 1160	45
АВ-17-8	0,355 - 1,25	92	40 - 60	0,74	2,9	650	800	400	670 - 900	90
АВ-17-8ЧС	0,4 - 1,25	95		-	3,3	1050	-	-	900	90
АВ-29-12П	0,355 - 1,5	95	55 - 65		3,6	1000	-	-	700	40

Для выбора ионообменной смолы при удалении из воды того или иного специфического соединения или элемента приводятся обменные емкости ионитов по некоторым компонентам, присутствующим в сточных водах.

В таблице 3 дана динамическая обменная емкость (ДОЕ) ряда катионитов по меди, никелю и цинку; в таблице 4 - ДОЕ сильно- и слабоосновных анионитов по шестивалентному хрому. В таблице 5 приведена рабочая обменная емкость анионита АВ-17 в ОН-форме по анионам сильных кислот при извлечении хроматов. В последующих таблицах даются опытные данные: по емкости некоторых ионитов по фенолу (таблица 6), катионитов КУ-2 и КБ-4П-2 по пиридину (таблица 7), анионитов ЭДЭ-10П и АВ-17 по муравьиной кислоте (таблица 8) и некоторых катионитов по анилину (таблица 9).

Процессы ионообменной очистки и обессоливания сточных вод могут осуществляться в различных аппаратах: ионообменных фильтрах с обработкой воды в плотном слое; фильтрах для работы с псевдоожиженным слоем ионитов; пульсационных колоннах, «паучках».

Таблица 3 - Динамическая обменная емкость катионитов

Марка катионита	ДОЕ, мг×экв на 1 г катионита по катионам			ДОЕ, г на 1 г катионита по катионам		
	цинка	меди	никеля	цинка	меди	никеля
КУ-2-8	2 - 3	3,7-3,8	2,1 -2,3	65 - 90	80 -120	63 - 70
КБ-4	5	-	-	163		
Сульфоголь	0,2	0,4 - 1	0,4 - 1	6,5	70 - 80	11 - 30
КУ-1	0,4	-	-	13	70 - 90	-

Таблица 4 - Динамическая обменная емкость сильно- и слабоосновных анионитов по шестивалентному хрому

Марка анионита	ДОЕ по Cr (VI) до проскока	
	% по массе сухой смолы	г× экв/м <sup>3</sup>
АВ-17-8	11 - 12	720 - 780
АВ-17-16	7,3 - 8,4	480 - 550
АН-18	6,9 - 10,4	450 - 680
АН-251	-	850



Таблица 5 - Рабочая обменная емкость анионита АВ-17

Состав сточной воды, мг×экв/л					РОЕ, г×экв/м <sup>3</sup>		Использование РОЕ по Cr(VI), %
Cr(VI)	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	CL <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	∑ C <sup>3П</sup>	∑ An <sup>по</sup>	по Cr(VI)	
0,8 - 1,1	0,8 - 1,1	0,4 - 0,5	–	2 - 2,7	660 - 900	270-436	41 - 48
1,2 - 1,3	1,2 - 1,4	0,3 - 0,4	4,8 - 5,3	7,5 - 8,4	600 - 925	108-144	16 - 18
1,2 - 1,3	1,3 - 1,4	0,3 - 0,4	0,4	3,1 - 3,5	835 - 1095	328-348	32 - 39
1,2 - 1,4	1,2	0,3	0,2	2,9 - 3,1	760-860	336-337	44

Таблица 6 - Емкости ионитов по фенолу

Марка ионита	Емкость в статических условиях, мг/г	В динамических условиях, мг/г		При сорбции фенола из водно-метанольных сред, мг/г
		до проскока	до насыщения	
Сульфуголь	37-40	92	90-100	–
КУ-1	–	–	70-90	–
ЭДЭ-10П	54-55	120	54-68	80 –100
АВ-17	85-89	147	90-95	100 –120

Таблица 7 – Емкость катионитов КУ-2 и КБ-4П-2 по пиридину

Марка катионита	Статическая обменная ёмкость при сорбции из чистых растворов		Динамическая обменная ёмкость при сорбции из сточных вод в присутствии катионов натрия и аммония			
			до насыщения		до проскока	
	мг×экв/г	мг×экв/г	мг×экв/г	мг×экв/г	мг×экв/г	мг×экв/г
КБ-4П-2	-	-	1 - 1,1	80 - 88	0,7 - 1	56 - 80
КУ-2	3,2 - 3,3	250 - 269	1,5 - 2,2	120 -180	1,3 - 2,1	105 - 170

Таблица 8 – Емкость анионитов ЭДЭ-10П и АВ-17 по муравьиной кислоте

Марка анионита	Ёмкость	
	мг×экв/г	мг /г
ЭДЭ-10П	4,5 - 4,6	206 - 210
АВ-17	3,7 - 3,9	170 - 180

Таблица 9 – Емкость катионитов по анилину

Марка катионита	ДОЕ до проскока, мг/г, при концентрации анилина 10 мг/л	Полная динамическая обменная ёмкость (ПДОЕэ, мг/г)
КУ-1	227	340
КУ-1Г	–	67
КУ-2	146	310
КБ-4П-2	–	95
Сульфуголь	330	422

Процессы ионообменной очистки и обессоливания сточных вод могут осуществляться в различных аппаратах: ионообменных фильтрах с обработкой воды в плотном слое; фильтрах для работы с псевдооживленным слоем ионитов; пульсационных колоннах.

Наиболее распространено применение серийно выпускаемых ионообменных фильтров для фильтрования воды в плотном слое. Для очистки и обессоливания сточных вод используются стандартные Н-катионитовые фильтры первой ступени, вертикальные, параллельно-точные. Их характеристики приведены в таблице 10.

Фильтры смешанного действия имеются двух видов: с внутренней регенерацией и с выносной регенерацией. Наибольшее применение в практике очистки и обессоливания сточных вод находят ФСД с внутренней регенерацией. Их характеристика приведена в таблице 11.

Таблица 10 - Характеристики Н-катионитовых фильтров

Характеристика фильтра	ФИПа-1-1-6	ФИПа-1-1, 5-6	ФИПа 1-2-6	ФИПа-1-2,6-6	ФИПа-1-3-6	ФИПа-1-3, 4-6
Рабочее давление, МПа	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
Площадь фильтрования, м <sup>2</sup>	0,785	1,775	3,14	5,3	7,1	9,1
Диаметр фильтра, мм	1000	1500	2000	2600	3000	3400
Высота слоя ионита, м	2	2	2,5	2,5	2,5	2,5
Объем загрузки ионита, м <sup>3</sup>	1,6	3,56	7,85	13,25	17,75	22,75
Масса фильтра (с арматурой), т	0,905	1,692	2,746	4,558	5,527	7,848
Удельное давление на фундамент	0,65	0,69	0,6	0,65	0,68	0,65

Таблица 11 - - Характеристики фильтров смешанного действия

Характеристика фильтра	ФСДН <sub>р</sub> -2,0-10	ФСДН <sub>р</sub> -2,6-10	ФСДН <sub>р</sub> -3,4 -10	ФСДН <sub>р</sub> -2,0-6
Давление, МПа				
- рабочее	1	1	1	0,6
- пробное гидравлическое	1,3	1,3	1,3	0,9
Площадь фильтрования, м <sup>2</sup>	3,14	5,3	9,1	3,13
Диаметр фильтра, мм	2000	2600	3400	2000
Высота фильтрующего слоя, м:				
- общая	1,2	1,2	1,2	1,2
- катионита	0,6	0,6	0,6	0,6
- анионита	0,6	0,6	0,6	0,6
Объем фильтрующей загрузки, м <sup>3</sup> :				
- катионита	1,9	3,18	5,5	1,9
- анионита	1,9	3,18	5,5	1,9
Масса, т:				
- катионита	1,35	2,26	3,9	1,35
- анионита	1,4	2,35	4,1	1,4
- нагрузочная	17	20,5	45	15,5
Удельное давление на фундамент, МПа	0,6	0,5	0,6	0,6

Важным моментом в проектировании ионообменных установок является расчет потери напора в загрузке ионитовых фильтров. В таблице 12 приведены данные о потере напора в зависимости от крупности зерен ионита, высоты слоя и скорости фильтрования.

Таблица 12

Скорость филь- трования м/ч	Потери напора в фильтрах, м, при размере зерен ионита, мм			
	0,3-0,8		0,5-1,2	
	Высота загрузки, м			
	2	2,5	2	2,5
5	5	5,5	4	4,5
10	5,5	6	5	5,5
15	6	6,5	5,5	6
20	6,5	7	6	6,5
25	9	10	7	7,5

Технологические данные для расчёта Н-катионитовых фильтров следующие:

- скорость фильтрования, м/ч.....10 – 15;
- скорость регенерации, м/ч..... 1,0 - 1,5;
- направление потока при фильтрации, регенерации и отмыве .....сверху вниз
- интенсивность взрыхления катионита перед регенерацией, л/(с×м<sup>2</sup>).....3;
- время взрыхления, мин ..... 5 – 7;
- скорость отмывки катионита после регенерации, м/ч.....6 – 10;
- регенерационный раствор.....7 –10 %-ные растворы HCl ИЛИ H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>;

- ДОЕ КУ-2 по сумме ионов 2- и 3-валентных металлов.....15 – 19 кг (830 - 1050 г ×экв) на 1 м<sup>3</sup> набухшей смолы;
- КУ – 23.....8 - 10,5 кг/м<sup>3</sup> (450 - 580 г ×экв/м<sup>3</sup>);
- ориентировочный годовой износ катионита.....10%.

Технологические данные для расчета анионитовых фильтров следующие:

- скорость фильтрования, м/ч.....10 – 15;
- скорость регенерации, м/ч .....1,5 – 2;
- направление потока при фильтрации, регенерации и отмывке.....сверху вниз;
- интенсивность взрыхления анионита перед регенерацией, л/(см<sup>2</sup>)..... 3–4;
- время взрыхления загрузки, мин.....5 –7;
- скорость отмывки после регенерации, м/ч.....5 – 6

- регенерационный раствор.....3 – 4 % NaOH;
- ДОЕ анионитов по анионам сильных кислот, г × экв на 1 м<sup>3</sup> набухшей смолы.....АН-2ФН - 800 - 1000; АН-22 - 900 - 1000; АН-31 - 1000 -1200;
- ориентировочный годовой износ.....15 – 20 %.

## **СПОСОБЫ ЗАЩИТЫ ИОНООБМЕННЫХ УСТАНОВОК**

Сточные воды, поступающие на установку, могут иметь кислую или щелочную реакцию, содержать компоненты, обладающие агрессивными свойствами по отношению к бетону или металлам. Кроме того, при обессоливании вода, поступающая из Н-катионитовых фильтров в анионитовые, имеет кислую реакцию, а обессоленная вода по отношению к бетону или металлам также обладает коррозионными свойствами. Агрессивны и применяемые для регенерации ионитов растворы и образующиеся элюаты. Эти обстоятельства необходимо учитывать при проектировании ионообменных установок. Необходима защита от коррозии внутренних поверхностей всех емкостей для приготовления и дозирования регенерирующих реагентов, сбора и хранения элюатов и промывных вод; внутренних поверхностей фильтров, декарбонизаторов, всех деталей внутри фильтра, обвязки трубопроводов, арматуры, соприкасающейся с водой и растворами в установке.

Для защиты от коррозии внутреннюю поверхность корпуса фильтров и емкостей либо гуммируют, либо покрывают кислотостойкими смолами и лаками. Нижние распределительные устройства трубчатого типа, крепежные детали внутри корпуса фильтра и другую арматуру изготавливают из нержавеющей стали. Верхние распределительные устройства выполняются из полиэтилена. Нижние распределительные устройства типа «ложное дно» изготавливают из полимерных материалов: доски из пресс-материала АГ-40, щелевые колпаки — из сополимера стирола СНП-2.

Сорбционные фильтры проектируются согласно СНиП 2.04.03-85 пп. 6.283–6.289. Фильтры рассчитываются на производительность 51 м<sup>3</sup>/ч, скорость фильтрования 8 – 10 м/ч, интенсивность взрыхления активированного угля 3 – 4 л/(с м<sup>2</sup>), высота загрузки 2,2 – 2,8 м. Необходимая площадь фильтрования 5,1 – 6,4 м<sup>2</sup>. Количество фильтров определяется в соответствии с основными их характеристиками. Загрузка — уголь БАУ, АГ-3, АГ-5, АР-3. Рекомендуется принять 2 рабочих фильтра диаметром 2 м и сечением 3,14 м'

каждый. Возможно совмещение механической и сорбционной предочистки в одном 2-слойном фильтре.

Н-катионитовые фильтры рассчитываются на производительность 51 м<sup>3</sup>/ч. Содержание катионов металлов 7,7 г-экв/м при эксплуатации и 8,3 г-экв/м<sup>3</sup> при запуске (работа без оборота).

Объем катионита (м<sup>3</sup>) в водородно-катионитовых фильтрах определяется по формуле:

$$W_{kat} = \frac{16q_{\omega}(\sum C_{em}^k - \sum C_{ex}^k)}{n_{reg}E_{\omega C}^k} \quad (1)$$

где

$$E_{\omega C}^k = \alpha_k E_{gen}^k - K_{ion}q_k \sum C_{\omega}^k \quad (2)$$

Подставим цифровые обозначения в формулы (1) и (2), получим:

$$W_{kat} = \frac{16 \times 51(7,7 - 1,2)}{0,5 \times 800} = 13,26 \text{ м}^2 ;$$

$$E_{\omega C}^k = 0,8 \times 1000 - 0,5 \times 4 \times 1,7 = 796,7 \approx 800 \text{ г} \times \frac{\text{ЭКВ}}{\text{М}^3}.$$

Площадь катионитовых фильтров определяется по формуле:

$$F_k = \frac{W_k}{H_k} \quad (3)$$

$$\text{Рассчитаем } F_k = \frac{13,26}{2} : \frac{13,26}{3} = 6,63 - 4,42 \text{ м}^2.$$

Предлагается к установке один рабочий и один резервный фильтр диаметром 2,6 м и сечением 5,3 м<sup>2</sup> каждый. При этом скорость фильтрования составит 51/5,3=9,6 м/ч (скорость фильтрования должна быть в пределах 8 –15 м/ч).

Длительность рабочего цикла фильтра принята 2 сут по 16 ч. Она может быть рассчитана по формуле

$$t_f = \frac{W_k E_{\omega C}^k - q_k W_k \sum C_{\omega}^k 0,5}{q_{\omega}(\sum C_{en}^k - \sum C_{ex}^k)} \quad (4)$$

Подставим цифровое обозначение в формулу (4) получим:

$$t_f = \frac{13,25 \times 800 - 4 \times 13,25 \times 1,2 \times 0,5}{51(7,7 - 1,2)} = 32 \text{ ч.}$$

Регенерация катионитовых фильтров производится 7 – 10 % - ным раствором соляной кислоты и количестве 2,5 –3 г-экв на 1 г-экв сор- бированных катионитов (на 1 г-экв РОЕ катионита). Расход реагента на регенерацию одного фильтра в одном цикле определяется по формуле:

$$P_k = W_k E_{\omega c}^k q_r N 100 / m \times 10^3.$$

Подставим цифровые обозначения получим:

$$P_k = \frac{13,25 \times 800 \times 3 \times 36,5 \times 100}{31 \times 10^3} = 3744 \text{ кг.}$$

При повторном использовании части элюатов на регенерацию расход кислоты может быть сокращен на 30 -40 %.

## РАСХОД ВОДЫ НА РЕГЕНЕРАЦИЮ КАТИОНИТОВЫХ ФИЛЬТРОВ

На взрыхление смолы при интенсивности 3 л/(с·м<sup>2</sup>) в течение 20 мин  $5,3 \cdot 3 \cdot 60 \cdot 20 \cdot 0,001 = 19 \text{ м}^3$ ; на приготовление 10 %-ной соляной кислоты:

$$\frac{3744 \times 31}{10 \times 1000} = 11,6 \text{ м}^2;$$

на послерегенерационную отмывку – 3 – 4 объема на 1 объем попита, т.е.  $13,25 \cdot 3,5 = 46,4 \text{ м}^3$ .

Общий объем воды на один фильтр в цикле  $77,1 \text{ м}^3$ , средний часовой расход  $77,1/32 = 2,4 \text{ м}^3$ .

**Анионитовые фильтры.** Загрузка – слабоосновный анионит АН-31, производительность  $51 \text{ м}^3/\text{ч}$ . На анионитовые фильтры поступает Н-катионированная вода с содержанием анионов сильных кислот  $7,4 \text{ г-экв}/\text{м}^3$ .

Объем анионита  $W_{an}(\text{м}^3)$  определяется по формуле (1), где вместо  $\sum C_{em}^k$  и  $\sum C_{ex}^k$  ставятся величины  $\sum C_{en}^{an}$  и  $\sum C_{ex}^{an}$  – концентрация суммы анионитов в обрабатываемой и анионированной воде.

Рабочая емкость анионита  $E_{wc}^{an}$  рассчитывается по формуле (2), где  $\alpha$  для слабоосновных анионитов  $\alpha = 0,9$ ,  $E_{gen}^{an} = 1120$ ;  $q_{an} = 3 - 4 \text{ м}^3$  на  $1 \text{ м}^3$  ионита;  $K_{ion} = 0,8$ ;  $E_{wc}^{an} = 0,9 \times 1120 - 0,8 \times 4 \times 1,7 = 1000$ ;  $P_{reg}$  – число регенераций анионитовых фильтров в сутки (принимается 1 раз в 3 сут.).

$$W = \frac{16 \times 51(7,4 - 1,7)}{0,33 \times 1000} = 14 \text{ м}^3.$$

По аналогии с Н-катионитовыми фильтрами, принимается один рабочий и один резервной анионитовые фильтры с объемом загрузки  $13,25 \text{ м}^3$ , сечением  $5,3 \text{ м}^2$  и диаметром 2,6 м. Площадь фильтрования анионитовых фильтров может быть проверена по формулам:

$$F_{an} = 16q_{\omega} / n_{reg} t_f v_f;$$

$$t_f = 16/n_{reg} - t_1 - t_2 - t_3.$$

Регенерация анионита производится 4 %-ным раствором гидроксида натрия в количестве 2,5 экв на 1 экв рабочей обменной емкости. Расход 100 %-ного гидроксида натрия рассчитывается по формуле (5):

$$P_b = \frac{13,25 \times 1000 \times 2,5 \times 40}{10^3} = 1325 \text{ кг.}$$

где 40 – эквивалентная масса гидроксида натрия.

Расход реагента может быть сокращен на 30 – 40 % при повторном использовании части элюатов.

Расход воды на регенерацию анионитовых фильтров:

– на взрыхление смолы  $5,3 \cdot 3 \cdot 60 \cdot 20 \cdot 0,001 = 19,1 \text{ м}^3$ ;

– на приготовление 4 %-ного раствора гидроксида натрия  $1325/40 = 33,1 \text{ м}^3$ ;

– на послерегенерационную отмывку фильтра  $13,25 \cdot 5 = 66,2 \text{ м}^3$ .

Общий расход воды на регенерацию составил  $118,4 \text{ м}^3$ , а продолжительность регенерации  $33,1/5,3 - 2 = 3,12 \text{ ч}$ , продолжительность отмывки  $66,2/5,3 - 6 = 2,08 \text{ ч}$ , продолжительность работы фильтра между регенерациями

$$\frac{16}{0,33} - 0,33 - 3,12 - 2,08 = 48,48 - 5,53 = 42,95 \text{ ч (43 ч)}.$$

Площадь фильтрования

$$F_a = (16 \times 51)/(0,33 \times 43 \times 12) = 4,79 \text{ м}^2,$$

что укладывается в сечение выбранного фильтра  $5,3 \text{ м}^2$ , диаметром 2,6 м.

Часовой расход воды на регенерацию составит  $118,4/43 = 2,75 \text{ м}^3/\text{ч}$ .

Часть отмывочной воды может использоваться для приготовления регенерационного раствора. Общий расход очищенной воды на собственные нужды ионообменной установки (на взрыхление, регенерацию, отмывку ионитов всех фильтров) без учета повторного использования составит  $2,4 + 2,75 = 5,15 \text{ м}^3/\text{ч}$ , или 10 % производительности установки.

**Задание.** Рассчитать ионообменные фильтры для следующих условий.

№ вар.	Расход сточных вод, м <sup>3</sup> /ч	$\sum C_{en}^k$ , Г-ЭКВ/М <sup>3</sup>	$\sum C_{ex}^k$ , Г-ЭКВ/М <sup>3</sup>	катионит	$C_{en}^{cap}$ , Г-КВ/М <sup>3</sup>	$C_{ex}^{cap}$ , Г-КВ/М <sup>3</sup>	анионит
1	40	7,0	0,9	БАУ	6,9	1,4	АН-18
2	43	7,1	0,8	АГ-3	7,4	1,7	АН-251
3	55	7,2	1,2	БАУ	7,2	1,3	АВ-17-8
4	36	7,3	1,1	АГ-5	7,3	1,6	АВ-17-16
5	51	7,4	1,2	АР-3	7,0	1,2	АН-18
6	47	7,6	0,7	АГ-3	6,8	1,7	АВ-17
7	34	7,5	0,6	БАУ	7,2	1,6	АН-251
8	49	7,7	0,9	АГ-3	7,3	1,5	АВ-17-16
9	52	6,9	1,0	АГ-5	7,4	1,4	АН-18
10	55	7,0	1,1	БАУ	7,1	1,3	АВ-17

### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ.

1. Схемы установок очистки сточных вод ионообменным способом.
2. Иониты для очистки сточных вод.
3. Виды ионообменных установок.
4. Способы защиты ионообменных установок.
5. Регенерация катионитовых фильтров.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Справочник проектировщика: Канализация населенных мест и промышленных предприятий. - М.: Стройиздат, 1981- 639с.
- 2 Яковлев С.В., Воронов Ю.В Водоотведение и очистка сточных вод. - М.: Издательство ассоциации строительных вузов, 2004. – 702 с.
- 3 Воронов Ю.В.Водоотведение. - М.: Инфа.- М. 2007. - 415 с.



**МИНОБРНАУКИ РОССИИ**

Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования  
«Юго-Западный государственный университет»  
(ЮЗГУ)

Кафедра охраны труда и окружающей среды



**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФРАКЦИОННОГО СОСТАВА ПЫЛИ  
ОПТИЧЕСКИМ МЕТОДОМ**

Методические указания к проведению лабораторных работ  
по дисциплинам «Перспективные технологии защиты окружающей  
среды», «Системы защиты воздушной среды» для студентов всех  
специальностей и направлений

Курск 2021

УДК 614.71

Составители: В.В. Юшин, Ю.С. Паукова

Кандидат технических наук, доцент Г.П. Тимофеев

Определение фракционного состава пыли оптическим методом: методические указания к проведению лабораторных работ по дисциплинам «Перспективные технологии защиты окружающей среды», «Системы защиты воздушной среды» для студентов всех специальностей и направлений / Юго-Зап. гос. ун-т; сост.: В.В. Юшин, Ю.С. Паукова. Курск, 2021. – 13 с.

Излагается методика микроскопического анализа мелкодисперсной пыли.

Предназначены для студентов всех специальностей и направлений.

Текст печатается в авторской редакции

Подписано в печать 06.09.2021. Формат 60x84 1/16.  
Усл. печ. л. 0,75. Уч.-изд.л. 0,7. Тираж 30 экз. Заказ . Бесплатно.

Юго-Западный государственный университет.  
305040, г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94.

### **Цель работы:**

- 1) изучить методы определения дисперсного состава;
- 2) познакомиться с характеристикой оптического микроскопа;
- 3) определить фракционный состав пыли методом микроскопического анализа

### **ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ**

Дисперсный (фракционный) состав считается одной из важных характеристик тонко–измельчённых материалов, определяющей их физико–химические свойства, а, следовательно, и их технологические качества и область практического использования.

Дисперсность – это степень измельчения вещества. Под дисперсным составом подразумевается распределение частиц пыли по размерам. Она является показателем размерности частиц пыли. Дисперсность в ряде случаев основывается на определении свойств пыли.

Наиболее часто данные дисперсного анализа даются в виде фракций, выраженных в процентах от общего числа или массы. Пример фракций пыли представлен в таблице 1.

Таблица 1 – Фракции пыли

Размеры частиц на границах фракций d, мкм	Фракции, % от общей массы частиц
0 – 1,6	2,08
1,6 – 2,5	3,61
2,5 – 4	8,32
4 – 6,3	17,56
6,3 – 10	22,60
10 – 16	18,74
16 – 25	14,57
25 – 40	12,52

Для определения дисперсного состава пыли используется ряд методов, основанные на различных физических принципах. Выбор метода определяется видом пыли, требуемой точностью, наличием соответствующего оборудования и другими факторами.

Основные методы определения дисперсного состава пыли представлены в таблице 2.

С помощью микроскопического анализа определяют счетную концентрацию частиц пыли различных фракций. При определении дисперсного состава подсчитывают в поле зрения микроскопа число частиц каждой выбранной фракции.

Таблица 2 – Основные методы определения дисперсного состава

Название метода	Назначение
Ситовый (фильтрационный анализ)	Разделение частиц на фракции путём последовательного просеивания навески пыли через лабораторные сита с отверстиями различных размеров
Седиментационный	Разделение навески пыли на отдельные фракции путем ее осаждения в жидкой или газообразной среде
Микроскопический метод	Рассмотрение пылевых частиц с помощью оптического или электронного микроскопа, определение формы частиц, их размера и количества по фракциям
Центробежная сепарация	Разделение пыли на фракции с помощью центробежной силы в специальном аппарате

Микроскопический анализ используется в основном для научных исследований, т.к. является трудоёмким в использовании. Исследования производятся непосредственно под микроскопом.

Метод основан на отборе проб пыли на фильтр АФА, определении массы отобранной пыли гравиметрическим методом и приготовлении образцов для микроскопического анализа способом просветления фильтра на стекле растворителем.

Исследование пыли начинают с разностороннего фотографирования образцов, увеличенных в 200–2000 раз под микроскопом с помощью микро-фотоприставки и ПК. Количество необходимых фотографий зависит от полидисперсности пыли.

Преимуществом микроскопического анализа является возможность не только определить размеры пылевых частиц и их количества, а также изучать строение частиц и делать микрофотографии пыли.

Порядок определения дисперсионного состава пыли показан на рисунке 1.

Для определения дисперсионного состава пыли используем стандартные фильтры АФА–ВП–10 и АФА–ВП–20, изготовленные из высокоэффективного гидрофобного фильтрующего материала ФПП–15.

Фильтры вставлены в защитные бумажные кольца и хранятся в ячейках упаковочного листа. При подготовке к отбору проб фильтры выдерживают в открытых пакетах в течение суток в эксикаторе с осушителем (хлоридом кальция).

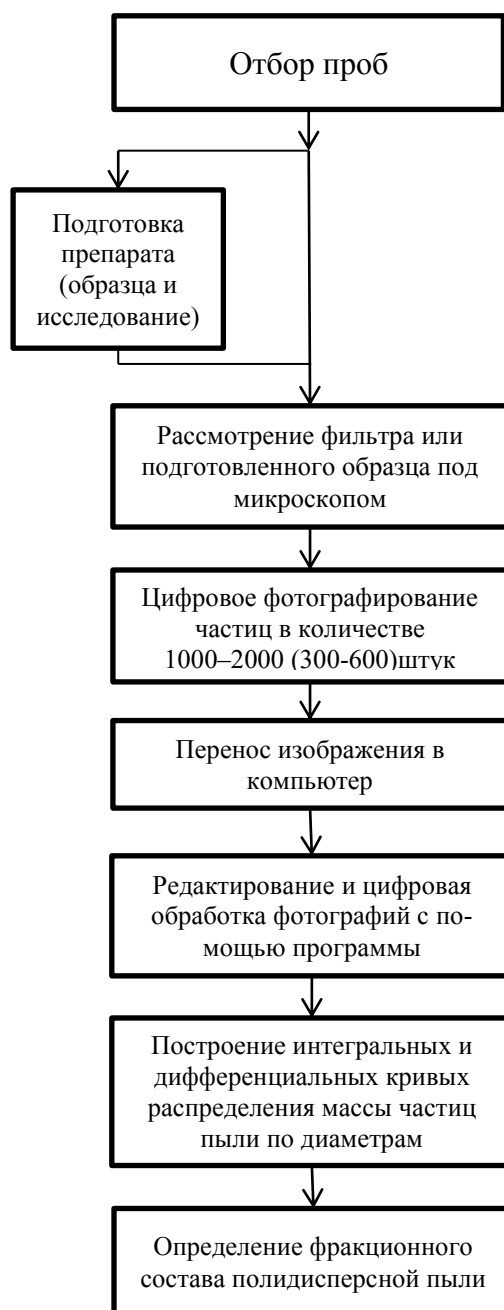


Рисунок 1 – Схема методики микроскопического анализа

Затем фильтр извлекают из пакета пинцетом, взвешивают на аналитических весах с точностью до 0,1 мг. Взвешенный до постоянного веса фильтр помещают в защитное кольцо и устанавливают в фильтродержатель. С помощью аспиратора ПУ–4Э проводится отбор пробы на фильтр с фильтродержателем.

После отбора проб и взвешивания фильтры подвергают просветлению. Для этого фильтр АФА помещают на предметное стекло запыленной стороной к стеклу и в слегка натянутом состоянии приклеивают по краям. Затем на фильтр воздействуют парами растворителя ацетона или наносят 1–2 капли смеси растворителей. В результате фильтр превращается в тонкую прозрачную пленку, в

которой прочно зафиксированы пылевые частицы. При обработке фильтра ацетоном препарат высушивают в течение 2–4 мин при комнатной температуре (около 22°C), в остальных случаях препарат высушивают при температуре 90 °С в течение 3–5 мин. Приготовленные образцы рассматривают под оптическим микроскопом.

При небольшой полидисперсности следует фотографировать от 300 до 500 частиц и от 1000 до 1200 при значительных колебаниях размеров частиц. Для получения изображения используются средства фото– или видеофиксации. С помощью компьютерной программы «TourView», позволяющей производить цифровую обработку изображений, определяется количество частиц и размер частиц.

Результаты измерений оформляют в виде таблиц, на основе которых можно построить дифференциальные и интегральные кривые распределения массы частиц по размерам.

### **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА МИКРОСКОПА**

Исследование дисперсного состава в данной работе проводится на оптическом микроскопе Levenhuk D670T (рисунок 2), который комплектуется тринокулярной насадкой с углом наклона 30°. Предметный столик с механизмом перемещения препарата и регулятор грубой/точной фокусировки.



1 – основание микроскопа; 2 – ручка перемещения препарата; 3 – настройка фокуса; 4 – штатив; 5 – бинокулярная насадка; 6 – окуляры; 7 – револьверная головка; 8 – объективы; 9 – предметный столик; 10 – предметный столик; 11 – конденсор Аббе.

Рисунок 2 – Микроскоп Levenhuk D670T

Конструкция микроскопа состоит из девяти основных составных частей:

- основание, на котором располагаются электронные компоненты и элементы управления;
- штатив: центральный элемент, соединяющий стойку и все остальные составные части;
- механизм подъема и спуска предметного столика;
- предметный столик, на котором размещается препарат с исследуемым веществом;
- конденсор: конденсор Abbe с ирисовой (апертурной) диафрагмой с  $NA = 1,25$ ;
- окулярная голова, на которой: размещается тринокулярная насадка;
- окуляры;
- револьверная головка;
- объективы, имеющие увеличение 4x, 10x, 40x, 100x, которые позволяют получить чёткое изображение.

Техническая характеристика микроскопа Levenhuk D670T представлена в таблице 3.

Таблица 3 – Техническая характеристика микроскопа Levenhuk D670T

Характеристика	Числовое значение
Насадка	Тринокулярная, с наклоном 30°
Общее увеличение	40x–2000x
Объективы	Ахроматические 4x, 10x, 40x, 100x (S) (S, масляный)
Окуляры	WF10x / Ø18 мм или 20 мм, WF20x / Ø ≥ 11
Механическая длина тубуса	160 мм
Размер платформы (предметный столик)	160 мм × 115 мм
Диапазон перемещения предметного столика	125 мм × 30 мм
Подсветка	Галогенная лампа 6В/20Вт (с регулируемой яркостью)
Масса нетто	4 кг
Размеры Д×Ш×В	260 × 174 × 375 мм

Для упрощения определения дисперсного состава микроскопическим методом можно применять программное обеспечение, например, TopView, позволяющее управлять микроскопической камерой и обрабатывать изображения. Оно предоставляет функции полного управления камерой и представления видеопотока, обрабатываемого на высокой скорости, что включает в себя специальный конвейер для обработки необработанных данных в реалистичную

сцену. Кроме того, программа содержит инструменты, которые позволяют выполнять следующие функции:

- подключение к ПК;
- настройка камеры;
- калибровка яркости;
- проводить различные измерения и сохранять их;
- сшивка изображений;
- расширение глубины резкости;
- вложение видео водяными знаками;
- цветовая композиция;
- обработка изображений;
- сохранение изображений в различных форматах.

Порядок работы с программным обеспечением:

1. Дважды щелкните значок на рабочем столе, чтобы запустить программу TourView; появится окно, в соответствии с рисунком 3.

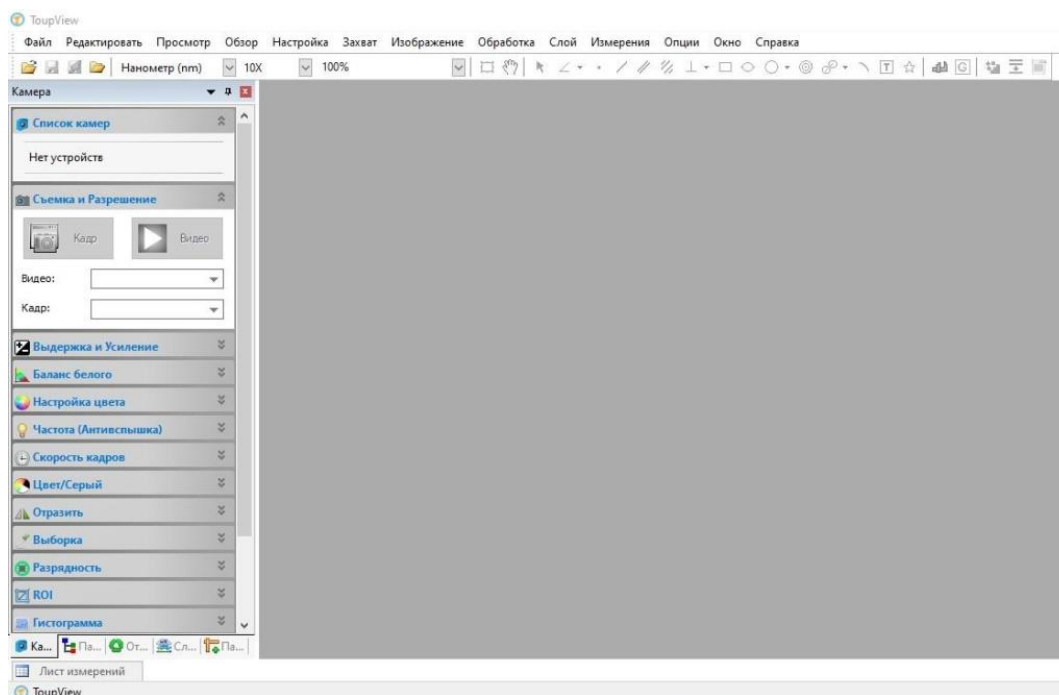


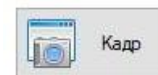
Рисунок 3 - Рабочее окно программы

2. В левом верхнем углу из списка камер выбрать камеру, установленную на ПК. После высветится видео окно, где появится изображение.

3. При необходимости, используя боковую панель, можно изменить параметры камеры.

4. Для того чтобы сделать фото, нужно нажать на

5. Для определения размеров частиц, необходимо воспользоваться верхней панелью инструментов.





## ЗАДАНИЕ.

Определить фракционный состав исследуемой пыли оптическим методом. Результаты занести в таблицы 4 – 5.

### ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ.

1. Собрать лабораторную установку: штуцер аспиратора подсоединяют с помощью резиновой трубки с аллонжем экспериментальной камеры (рисунок 4).

2. Включить в розетку аспиратор и вентилятор.

3. Взвесить на аналитических весах чистый фильтр. Для этого его помещают в держатель. Фильтр брать и перемещать только пинцетом, не касаясь его руками. Вставить фильтр с держателем в аллонж.



Рисунок 4 – Лабораторная установка

4. Включить вентилятор пылевой камеры и добиться равномерного распределения пыли по камере.

5. Включить аспиратор и одновременно секундомер. Вентилем отрегулировать скорость просасывания воздуха.

6. Проводить забор пробы воздуха в течение 10-15 минут. Снять аллонж, вынуть из него фильтр с держателем, не встряхивая и не переворачивая, вторично взвесить на весах.

7. Подготовить микроскоп к работе: вставить окуляры в бинокулярную насадку, вкрутить объективы в револьверную головку микроскопа (рисунок 5).

8. Вставить в фото–видео вход микроскопа камеру и подключить её с помощью USB–кабеля к ПК, на котором уже установлено программное обеспечение; включить питание и медленно регулировать яркость от темной к яркой.

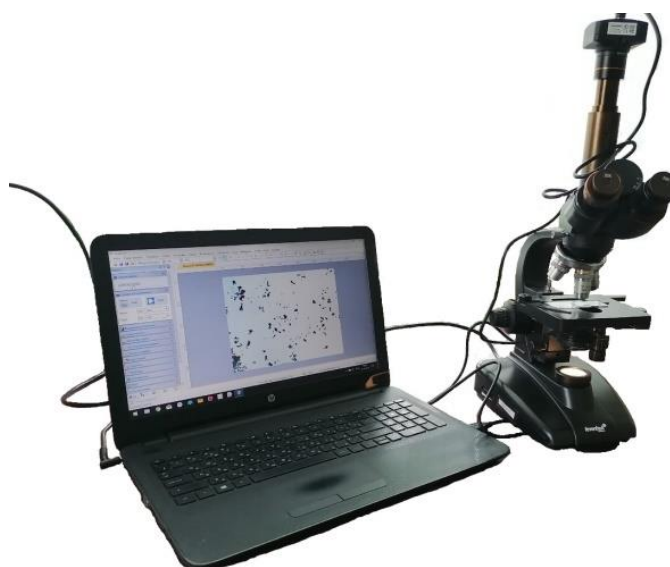


Рисунок 5 – Подготовка микроскопа к исследованию

9. Фильтр поместить на предметное стекло запыленной стороной к стеклу и в слегка натянутом состоянии приклеить по краям.

10. На фильтр нанести 1–2 капли смеси растворителей. В результате фильтр превращается в тонкую прозрачную пленку, в которой прочно зафиксированы пылевые частицы (рисунок 6).

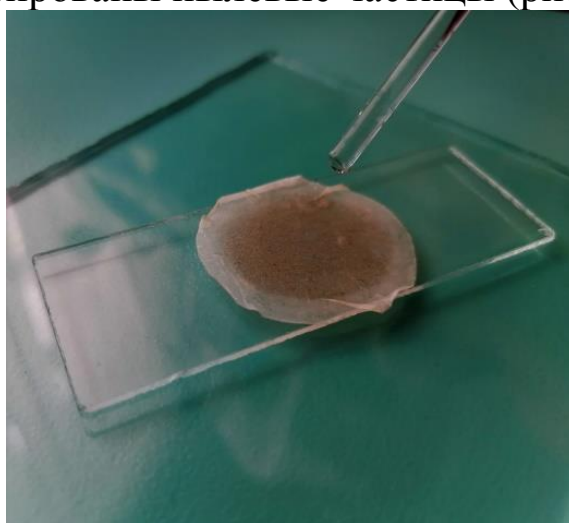


Рисунок 6 – Фильтр

11. Препарат высушить при комнатной температуре около 2 минут.

12. Готовый препарат поместить в центр предметного столика и закрепить его зажимами.

13. Включить микроскоп; с помощью фокуса настроить чёткость изображения.

14. С помощью программы TourView сделать фото, исследуемого объекта и определить размеры частиц (рисунок 7).

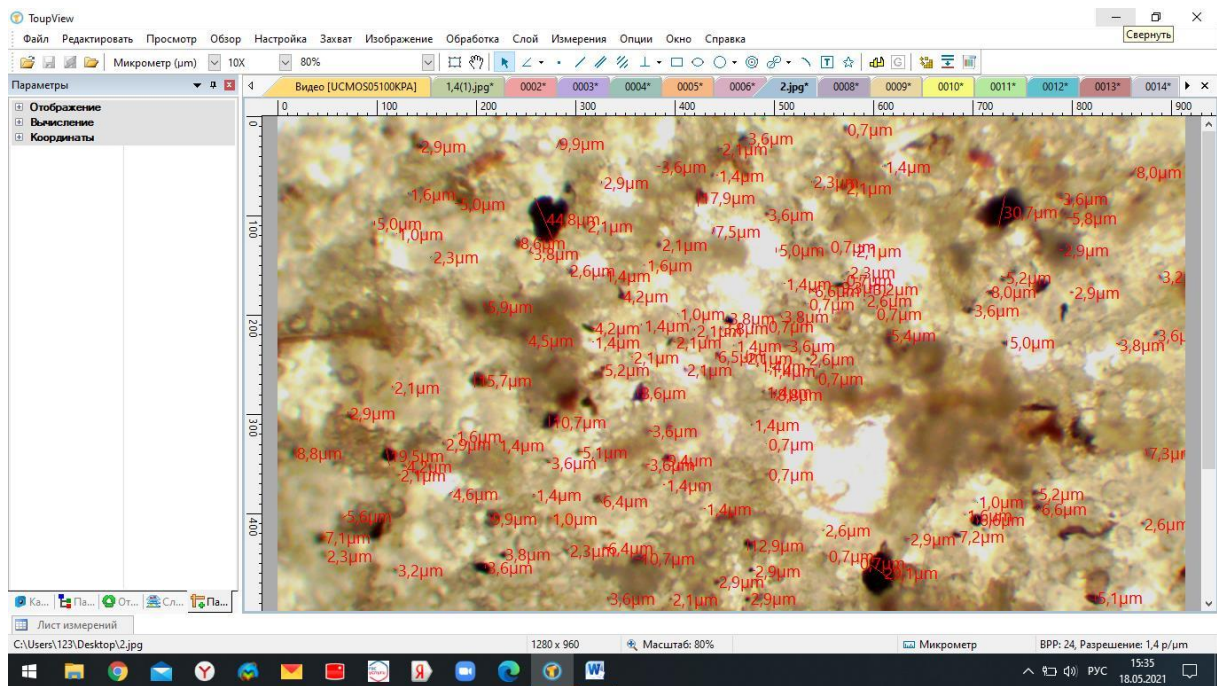


Рисунок 7 – Размер частиц

15. Рассчитать процентное содержание частиц по массе в каждой фракции. Для этого необходимо найти массу частиц во фракции и общую массу частиц.

Масса одной частицы:

$$m = V \cdot \rho_{\text{ч}} = \frac{\pi \cdot d^3}{6} \cdot \rho_{\text{ч}}, \quad (1)$$

где  $\rho_{\text{ч}}$  – плотность частиц пыли, кг/м<sup>3</sup>;  $d$  – размер частиц пыли, мкм.

Общая масса всех частиц:

$$\sum_{i=0}^n m_{\text{общ}} = \frac{\pi \cdot d_1^3}{6} \cdot \rho_{\text{ч}} + \dots + \frac{\pi \cdot d_n^3}{6} \cdot \rho_{\text{ч}} = \frac{\pi}{6} \cdot \rho_{\text{ч}} \cdot (d_1^3 + \dots + d_n^3) \quad (2)$$

Процентное содержание частиц одной фракции по массе вычисляется по формуле (например, для фракции от 0 до 1,6 мкм):

$$P_{0-1,6} = \frac{\sum_{l=0}^{1,5} m}{\sum_{l=0}^n m_{\text{общ}}} \cdot 100\%, \quad (3)$$

где  $\sum_{l=0}^{1,5} m$  – масса частиц, находящихся во фракции от 0 до 1,6 мкм, вычисляется по формуле:

$$\sum_0^{1,5} m = \frac{\pi}{6} \cdot \rho_{\text{ч}} \cdot (d_{0,1}^3 + \dots + d_{1,5}^3), \quad (4)$$

где  $d_{0,1}$  – частица пыли, размером 0,1 мкм;  $d_{1,5}$  – частица пыли, размером 1,5 мкм.

Подставляем полученные значения формул (2) и (4) в формулу (3), в результате получим формулу для определения процентного содержания частиц по массе во фракции от 0 до 1,6 мкм:

$$P_{0-1,6} = \frac{\frac{\pi}{6} \cdot \rho_{\text{ч}} \cdot (d_{0,1}^3 + \dots + d_{1,5}^3)}{\frac{\pi}{6} \cdot \rho_{\text{ч}} \cdot (d_{0,1}^3 + \dots + d_n^3)} \cdot 100\% = \frac{d_{0,1}^3 + \dots + d_{1,5}^3}{d_{0,1}^3 + \dots + d_n^3} \cdot 100\% = \frac{\sum_{l=0}^{1,5} d^3}{\sum_{l=0}^n d^3} \cdot 100\%, \quad (5)$$

16. Расчёт массы частиц на границах фракции представить в виде таблице 4.

Таблица 4 – Масса частиц на границах фракций

Диапазон	$d_{x-y}$	$n$	$d^3_{x-y}$	$n \cdot d^3$
0 – 1,6				
		$\Sigma n_{0-1,5} =$		$\sum_{l=0}^{1,5} d^3$
1,6 – 2,5				
		$\Sigma n_{1,6-2,4} =$		$\sum_{l=1,6}^{2,4} d^3$
25 – 40				
		$\Sigma n_{25-40} =$		$\sum_{l=25}^{40} d^3$
		$\Sigma n_{0-40} =$		$\sum_{l=0}^{40} d^3$

Примечание:  $d_{x-y}$  – диаметр частицы во фракции;  $n$  – количество частиц во фракции.

17. Результаты расчета занести в таблицу 5.

Таблица 5 – Результаты расчета

Размеры частиц на границах фракций $d$ , мкм	Фракции, % от общей массы частиц
0 – 1,6	...
1,6 – 2,5	...
2,5 – 4	
4 – 6,3	
6,3 – 10	
10 – 16	
16 – 25	
25 – 40	

### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ.

1. Понятие дисперсности.
2. Основные методы определения дисперсного состава.
3. Основные элементы микроскопа.
4. Назначение программного обеспечения TourView.
5. Порядок выполнения работы.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.

1. Юшин, В.В. Физико-химические свойства пылей [Текст]: методические указания / Юго-Зап. гос. ун-т; сост.: В.В. Юшин. Курск, 2012. 14 с.: табл. 5. Библиогр. с.: 14.
2. Беспалова, Ж.И. Коллоидная химия. Поверхностные явления и дисперсные системы: Кинетические и оптические свойства дисперсных систем. Методы их исследования [Текст]: учеб. пособие / Ж.И. Беспалова. – Новочеркасск: ЮРГПУ (НПИ). 2014.– 88 с.
3. Указания по эксплуатации levenhuk-625-670-d670 [Электронный ресурс]. URL: <https://docviewer.yandex.ru/view/986279849>.

## **МИНОБРНАУКИ РОССИИ**

Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования  
«Юго-Западный государственный университет»  
(ЮЗГУ)

Кафедра охраны труда и окружающей среды



## **РАСЧЕТ ВОЗДУШНЫХ ФИЛЬТРОВ**

Методические указания к проведению практических занятий по дисциплинам «Расчет и проектирование систем обеспечения безопасности», «Перспективные технологии защиты окружающей среды», «Системы защиты воздушной среды» для студентов всех специальностей и направлений подготовки

УДК 614.71

Составители: В.В. Юшин

Рецензент

Кандидат технических наук, доцент Г.П. Тимофеев

**Расчет воздушных фильтров:** методические указания к проведению практических занятий по дисциплинам «Расчет и проектирование систем обеспечения безопасности», «Перспективные технологии защиты окружающей среды», «Системы защиты воздушной среды» / Юго-Зап. гос. ун-т; сост.: В.В. Юшин Курск, 2021. 9 с.

Излагается методика расчета фильтров для очистки наружного или рециркуляционного воздуха.

Работа предназначена для студентов всех специальностей и направлений подготовки.

Текст печатается в авторской редакции

Подписано в печать 06.09.2021. Формат 60x84 1/16.  
Усл. печ. л. 0,52. Уч.-изд.л. 0,47. Тираж 30 экз. Заказ 53 . Бесплатно.  
Юго-Западный государственный университет.  
305040, г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94.

**Цель занятия:** изучить конструкцию и методику расчета фильтров для очистки наружного или рециркуляционного воздуха.

## ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Для очистки наружного или рециркуляционного воздуха наибольшее применение находят фильтры ячеякового типа ФяРБ, ФяВБ, ФяПБ, ФяУБ. Фильтры работоспособны при эксплуатации в окружающей среде и с фильтруемыми газопаровоздушными смесями с температурой от  $-40^{\circ}\text{C}$  до  $40^{\circ}\text{C}$ , а также не содержащими агрессивных газов и паров. Фильтр (рисунок 1) состоит из установочной рамы, в которой помощью четырёх прижимов закреплена ячейка с уложенным фильтрующим слоем (материалом).

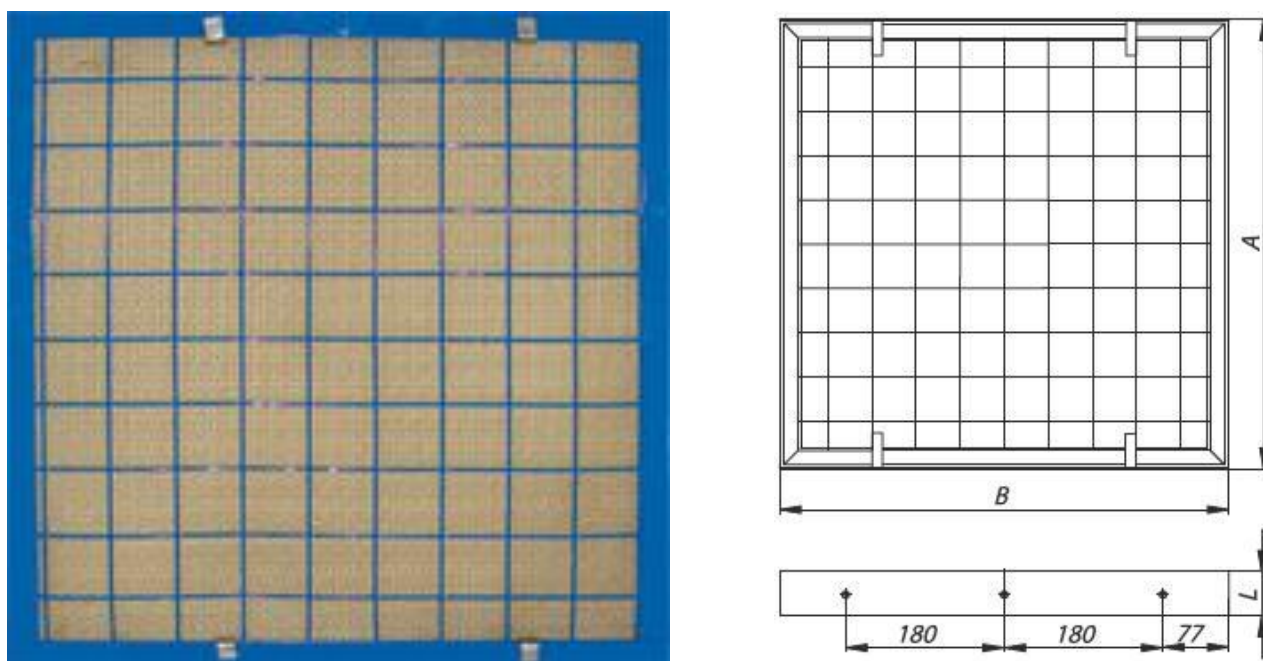


Рисунок 1 – Общий вид фильтра Фя

Аэродинамическое сопротивление фильтров контролируется при помощи микроманометров. При достижении перепада давления величины, указанной в проекте, или выбранной исходя из располагаемого давления в системе, фильтры необходимо заменить (регенерировать). Регенерации можно подвергнуть только фильтры ФяРБ и ФяВБ. Для этого необходимо промыть извлеченные ячейки теплым



раствором 10% раствором каустической соды. Фильтрующий материал фильтров ФяУБ и ФяПБ регенерации не подлежит и заменяется новым.

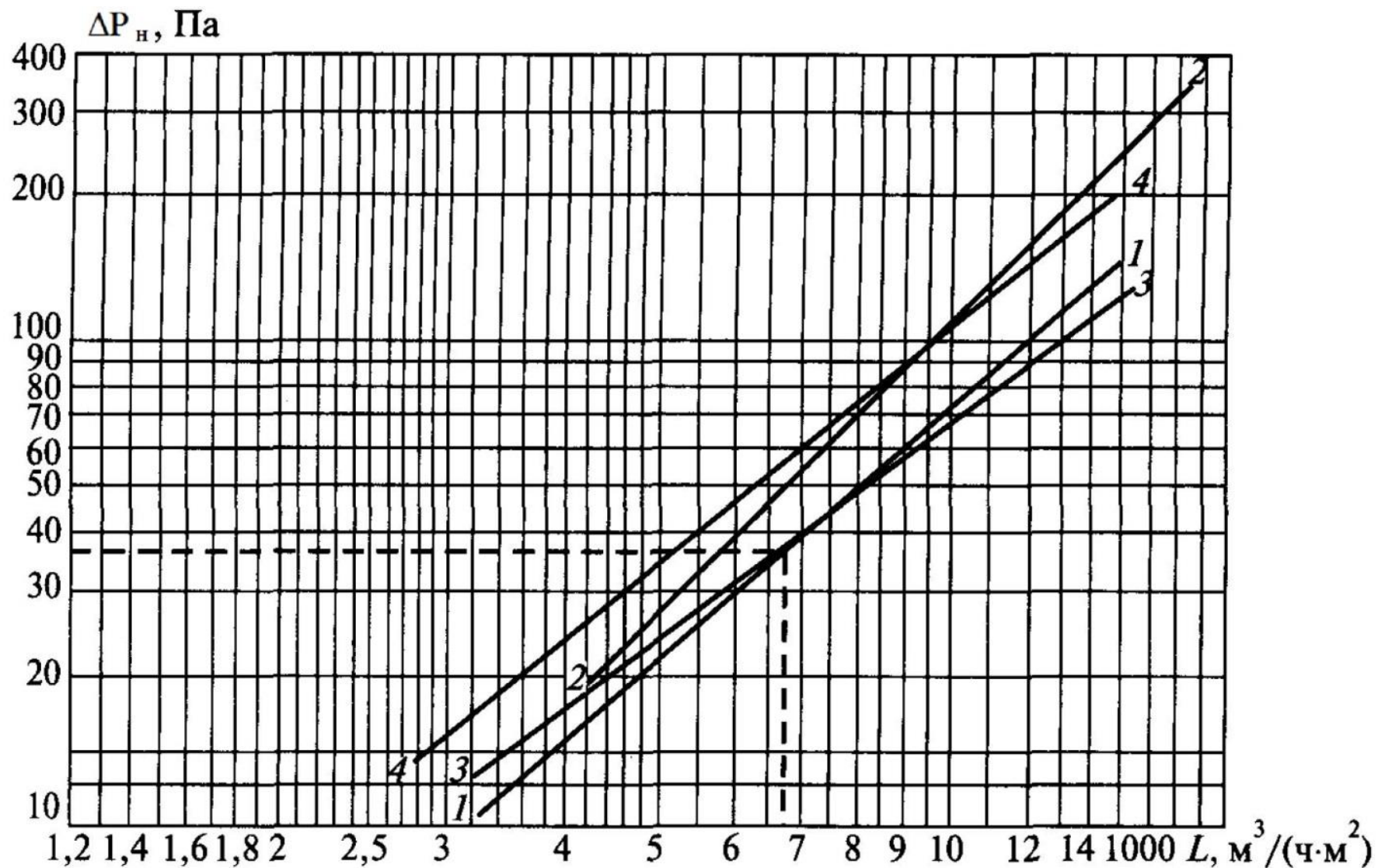
Основные технические характеристики фильтров представлены в таблице 1.

Таблица 1 - Технические характеристики фильтров ФяРБ, ФяВБ, ФяПБ, ФяУБ

Параметры	ФяРБ	ФяВБ	ФяПБ	ФяУБ
Номинальная пропускная способность, м <sup>3</sup> /ч	1540	1540	1540	1540
Номинальная нагрузка, м <sup>3</sup> /ч*м <sup>2</sup>	7000	7000	7000	7000
Начальное сопротивление при номинальной пропускной способности, Па	50	60	60	40
Площадь рабочего сечения, м <sup>2</sup>	0,22	0,22	0,22	0,22
Класс фильтра по ГОСТ Р 51251-99 EN 779	G3	G3	G3	G3
Рекомендуемое конечное сопротивление, Па	150	150	150	130
Габаритные размеры	мм, не более			
высота А	514	514	514	514
ширина В	514	514	514	514
глубина L	50 (32)	32	32	32
Тип фильтрующего материала	Металлические сетки	Винил-пластиковые сетки	Пенополиуретан	Стекловолокно
Масса, кг, не более	6,0	4,2	3,4	2,8

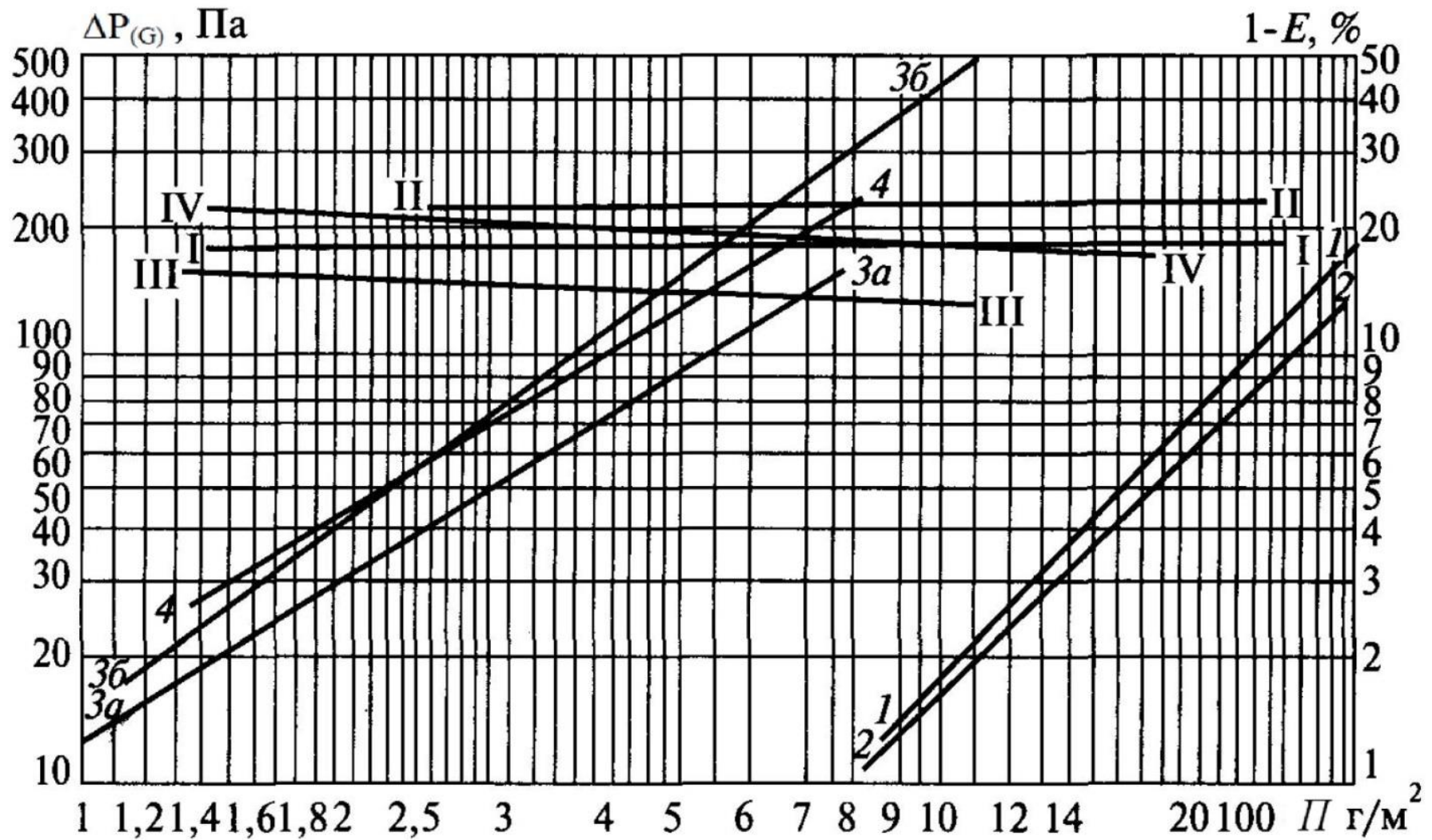
Фильтры для очистки наружного или рециркуляционного воздуха выбирают с учетом начальной запыленности воздуха и требуемой эффективности очистки. При этом учитываются такие параметры, как начальное аэродинамическое сопротивление фильтра и его изменение при запылении.

Зависимость начального сопротивления  $\Delta P_H$  от воздушной нагрузки  $L$  для некоторых типов фильтров представлена на рисунке 2. На рисунке 3 приведены пылевые характеристики тех же фильтров. Линиями, обозначенными цифрами, показаны зависимости повышения сопротивления фильтра  $\Delta P_{(G)}$  по сравнению с начальным  $\Delta P_H$  от массы уловленной в нем пыли. Полное сопротивление фильтра определяется в виде суммы  $\Delta P_H + \Delta P_{(G)}$ .



1 – фильтр ФяРБ; 2 – фильтр ФяВБ; 3 – фильтр ФяУК; 4 – фильтр ФяПБ

Рисунок 2 - Аэродинамические характеристики фильтров и фильтрующих материалов



1 – фильтр ФяРБ при  $Z = 7000 \text{ м}^3/(\text{ч}\cdot\text{м}^2)$ ; 2 – фильтр ФяВБ при  $Z = 7000 \text{ м}^3/(\text{ч}\cdot\text{м}^2)$ ; 3а – фильтр ФяУК при  $Z = 7000 \text{ м}^3/(\text{ч}\cdot\text{м}^2)$ ; 3, – фильтр ФяУК при  $Z = 10000 \text{ м}^3/(\text{ч}\cdot\text{м}^2)$ ; 4 – фильтр ФяПБ при  $Z = 7000 \text{ м}^3/(\text{ч}\cdot\text{м}^2)$ .

Рисунок 3 - Пылевая характеристика фильтра и фильтрующих материалов

Решение задачи по определению размеров фильтра и времени его работы до регенерации проводится в следующей последовательности.

При известной производительности фильтра по воздуху и его номинальной воздушной нагрузке определяется требуемая поверхность рабочего сечения по формуле

$$F_{\text{трф}} = \frac{V}{L_{\text{н}}} (\text{м}^2), \quad (1)$$

где  $V$  – количество воздуха, проходящего через фильтр,  $\text{м}^3/\text{ч}$ ;

$L_{\text{н}}$  – номинальная воздушная нагрузка на фильтр,  $\text{м}^3/(\text{м}^2 \text{ ч})$ .

При использовании ячейковых фильтров с известными размерами ячеек необходимо определить их число  $n_{\text{ф}}$  и соответственно реальную площадь сечения для прохода воздуха  $F_{\text{трф}}$  по формуле

$$n_{\text{ф}} = \frac{F_{\text{трф}}}{f_{\text{яч}}}, \quad (2)$$

где  $f_{\text{яч}}$  – площадь рабочего сечения ячейкового фильтра,  $\text{м}^2$ . Согласно техническим данным фильтров  $f_{\text{яч}}$ , площадь рабочего сечения ячейки составляет  $0,22 \text{ м}^2$  (таблица 1). Полученное значение  $n$  округляют до единиц в большую сторону.

Зная число ячеек, находят реальную площадь сечения фильтра и реальную воздушную нагрузку:

$$F_{\text{реал ф}} = f_{\text{яч}} \cdot n (\text{м}^2) \quad (3)$$

$$L_{\text{реал ф}} = \frac{V}{F_{\text{реал ф}}} (\text{м}^3/\text{м}^2 \text{ ч}) \quad (4)$$

По реальной воздушной нагрузке, используя аэродинамическую характеристику выбранного типа фильтра, по рисунку 2 определяют величину начального сопротивления фильтра  $\Delta P_{\text{н}}$  (Па). По соответствующей линии, характеризующей пылевую характеристику фильтра (рисунок 3), определяют расчетную пылеемкость фильтра  $\Pi$  ( $\text{г}/\text{м}^2$ ).

При этом принимается условие, что дополнительное увеличение сопротивления  $\Delta P_{(\text{Г})}$  фильтра ограничивается разностью между располагаемым напором вентилятора  $\Delta P_{\text{вент}}$  и начальным сопротивлением фильтра  $\Delta P_{\text{н}}$ :

$$\Delta P_{(\text{Г})} = \Delta P_{\text{вент}} - \Delta P_{\text{н}} \quad (5)$$

Максимально допустимое количество пыли,  $G_{\text{н}}$  которое может быть задержано фильтром при соблюдении указанных условий, определяется по формуле

$$G_{\text{н}} = \Pi * F_{\text{реал ф}} (\text{Г}). \quad (6)$$

Количество пыли, оседающей на фильтре за сутки работы при-

точной системы вентиляции, будет равно:

$$g_{н/сут} = c_{н} \cdot 10^{-3} \cdot V \cdot \Delta t \cdot \eta \cdot 10^{-2} \text{ (г/сут)}, \quad (7)$$

где  $c_{н}$  – начальная концентрация пыли в воздухе, мг/м<sup>3</sup>;

$\Delta t$  – количество часов работы вентиляционной системы за сутки, ч/сут;

$\eta$  – эффективность очистки воздуха, %.

Для принятого типа фильтра эффективность очистки согласно техническим характеристикам составляет 80 %.

Продолжительность работы фильтра до регенерации:

$$N = \frac{G_{н}}{g_{н/сут}} \text{ (сут)}. \quad (8)$$

Полученное значение  $N$  округляют до единиц в сторону уменьшения.

### ЗАДАНИЕ.

Рассчитать площадь сечения фильтра и время его работы до регенерации.

#### Варианты заданий

№ варианта	Тип фильтра	Воздухопроизводительность $V$ , м <sup>3</sup> /ч	Располагаемое давление $\Delta P_{вент}$ , Па	Количество часов работы в сутки $\Delta t$ , ч/сут	Начальная концентрация пыли в воздухе $c_{н}$ , мг/м <sup>3</sup>
1	ФяВБ	3600	120	12	1,0
2		4200	130	12	0,9
3		5000	140	16	0,8
4		6000	150	16	0,7
5		7000	120	12	1,1
6	ФяПБ	3600	120	16	1,0
7		4200	130	12	0,9
8		5000	140	16	0,8
9		6000	150	12	0,7
10		7000	120	16	1,1
11	ФяРБ	3600	120	16	1,0
12		4200	130	12	0,9
13		5000	140	12	0,8
14		6000	150	16	0,7
15		7000	120	16	0,6
16	ФяУК	3600	120	16	0,8
17		4200	130	16	0,7
18		5000	140	12	0,6
19		6000	150	12	0,5
20		7000	120	12	1,0

## **КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ.**

1. Назначение ячеяковых фильтров.
2. Конструкция ячеяковых фильтров
3. Технические характеристики ячеяковых фильтров.
4. Регенерация ячеяковых фильтров.
5. Порядок расчета ячеяковых фильтров.

## **СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ.**

1. Расчет и проектирование природоохранных систем : практикум / А.М. Асонов. – Екатеринбург : УрГУПС, 2015. – 50 с.
2. Техника и технология защиты воздушной среды: Учеб. пособие для вузов/ В.В. Юшин, В.М. Попов, П.П. Кукин и др. М.: высш. шк., 2005. 391 с.
3. Алиев Г.М.–А. Техника пылеулавливания и очистки промышленных газов. М.: Металлургия, 1986. 543 с.

## **МИНОБРНАУКИ РОССИИ**

Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования  
«Юго-Западный государственный университет»  
(ЮЗГУ)

Кафедра охраны труда и окружающей среды



### **РАСЧЕТ ЖИДКОСТНЫХ НЕЙТРАЛИЗАТОРОВ ОТРАБОТАВШИХ ГАЗОВ**

Методические указания к проведению практических занятий по дисциплинам «Расчет и проектирование систем обеспечения безопасности», «Перспективные технологии защиты окружающей среды», «Системы защиты воздушной среды» для студентов всех специальностей и направлений подготовки

Курск 2021

УДК 614.71

Составители: В.В. Юшин

Рецензент

Кандидат технических наук, доцент Г.П. Тимофеев

**Расчет жидкостных нейтрализаторов отработавших газов:** методические указания к проведению практических занятий по дисциплинам «Расчет и проектирование систем обеспечения безопасности», «Перспективные технологии защиты окружающей среды», «Системы защиты воздушной среды» / Юго-Зап. гос. ун-т; сост.: В.В. Юшин Курск, 2021. 9 с.

Излагается методика расчета жидкостных нейтрализаторов отработавших газов автотранспортных средств.

Работа предназначена для студентов всех специальностей и направлений подготовки.

Текст печатается в авторской редакции

Подписано в печать 06.09.2021. Формат 60x84 1/16.

Усл. печ. л. 0,52. Уч.-изд.л. 0,48. Тираж 30 экз. Заказ 53. Бесплатно.

Юго-Западный государственный университет.

305040, г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94.



**Цель занятия:** изучить конструкцию и методику расчета жидкостных нейтрализаторов отработавших газов автотранспортных средств.

## ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Одним из основных источников негативного воздействия на окружающую среду и здоровье населения является автомобильный транспорт, на долю которого приходится более 50 % антропогенных выбросов загрязняющих веществ в атмосферу. Вредные и токсичные вещества, содержащиеся в отработавших газах двигателей, в зависимости от механизма их образования можно разделить на три группы.

а) углеродсодержащие вещества - продукты полного и неполного сгорания топлив: ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$ , углеводороды, в том числе полициклические ароматические, сажа);

б) вещества, механизм образования которых непосредственно не связан с процессом сгорания топлива (оксиды азота - по термическому механизму);

в) вещества, выброс которых связан с примесями, содержащимися в топливе (соединения серы, свинца, других тяжелых металлов), воздухе (кварцевая пыль, аэрозоли), а также образующимися в процессе износа деталей (оксиды металлов).

В состав отработавших газов (ОГ) автотранспорта входит 200–300 газообразных, жидких и твердых химических соединений. Кроме нормируемых вредных (загрязняющих) веществ (таблица 1), в состав отработавших газов входит значительное количество канцерогенных соединений (бензол ( $\text{C}_6\text{H}_6$ ), бенз(а)пирен ( $\text{C}_{20}\text{H}_{12}$ ), формальдегид ( $\text{CH}_2\text{O}$ ), ацетальдегид ( $\text{CH}_3\text{COH}$ ), диоксины и полиядерные ароматические углеводороды (ПАУ) – N-нитрозоамины). Компоненты ОГ инициируют 1700–2700 разновидностей онкологических заболеваний (данные Агентства по охране окружающей среды) и являются причиной 6 % смертей (данные ВОЗ).

Для очистки выбросов отработавших газов на автотранспортных средствах устанавливают жидкостные и каталитические нейтрализаторы, сажевые фильтры.

Таблица 1 -Содержание и нормы вредных (загрязняющих) веществ в отработавших газах ДВС

Вещество	Объемная доля		Экологический стандарт для легковых автомобилей Евро-6 (в г/км)	
	Бензиновый двигатель	Дизельный двигатель	Бензиновый двигатель	Дизельный двигатель
CO <sub>2</sub>	от 5% до 12,5%	от 1% до 12%	-	-
CO	от 0,1% до 10%	от 0,01% до 0,5%	1	0,5
NO <sub>x</sub>	от 0,05% до 0,5%	от 0,1% до 1,0%	0,06	0,08
CH	от 0,2% до 2,0%	от 0,01% до 0,5%	0,1	-
Сажа	До 100 мг/м <sup>3</sup>	До 20000 мг/м <sup>3</sup>	0,005	0,005
SO <sub>2</sub>	0,003 мг/м <sup>3</sup>	0,015 мг/м <sup>3</sup>	-	-

Принцип действия жидкостного нейтрализатора основан на растворении или химическом взаимодействии компонентов ОГ, пропускаемых через воду, водный раствор сульфита натрия, водный раствор двууглекислой соды или другую жидкость. Наиболее эффективно использование 10% водного раствора сульфита натрия с добавкой 0,5% гидрохинона.

Очистка с помощью жидкостных нейтрализаторов (ЖН) включает в себя улавливание мелкодисперсных частиц, абсорбцию, конденсацию и фильтрацию.

Благодаря жидкостным нейтрализаторам в ОГ уменьшается содержание оксидов азота (до 80 %), альдегидов (до 50 %), сажи (60-80 %), бенз(а)пирена, снижается интенсивность запаха. СО и СпНм практически не улавливаются, что определяет использование жидкостных нейтрализаторов только для дизельных ДВС.

Большинство ЖН относится к типу барботажных, в которые ОГ про-дуваются через слой нейтрализующего раствора. Их применяют, в част-ности, на подземных автосамосвалах МоАЗ-6401-9598, подземных бульдо-зерах Д-108 и бульдозерах Д-535 и другом транспорте.

Во всех конструкциях ЖН происходит брызгоунос. В большинстве случаев для сепарации капель из ОГ используют различные виды насадок, которые устанавливают на выходе ОГ из ЖН в виде слоя толщиной 80-200 мм и более.

На рисунке 1 представлена схема жидкостного нейтрализатора НТЖ-2, применяемого на автосамосвале МАЗ-205 с двухтактным дизельным ДВС.

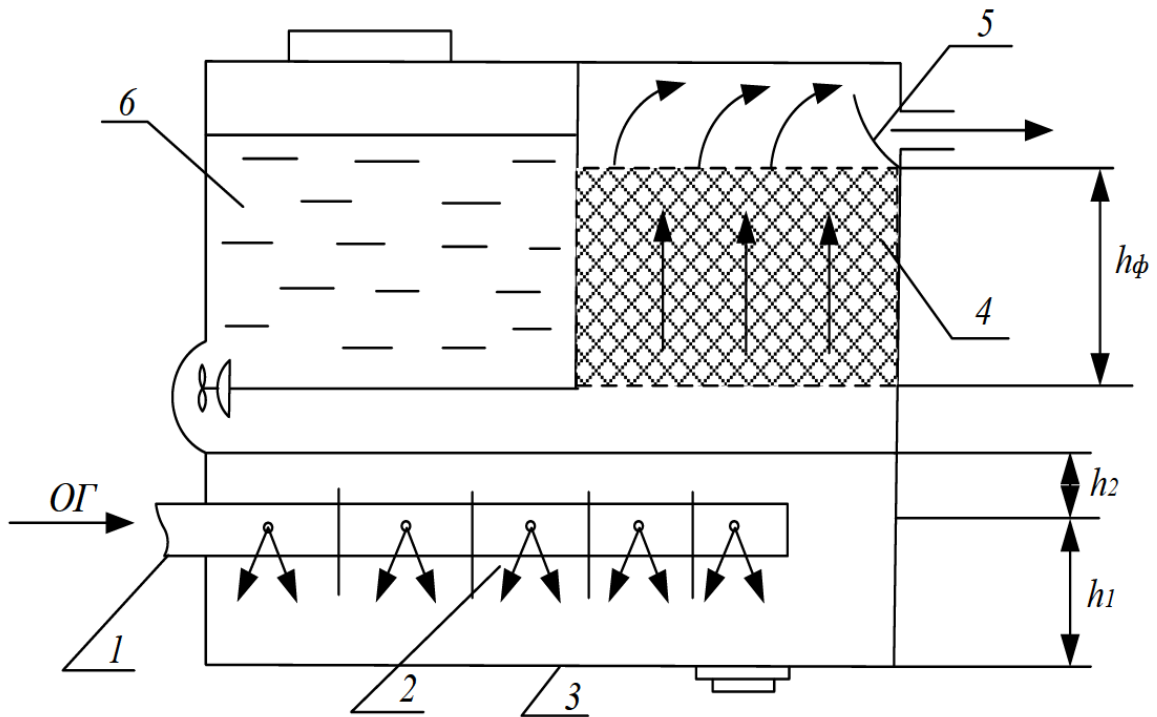


Рисунок 1 - Схема жидкостного нейтрализатора

ОГ поступают в нейтрализатор по трубе 1 и через коллектор 2 попадают в бак 3, где вступают в реакцию с рабочей жидкостью. Очищенные газы проходят через фильтр 4, сепаратор 5 и выбрасываются в атмосферу. По мере испарения жидкость доливают в рабочий бак из дополнительного бака 6.

Основные преимущества жидкостных нейтрализаторов:

- поглощение до 80% окислов азота;
- не требуется времени для выхода на рабочий режим после пуска холодного двигателя;
- охлаждение ОГ перед выпуском в атмосферу.

Недостатки:

- значительные габариты и масса;
- необходимость частой смены рабочего раствора и трудоемкость очисток внутренних полостей от налетов смол и сажи;
- инертность по отношению к продуктам неполного сгорания топлива (СО и СН);
- интенсивное испарение жидкости;
- трудности эксплуатации при отрицательных температурах;
- коррозия деталей и узлов.

Однако, несмотря на отмеченные недостатки, использование жидкостных нейтрализаторов в комбинированных системах очист-

ки может быть рациональным, особенно для установок, отрабатывающие газы которых должны иметь низкую температуру при поступлении в атмосферу (в шахтах, в закрытых помещениях). За рубежом ЖН, в основном, серийно выпускаются для машин с дизельным приводом, предназначенных для эксплуатации в подземных условиях.

### РАСЧЕТ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ЖИДКОСТНОГО НЕЙТРАЛИЗАТОРА

Расчет заключается в определении основных конструктивных размеров, необходимого количества раствора для нейтрализатора ОГ и проводится в следующей последовательности.

1. Определить объемный расход ОГ, м<sup>3</sup>/ч при заданной температуре выброса

$$Q' = Q_{\text{ОГ}} \cdot (1 + \alpha \cdot t_2), \quad (1)$$

где  $Q_{\text{ОГ}}$  – объемный расход ОГ через двигатель при температуре 0 °С, м<sup>3</sup>/ч;  $\alpha$  – коэффициент объемного расширения газов ( $\alpha = 1/273 = 0,00366$ );  $t_2$  – температура ОГ на выходе из нейтрализатора (в расчетах принимается равной 50 °С).

2. Определить количество жидкости, кг, уносимой ОГ в течение часа

$$m = \frac{Q' \cdot (d_2 - d_1)}{1000},$$

где  $d_1$  – влагосодержание воздуха, поступающего в двигатель, г/м<sup>3</sup>;  $d_2$  – влагосодержание ОГ при температуре  $t_2$  в условиях, близких к насыщению. В расчетах принять  $d_2 = 64 \text{ г/м}^3$ .

Значение  $d_1$  определяется по формуле

$$d_1 = \frac{d_{\text{max}} \cdot \varphi_1}{100},$$

где  $\varphi_1$  – относительная влажность воздуха, %,  $d_{\text{max}}$  – максимальная влажность при заданной температуре, поступающего в двигатель  $t_1$  (таблица 2).

3. Определить площадь поверхности жидкости в нейтрализаторе  $S$ .

Площадь поверхности жидкости в нейтрализаторе определяется из условия необходимого времени контакта газа с раствором  $\tau_{\text{кон}} = 0,8 - 1,0 \text{ с}$ .

Таблица 2 - Максимальная влажность воздуха при различной температуре

Температура, °С	Масса водяных паров, г/м <sup>3</sup>	Температура, °С	Масса водяных паров, г/м <sup>3</sup>
-15	1,571	20	17,164
-10	2,300	21	18,204
-9	2,488	22	19,286
-8	2,674	23	20,450
-7	3,883	24	21,604
-6	3,111	25	22,867
-5	3,360	26	24,190
-4	3,614	27	25,582
-3	3,902	28	27,004
-2	4,194	29	28,529
0	4,522	30	30,139
-1	4,874	31	31,890
1	5,210	32	33,640
2	5,574	33	35,480
3	5,963	34	37,400
4	7,310	35	39,410
5	6,791	36	41,520
6	6,998	37	43,710
7	7,892	38	46
8	8,017	39	48,400
9	8,574	40	50,910
10	9,165	41	53,200
11	9,792	42	56,260
12	10,457	43	59,090
13	11,162	44	62,050
14	11,908	45	65,140
15	12,699	46	68,360
16	13,536	47	71,730
17	14,421	48	75,220
18	15,357	49	78,860
19	16,364	50	82,630

Путь контактирования ОГ с раствором принимается равным сумме высоты фильтра (рис. 1) и толщины слоя жидкости от нижней кромки коллектора до зеркала жидкости (обычно  $H \approx 0,5$  м).

Тогда скорость ОГ  $V$ , м/с в нейтрализаторе

$$v = H/\tau_{\text{кон}}$$

Площадь поверхности жидкости  $S$ ,  $\text{м}^2$  определяется по формуле

$$S = \frac{Q_{\text{ог}}(1 + 0,00366 \cdot t_{\text{cp}})}{3600 \cdot v \cdot \Pi},$$

где  $V$  – скорость ОГ в нейтрализаторе, м/с;  $\Pi$  – пористость фильтра (в расчетах принять  $\Pi = 0,8$ );  $t_{\text{cp}}$  – средняя температура ОГ, °С, определяется по формуле

$$t_{\text{cp}} = (t_{\text{ог}} + t_2)/2.$$

В расчетах принять  $t_{\text{ог}} = 350$  °С.

4. Определить минимально допустимое количество раствора в нейтрализаторе  $m_{\text{min}}$ , кг, которое зависит от размеров и конструкции нейтрализатора и рассчитывается по формуле

$$m_{\text{min}} = \rho \cdot S \cdot (h_1 + h_2),$$

где  $\rho$  – плотность раствора,  $\text{кг}/\text{м}^3$  (в расчете принять  $\rho = 1\,060$   $\text{кг}/\text{м}^3$ );  $h_1$  – расстояние от дна нейтрализатора до верхней кромки трубок коллектора (см. рисунок 1). Конструктивно принимается  $h_1 \approx 0,05$  м;  $h_2$  – высота раствора над трубками коллектора (изменяется в пределах  $h_2 = 0,05 - 0,15$  м).

5. Общее количество раствора  $m_{\Sigma}$ , кг, для работы двигателя в течение времени  $\tau$  находится по формуле

$$m_{\Sigma} = m \cdot \tau + m_{\text{min}},$$

где  $m$  – масса жидкости, уносимая с ОГ, кг;  $\tau$  – время работы двигателя, час;  $m_{\text{min}}$  – минимально допустимое количество жидкости в нейтрализаторе, кг.

6. Рассчитать количество выделяющихся альдегидов (по ацетальдегиду) за время работы двигателя, кг

$$M_A = C_A \cdot Q_{\text{ог}} \cdot \tau \cdot 10^{-3},$$

где  $M_A$  – количество выделяющихся альдегидов за время работы двигателя, кг;  $C_A$  – концентрация альдегидов в ОГ ( $C_A = 0,02 - 0,2$   $\text{г}/\text{нм}^3$ );  $Q_{\text{ог}}$  – объем ОГ,  $\text{нм}^3/\text{ч}$ .

7. Исходя из ориентировочного расхода реагентов 2 кг на 1 кг альдегидов, определить количество реагента ( $\text{Na}_2\text{SO}_3$ ,  $\text{NaHCO}_3$ ) в твердом виде, необходимое для обезвреживания альдегидов, кг:

$$M_P = 2M_A.$$

**Задание.** Рассчитать общее количество раствора в жидкостном нейтрализаторе и необходимое количество реагента.

Вариант	Объемный расход ОГ $Q_{ог}$ при 0°C, н. м <sup>3</sup> /ч	Температура воздуха, поступающего в двигатель, $t_L$ , °C	Относительная влажность воздуха $\varphi_1$ , %	Время работы двигателя $\tau$ , ч
1	320	10	60	6
2	400	15	60	7
3	420	16	60	8
4	450	14	60	10
5	470	12	60	12
6	500	14	60	14
7	300	10	40	4
8	300	12	50	6
9	300	14	50	8
10	300	16	40	10
11	300	18	60	12
12	300	20	55	14
13	350	8	40	2
14	350	10	50	4
15	350	12	60	6
16	350	16	60	8
17	350	20	35	10
18	350	25	55	12
19	200	-5	50	4
20	250	-10	50	6

### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ.

1. Состав отработавших газов автомобилей.
2. Принцип действия жидкостного нейтрализатора.
3. Область применения жидкостных нейтрализаторов.
4. Конструкция типового жидкостного нейтрализатора.
5. Порядок расчета основных параметров ЖН

### СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ.

1. Экология Курского края: учебное пособие / Белякова О.И., Преликова Е.А., Тимофеев Г.П., Юшин В.В., Курск: Изд-во ЗАО «Университетская книга», 2018. - 179 с.
2. Защита атмосферы : практикум / Л. П. Майорова, В. П. Тищенко, А. А. Черенцова ; под общ. ред. Л. П. Майоровой. – Хабаровск : Изд-во Тихоокеан. гос. ун-та, 2014. – 115 с.
3. Луканин, В.Н. Промышленно-транспортная экология [Текст] / В.Н. Луканин, Ю.В. Трофименко. - М.: Высшая школа, 2001. - 273 с.

**МИНОБРНАУКИ РОССИИ**  
Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования  
«Юго-Западный государственный университет»  
(ЮЗГУ)

Кафедра охраны труда и окружающей среды



**РАСЧЕТ ТКАНЕВЫХ ФИЛЬТРОВ С ИМПУЛЬСНОЙ  
ПРОДУВКОЙ**

Методические указания к проведению практических занятий по дисциплинам «Расчет и проектирование систем обеспечения безопасности», «Перспективные технологии защиты окружающей среды», «Системы защиты воздушной среды» для студентов всех специальностей и направлений подготовки

Курск 2021



УДК 614.71

Составители: В.В. Юшин

Рецензент

Кандидат технических наук, доцент Г.П. Тимофеев

**Расчет тканевых фильтров с импульсной продувкой:** методические указания к проведению практических занятий по дисциплинам «Расчет и проектирование систем обеспечения безопасности», «Перспективные технологии защиты окружающей среды», «Системы защиты воздушной среды» / Юго-Зап. гос. ун-т; сост.: В.В. Юшин Курск, 2021. 13 с.

Излагается методика расчета тканевого фильтра с импульсной продувкой.

Работа предназначена для студентов всех специальностей и направлений подготовки.

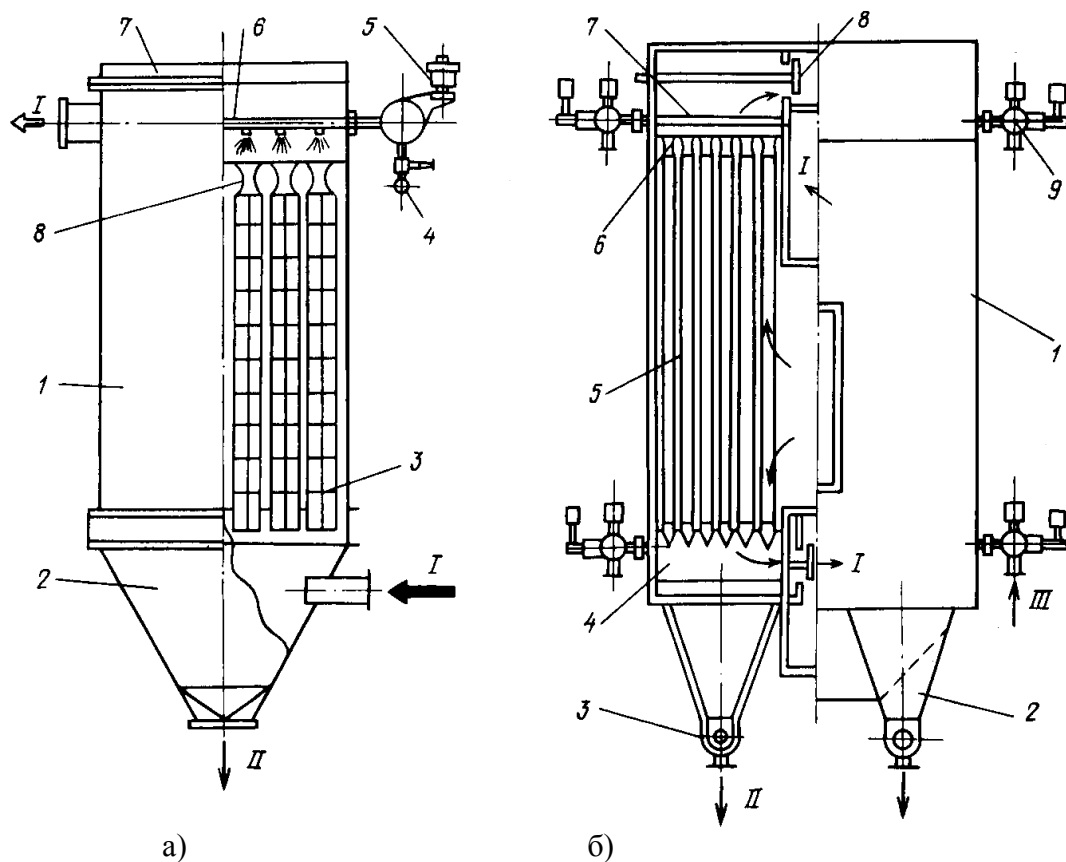
Текст печатается в авторской редакции

Подписано в печать 06.09.2021. Формат 60x84 1/16.  
Усл. печ. л. 0,75. Уч.-изд.л. 0,71. Тираж 30 экз. Заказ 53. Бесплатно.  
Юго-Западный государственный университет.  
305040, г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94.

**Цель занятия:** изучить конструкцию и методику расчета тканевых рукавных фильтров.

## ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Тканевые фильтры являются одним из самых распространенных и перспективных пылеулавливающих устройств. Чаще всего, тканевые фильтры содержат гибкую фильтровальную перегородку, имеющие форму гибких цилиндрических рукавов (рис.1), закрепленных на трубных перегородках в корпусе, оборудованном устройствами для удаления уловленного материала с рукавов и выгрузки его из бункеров. Тканевые фильтры способны улавливать частицы размером от нескольких сотен микрон до субмикронных, что обеспечивается главным образом осажденным пылевым слоем на поверхности фильтра.



а – фильтр ФРКИ: 1 – корпус; 2 – бункер; 3 – рукава; 4 – коллектор сжатого воздуха; 5 – клапанное устройство; 6 – раздающий коллектор; 7 – крышка; 8 – диффузор-сопло; I – газ; II – жидкость;

б – фильтр ФРКДИ: 1 – корпус; 2 – бункер; 3 – шнек; 4 – коллектор чистого газа; 5 – рукав; 6 – диффузор; 7 – раздающий коллектор; 8 – заслонка; 9 – клапан; I – газ; II – пыль; III – сжатый воздух

Рисунок 1 - Рукавные фильтры типа ФРКИ и ФРКДИ

Для регенерации тканевых фильтров используются два основных способа:

1) Встряхивание фильтрующих элементов (механическое, аэродинамическое - путем пульсации или резких изменений направления фильтруемого потока газов, воздействием звуковых колебаний и т.п.)

2) Обратная продувка фильтрующих элементов очищенными газами или воздухом (нагнетание в секцию газов с низким давлением при большом расходе, подсос атмосферного воздуха, струйная локальная продувка каждого рукава или плоского элемента и др.). При этом регенерация не требует прекращения процесса фильтрования, т.е. процесс регенерации может производиться на работающих тканевых фильтрах.

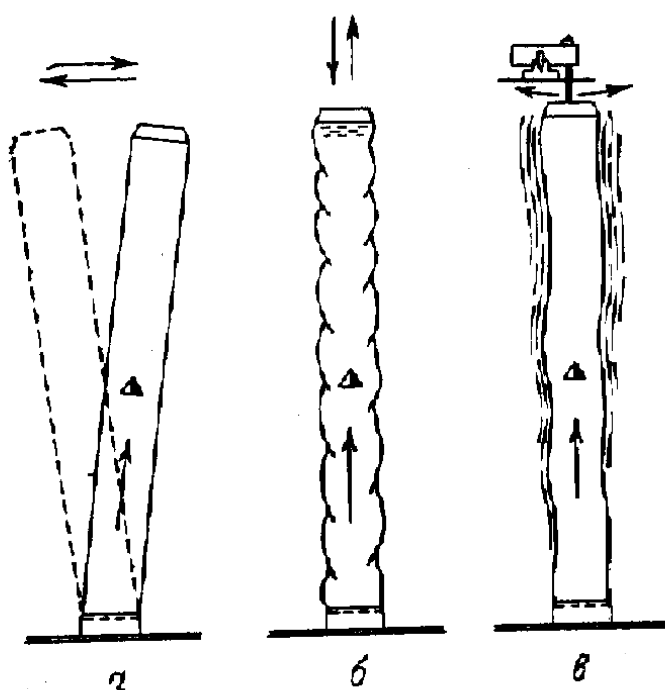


Рисунок 2 - Способы механического встряхивания рукавов: а – встряхивание в горизонтальном направлении; б – ослабление и натяжение рукава в вертикальном направлении; в - вибрация

Операция встряхивания рукавов в продольном направлении заключается в поднятии штанги подвеса на 7 – 10 см и последующем свободном падении ее вместе с рукавами на подушки, которые амортизируют удар. Подъем и сброс повторяется непрерывно 5 – 15 раз в зависимости от свойств пыли. Этот способ в сочетании с обратной продувкой наиболее старый.

Диаметр рукавов, как правило, составляет 0,1 - 0,3 м, а длина - 0,5 – 4,0 м. К фильтрам с механическим встряхивания относятся фильтры РФГ, УРФМ, РФК.

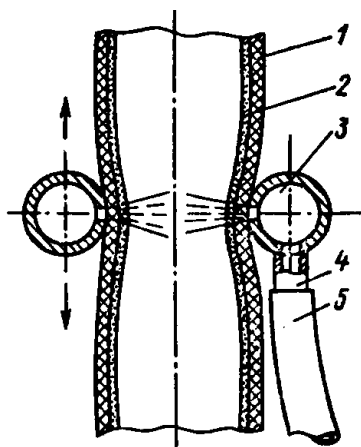
*Механическое встряхивание* (рис. 2) закрепленных на общей раме закрытых сверху рукавов наиболее эффективно в продольном направлении, но при этом сильно изнашиваются рукава, особенно в нижней части. Встряхивание должно быть кратковременным и резким, но не настолько сильным, чтобы вызвать большие механические усилия в ткани. Операция встряхивания рукавов в продольном направлении

Регенерация с помощью *импульсной продувки* (рис. 1) осуществляется путем подачи импульса сжатого воздуха внутрь каждого фильтрующего элемента. В рассматриваемом методе обратная продувка сочетается с механическим воздействием, обеспечивающим деформацию ткани. Такой вид регенерации используется в каркасных рукавных и плоских фильтрах. Металлический каркас рукавов используется во избежание “схлопывания” рукавов. Избыточное давление сжатого воздуха при регенерации составляет 0,4 – 0,8 МПа; длительность импульса - 0,1 – 0,2 с. В качестве фильтрующего материала обычно используют фетры, ибо ткани часто очищаются слишком интенсивно. Расход продувочного сжатого воздуха составляет 0,1-0,2% от количества очищаемых газов. В таких фильтрах нагрузка по газу составляет 1,5-6 м/мин. Одним из основных условий эффективной работы данного типа фильтров является ограниченность геометрических размеров фильтровальных элементов, что связано с эффективной регенерацией по всей длине рукава в условиях, когда энергия импульса при перемещении вдоль рукава постепенно рассеивается. Поэтому диаметр рукавов не превышает 0,135 м, а длина, как правило, составляет 2 – 3 м (лишь в отдельных случаях до 6 м). К фильтрам данного типа относятся ФРКИ и ФРКДИ (рис.1).

*Обратная продувка* без механического встряхивания достигается использованием отдельного вентилятора и применяется для пылей, легко сбрасываемых с ткани. Предпочтительно использовать для продувки очищенный газ, поскольку при этом не увеличивается общий объем газов. Объем продувочного газа лежит в пределах 7 – 10 % по отношению к объему очищаемого газа. Этот способ считается “мягким” и используется в больших фильтрах, оснащенных стеклотканями. Диаметр рукавов фильтров данного типа, как правило, не превышает 0,3 м, а длина - 5 м. Отечественной промышленностью выпускается ряд фильтров с обратной посекционной продувкой – ФРО, ФР, СМЦ. В фильтрах с обратной продувкой, также как и в фильтрах с механическим встряхиванием, используют рукава, выполненные из тканного материала, который является “подложкой” для формирования пылевого слоя, обеспечивающего высокую эффективность очистки газов.

*Обратная струйная продувка* (рис. 3) используется для всех видов фильтровальных элементов (рукава или кассеты, тканые и войлочные материалы). Принцип работы фильтра заключается в следующем. Вдоль рукава вверх и вниз движется полое кольцо, через которое про-

ходит истечение радиальной высокоскоростной струи воздуха с повышенным давлением, выдувающим пыль в направлении обратном фильтрации. Воздух подается в кольцо или в раму с кольцами от высоконапорного вентилятора или газодувки через гибкие шланги. Диаметр рукавов фильтров данного типа, как правило, не превышает 0,3 м, а длина 5 м. К фильтрам с обратной струйной продувкой относится фильтр РФСП.



1 – рукав; 2 – пылевой слой; 3 – кольцевая каретка с отверстиями; 4 – ниппель; 5 – гибкий шланг

Рисунок 3 - Струйная продувка рукавов

### РАСЧЕТ ТКАНЕВОГО ФИЛЬТРА.

Эффективность очистки воздуха в тканевых фильтрах достаточно высока и обычно не рассчитывается.

Разработка и расчет любого фильтра начинается с выбора удельной газовой нагрузки  $v_{\phi}$  (скорости фильтрации), которая представляет собой отношение объема очищаемого газа (воздуха) в единицу времени к площади поверхности фильтрации. Удельная газовая нагрузка измеряется в  $\text{м}^3/(\text{м}^2 \text{ мин})$  или  $\text{м}^3/(\text{м}^2 \text{ ч})$ .

Правильный выбор удельной газовой нагрузки (скорости фильтрации) является непростой задачей. Она должна выбираться исходя из оптимального соотношения между гидравлическим сопротивлением фильтра и занимаемой им площади. При высокой скорости фильтрации увеличиваются гидравлические потери, износ, возникает большая вероятность забивания рукавов пылью, уменьшается эффективность пылеулавливания. В результате возрастают эксплуатационные затраты на фильтр. Выбор неоправданно низких скоростей фильтрации приводит к большим габаритным размерам фильтра и завышенным капитальным затратам.

При выборе величины удельной газовой нагрузки обычно ориентируются на практический опыт эксплуатации тканевых фильтров на промышленных установках (табл.1).

Таблица 1 - Рекомендуемые значения удельной газовой нагрузки в рукавных фильтрах

Класс пыли	Виды пылей	Скорости фильтрации, м/ мин для фильтров		
		со встряхиванием и продувкой	с импульсной продувкой	с обратной продувкой
1	Сажа; кремнезем (белая сажа); возгоны свинца, цинка и другие аналогичные аэрозоли, образующиеся в газовой фазе за счет конденсации и химических реакций; моющие средства; молочный порошок; активированный уголь; цемент от печей	0.45-0.6	0.8-2.0	0.33-0.45
2	Возгоны железа и ферросплавов; литейная пыль; глинозем; цемент от мельниц; возгон карбидных печей; известь; корунд; аммофос и др. удобрения; пластмассы; крахмал	0.6-0.75	1.5-2.5	0.45-0.55
3	Тальк; каменный уголь; пыль от песко- и дробеструйной очистки; летучая зола; пыль керамических производств; сажа (вторичная переработка); пигменты; каолин; известняк	0.7-0.8	2.0-3.5	0.6-0.9
4	Асбест; волокнистые материалы; гипс; перлит; пыли в производстве резины; мука; пыли от шлифовальных процессов	0.8-1.5	2.5-4.5	-
5	Табак; кожевенная пыль; пыль в процессах деревообработки; грубые растительные волокна (пенька, джут и др.)	0.9-2.0	2.5-6.0	-

Удельная газовая нагрузка для выбранного типа фильтра может определяться по следующей формуле:

$$q = q_n \cdot c_1 \cdot c_2 \cdot c_3 \cdot c_4 \cdot c_5,$$

где  $q_n$  — табличное значение удельной газовой нагрузки, зависящее от вида улавливаемой пыли, определяется по табл. 1 как среднее арифметическое из максимального и минимального значений нагрузки;

$c_1$  — коэффициент, характеризующий особенность регенерации фильтрующих элементов;  $c_2$  — коэффициент, учитывающий влияние концентрации пыли на удельную газовую нагрузку (определяется по

рисунку ниже);  $c_3$  - коэффициент, учитывающий влияние дисперсного состава пыли в газе (определяется по данным, приведенным ниже);  $c_4$  - коэффициент, учитывающий влияние температуры газа (определяется по данным, приведенным ниже);  $c_5$  - коэффициент, учитывающий требования к качеству очистки.

Для коэффициента, учитывающего влияние особенностей регенерации фильтровальных элементов, в качестве базового варианта принимается фильтр с импульсной продувкой сжатым воздухом с рукавами из ткани. Для этого аппарата коэффициент  $c_7=1$ . При использовании рукавов из нетканых материалов значение коэффициента может увеличиваться на 5...10%. Для фильтров с регенерацией путем обратной продувки и одновременного встряхивания или покачивания рукавов принимается коэффициент  $c_7=0,7...0,85$ . Меньшее значение принимается для более плотной ткани. При регенерации путем только обратной продувки  $c_7=0,55...0,7$ .

Концентрация пыли (коэффициент  $c_2$ ) сказывается на продолжительности цикла фильтрования. При увеличении концентрации увеличивается частота регенерации и удельная нагрузка должна снижаться. Однако зависимость удельной нагрузки от концентрации пыли не является линейной функцией. Наиболее заметно изменение концентрации проявляет себя в интервале концентраций 1...30г/м<sup>3</sup>. При более высоких значениях усиливается влияние коагуляции частиц пыли, и часть ее в виде агломератов падает в бункер до ее осаждения на фильтровальных элементах.

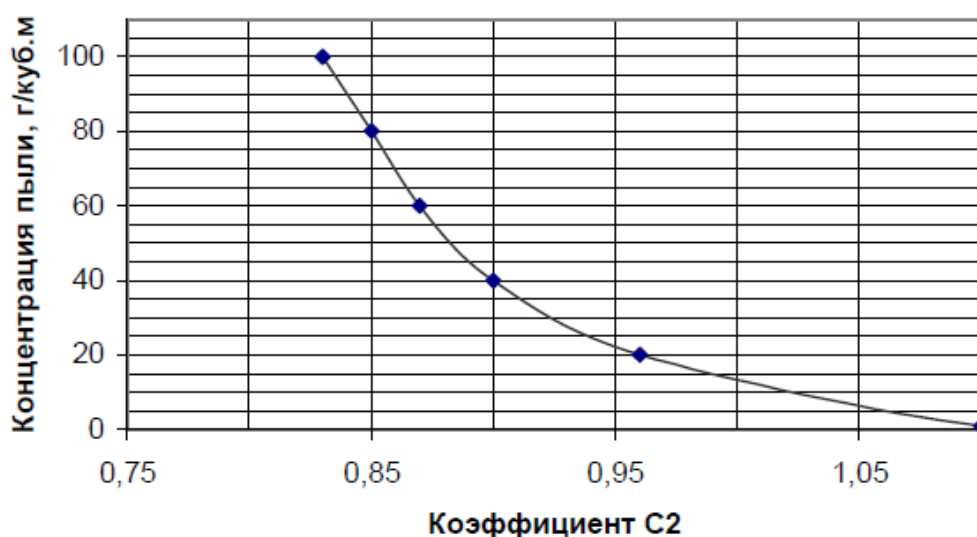


Рисунок 4 - Зависимость коэффициента  $c_2$  от концентрации пыли на входе в фильтр  $c_{вх}$

Значения коэффициента  $c_3$ , учитывающего влияние дисперсного состава пыли, приведены ниже ( $d_m$ - медианный размер частиц):

Зависимость коэффициента  $c_3$  от диаметра частиц

$d_m$ , мкм	<3	3-10	10-50	50-100	>100
$c_3$	0,7-0,9	0,9	1,0	1,1	1,2-1,4

Значения коэффициента  $c_4$ , учитывающего влияние температуры газа, приведены ниже:

Зависимость коэффициента  $c_4$  от температуры газа

$t$ , °C	20	40	60	80	100	120	140	160
$c_4$	1	0,9	0,84	0,78	0,75	0,73	0,72	0,7

Коэффициент  $c_5$  учитывающий требования к качеству очистки, оценивается по концентрации пыли в очищенном газе. При концентрации пыли в отходящих газах  $30 \text{ мг/м}^3$   $c_5=1$ , а при  $10 \text{ мг/м}^3$   $c_5=0,95$ .

После предварительного определения удельной газовой нагрузки осуществляется расчет площади фильтрации тканевого фильтра По общему расходу запыленных газов  $Q$ ,  $\text{м}^3/\text{с}$ , расходу газов  $Q_p$  на регенерацию,  $\text{м}^3/\text{с}$  и удельной газовой нагрузке  $q$   $\text{м}^3/\text{с}$ , допустимой для выбранного типа фильтра, определяют рабочую площадь фильтрации:

$$F_{\phi} = (Q + Q_p) / q, \text{ м}^2$$

Количество газов на регенерацию  $Q_p$  принимают по техническим характеристикам выбранных фильтров.

Если регенерацию производят с отключением секций, то к рабочей площади фильтрации  $F_{\phi}$  прибавляют величину площади фильтрации отключенных секций и находят общую площадь фильтра:

$$F_{\text{общ}} = F_{\phi} + F_p, \text{ м}^2$$

Для фильтров с импульсной и струйной продувкой, в которых отключение секций на регенерацию не требуется, общая площадь поверхности фильтрации  $F_{\text{общ}}$  принимается равной рабочей  $F_{\phi}$ .

По рассчитанной площади поверхности фильтрации  $F_{\text{общ}}$  выбирается ближайшее значение типоразмера фильтра с площадью фильтрации  $F_{\text{факт}}$ . Например, фильтр ФРКИ выпускается со следующими площадями фильтрации 30, 60, 90, 120, 180, 360, 450  $\text{м}^2$ .

Фактическое значение удельной газовой нагрузки определяется по формуле:

$$q = (Q + Q_p) / F_{\text{факт}}$$



Фактическое значение удельной газовой нагрузки должно входить в диапазон допустимых значений, зависящий от вида пыли и от способа регенерации (табл.1).

Гидравлически сбалансированный фильтр обеспечивает высокую эффективность пылеулавливания, поэтому после удельной газовой нагрузки второй важнейшей характеристикой фильтра является его гидравлическое сопротивление, которое складывается из гидравлических потерь при прохождении через входной и выходной патрубки (корпус) и непосредственно через фильтровальную перегородку.

$$\Delta P_{\phi} = \Delta P_{\kappa} + \Delta P_{n},$$

Гидравлическое сопротивление корпуса аппарата определяется величиной местных сопротивлений, возникающих на входе в аппарат и выходе из него и при раздаче потока по фильтровальным элементам. В общем виде гидравлическое сопротивление может быть оценено коэффициентом сопротивления корпуса аппарата, отнесенным к скорости газа во входном патрубке.

$$\Delta P_{\kappa} = 0,5 \cdot \xi_{\kappa} \cdot v_{ex}^2 \cdot \rho_{\text{г}},$$

где  $v_{ex}$  – скорость газа во входном патрубке;  $\rho_{\text{г}}$  – плотность газа, кг/м<sup>3</sup> (рисунок 5). Величина  $\xi_{\kappa}$  – устанавливается конструкцией фильтров равной 1,5...2.



Рисунок 5 – Зависимость плотности воздуха от температуры

Гидравлическое сопротивление фильтровальной перегородки включает потери напора за счет самой перегородки  $\Delta P_n'$  и потери за счет осевшей на перегородку пыли  $\Delta P_n''$

$$\Delta P_n = \Delta P_n' + \Delta P_n''$$

Величину  $\Delta P_n'$  (в Па) удобно вычислять по выражению:

$$\Delta P_n' = K_n \cdot \mu \cdot q^n$$

где  $K_n$  - коэффициент, характеризующий сопротивление фильтровальной перегородки,  $\text{м}^{-1}$ ;  $\mu$  - динамическая вязкость газа,  $\text{Па}\cdot\text{с}$  (рисунок 6);  $q$  - скорость фильтрования (удельная газовая нагрузка),  $\text{м}^3/\text{с}$ ;  $n$  - показатель степени, зависящий от режима течения газа сквозь перегородку (для ламинарного режима  $n=1$ , для турбулентного  $n=2\dots 4$ ).

Динамическая и кинематическая вязкость воздуха (в таблице даны значения вязкости, увеличенные в  $10^6$  раз)

t, °C	$\mu \cdot 10^6$ , Па·с	$\nu \cdot 10^6$ , м <sup>2</sup> /с	t, °C	$\mu \cdot 10^6$ , Па·с	$\nu \cdot 10^6$ , м <sup>2</sup> /с	t, °C	$\mu \cdot 10^6$ , Па·с	$\nu \cdot 10^6$ , м <sup>2</sup> /с
-50	14,6	9,23	70	20,6	20,02	350	31,4	55,46
-45	14,9	9,64	80	21,1	21,09	400	33	63,09
-40	15,2	10,04	90	21,5	22,1	450	34,6	69,28
-35	15,5	10,42	100	21,9	23,13	500	36,2	79,38
-30	15,7	10,8	110	22,4	24,3	550	37,7	88,14
-25	16	11,21	120	22,8	25,45	600	39,1	96,89
-20	16,2	11,61	130	23,3	26,63	650	40,5	106,15
-15	16,5	12,02	140	23,7	27,8	700	41,8	115,4
-10	16,7	12,43	150	24,1	28,95	750	43,1	125,1
-5	17	12,86	160	24,5	30,09	800	44,3	134,8
0	17,2	13,28	170	24,9	31,29	850	45,5	145
10	17,6	14,16	180	25,3	32,49	900	46,7	155,1
15	17,9	14,61	190	25,7	33,67	950	47,9	166,1
20	18,1	15,06	200	26	34,85	1000	49	177,1
30	18,6	16	225	26,7	37,73	1050	50,1	188,2
40	19,1	16,96	250	27,4	40,61	1100	51,2	199,3

Рисунок 6 – Зависимость вязкости газа от температуры

Коэффициент  $K_n$  зависит от толщины и проницаемости фильтровальной перегородки, количества пыли, оставшейся на перегородке после регенерации, свойств пыли. Поэтому этот коэффициент определяют экспериментально. Для фильтровальных тканей из лавсана, улавливающих цементную или кварцевую пыль с медианным диаметром в пределах 10...20 мкм  $K_n = (1100\dots 1500) \cdot 10^6 \text{ м}^{-1}$ , для тех же материалов при улавливании возгонов от сталеплавильных дуговых печей с медианным диаметром частиц 2,5...3,0 мкм  $K_n = (2300\dots 2400) \cdot 10^6 \text{ м}^{-1}$ .

Сопротивление в Па, вызванное осевшей на перегородку пылью, рассчитывается по уравнению:

$$\Delta P_n'' = \mu \cdot \tau \cdot c_{ex} \cdot q^2 \cdot K_l$$

где  $\tau$  - продолжительность фильтровального цикла, с;  $c_{ex}$  - концентрация пыли на входе в фильтр, г/м<sup>3</sup>;  $K_l$  - параметр сопротивления слоя пыли, м/г.

Величина  $K_I$  зависит от свойств пыли и порозности слоя пыли на перегородке. Например, для цемента с медианным диаметром частиц  $d_m = 10 \dots 20$  мкм  $K_I = (6-16) \cdot 10^6$  м/г, для частиц кремния  $d_m = 0,7$  мкм  $K_I = 330 \cdot 10^6$  м/г, для возгонов сталеплавильной дуговой печи  $d_m = 3$  мкм  $K_I = 80 \cdot 10^6$  м/г.

В случае отсутствия необходимых данных переменную величину гидравлического сопротивления фильтровальной перегородки для мелких пылей принимают в пределах 600...800 Па, для крупных пылей с медианным диаметром частиц более 20 мкм – 250...350 Па.

Следует иметь в виду, что общее сопротивление рукавных фильтров не должно превышать 2800 Па.

**Задание:** Для улавливания цементной пыли (от мельниц) подобрать фильтр ФРКИ, рассчитать его гидравлическое сопротивление и продолжительность фильтровального цикла. Температура воздуха - 40 °С; материал тканевого фильтра – лавсан, режим течения газа в фильтре – ламинарный.

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Расход запыленных газов * 10 <sup>3</sup> , м <sup>3</sup> /ч	12	15	18	21	14	17	20	22	26	24
Концентрация пыли на входе в фильтр, г/м <sup>3</sup>	10	15	12	20	24	22	18	30	10	15
Медианный диаметр ча- стиц пыли, мкм	10	10	11	13	11	12	12	13	15	14
Требуемая концентрация пыли в очищенном газе, до мг/м <sup>3</sup>	10	30	10	30	10	30	10	30	10	30
Скорость газа во входном патрубке, м/с	3	3,1	3,2	3,3	3,4	3,5	3,6	3,7	3,8	3,9

### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ.

1. Классификация тканевых фильтров.
2. Требования предъявляемые к фильтровальным тканям.
3. Устройство рукавных тканевых фильтров.
4. Способы регенерации тканевых фильтров.
5. Порядок расчета рукавных тканевых фильтров.

## **СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ.**

1. Алиев Г.М.–А. Техника пылеулавливания и очистки промышленных газов. М.: Металлургия, 1986. 543 с.
2. Справочник по пыле– и золоулавливанию. / под ред. А.А. Русанова. – М.: Энергия, 1982. 296 с.
3. Ужов В.Н., Мягков Б.И.. Очистка промышленных газов фильтрами. – М.: Химия, 1970. 320 с.

**МИНОБРНАУКИ РОССИИ**

Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования  
«Юго-Западный государственный университет»  
(ЮЗГУ)

Кафедра охраны труда и окружающей среды



**РАСЧЕТ СУХОГО ПЛАСТИНЧАТОГО  
ЭЛЕКТРОФИЛЬТРА**

Методические указания к проведению практических занятий по дисциплинам «Расчет и проектирование систем обеспечения безопасности», «Перспективные технологии защиты окружающей среды», «Системы защиты воздушной среды» для студентов всех специальностей и направлений подготовки

Курск 2021

УДК 614.71

Составители: В.В. Юшин

Рецензент

Кандидат технических наук, доцент Г.П. Тимофеев

**Расчет сухого пластинчатого электрофильтра:** методические указания к проведению практических занятий по дисциплинам «Расчет и проектирование систем обеспечения безопасности», «Перспективные технологии защиты окружающей среды», «Системы защиты воздушной среды» / Юго-Зап. гос. ун-т; сост.: В.В. Юшин Курск, 2021. 16 с.

Излагается методика расчета электрофильтра ЭГА.

Работа предназначена для студентов всех специальностей и направлений подготовки.

Текст печатается в авторской редакции

Подписано в печать 06.09.2021. Формат 60x84 1/16.

Усл. печ. л. 0,92. Уч.-изд.л. 0,88. Тираж 30 экз. Заказ 53. Бесплатно.

Юго-Западный государственный университет.

305040, г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94.

**Цель занятия:** изучить методику расчета сухого пластинчатого электрофильтра.

## **ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ**

Электрофильтр представляет собой аппарат с вертикальным и горизонтальным движением газового потока, в котором размещены осадительные и коронирующие электроды. По конструкции осадительных электродов электрофильтры подразделяются на пластинчатые и трубчатые. В пластинчатых электрофильтрах осадительные электроды выполняются в виде параллельных поверхностей, набираемых из пластин определенного сечения, а в трубчатых электрофильтрах осадительные электроды выполнены в виде труб круглого, овального или шестигранного сечения. Среди пластинчатых одними из наиболее распространенных являются электрофильтры ЭГА.

Электрофильтры типа ЭГА предназначены для обеспыливания неагрессивных невзрывоопасных технологических газов и аспирационного воздуха температурой до 330<sup>0</sup>С в энергетике, промышленности строительных материалов, черной и цветной металлургии и других отраслях промышленности.

Электрофильтры – одно- или двухсекционные аппараты прямоугольной формы. Корпуса аппаратов – стальные, покрытые снаружи теплоизоляцией.

Активная зона электрофильтров состоит из осадительных электродов (плоских полотен, набранных из пластинчатых элементов специального профиля) и коронирующих электродов (трубчатых рам, в которых натянуты коронирующие элементы). Расстояние между соседними осадительными электродами (300 мм) является также шириной единичного газового прохода.

Удаление уловленной пыли с электродов – механическое, путем периодического встряхивания их ударами молотков.

Типоразмер электрофильтра определяется числом газовых проходов в его поперечном сечении, высотой электродов, длиной поля, эквивалентной ширине осадительного электрода, и количеством полей в аппарате.

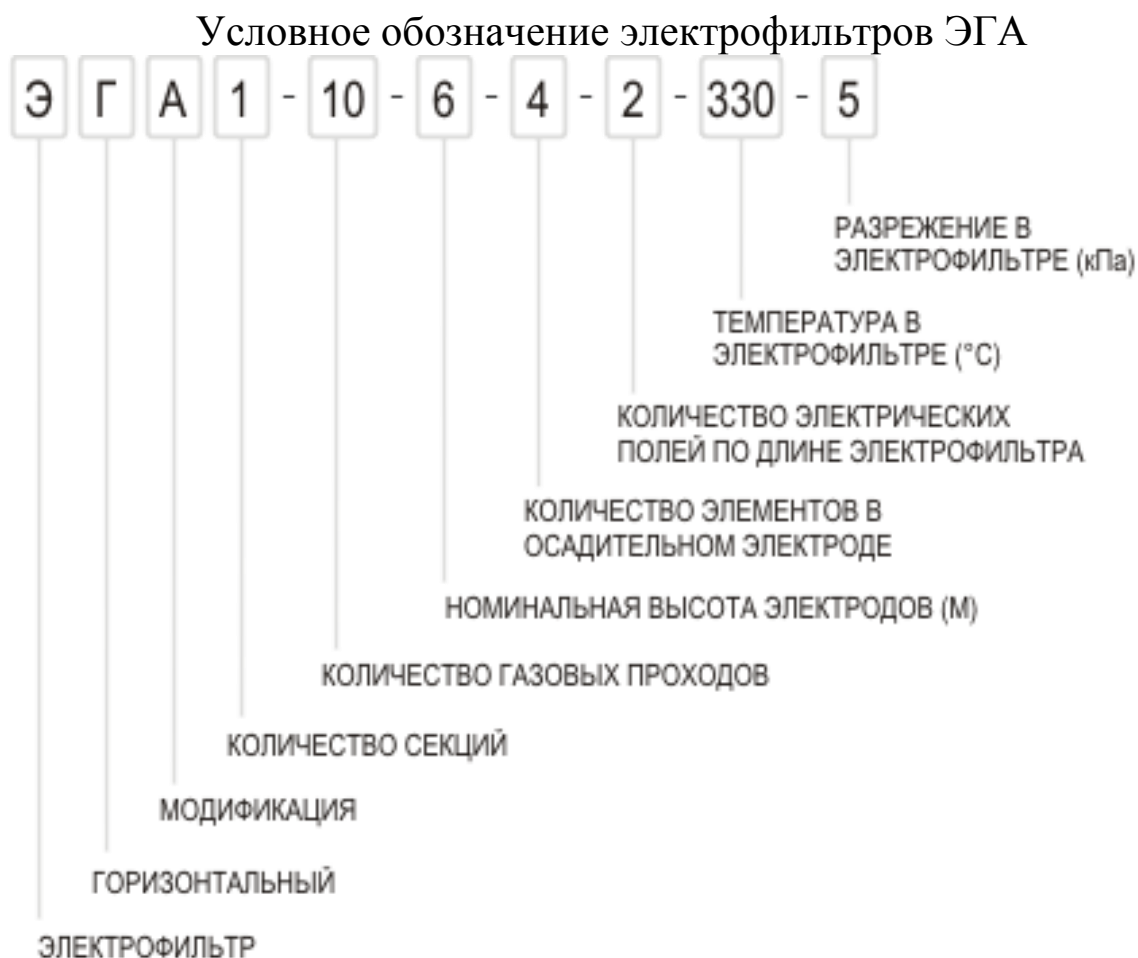
Электрофильтры с числом проходов от 10 до 40 – односекционные; от 48 до 88 – двухсекционные.

Электрофильтры могут быть изготовлены в климатическом исполнении У, категория 1-4, или ХЛ, категория 4 по ГОСТ 15150-69.

Корпуса электрофильтров рассчитаны на применение в районах сейсмичностью не более 7 баллов.

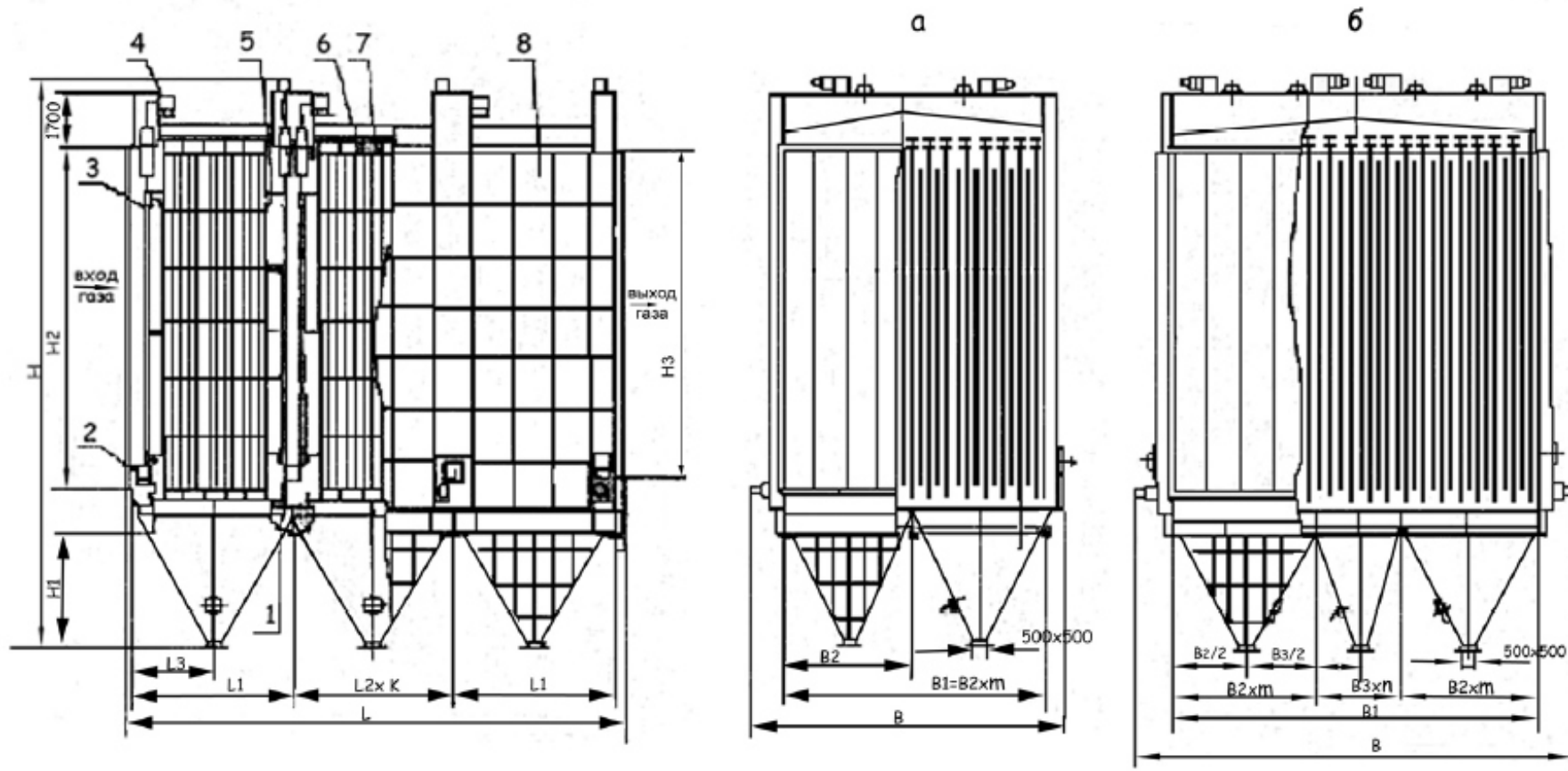
Подвод тока к электрофильтрам может осуществляться специальным кабелем от преобразовательных агрегатов для электрофильтров, установленных в отдельном помещении, или посредством шинного ввода от агрегатов, расположенных на крыше электрофильтров. Тип токопровода определяется в проекте установки электрофильтров.

Электрофильтры комплектуются современными коронирующими электродами в зависимости от свойств улавливаемой пыли, надежными мотор-редукторами с частотным регулированием оборотов вала механизма встряхивания электродов, агрегатами питания с усовершенствованными регуляторами, автоматической системой контроля и управления электрофильтром.



Общий вид электрофильтра ЭГА представлен на рисунке 1.





Электрофильтры типа ЭГА

а – односекционные; б – двухсекционные;

- 1 – механизм встряхивания осадительных электродов; 2 – люк обслуживания; 3 – газораспределительная решетка;
- 4 – защитная коробка для подвода тока; 5 – механизм встряхивания коронирующих электродов; 6 – коронирующий электрод;
- 7 – осадительный электрод; 8 – корпус

## МЕТОДИКА РАСЧЕТА ЭЛЕКТРОФИЛЬТРА

При проектировании электрофильтров ожидаемую степень очистки газов рассчитывают по полуэмпирическим формулам. После выбора типа электрофильтра (например ЭГА – электрофильтр, горизонтальный, модификации А), удовлетворяющего требованиям проекта, на основании имеющихся исходных данных вычисляют следующие величины.

- *Относительную плотность очищаемого газа:*

$$\beta = \frac{p \cdot (273 + t_{\text{ст}})}{p_{\text{ст}} \cdot (273 + t)}, \quad (1)$$

где  $p$  и  $t$  – давление и температура очищаемого газа, кПа и  $^{\circ}\text{C}$ ;  $p_{\text{ст}}$  и  $t_{\text{ст}}$  – давление и температура газа при стандартных условиях, кПа и  $^{\circ}\text{C}$ .

- *Критическую напряженность электрического поля:*

$$E_{\text{кр}} = 3,04 \cdot \left( \beta + 0,0311 \cdot \sqrt{\frac{\beta}{R_1}} \right) \cdot 10^6, \text{ В/м}, \quad (2)$$

где  $R_1$  – радиус острия коронирующего электрода ( $R_1=1$  мм).

- *Критическое напряжение короны:*

$$U_{\text{кр}} = E_{\text{кр}} \cdot R_1 \cdot \left( \frac{\pi \cdot H}{S_1} - \ln \frac{2 \cdot \pi \cdot R_1}{S_1} \right), \text{ В}, \quad (3)$$

где  $H$  – расстояние между плоскостями коронирующих и осадительных электродов, м;  $S_1$  – шаг коронирующих электродов.

Для электрофильтров типа ЭГА:

$$H = \frac{0,300}{2} \text{ м}; \quad S_1 = 0,18 \text{ м}.$$

- *Напряженность электрического поля:*

$$E = \left[ \frac{8 \cdot \pi \cdot f \cdot H \cdot U \cdot (U - U_{\text{кр}})}{9 \cdot 10^9 \cdot \varepsilon_0 \cdot S_1^3 \cdot \left( \frac{\pi \cdot H}{S_1} - \ln \frac{2 \cdot \pi \cdot R_1}{S_1} \right)} \right]^{0,5}, \text{ В/м}, \quad (4)$$

где  $f$  – коэффициент, зависящий от отношения  $H/S_1$  (при  $H/S_1=0,300/(2 \cdot 0,18)=0,833$  значение  $f=0,0423$ );  $U$  – среднее значение рабочего напряжения (60...100 кВ), В;  $\varepsilon_0$  – диэлектрическая проницаемость вакуума ( $8,85 \cdot 10^{-12}$  Ф/м).

- *Скорость дрейфа частиц пыли в электрическом поле:*

$$w = \frac{0,118 \cdot 10^{-10} \cdot E^2 \cdot r}{\mu}, \text{ м/с}, \quad (5)$$

где  $r$  – эквивалентный радиус частицы пыли, м;  $\mu$  – динамический коэффициент вязкости очищаемого газа при рабочих условиях, Па·с;

- Фракционную степень улавливания пыли:

$$\eta_i = 1 - \exp\left(-\frac{w \cdot T}{2 \cdot u}\right), \quad (6)$$

где  $T$  – отношение общей площади осаждения к площади активного сечения электрофилтра (см. приложение А);  $u$  – скорость газа в электрофилтре, м/с.

- Общую степень улавливания пыли:

$$\eta = \sum_1^n \eta_i \cdot \phi_i, \%, \quad (7)$$

где  $\phi_i$  – содержание в улавливаемой пыли  $i$ -й фракции, %.

- Требуемую эффективность очистки газа от пыли:

$$\eta_{\text{тр}} = \frac{z_1 - z_2}{z_1} \cdot 100, \%, \quad (8)$$

где  $z_1$  и  $z_2$  – заданные начальная и конечная запыленности газа, г/м<sup>3</sup>.

- Необходимую площадь активного сечения электрофилтра:

$$S = \frac{V}{3600 \cdot u}, \text{ м}^2, \quad (9)$$

где  $V$  – производительность электрофилтра, м<sup>3</sup>/ч.

На основе задания, справочных материалов и вычислений по формулам (1) – (5) подготавливаются следующие исходные данные:

- 1) скорости дрейфа частиц пыли крупностью 1, 3, 5, 7, 9 и 10 мкм (средний радиус частиц – 0,5; 1,5; 2,5; 3,5; 4,5 и 5 мкм);
- 2) массовая доля указанных фракций улавливаемой пыли, %;
- 3) значение  $T$  – отношение общей площади осаждения к площади активного сечения для рассматриваемого типоразмера электрофилтра (значение  $T$  приведено в приложении А).

Принимается ряд значений скорости газа в электрофилтре и вычисляется по формулам (6) и (7) фракционная и общая степень улавливания пыли для принятых типоразмеров электрофилтров. По полученным данным для каждого из рассмотренных типоразмеров электрофилтра строят кривые зависимостей  $\eta=f(u)$ .

По формуле (8) вычисляют требуемую эффективность очистки газа от пыли  $\eta_{\text{тр}}$ .

Совмещая на графике полученные зависимости  $\eta=f(u)$  и значение требуемой эффективности очистки газа, определяют типоразмеры электрофилтров, обеспечивающие при приемлемых скоростях газа необходимую эффективность очистки.

По формуле (9) определяют необходимую площадь активного сечения электрофилтра и по таблице конструктивных характеристик

(приложение А) выбирают оптимальный типоразмер электрофильтра.

### ПРИМЕР РАСЧЕТА.

Рассчитать и выбрать электрофильтр типа ЭГА, предназначенный для очистки газов электросталеплавильной печи и аспирационных установок цеха при следующих исходных данных:

- объем очищаемых газов при рабочих условиях –  $V=10^6$  м<sup>3</sup>/ч;
- температура газа –  $t=30$  °С;
- разрежение на входе в электрофильтр –  $p_1=1$  кПа;
- коэффициент динамической вязкости газа –  $\mu=18,65 \cdot 10^{-6}$  Па·с;
- начальная запыленность газа –  $z_1=1,4$  г/м<sup>3</sup>;
- требуемая запыленность очищенного газа –  $z_2=0,05$  г/м<sup>3</sup>.
- дисперсный (фракционный) состав улавливаемой пыли:

Крупность, мкм	0–2	2–4	4–6	6–8	8–10	10–20
Массовая доля, %	52,0	22,0	6,4	7,6	2,7	9,3

В соответствии с заданным фракционным составом характеристики частиц пыли по фракциям приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Характеристики частиц пыли

Крупность, мкм	0–2	2–4	4–6	6–8	8–10	10–20
Средний размер частиц, мкм	1	3	5	7	9	10
Средний эквивалентный радиус частиц $r$ , мкм	0,5	1,5	2,5	3,5	4,5	5

Расчет выполняется в следующей последовательности.

1. По формуле (1) определяется относительная плотность очищаемого газа (давление очищаемого газа  $p = p_{ст} - p_1$ ):

$$\beta = \frac{p \cdot (273 + t_{ст})}{p_{ст} \cdot (273 + t)}$$

где  $p_{ст}=101,3$  кПа; и  $t_{ст} = 20$  °С.

$$\beta = \frac{(101,3 - 1) \cdot (273 + 20)}{101,3 \cdot (273 + 30)} = 0,957.$$

2. Определяется критическая напряженность электрического поля (формула 2):

$$E_{кр} = 3,04 \cdot \left( \beta + 0,0311 \cdot \sqrt{\frac{\beta}{R_1}} \right) \cdot 10^6, \text{ В/м,}$$

$$E_{кр} = 3,04 \cdot \left( 0,957 + 0,0311 \cdot \sqrt{\frac{0,957}{0,001}} \right) \cdot 10^6 = 5,83 \cdot 10^6, \text{ В/м.}$$

3. Определяется критическое напряжение короны (формула 3):

$$U_{кр} = E_{кр} \cdot R_1 \cdot \left( \frac{\pi \cdot H}{S_1} - \ln \frac{2 \cdot \pi \cdot R_1}{S_1} \right), \text{ В,}$$

$$U_{кр} = 5,83 \cdot 10^6 \cdot 0,001 \cdot \left( \frac{3,14 \cdot 0,15}{0,18} - \ln \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 0,001}{0,18} \right)$$

$$= 34,84 \cdot 10^3, \text{ В.}$$

4. Определяется напряженность электрического поля при рабочем напряжении  $U=85$  кВ (формула 4):

$$E = \left[ \frac{8 \cdot \pi \cdot f \cdot H \cdot U \cdot (U - U_{кр})}{9 \cdot 10^9 \cdot \varepsilon_0 \cdot S_1^3 \cdot \left( \frac{\pi \cdot H}{S_1} - \ln \frac{2 \cdot \pi \cdot R_1}{S_1} \right)} \right]^{0,5}, \text{ В/м,}$$

$$E = \left[ \frac{8 \cdot 3,14 \cdot 0,0423 \cdot 0,15 \cdot 85 \cdot (85 - 34,84) \cdot 10^6}{9 \cdot 10^9 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 0,18^3 \cdot \left( \frac{3,14 \cdot 0,15}{0,18} - \ln \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 0,001}{0,18} \right)} \right]^{0,5}$$

$$= 4,9 \cdot 10^5 \text{ В/м.}$$

5. Определяется скорость дрейфа частиц пыли крупностью 1 мкм (формула 5):

$$w = \frac{0,118 \cdot 10^{-10} \cdot E^2 \cdot r}{\mu}, \text{ м/с,}$$

$$w = \frac{0,118 \cdot 10^{-10} \cdot (4,9 \cdot 10^5)^2 \cdot 0,5 \cdot 10^{-6}}{18,65 \cdot 10^{-6}} = 0,076 \text{ м/с.}$$

Аналогично вычисляют скорости дрейфа частиц крупностью 3, 5, 7, 9 и 10 мкм при соответствующих средних эквивалентных радиусах (см. табл. 1). Результаты расчета скорости дрейфа частиц представлены в таблице 2.

Принимают обозначения Т1, Т2, Т3, Т4, Т5, Т6 типоразмеров электрофильтров ЭГА по значению  $T=S0/S$  (см. приложение А): Т1=38,2, Т2=57,7, Т3=77,0, Т4=86,6, Т5=88,0, Т6=115,5.

Таблица 2 – Фракционный состав и скорость дрейфа частиц пыли в электрофилт্রে

Показатели	Размер частиц пыли, мкм					
	0–2	2–4	4–6	6–8	8–10	10–20
Средний размер частиц, мкм	1	3	5	7	9	10
Средний эквивалентный радиус частиц r, мкм	0,5	1,5	2,5	3,5	4,5	5
Массовая доля фракций $\Phi_i$ , %	52,0	22,0	6,4	7,6	2,7	9,3
Скорость дрейфа частиц w, м/с	0,076	0,228	0,380	0,532	0,684	0,761

Электрофилт্রে в соответствии с принятым обозначением типоразмеров представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Принятые обозначения типоразмеров электрофилт্রে и значения отношений общей площади осадительных электродов к площади активного сечения электрофилт্রে ЭГА

Принятое обозначение типоразмера электрофилт্রে	Типоразмер электрофилт্রে	Отношение общей площади осадительных электродов к площади активного сечения электрофилт্রে
T <sub>1</sub>	ЭГА 1-10-6-4-2	38,2
T <sub>2</sub>	ЭГА 1-10-6-4-3; ЭГА 1-10-6-6-2; ЭГА 1-14-7,5-4-3; ЭГА 1-14-7,5-6-2; ЭГА 1-20-7,5-4-3; ЭГА 1-20-7,5-6-2; ЭГА 1-20-9-6-2; ЭГА 1-30-7,5-4-3; ЭГА 1-30-7,5-6-2; ЭГА 1-30-9-6-2; ЭГА 1-40-7,5-4-3; ЭГА 1-40-7,5-6-2; ЭГА 1-40-9-6-2.	57,7
T <sub>3</sub>	ЭГА 1-14-7,5-4-4; ЭГА 1-20-7,5-4-4; ЭГА 1-30-7,5-4-4; ЭГА 1-40-7,5-4-4.	77,0
T <sub>4</sub>	ЭГА 1-10-6-6-3; ЭГА 1-14-7,5-6-3; ЭГА 1-20-7,5-6-3; ЭГА 1-20-9-6-3; ЭГА 1-30-7,5-6-3; ЭГА 1-30-12-6-3; ЭГА 1-40-7,5-6-3; ЭГА 1-40-9-6-3; ЭГА 1-40-12-6-2; ЭГА 2-48-12-6-3; ЭГА 2-56-12-6-3; ЭГА 2-76-12-6-3; ЭГА 2-88-12-6-3.	86,6
T <sub>5</sub>	ЭГА 1-30-9-6-3	88,0
T <sub>6</sub>	ЭГА 1-20-9-6-4; ЭГА 1-30-9-6-4; ЭГА 1-30-12-6-4; ЭГА 1-40-9-6-4; ЭГА 1-40-12-6-4; ЭГА 2-48-12-6-4; ЭГА 2-56-12-6-4; ЭГА 2-76-12-6-4; ЭГА 2-88-12-6-4.	115,5

Принимают значения скоростей очищаемого газа  $u$ : 0,6; 0,8; 1,0; 1,2; 1,4 м/с и вычисляют по формулам (6) и (7) фракционные и общие степени улавливания пыли для указанных скоростей газа и приведенных в таблице 2 и 3 значений  $w$  и  $T$ . Результаты расчета представлены в таблице 4.

Таблица 2.4 – Результаты расчета фракционной (доли.ед.) и общей (%) степени улавливания пыли

$T$	$u$	$\eta_1$	$\eta_3$	$\eta_5$	$\eta_7$	$\eta_9$	$\eta_{10}$	$\eta$
$T_1=38,2$	0,6	0,9111	0,9993	1	1	1	1	94,36
	0,8	0,8371	0,9957	0,9999	1	1	1	91,43
	1,0	0,7659	0,9872	0,9993	1	1	1	87,54
	1,2	0,7018	0,9735	0,9977	0,9998	1	1	83,89
	1,4	0,6455	0,9555	0,9944	0,9993	1	1	80,54
$T_2=57,7$	0,6	0,9742	1	1	1	1	1	98,65
	0,8	0,9355	0,9998	1	1	1	1	96,64
	1,0	0,8884	0,9987	1	1	1	1	94,16
	1,2	0,8392	0,9959	0,9999	1	1	1	91,54
	1,4	0,7912	0,9909	0,9997	1	1	1	88,94
$T_3=77,0$	0,6	0,9924	1	1	1	1	1	99,60
	0,8	0,9743	1	1	1	1	1	98,66
	1,0	0,9464	0,9999	1	1	1	1	97,21
	1,2	0,9127	0,9994	1	1	1	1	95,44
	1,4	0,8764	0,9982	1	1	1	1	93,53
$T_4=86,6$	0,6	0,9959	1	1	1	1	1	99,78
	0,8	0,9837	1	1	1	1	1	99,15
	1,0	0,9628	1	1	1	1	1	98,06
	1,2	0,9356	0,9998	1	1	1	1	96,64
	1,4	0,9047	0,9992	1	1	1	1	95,02
$T_5=88,0$	0,6	0,9963	1	1	1	1	1	99,80
	0,8	0,9848	1	1	1	1	1	99,20
	1,0	0,9648	1	1	1	1	1	98,16
	1,2	0,9384	0,9998	1	1	1	1	96,79
	1,4	0,9083	0,9993	1	1	1	1	95,21
$T_6=115,5$	0,6	0,9994	1	1	1	1	1	99,96
	0,8	0,9959	1	1	1	1	1	99,78
	1,0	0,9876	1	1	1	1	1	99,35
	1,2	0,9743	1	1	1	1	1	98,66
	1,4	0,9566	1	1	1	1	1	97,74

По результатам расчета строят графики зависимости эффективности электрофилтра от его типоразмера при различных скоростях газа (см. рис. 2).

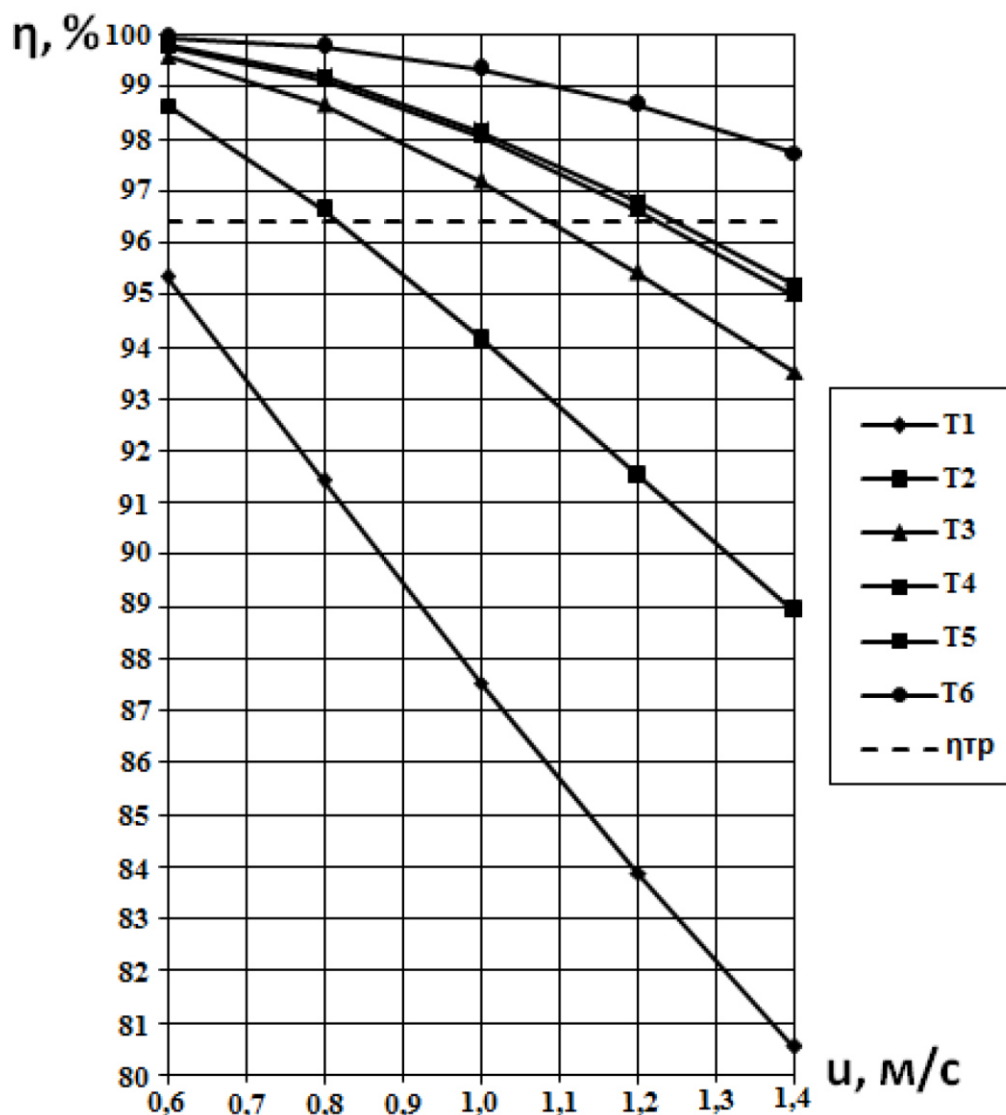


Рисунок 2 – Зависимость эффективности очистки газа от скорости газа  $u$  и типоразмера электрофилтра Т

Требуемая степень улавливания пыли при начальной запыленности  $z_1=1,4 \text{ г/м}^3$  и конечной  $z_2=0,05 \text{ г/м}^3$  составит:

$$\eta_{тр} = \frac{1,4 - 0,05}{1,4} \cdot 100 = 96,4 \%$$

Значение требуемой запыленности наносят на график (рис. 2). Сравнение требуемой запыленности и расчетной эффективности электрофилтра при различных типоразмерах показывает возможность применения для удовлетворительной очистки газа типоразмер Т<sub>2</sub> – при скорости газа до 0,8 м/с, Т<sub>3</sub> – при скорости газа до 1,1 м/с, Т<sub>4</sub> и Т<sub>5</sub> – при скорости газа до 1,2 м/с и Т<sub>6</sub> – во всем диапазоне принятых в расчете скоростей газа.



Опыт эксплуатации электрофильтров показывает в качестве наиболее предпочтительной скорости газа интервал 1,0÷1,2 м/с. В частности, при скорости 1,2 м/с и  $\eta_{\text{тр}}=96,4\%$  принимаются к рассмотрению электрофильтры типоразмеров, которые на графике лежат выше линии требуемой степени очистки (кривые Т<sub>4</sub>, Т<sub>5</sub>, Т<sub>6</sub>), поскольку электрофильтры с типоразмерами, лежащими под этой линией, не обеспечивают необходимую степень улавливания пыли.

В рассматриваемом случае целесообразно установить электрофильтр типоразмера Т<sub>4</sub>, как имеющего меньшие габаритные размеры и металлоемкость конструкции по сравнению с типоразмерами Т<sub>5</sub> и Т<sub>6</sub>.

При очистке в электрофильтре 106 м<sup>3</sup>/ч газа и скорости газа 1,2 м/с необходимая площадь активного сечения электрофильтра составит:

$$S = \frac{1000000}{3600 \cdot 1,2} = 231,5 \text{ м}^2.$$

Наиболее близким по площади активного сечения является электрофильтр ЭГА 2-76-12-6-3, у которого S=246,6 м<sup>2</sup> (см. приложение А).

Скорость очищаемого газа в этом электрофильтре составит:

$$U = \frac{1000000}{3600 \cdot 246,6} = 1,13 \text{ м/с}.$$

При такой скорости газа в электрофильтре степень улавливания пыли составит свыше 97 %, что соответствует условиям расчета.

**Задание:** Рассчитать и выбрать электрофильтр типа ЭГА, предназначенный для очистки газов электросталеплавильной печи и аспирационных установок цеха. Объем очищаемых газов при рабочих условиях – V=10<sup>6</sup> м<sup>3</sup>/ч.

Исходные данные:

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Температура газа, °С	25	35	40	45	50	55	60	65	70	75
Разрежение на входе в электрофильтр, 1 кПа	1,1	1,2	0,9	1,3	1,4	1,15	1,5	1,6	1,25	1
Коэффициент динамической вязкости газа, 10 <sup>-6</sup> Па·с	18,1	18,2	18,3	18,4	18,5	18,6	18,7	18,8	18,9	19,0
Начальная запыленность газа, г/м <sup>3</sup>	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9
Требуемая запыленность очищенного газа, мг/м <sup>3</sup>	35	40	45	50	55	60	65	75	80	85

Вариант		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
		Дисперсный состав улавливаемой пыли (массовая доля, %)									
Размер, мкм	0–2	50	48	52	54	46	56	58	44	42	60
	2–4	20	17	13	21	20	16	20	22	18	12
	4–6	15	10	12	9	14	10	6	14	14	10
	6–8	5	8	8	8	9	8	6	8	11	8
	8–10	3	7	9	7	6	6	7	7	9	6
	10–20	7	10	6	1	5	4	3	5	6	4

### **КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ.**

1. Назначение электрофильтров ЭГА.
2. Условное обозначение электрофильтров ЭГА
3. Удаление пыли с осадительных электродов электрофильтров ЭГА
4. Особенности конструкции электрофильтров ЭГА
5. Порядок расчета фильтров ЭГА

### **СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ.**

1. Алиев Г.М.–А. Техника пылеулавливания и очистки промышленных газов. М.: Metallurgy, 1986. 543 с.
2. Справочник по пыле– и золоулавливанию. / под ред. А.А. Русанова. – М.: Энергия, 1982. 296 с.
3. Гичев Ю.А. Очистка газов. Часть II: Конспект лекций. – Днепропетровск: НМетАУ. 2015. – 48 с.

## ПРИЛОЖЕНИЕ А

### Конструктивные характеристики электрофильтров ЭГА

Типоразмер электрофильтра	Активная высота электродов, м	Число полей	Площадь активного сечения S, м <sup>2</sup>	Общая площадь осаждения S <sub>0</sub> , м <sup>2</sup>	Габаритные размеры электрофильтра, м			$\tau = \frac{S_0}{S}$
					Длина	Ширина (по осям опор)	Высота	
ЭГА 1-10-6-4-2	6,0	2	16,5	630	9,26	3,2	12,4	38,2
ЭГА 1-10-6-4-3	6,0	3	16,5	950	13,44	3,2	12,4	57,6
ЭГА 1-10-6-6-2	6,0	2	16,5	950	11,82	3,2	12,4	57,6
ЭГА 1-10-6-6-3	6,0	3	16,5	1430	17,28	3,2	12,4	86,7
ЭГА 1-14-7,5-4-3	7,5	3	28,7	1660	13,44	4,4	13,9	57,8
ЭГА 1-14-7,5-4-4	7,5	4	28,7	2210	17,62	4,4	13,9	77,0
ЭГА 1-14-7,5-6-2	7,5	2	28,7	1660	11,82	4,4	14,9	57,8
ЭГА 1-14-7,5-6-3	7,5	3	28,7	2480	17,28	4,4	14,9	86,4
ЭГА 1-20-7,5-4-3	7,5	3	41,0	2360	13,44	6,2	15,4	57,6
ЭГА 1-20-7,5-4-4	7,5	4	41,0	3160	17,62	6,2	15,4	77,0
ЭГА 1-20-7,5-6-2	7,5	2	41,0	2360	11,82	6,2	15,4	57,6
ЭГА 1-20-7,5-6-3	7,5	3	41,0	3550	17,28	6,2	15,4	86,6
ЭГА 1-20-9-6-2	9,0	2	49,0	2830	11,82	6,2	16,9	57,7
ЭГА 1-20-9-6-3	9,0	3	49,0	4240	17,28	6,2	16,9	86,5
ЭГА 1-20-9-6-4	9,0	4	49,0	5660	22,74	6,2	16,9	115,5
ЭГА 1-30-7,5-4-3	7,5	3	61,4	3550	13,44	9,2	14,9	57,8
ЭГА 1-30-7,5-4-4	7,5	4	61,4	4730	17,62	9,2	14,9	77,0
ЭГА 1-30-7,5-6-2	7,5	2	61,4	3550	11,82	9,2	14,9	57,8
ЭГА 1-30-7,5-6-3	7,5	3	61,4	5320	17,28	9,2	14,9	86,7
ЭГА 1-30-9-6-2	9,0	2	73,4	4240	11,82	9,2	16,4	57,8
ЭГА 1-30-9-6-3	9,0	3	73,4	6460	17,28	9,2	16,4	88,0
ЭГА 1-30-9-6-4	9,0	4	73,4	8480	22,74	9,2	16,4	115,5
ЭГА 1-30-12-6-3	12,0	3	97,4	8430	17,28	9,2	19,4	86,5
ЭГА 1-30-12-6-4	12,0	4	97,4	11240	22,74	9,2	19,4	115,4
ЭГА 1-40-7,5-4-3	7,5	3	81,9	4730	13,44	12,2	15,4	57,7
ЭГА 1-49-7,5-4-4	7,5	4	81,9	6310	17,62	12,2	15,4	77,0
ЭГА 1-40-7,5-6-2	7,5	2	81,9	4730	11,82	12,2	15,4	57,5
ЭГА 1-40-7,5-6-3	7,5	3	81,9	7100	17,28	12,2	15,4	86,7
ЭГА 1-40-9-6-2	9,0	2	97,9	5650	11,82	12,2	16,9	57,7
ЭГА 1-40-9-6-3	9,0	3	97,9	8480	17,28	12,2	16,9	86,6
ЭГА 1-40-9-6-4	9,0	4	97,9	11300	22,74	12,2	16,9	115,4
ЭГА 1-40-12-6-2	12,0	3	129,8	11240	17,28	12,2	19,9	86,5

Типоразмер электрофильтра	Активная высота электродов, м	Число полей	Площадь активного сечения S, м <sup>2</sup>	Общая площадь осаднения S <sub>0</sub> , м <sup>2</sup>	Габаритные размеры электрофильтра, м			$\Gamma = \frac{S_0}{S}$
					Длина	Ширина (по осям опор)	Высота	
ЭГА 1-40-12-6-3	12,0	4	129,8	15000	22,74	12,2	19,9	115,6
ЭГА 2-48-12-6-3	12,0	3	155,8	13500	17,28	15,2	19,9	86,6
ЭГА 2-48-12-6-4	12,0	4	155,8	18000	22,74	15,2	19,9	115,3
ЭГА 2-56-12-6-3	12,0	3	181,7	15750	17,28	17,6	19,9	86,7
ЭГА 2-56-12-6-4	12,0	4	181,7	21000	22,74	17,6	19,9	115,6
ЭГА 2-76-12-6-3	12,0	3	246,6	21400	17,28	23,6	19,9	86,8
ЭГА 2-76-12-6-4	12,0	4	246,6	28500	22,74	23,6	19,9	115,6
ЭГА 2-88-12-6-3	12,0	3	285,6	24750	17,28	27,2	19,9	86,7
ЭГА 2-88-12-6-4	12,0	4	285,6	33000	22,74	27,2	19,9	115,5

Условные обозначения типоразмера электрофильтра: Э – электрофильтр; Г – горизонтальный; А – модификация; числа после букв обозначают: первое – количество секций, второе – количество газовых проходных каналов, третье – номинальная высота электродов (м), четвертое – количество элементов в осадительном электроде, пятое – количество электрических полей по длине электрофильтра.