

Министерство образования и науки Российской Федерации

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ПРОМЫШЛЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ И ДИЗАЙНА»

Кафедра инженерной химии и промышленной экологии

**ТЕХНИКА И ТЕХНОЛОГИЯ
ЗАЩИТЫ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ**

Методические указания к выполнению контрольной работы по дисциплине
для студентов заочной формы обучения
по направлению подготовки бакалавриата
20.03.01 – Техносферная безопасность

Составители
С. В. Петров
Р. Ф. Витковская

Санкт-Петербург
2018

Утверждено
на заседании кафедры
09.10.2018 г., протокол № 2

Рецензент

Методические указания посвящены расчётам аппаратов по очистке сточных вод и газовых выбросов от механических загрязнений, выполняемым в контрольной работе студентами заочной формы обучения по направлению 20.03.01 – Техносферная безопасность.

Учебное электронное издание сетевого распространения
Издано в авторской редакции

Системные требования:
электронное устройство с программным обеспечением для воспроизведения файлов формата PDF

Режим доступа: http://publish.sutd.ru/tp_get_file.php?id=2018____, по паролю. – Загл. с экрана.

Дата подписания к использованию __.__.2018 г. Рег. № _____.

ФГБОУВО «СПбГУПТД»
Юридический и почтовый адрес: 191186, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, 18.
<http://sutd.ru>

Введение

Присутствие в стоках и выбросах твёрдых частиц и капель создаёт огромную нагрузку на природную среду, а также сильно затрудняет или делает невозможной очистку от растворённых примесей. Методические указания посвящены расчётам аппаратов по очистке сточных вод и газовых выбросов от механических загрязнений.

Для крупных частиц, размером более 10 мм целесообразно использовать процеживание через решётки и сита. С уменьшением размеров частиц, резко возрастают трудности их выделения. Наиболее простыми, дешёвыми, а также достаточно эффективными являются методы:

- гравитационного отстаивания;
- действие инерционных сил, основанное на разнице плотностей среды и частиц;
- флотация, когда частицы увлекаются вверх пузырьками воздуха в виде пены;
- коагуляция и флокуляция, где частицы укрупняются действием специальных реагентов;
- фильтрование.

Для очистки газов от пыли эффективны методы мокрой очистки, связанные с поглощением частиц водой и осаждение под действием электростатических полей. В последнее время изучаются процессы слипания и укрупнения частиц действием ультразвука, что существенно увеличивает степень очистки всеми перечисленными методами. Физико-химическая основа методов является общей для газов и жидких сред, однако в силу специфических особенностей изучать методы расчёта аппаратов в обеих областях следует отдельно.

1. Очистка сточных вод

1.1. Отстаивание

В основе работы гравитационных отстойников лежит способность частиц всплывать на поверхности или тонуть при наличии разницы плотностей частиц и среды под действием архимедовой силы. Независимо от типа среды и формы аппаратов принцип работы отстойников очень прост – поток из трубопровода вводится в ёмкость больших размеров, где замедляется до такой скорости, чтобы частицы успели осесть, либо всплыть. Всегда применяются специальные распределительные устройства, лотки, поперечные перегородки, трубы с отверстиями, для того, чтобы максимально замедлить входной поток, равномерно распределить его по объёму аппарата, предотвратить образование струй и завихрений с тем, чтобы минимально возмущать оседание частиц в основной, отстойной зоне аппарата. По той же причине, аналогичные устройства – сборники применяют и на выходе, так, чтобы струи потоков не увлекали за собой оседающие частицы.

Всплывающие загрязнения собирают различными, автоматизированными сборниками, отводными трубами, если это эмульсии или скребками. Наибольшую трудность представляет сбор осадка со дна отстойника. Для этого используют конические и наклонные днища, прямки для сбора осадка, скребки, ленточные транспортёры, уплотняющие осадок и выталкивающие его к отводным трубам. При наличии тяжёлых, кристаллических частиц применяют устройства гидросмыва, где песок и другие подобные примеси увлекаются струями специально подаваемой через форсунки воды в приёмные трубы. Независимо от применяемых решений, влажность конечного осадка не может быть менее 98–99 %, что позволяет перекачивать его по трубам специальными насосами, но требует дальнейшего уплотнения и обезвоживания. Это достигается применением специальных вертикальных отстойников, где осадок уплотняется под действием собственного веса, и струй воздуха, кроме того, используется сушка осадка на иловых и песковых площадках, снабжённых земляными валами, проходами для вывоза осадка, подземными дренажными трубами для отвода воды. Утилизация осадка выполняется различными способами, в зависимости от его состава: сжиганием, сбрасыванием в метантенках, при возможности используют в качестве строительных материалов, иногда, в случае отсутствия токсичных загрязнений, тяжёлых металлов, тяжёлой органики и т. п., осадок может быть использован как удобрение. В случае высокотоксичных осадков единственным на сегодня методом его утилизации является захоронение на специальных полигонах.

К основным геометрическим формам отстойников относятся следующие:

– горизонтальные, близкие по форме к параллелепипеду. Они применяются для больших расходов сточных вод (до сотен кубометров в сутки) и отличаются высокими степенями очистки от взвешенных, но и повышенной громоздкостью, трудностью выделения осадка;

– горизонтальные, круглого сечения. Они применяются при расходах, равных десяткам тысяч кубометров воды в сутки. В них легче контролировать сбор, перемещение и уплотнение осадка с помощью круговых скребковых механизмов. Диаметры их могут достигать 36 метров, а глубина обычно 3–6 метров;

– вертикальные, круглого сечения. Они занимают гораздо меньшую площадь, накапливают большие количества осадка, уплотняя его под действием собственного веса. Их удобно заглублять в землю. Удаление осадка достигается с меньшими затратами энергии за счёт небольшого объёма и большего веса.

Подвод среды в аппараты круглые в плане может выполняться как по центральной трубе, так и с периферии. Центральный выпуск легче конструктивно обеспечить, но он даёт большие локальные скорости движения среды, объём отстойника используется менее эффективно, что приводит к возрастанию размеров или к уменьшению степени очистки.

К основным достоинствам отстойников относятся простота конструкции, дешевизна, лёгкость обслуживания. Недостатками являются громоздкость, высокая материалоемкость, небольшие степени очистки от взвешенных (40–65 %), медленность отстаивания, необходимость дополнительных усилий для отбора и утилизации осадков, часто отстойники испускают неприятный запах. Нефтепродукты, масла, жиры получают в виде устойчивых водных эмульсий, утилизация которых весьма затруднена. Скорость отстаивания может быть увеличена с помощью предварительного введения коагулянтов и флокулянтов, что приводит к уменьшению объёмов этих аппаратов. Также значительного увеличения степени очистки и уменьшения размера можно достичь введением в объём отстойной зоны, так называемых тонкослойных модулей, представляющих собой блоки горизонтальных или наклонных пластин, на небольшом расстоянии одна от другой, снабжённые промежутками для сползания осадка вниз. Улучшение происходит за счёт резкого уменьшения пути и времени прохождения частицы до оседания на пластинах. Тонкослойные модули разработаны для всех типов отстойников и могут добавляться в готовые аппараты по мере необходимости.

В зависимости от типа осадка применяют отстойники различного назначения. Среди прочего используются схемы [1], [2].

Песколовки, используются для выделения песка, битого стекла и других кристаллических примесей. Их размеры проектируются так, чтобы песок успевал осесть, а более мелкие частицы и хлопья проходили дальше. Это достигается путём подбора средней скорости движения воды в поперечном сечении аппарата, так, чтобы успевали осесть лишь крупные частицы. К их недостаткам относится непригодная для строительных целей чистота песка. Улучшение отделения песка от бесформенных хлопьев органического происхождения достигается продувкой этих аппаратов воздухом. Особую трудность представляет извлечение песка со дна машины. Для этого используют устройства гидросмыва и шнеки. Извлечённый песок высушивают на песковых площадках или в специальных вертикальных бункерах.

Нефтеловушки. Применяются для извлечения нефтепродуктов, масел, жира в виде всплывающей эмульсии. В этих аппаратах требуется много внимания уделять проектированию равномерного подвода и отвода воды и водораспределительным перегородкам и трубам. Также сложен отвод всплывающей эмульсии, поэтому необходимы скребковые транспортёры, перегоняющие нефтепродукты к отводным трубам. Всплывание нефтепродуктов всегда сопровождается оседанием тяжёлых частиц, поэтому необходимо предусматривать скребки и отвод осадка снизу аппарата. Недостатками гравитационных нефтеловушек являются громоздкость, небольшие степени очистки от нефтепродуктов (до 40 %), сложность утилизации эмульсии.

Первичные отстойники. Используют для извлечения твёрдых примесей любого характера перед более тонкой очисткой или биологическим обезвреживанием.

Вторичные отстойники. Их применяют после установок биологической очистки для отделения активного ила от очищенной воды.

1.2. Основные принципы расчёта и подбора отстойников

Они одинаковы для очистки жидких и газовых сред. Исходными данными являются:

– средний суточный объёмный расход Q , тыс. м³/сут. Если имеются колебания расхода, то расчёт следует вести, умножая средний расход на коэффициент неравномерности расхода K_w , определяемый как отношение максимального расхода к среднему;

– тип и количество механических примесей на входе в аппарат, C_0 , мг/м³;

– плотность среды и частиц, кг/м³, а также коэффициент динамической вязкости среды, μ , Па·с, определяющие скорость оседания.

Средняя скорость оседания или всплывания частиц в неподвижной среде, u_0 , мм/сек, называемая гидравлической крупностью осадка. За исключением кристаллических частиц, близких по форме к сферическим, её невозможно определить теоретически. Скорости оседания бесформенных хлопьев, кроме плотности и вязкости сильно зависят от их концентрации и взаимодействия друг с другом (стеснённое и не стеснённое осаждение), предыстории их образования, гидродинамических режимов в аппарате. Обычно их легко определить экспериментально с помощью проведения пробного отстаивания в цилиндрических стаканах в заводской лаборатории. Для городских сточных вод различного типа, скорости оседания известны и приведены в литературе в виде графиков и таблиц, см. [1], [2].

Средняя скорость поперечного движения среды через отстойник, v , мм/сек. Эта величина выбирается исходя из типа и количества загрязнений. А также формы отстойника при двух основных условиях: частице необходимо успеть осесть на дно или поверхность жидкости и не быть увлечённой в выходные отверстия, также движение воды должно быть наиболее спокойным и равномерным, без струй и завихрений, ухудшающих работу аппарата. Следовательно, она не может быть большой (не более 100–300 мм/сек для песка и 5–15 мм/сек для мелких частиц, хлопьев, масляных капель). Разумеется, занижать эту величину тоже нельзя, поскольку это приводит к резкому увеличению размера машины.

Тип и геометрическая форма отстойников определяется исходя из потребностей, специфики загрязнений, объёмного расхода, имеющейся производственной площади.

Степень очистки от взвешенных частиц. Для жидких сред, в большинстве случаев этот параметр не поддаётся теоретическому расчёту и определяется экспериментально (в процентах) в уже действующих аппара-

тах аналогичной конструкции, предназначения, количества и состава сточных вод.

Примеры решения и варианты заданий для очистки воды от механических примесей.

Для решения всех представленных здесь задач по очистке воды, можно пользоваться алгоритмами из [1], [2]. Методическое пособие [1] составлено для студентов, содержит все необходимые исходные данные, стандартные размеры, схемы и описания аппаратов, параметры сточных вод, скорости движения частиц для различных случаев, подробное описание расчёта, примеры к каждому из аппаратов. В качестве очищаемой среды используются сточные воды городского коммунального хозяйства с хорошо известными параметрами – расходы, составы, физико-химические свойства, и т. п.

2. Расчёты отстойников

Расчёт основан на подборе геометрических размеров аппарата и показан на примере горизонтального отстойника, *рис. 1*.

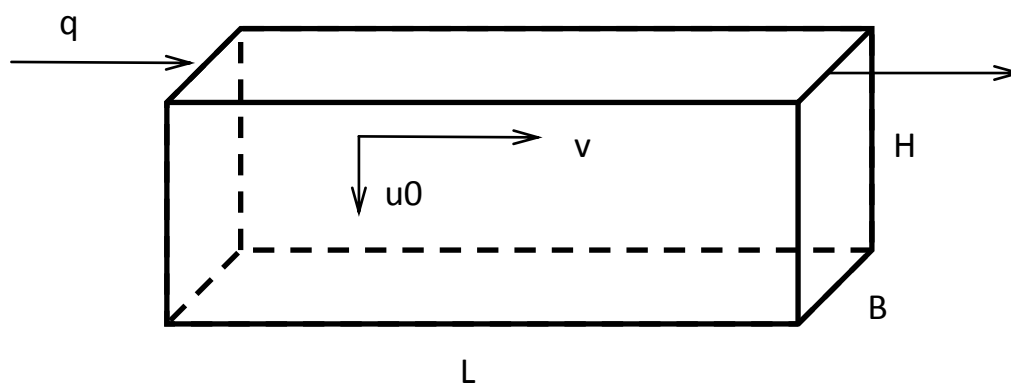


Рис. 1. Схема для расчёта горизонтального отстойника

Основное требование, обеспечивающее нормальную работу отстойника, заключается в том, чтобы среднее время достижения частицы дна (или поверхности при всплывании) аппарата должно быть меньше или равно среднему времени нахождения частицы среды в отстойнике. Также, сечение проходной зоны отстойника должно обеспечивать требуемый расход при выбранной поперечной скорости движения среды:

$$\tau = L/v = H/u_0 \quad (1)$$

$$q = v \cdot B \cdot H, \quad (2)$$

где, τ – время, сек, L , H , м – длина и глубина рабочей зоны аппарата, v , u_0 , м/сек – скорости движения среды и оседания частиц, q , м³/сек – секундный объёмный расход среды.

Один из размеров обычно известен исходя из конструкции, места, назначения, часто выбирается стандартным. Современные стандарты раз-

меров (см. [1]). Тогда два других определяются соотношениями (1)–(2). Для круглых в сечении аппаратов расчёт аналогичен, осложняясь только спиральным и неоднородным по скорости движением среды.

3. Песколовки

Пример расчёта

Рассчитать аэрируемую песколовку для очистки сточной воды коммунального хозяйства при среднесуточном расходе Q , 15 тыс. м³/сут, коэффициент неравномерности расхода K_w , 1,6. Норма водопотребления A , 270 л/(чел·сут), удельное содержание песка в сточной воде q_{oc} , 0,04 л/(сут·чел), гидравлическая крупность песка u_0 , 15 мм/с. Дополнительно рассчитать необходимый размер песковой площадки.

Рассчитываем максимальный секундный расход воды.

$$q_m = K_w \cdot Q \cdot 1000 / 3600 / 24 = 1,6 \cdot 15 \cdot 1000 / 3600 / 24 = 0,278 \text{ м}^3/\text{сек} \quad (3)$$

Принимаем одно $n = 1$ отделение песколовки, выбираем ([1, табл. 3.1]) горизонтальную скорость течения воды $v = 0,1$ м/с

Необходимое живое поперечное сечение одного отделения песколовки

$$\omega = q_m / n \cdot v = 0,278 / 1 \cdot 0,1 = 2,78 \text{ м}^2 \quad (4)$$

Принимаем отношение ширины к глубине $\alpha = B/H = 1,5$ и рассчитываем обе величины.

$$H = (\omega/\alpha)^{1/2} = (2,78/1,5)^{1/2} = 1,36 \text{ м} \quad (5)$$

$$B = \alpha \cdot H = 1,5 \cdot 1,36 = 2 \text{ м (с округл. до целых)} \quad (6)$$

Принимаем среднюю расчётную глубину воды в песколовке с учётом того, что половина её полной глубины заполнена песком.

$$H_s = H/2 = 1,36/2 = 0,68 \text{ м} \quad (7)$$

Рассчитываем длину песколовки с добавочным множителем $K_s = 2,39$ [1, табл. 3.2], учитывающим вращательное движение жидкости в песколовке.

$$L_s = 1000 \cdot K_s \cdot H_s \cdot v / u_0 = 1000 \cdot 2,39 \cdot 0,68 \cdot 0,1 / 15 = 11 \text{ м, (с округл до цел)} \quad (8)$$

Итак, получаем отношения размеров глубина : ширина : длина = 1,36 : 2 : 11 м.

Рассчитываем приведённое население, исходя из нормы водопотребления и среднесуточного расхода.

$$N_{пр} = 1000 \cdot Q \cdot 1000 / A = 1000 \cdot 15000 / 270 = 55556 \text{ чел} \quad (9)$$

Среднесуточный объём осадка, накапливаемый в песколовке.

$$W_{сут} = N_{пр} \cdot q_{oc} / 1000 = 55556 \cdot 0,04 / 1000 = 2,22 \text{ м}^3/\text{сут} \quad (10)$$

Принимаем интервал времени между выгрузками осадка $T_{oc} = 2$ сут и определяем объём пескового бункера одного отделения песколовки.

$$W = W_{сут} \cdot T_{oc} / n = 2,22 \cdot 2 / 1 = 4,44 \text{ м}^3 \quad (11)$$

Находим глубину бункера песколовки

$$h_б = W/B^2 = 4,44/4 = 1,11 \text{ м} \quad (12)$$

Наибольшая глубина слоя песка в песколовке находится с учётом коэффициента неравномерности распределения осадка $K_n = 3$.

$$h_{oc} = K_H \cdot W_{сут} / B / n / L_s = 3 \cdot 2,22 / 2 / 1 / 11 = 0,30 \text{ м} \quad (13)$$

Полная строительная высота песколовки.

$$H_c = H_s + h_{oc} + 0,5 = 0,68 + 0,3 + 0,5 = 1,48 \text{ м} \quad (14)$$

Определяем длину пескового лотка.

$$l_s = L_s - B = 11 - 2 = 9 \text{ м} \quad (15)$$

Расход промывной воды, при гидромеханическом удалении осадка рассчитываем исходя из скорости восходящего движения воды в лотке $v_h = 0,0065 \text{ м/с}$ и ширины лотка $b_s = 0,5 \text{ м}$.

$$q_h = v_h \cdot l_s \cdot b_s = 0,0065 \cdot 9 \cdot 0,5 = 0,03 \text{ м}^3/\text{сек} \quad (16)$$

Напор промывной воды в начале смывного трубопровода определяем исходя из максимальной высоты слоя песка в начале пескового лотка $h_0 = 0,2 \text{ м}$, и скорости промывной воды в начале смывного трубопровода $v_{тр} = 3 \text{ м/сек}$.

$$H_0 = 5,4 \cdot (h_0 + v_{тр}^2 / 2 / g) = 5,4 \cdot (0,2 + 3^2 / 2 / 9,81) = 3,56 \text{ м} \quad (17)$$

Общий расход воздуха для аэрации песколовки рассчитываем исходя из интенсивности аэрации $J_a = 4 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{час})$

$$Q_a = J_a \cdot B \cdot L_s \cdot n = 4 \cdot 2 \cdot 11 \cdot 1 = 88 \text{ м}^3/\text{час} \quad (18)$$

Добавочный расчёт песковых бункеров.

Годовой объём песка, задерживаемый в песколовках.

$$W_{год} = 365 \cdot W_{сут} = 365 \cdot 2,22 = 810,3 \text{ м}^3 \quad (19)$$

Рабочая площадь песковой площадки рассчитывается, исходя из максимальной годовой нагрузки на площадки $h_{год} = 3 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{год})$

$$S_p = W_{год} / h_{год} = 810,3 / 3 = 270,1 \text{ м}^2 \quad (20)$$

И полная площадь

$$S_{полн} = 1,3 \cdot S_p = 1,3 \cdot 270,1 = 351,1 \text{ м}^2 \quad (21)$$

Варианты заданий для расчёта песколовки

В таблице приведено всего 30 вариантов заданий. Поэтому, для получения своего варианта достаточно двухзначное число, составленное из двух последних цифр номера зачётной книжки, поделить на 30, взять полученный остаток (0–29) и использовать его в качестве номера варианта.

Таблица 1. Варианты заданий для расчёта песколовки

№	Тип песколовки	Среднесуточный расход, Q , тыс. м ³	Коэффициент неравномерности расхода, K_w	Норма водопотребления, A , л/(чел·сут)	Содержание песка, $q_{ос}$, л/(сут·чел)	Гидравлическая крупность осадка, u_0 , мм/сек	Дополнительно рассчитать песковую ...
0	Горизонтальная с прямолинейным движением воды	15	1,1	210	0,02	12	площадку
1	Горизонтальная с круговым движением воды	6	1,7	280	0,03	13	бункер
2	Тангенциальная	25	2,8	240	0,04	14	площадку

№	Тип песколовки	Среднесуточный расход, Q , тыс. м ³	Коэффициент неравномерности расхода, K_w	Норма водопотребления, A , л/(чел·сут)	Содержание песка, $q_{ос}$, л/(сут·чел)	Гидравлическая крупность осадка, U_0 , мм/сек	Дополнительно рассчитать песковую ...
3	Вертикальная	40	2,4	300	0,05	15	бункер
4	Аэрируемая	31	1,5	250	0,01	16	площадку
5	Горизонтальная с прямолинейным движением воды	12	1,9	310	0,02	17	бункер
6	Горизонтальная с круговым движением воды	4	3,8	270	0,03	18	площадку
7	Тангенциальная	50	1,51	210	0,04	19	бункер
8	Вертикальная	15	2,7	280	0,05	20	площадку
9	Аэрируемая	17	3,1	240	0,01	21	бункер
10	Горизонтальная с прямолинейным движением воды	20	1,4	300	0,02	22	площадку
11	Горизонтальная с круговым движением воды	44	1,3	250	0,03	23	бункер
12	Тангенциальная	52	1,9	310	0,04	24	площадку
13	Вертикальная	170	1,3	270	0,05	25	бункер
14	Аэрируемая	29	2,5	210	0,01	26	площадку
15	Горизонтальная с прямолинейным движением воды.	150	1,8	280	0,02	27	бункер
16	Горизонтальная с круговым движением воды	14	2,4	240	0,03	12	площадку
17	Тангенциальная	78	1,6	300	0,04	13	бункер
18	Вертикальная	24	2,1	250	0,05	14	площадку
19	Аэрируемая	118	1,4	310	0,01	15	бункер
20	Горизонтальная с прямолинейным движением воды	23	3,1	270	0,02	16	площадку
21	Горизонтальная с круговым движением воды	55	2,2	270	0,03	17	бункер
22	Тангенциальная	48	1,8	210	0,04	18	площадку
23	Вертикальная	120	1,2	280	0,05	19	бункер
24	Аэрируемая	72	2,6	240	0,01	20	площадку
25	Горизонтальная с прямолинейным движением воды.	58	3,4	300	0,02	21	бункер
26	Горизонтальная с круговым движением воды	25	2,7	250	0,03	22	площадку
27	Тангенциальная	95	1,5	310	0,04	23	бункер
28	Вертикальная	43	2,8	270	0,05	24	площадку
29	Аэрируемая	114	1,1	250	0,01	25	бункер

4. Нефтеловушки

Эти аппараты рассчитываются совершенно аналогично. Порядок расчёта и примеры можно посмотреть в [1]. В случае если размеры нефтеловушки превысят стандартные, предусмотреть два или три одинаковых аппарата.

Номер варианта использовать тот же.

Таблица 2. Варианты заданий для расчёта нефтеловушек

№	Тип аппарата	Среднесуточный расход воды, Q , тыс. м ³ /сут	Коэффициент неравномерности расхода, K_w	Исходная концентрация нефти, A_0 , мг/л	Конечная концентрация нефти, A_1 , мг/л	Вязкость нефти, μ , Па·с	Плотность нефти, ρ , тонн/м ³
0	Горизонтальная	5	1,1	400	90	0,0050	0,65
1	Горизонтальная многоярусная	25	2,4	240	70	0,0080	0,83
2	Радиальная	80	1,8	310	60	0,0065	0,71
3	Горизонтальная	45	3,6	390	80	0,0073	0,59
4	Горизонтальная многоярусная	120	1,3	180	50	0,0055	0,63
5	Радиальная	12	1,7	320	70	0,0082	0,85
6	Горизонтальная	78	2,9	350	60	0,0045	0,68
7	Горизонтальная многоярусная	5	1,1	210	50	0,0063	0,74
8	Радиальная	25	2,4	400	90	0,0050	0,65
9	Горизонтальная	80	1,8	240	70	0,0080	0,83
10	Горизонтальная многоярусная	45	3,6	310	60	0,0065	0,71
11	Радиальная	120	1,3	390	80	0,0073	0,59
12	Горизонтальная	12	1,7	180	50	0,0055	0,63
13	Горизонтальная многоярусная	78	2,9	320	70	0,0082	0,85
14	Радиальная	5	1,1	350	60	0,0045	0,68
15	Горизонтальная	25	2,4	210	50	0,0063	0,74
16	Горизонтальная многоярусная	80	1,8	400	90	0,0050	0,65
17	Радиальная	45	3,6	240	70	0,0080	0,83
18	Горизонтальная	120	1,3	310	60	0,0065	0,71
19	Горизонтальная многоярусная	12	1,7	390	80	0,0073	0,59
20	Радиальная	78	2,9	180	50	0,0055	0,63
21	Горизонтальная	5	1,1	320	70	0,0082	0,85
22	Горизонтальная многоярусная	25	2,4	350	60	0,0045	0,68
23	Радиальная	80	1,8	210	50	0,0063	0,74
24	Горизонтальная	45	3,6	400	90	0,0050	0,65
25	Горизонтальная многоярусная	120	1,3	240	70	0,0080	0,83

№	Тип аппарата	Среднесуточный расход воды, Q , тыс. м ³ /сут	Коэффициент неравномерности расхода, K_w	Исходная концентрация нефти, A_0 , мг/л	Конечная концентрация нефти, A_1 , мг/л	Вязкость нефти, μ , Па·с	Плотность нефти, ρ , тонн/м ³
26	Радиальная	12	1,7	310	60	0,0065	0,71
27	Горизонтальная	78	2,9	390	80	0,0073	0,59
28	Горизонтальная многоярусная	5	1,1	180	50	0,0055	0,63
29	Радиальная	25	2,4	320	70	0,0082	0,85

5. Очистка газовых выбросов от пыли

Механические загрязнения воздуха – пыль, сажа, конденсаты смол, дым являются столь же опасными для живого, как и загрязнения воды. Нарушается работа дыхания, возникает раздражение дыхательных путей, глаз, носа. Дополнительная нагрузка на дыхательный аппарат провоцирует бронхиальные и лёгочные заболевания. Оседание пыли на листву растений приводит к различным нарушениям. Кроме того, механические загрязнения воздуха сильно препятствуют и нарушают процессы очистки от токсичных газовых примесей. Аэрозольные частицы, состоящие из оксидов кремния, сажи, оксидов и карбонатов тяжёлых металлов, оксидов, силикатов и карбонатов калия, натрия, кальция, магния, капелек смол, являются токсичными.

В то же время, выделение пыли сопровождает любые процессы работы с твёрдыми материалами. Пиление, строгание, шлифование, сварка, работа любого транспорта. Добыча природных ископаемых, производство, хранение и транспортировка сыпучих материалов, взрывные работы, производство цемента и стекла, строительство, применение любого огня, отопительных, доменных, теплоэнергетических установок, пожары приводит к образованию огромного количества аэрозолей. Большой вклад дают и химические производства щелочей, кислот, сернистого газа, выделяя токсичные туманы.

Для защиты работников предприятия применяют как средства индивидуальной защиты – маски, спецодежду, противогазы, так и вытяжные устройства. Кроме того, многие производства требуют воздуха, гораздо более свободного от аэрозольных частиц, чем наружный и сопровождаются системами его очистки. Воздух от вытяжных устройств часто невозможно выбрасывать прямо в атмосферу и вентиляционные (аспирационные) системы должны иметь на выходе устройства очистки от пылевых частиц и туманов.

Наиболее простыми, дешёвыми, надёжными являются гравитационные способы выделения частиц, путём их оседания в специальных камерах. Простота конструкции, принципа действия уравнивается громоздкостью, недостаточно высокой степенью очистки, особенно от частиц малого размера. Частицы размером менее 10 мкм не могут удаляться этим

способом. Эффективность очистки может быть увеличена применением полочных систем, извилистых каналов движения воздуха, введением стержней, цепей и других препятствий, заставляющих струи воздуха изгибаться, уменьшая пути движения частицы и ускоряя их оседание действием инерционных сил. Другим способом повысить эффективность очистки и уменьшить размер аппаратов, является применение вихревых аппаратов, где струи воздуха закручиваются в цилиндрическом корпусе и оседают действием центробежных сил, больших по величине, чем гравитационные. Это позволяет избавляться от частиц размером 1–5 мкм. Циклоны обладают огромной производительностью. Для увеличения производительности собираются в батареи. Оплачивается это более высокими гидравлическими сопротивлениями, повышенными расходами энергии в вентиляторах. Кроме того, циклонные аппараты имеют большой абразивный износ стенок. Циклоны не способны выделять жидкие, липкие и влажные частицы.

Очистка от ещё более мелких частиц достигается фильтрованием через нетканые волокнистые слои, тканевые рукава и насыпные фильтры из песка, порошков угля, кокса, гравия и др. Огромное разнообразие природных и синтетических материалов, хемостойкость и термостойкость, механическая прочность позволяет создавать фильтры для любых условий, расходов, размеров и агрегатного состояния частиц. Они могут работать при обычных и повышенных (до 800 °С) температурах. Высокая степень очистки компенсируется большим гидравлическим сопротивлением, возрастающим по мере работы, периодичностью, сложностью, а иногда и невозможностью восстановления отработанных фильтров, а также громоздкостью аппаратов.

Этих недостатков лишены электростатические методы, где частицы заряжаются, проходя в тлеющем разряде, созданном тонкими проводами, расположенными по центру аппарата и находящимся под напряжением постоянного тока около 10–15 кВ. Заряженные частицы под действием электростатических полей устремляются к заземлённому металлическому корпусу и оседают на нём. Электрофильтры эффективны для очистки от твёрдых, сыпучих, не слипающихся частиц любого размера. Работают непрерывно, могут использоваться при повышенных температурах. Эффективны при очистке дымовых газов. Они потребляют сравнительно немного электрической энергии в силу невысоких интенсивностей разряда, имеют малое гидравлическое сопротивление, небольшой размер, легки в обслуживании, эксплуатации и ремонте. Метод не эффективен при наличии влаги.

Наиболее практически применим по степени очистки от частиц любого размера и агрегатного состояния метод промывки газа водой. Достигается это пропусканием запылённого газа через полочные, пенные, насадочные скрубберы, орошаемые водой, а также через трубы Вентури. В скрубберах Вентури газ сильно ускоряется, проходя через сжимающийся участок трубы. В самом тонком месте в поток впрыскивается вода, которая мгновенно поглощает все аэрозольные частицы. Далее газ замедляется,

проходя расширитель, и поток направляется в цилиндрическую колонну, где газ отделяется от жидкости.

Мокрый способ имеет почти абсолютную эффективность по очистке от частиц любого размера, состава и агрегатного состояния. Однако требует дополнительных затрат на подачу воды, мощных воздуходувок, а также дополнительных устройств по очистке отработанной воды от загрязнений. Очищенный воздух обладает повышенной влажностью. Поэтому невозможна очистка горячего воздуха из-за образования большого количества пара.

Основные параметры, необходимые для расчёта установок пылеочистки.

1. Объемный расход очищаемого воздуха, V , м³/сек.
2. Химический и агрегатный состав загрязнений.
3. Температура и коэффициент динамической вязкости воздуха, t_r , °С, μ_r , Па·с.
4. Плотности частиц и воздуха при рабочей температуре, $\rho_{ч}$, ρ_r , кг/м³.

Физические свойства среды могут быть взяты из справочников (напр., [3]) или из интернета (это быстро, легко, но их следует проверять и особое внимание уделять размерностям).

5. Входная и выходная концентрация загрязнений, $c_{вх}$, $c_{вых}$, г/м³. Выходную концентрацию иногда заменяют требуемой степенью очистки $\alpha = (c_{вх} - c_{вых})/c_{вх}$.

6. Распределение частиц по размерам. Моделирование механических процессов в аппаратах, наиболее просто проводится для частиц круглой формы. Для грубых технических расчётов это вполне оправдано. Поэтому, основой для расчёта является гистограмма или дискретная функция распределения частиц по диаметрам следующего вида (рис. 2):

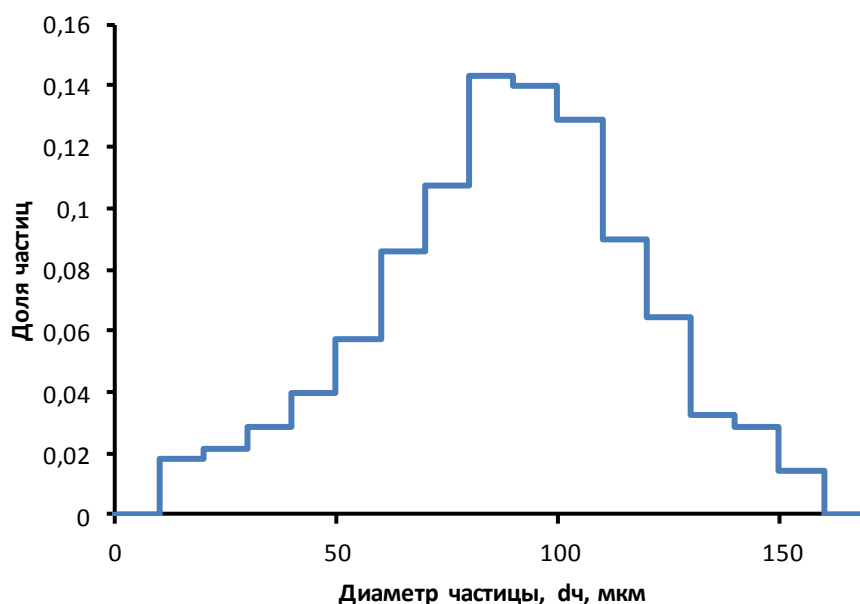


Рис. 2. Функция распределения частиц по размерам

Или в виде табличных значений: диапазон диаметров частиц, $dc_i - dc_{i+1}$, мкм – доля частиц в этом диапазоне, x_i , где $i = 1..n$ – номер диапазона, n – их общее число ($n = 15$ на *рис. 2*). Эти данные обычно получают экспериментально, методами фильтрования через фильтры, задерживающие частицы разного размера по типу ситового анализа.

Все дальнейшие расчёты согласованы с [4]. Там же можно посмотреть конструкции, принцип работы, достоинства и недостатки аппаратов.

Расчёт пылеосадительной камеры

Основные принципы расчёта совпадают со случаем очистки жидких сред. Основное отличие заключается в том, что вязкость воздуха на два порядка меньше вязкости воды и взаимодействие частиц отсутствует. В жидкой среде частицы оседают коллективно, чаще всего с выраженной границей раздела осветлённой и не осветлённой жидкости. В случае газа, каждая частица оседает со своей скоростью, определяемой в зависимости от её диаметра $w_{oc}(dc)$, м/с. Поэтому и степени очистки от частиц разного диаметра отличаются и должны считаться отдельно по каждому из диапазонов $dc_i - dc_{i+1}$. Полученные таким образом частные, или парциальные степени очистки a_i , являются характеристикой аппарата и основной целью расчёта. Также в расчётах встречается дополнительная к a_i величина, $N_i = 1 - a_i$ – доля частиц, прошедших через аппарат.

Если известны распределения частиц запылённого воздуха по размерам в виде таблицы доли $x_i(d_i)$, то следует посчитать общую степень очистки

$$a_{общ} = (c_{вх} - c_{вых})/c_{вх} = 1 - \sum_{i=1..n} x_i \cdot (1 - a_i) = 1 - \sum_{i=1..n} x_i \cdot N_i \quad (22)$$

и концентрацию частиц на выходе из аппарата, суммируя по указанным диапазонам диаметров:

$$c_{вых} = c_{вх} (1 - a_{общ}) \quad (23)$$

Второй основной расчётный параметр – гидравлическое сопротивление аппарата, Δp , Па, необходим для подбора вентилятора.

Пример расчёта пылеосадительной камеры

Рассчитать размеры и степени очистки для прямоугольной пылеосадительной камеры очистки вентиляционного воздуха деревообрабатывающего предприятия, при следующих входных параметрах:

Объёмный расход очищаемого воздуха, $V = 30$ тыс. м³/сут = 0,347 м³/сек

Исходная концентрация пыли в воздухе, $c_{исх}$, 55 г/м³

Плотность воздуха при рабочих условиях, ρ_r , 1,29 кг/м³

Вязкость воздуха при рабочих условиях, μ_r , $1,8 \cdot 10^{-5}$ Па·с

Плотность частиц пыли, $\rho_{ч}$, 500 кг/м³

Отношение длины к высоте камеры, $K_1 = L/H = 10$.

Отношение длины к ширине камеры, $K_2 = L/B = 8$.

Распределение частиц по размерам:

Номер, i	1	2	3	4	5
Доля частиц, x_i	0,031	0,082	0,357	0,306	0,224

Примечание. Для учебного примера принять диаметры частиц каждого номера такими, какие получатся по нижеприведённому расчёту.

Решение. Задаёмся значением средней скорости горизонтального движения воздуха в камере, $v = 0,4$ м/с. Обычно в зависимости от размера и массы частиц, скорость выбирается в пределах (0,2–0,8 м/с).

Исходя из заданных геометрических отношений и условия согласования объёмного расхода и средней скорости движения $V = v \cdot B \cdot H$, находим:

$$\text{Длина камеры, } L = (V \cdot K_1 \cdot K_2 / v)^{1/2} = (0,347 \cdot 10 \cdot 8 / 0,4)^{1/2} = 8,33 \text{ м} \quad (24)$$

$$\text{Высота камеры, } H = L / K_1 = 8,33 / 10 = 0,83 \text{ м} \quad (25)$$

$$\text{Ширина камеры, } B = L / K_2 = 8,33 / 8 = 1,04 \text{ м} \quad (26)$$

Литература [4] советует далее рассчитать скорость осаждения частиц, которые будут уловлены в камере на 50% по критериальной формуле

$$w_{oc}^{50} = 1,5 \cdot v \cdot H / L = 1,5 \cdot 0,4 \cdot 1 / 10 = 0,06 \text{ м/с} \quad (27)$$

Однако проверка показывает, что она не согласуется с результатами дальнейшего уточнённого расчёта и этот параметр надо подбирать так, чтобы обеспечить это согласование, для чего удобно выполнять расчёт в MS Excel. В данном случае расчёт будет согласован, если принять следующее значение: $w_{oc}^{50} = 0,015$ м/с.

Далее, помня о том, что в воздухе находятся частицы разного диаметра и разных скоростей осаждения, выбираем несколько значений скорости осаждения, больше и меньше заданного значения, как показано в *табл. 2*, в которой удобно производить дальнейшие расчёты.

По заданным скоростям осаждения рассчитываем соответствующие диаметры частиц, считая, что осаждение происходит в ламинарной области действия закона Стокса:

$$d_{oc} = 10^6 \cdot (18 \cdot \mu_r \cdot w_{oc} / g / (\rho_{ch} - \rho_r))^{1/2} = 10^6 \cdot (18 \cdot 1,8 \cdot 10^{-5} \cdot w_{oc} / 9,807 / (500 - 1,29))^{1/2}, \text{ мкм}, \quad (28)$$

где g – ускорение свободного падения, а остальные параметры объяснены ранее. Результаты расчёта показаны во второй строке *табл. 3*.

Поскольку в среднем, частицы в аппарате движутся вниз по наклонной линии с тангенсом w_{oc}/v , то успеет частица осесть на дно или пройдёт насквозь, зависит не только от скорости её осаждения, но и от высоты h , на которой она войдёт в камеру. Считаем, что на каждой высоте находится одинаковая доля частиц. Отчитывая h сверху камеры, выбираем несколько сечений, например, делящих высоту в отношениях $h/H = \{0; 0,25; 0,5; 0,75; 1\}$, как показано в первом горизонтальном столбце *табл. 3*. В расчёте учитывается, что турбулентная диффузия искажает строгое движение частицы по прямой линии. Вероятность найти частицу выше или ниже прямой траектории принимается подчиняющейся закону нормального распределения. Тогда в

каждой из $5 \cdot 5 = 25$ ячеек таблицы следует рассчитать следующие величины:

Таблица 3. Расчёт парциальных степеней очистки

от частиц разного размера в прямоугольной пылеосадительной камере

w_{oc} , м/с		0,005	0,01	0,015	0,02	0,025
Диаметр частиц, d_{oc} , мкм		18,2	25,7	31,5	36,4	40,7
		Параметры функции распределения и доля частиц, прошедшая через аппарат, $x_1/x_2/N$				
Горизонтальные сечения аппарата, отчитываемые сверху вниз h/H	0	0,53	0,06	-0,42	-0,89	-1,36
		1,47	1,94	2,42	2,89	3,36
		0,63	0,50	0,33	0,18	0,09
	0,25	0,78	0,31	-0,17	-0,64	-1,11
		1,22	1,69	2,17	2,64	3,11
		0,67	0,57	0,42	0,26	0,13
	0,5	1,03	0,56	0,08	-0,39	-0,86
		0,97	1,44	1,92	2,39	2,86
		0,68	0,64	0,51	0,34	0,19
	0,75	1,28	0,81	0,33	-0,14	-0,61
		0,72	1,19	1,67	2,14	2,61
		0,66	0,67	0,58	0,43	0,27
	1	1,53	1,06	0,58	0,11	-0,36
		0,47	0,94	1,42	1,89	2,36
		0,62	0,68	0,64	0,51	0,35
Средняя доля частиц, прошедшая через аппарат, N_i		0,65	0,61	0,50	0,34	0,21
Парциальная степень очистки, a_i		0,35	0,39	0,50	0,66	0,79

Безразмерные параметры функции распределения (верхний и нижний):

$$x_1 = (H + h - L \cdot w_{oc}/v)/(2 \cdot D_t - L/v) = (1 + h/H - L/H \cdot w_{oc}/v)/(7 \cdot 10^{-3} \cdot L/H) \quad (29)$$

$$x_2 = (H - h + L \cdot w_{oc}/v)/(2 \cdot D_t - L/v) = (1 - h/H + L/H \cdot w_{oc}/v)/(7 \cdot 10^{-3} \cdot L/H), \quad (30)$$

где $D_t = 0,02 \cdot v \cdot H \cdot 0,03^{1/2}$ – коэффициент турбулентной диффузии.

Доля частиц с заданной скоростью осаждения в выбранном сечении, прошедшая аппарат без осаждения:

$$N = \Phi(x_1, 0, 1) + \Phi(x_2, 0, 1) - 1, \quad (31)$$

где $\Phi(x, 0, 1)$ – интегральная функция нормального распределения с медианой 0 и среднеквадратическим отклонением 1. Таблица этой функции приведена в [2].

Рассчитываются парциальные степени очистки от частиц заданного размера:

$$a_i = 1 - N_i \quad (32)$$

Значение a_3 при скорости осаждения $w_{oc}^{50} = 0,015$ по замыслу расчёта, должно быть равным 0,5. Однако при использовании формулы (26) это никогда не будет обеспечено в силу её приближённого характера. Поэтому, как уже говорилось ранее, значение w_{oc}^{50} следует в первом приближении

выбрать по формуле (26), а затем, после вычисления a_3 её нужно подбирать так, чтобы обеспечить половинное значение.

После этого строится график парциальных степеней очистки в зависимости от диаметра частиц, *рис. 3*, являющийся главной характеристикой эффективности камеры очистки.

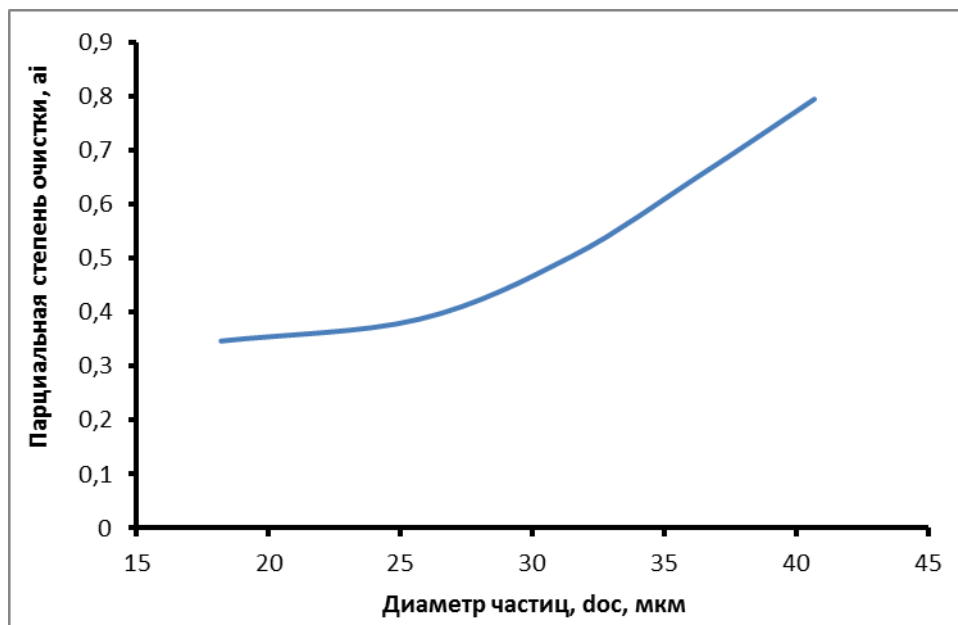


Рис. 3. Зависимость парциальных степеней очистки от размера пылевых частиц в прямоугольной осадительной камере.

Усредняя доли частиц по всем сечениям, получаем долю частиц заданной скорости осаждения, прошедшую через аппарат N_i . А также парциальные степени очистки $a_i = 1 - N_i$. После этого, по формулам (22) и (23) считаем общую степень очистки, и выходную концентрацию частиц:

$$a_{\text{общ}} = 1 - 0,65 \cdot 0,031 + 0,61 \cdot 0,082 + 0,50 \cdot 0,357 + 0,34 \cdot 0,306 + 0,21 \cdot 0,224 = 0,60 \quad (33)$$

$$c_{\text{вых}} = 55 \cdot (1 - 0,60) = 22 \text{ г/м}^3 \quad (34)$$

Из расчёта следует, что степень очистки в выбранных условиях невелика. Достичь требуемой эффективности можно либо уменьшая скорость продольного движения воздуха v , либо увеличивая длину аппарата.

Расчёт гидравлического сопротивления камеры производить не следует.

Варианты заданий для расчёта пылеосадительной камеры приведены в *табл. 4*. Номер своего варианта оставить прежним. Плотность и вязкость воздуха выбрать самостоятельно по справочной литературе.

Таблица 4. Варианты заданий по расчёту пылеосадительной камеры.

№	Расход воздуха, V, тыс. м ³ /сут	Исходная конц-я частиц, сис. х, г/м ³	Плотн част, ρ _ч , кг/м ³	Геометрическое отношение		Прод скор. движ возд., v, м/с	Распределение частиц по размерам				
				Длины к высоте, L/H	Длины к шрине, B/H		1	2	3	4	5
0	20	30	2600	8	6	0,6	0,122	0,212	0,438	0,106	0,122
1	56	15	500	15	14	0,2	0,092	0,241	0,166	0,362	0,139
2	125	25	2300	12	12	0,8	0,158	0,274	0,189	0,274	0,105
3	80	24	2600	10	8	0,9	0,124	0,215	0,297	0,323	0,041
4	15	12	800	20	9	0,3	0,078	0,204	0,281	0,204	0,234
5	120	40	1200	18	12	0,6	0,166	0,145	0,199	0,434	0,055
6	300	28	580	16	10	0,25	0,064	0,249	0,343	0,249	0,095
7	45	30	2600	8	6	0,6	0,048	0,127	0,523	0,253	0,048
8	84	15	500	15	14	0,2	0,133	0,115	0,477	0,231	0,044
9	130	25	2300	12	12	0,8	0,078	0,204	0,281	0,204	0,234
10	70	24	2600	10	8	0,9	0,122	0,159	0,219	0,318	0,183
11	25	12	800	20	9	0,3	0,037	0,292	0,268	0,292	0,112
12	69	40	1200	18	12	0,6	0,074	0,389	0,268	0,194	0,074
13	56	28	580	16	10	0,25	0,039	0,202	0,417	0,303	0,039
14	84	30	2600	8	6	0,6	0,035	0,275	0,379	0,275	0,035
15	14	15	500	15	14	0,2	0,048	0,380	0,349	0,127	0,097
16	35	25	2300	12	12	0,8	0,097	0,127	0,349	0,380	0,048
17	56	24	2600	10	8	0,9	0,077	0,303	0,278	0,303	0,039
18	38	12	800	20	9	0,3	0,217	0,189	0,260	0,189	0,145
19	68	40	1200	18	12	0,6	0,122	0,159	0,438	0,159	0,122
20	48	28	580	16	10	0,25	0,114	0,199	0,411	0,199	0,076
21	58	30	2600	8	6	0,6	0,045	0,235	0,323	0,352	0,045
22	49	15	500	15	14	0,2	0,055	0,290	0,399	0,145	0,111
23	29	25	2300	12	12	0,8	0,048	0,253	0,523	0,127	0,048
24	94	24	2600	10	8	0,9	0,072	0,281	0,258	0,281	0,108
25	150	12	800	20	9	0,3	0,166	0,145	0,199	0,434	0,055
26	230	40	1200	18	12	0,6	0,074	0,195	0,402	0,292	0,037
27	76	28	580	16	10	0,25	0,169	0,221	0,304	0,221	0,085
28	24	30	2600	8	6	0,6	0,037	0,292	0,268	0,292	0,112
29	98	15	500	15	14	0,2	0,083	0,216	0,445	0,216	0,041

Расчёт циклонов.

Эта часть [4] составлена без заметных ошибок, проста для понимания и уточняющего примера не требует. Там приведены все необходимые алгоритмы расчёта, типы циклонов, рабочие условия.

Варианты заданий для расчёта циклонов приведены в *табл. 5*.
Номер варианта прежний.

Во всех случаях требуется рассчитать размеры циклона, общую степень очистки и гидравлическое сопротивление. Физические параметры, плотность и вязкость приведены для рабочих условий.

Таблица 5. Варианты заданий для расчёта циклонов

№	Тип циклона	Расход газа, V, тыс. м ³ /сут	Медианный размер частиц, d ₅₀ , мкм	Ширина распределения, σ	Плотность газа, кг/м ³	Вязкость газа, мкПа·с	Содержание пыли, г/м ³	Плотность частиц, кг/м ³
0	ЦН-11	14	20	2,0	1,25	18	15	2700
1	ЦН-15	26	15	1,5	1,32	15	24	500
2	ЦН-15у	64	30	2,5	1,20	16	30	800
3	ЦН-24	67	10	1,8	1,30	20	28	2200
4	СИОТ	32	50	2,5	1,25	21	12	1200
5	ВЦНИИОТ	121	32	3,5	1,28	14	48	1600
6	ЛИОТ	289	25	2,9	1,33	17	36	1900
7	ЦКК	84	56	2,1	1,22	19	22	2300
8	РЦ	59	34	1,5	1,32	15	24	500
9	ЦБР	40	23	2,5	1,20	16	30	800
10	ЦН-11	84	42	1,8	1,30	20	28	2200
11	ЦН-15	59	30	2,5	1,25	21	12	1200
12	ЦН-15у	36	25	3,5	1,28	14	48	1600
13	ЦН-24	49	20	2,9	1,33	17	36	1900
14	СИОТ	40	20	2,1	1,22	19	22	2300
15	ВЦНИИОТ	39	15	2,0	1,25	18	15	2700
16	ЛИОТ	46	30	1,5	1,32	15	24	500
17	ЦКК	30	10	2,5	1,20	16	30	800
18	РЦ	49	50	1,8	1,30	20	28	2200
19	ЦБР	46	32	2,5	1,25	21	12	1200
20	ЦН-11	68	25	3,5	1,28	14	48	1600
21	ЦН-15	60	56	2,9	1,33	17	36	1900
22	ЦН-15у	39	34	2,1	1,22	19	22	2300
23	ЦН-24	38	23	1,5	1,32	15	24	500
24	СИОТ	93	42	2,5	1,20	16	30	800
25	ВЦНИИОТ	85	30	1,8	1,30	20	28	2200
26	ЛИОТ	38	25	2,5	1,25	21	12	1200
27	ЦКК	59	20	3,5	1,28	14	48	1600
28	РЦ	54	50	2,9	1,33	17	36	1900
29	ЦБР	56	32	2,1	1,22	19	22	2300

Литература

1. Гудков А. Г. Механическая очистка сточных вод: учеб. пособие / А. Г. Гудков. – Вологда, 2003. – 152 с.
2. Ласков Ю. М. Примеры расчёта канализационных сооружений: учеб. пособие для вузов / Ю. М. Ласков, Ю. В. Воронов, В. И. Калицун. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Стройиздат, 1987. – 255 с.
3. Павлов К. Ф., Романков П. Г., Носков А. А. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии: учеб. пособие для вузов / под ред. чл.-корр. АН СССР П. Г. Романкова. – 10-е изд., перераб. и доп. – Л.: Химия, 1987. – 576 с.
4. Ветошкин А. Г. Процессы и аппараты пылеочистки: учеб. пособие / А. Г. Ветошкин. – Пенза, 2005. – 210 с.
5. Техника и технология защиты окружающей среды. Курсовые работы [Электронный ресурс]: метод. указания / Сост. Витковская Р. Ф., Шаханов В. Д. – СПб.: СПГУТД, 2015.– 46 с.– Режим доступа: <http://publish.sutd.ru>, по паролю.