

Министерство образования и науки Российской Федерации
Тольяттинский государственный университет
Институт машиностроения
Кафедра «Управление промышленной
и экологической безопасностью»

И.И. Рашоян

РАСЧЕТ, ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ СИСТЕМ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ

**Электронное учебно-методическое пособие
для студентов очной формы обучения**

© ФГБОУ ВО «Тольяттинский
государственный университет», 2017

ISBN 978-5-8259-1142-7

УДК 504.06/628.51

ББК 30н

Рецензенты:

канд. биол. наук, доцент, научный сотрудник
Института экологии Волжского бассейна РАН *Н.Г. Шерышева*;
канд. пед. наук, доцент Тольяттинского государственного
университета *Л.А. Угарова*.

Рашоян, И.И. Расчет, проектирование и повышение надежности систем обеспечения безопасности : электронное учебно-методическое пособие для студентов очной формы обучения / И.И. Рашоян. – Тольятти : Изд-во ТГУ, 2017. – 1 оптический диск.

Учебно-методическое пособие содержит теоретические сведения и методические указания по выполнению практических работ по курсу «Расчет, проектирование и повышение надежности систем обеспечения безопасности».

Предназначено для студентов направления подготовки 20.04.01 «Техносферная безопасность» по магистерской программе «Системы управления производственной, промышленной и экологической безопасностью» очной формы обучения.

Текстовое электронное издание.

Рекомендовано к изданию научно-методическим советом Тольяттинского государственного университета.

Минимальные системные требования: IBM PC-совместимый компьютер: Windows XP/Vista/7/8; ПИИ 500 МГц или эквивалент; 128 Мб ОЗУ; SVGA; CD-ROM; Adobe Acrobat Reader.

Редактор *Г.В. Данилова*

Технический редактор *Н.П. Крюкова*

Компьютерная верстка: *Л.В. Сызганцева*

Художественное оформление,

компьютерное проектирование: *И.И. Шишкина*

Дата подписания к использованию 13.04.2017.

Объем издания 14,0 Мб.

Комплектация издания:

компакт-диск, первичная упаковка.

Заказ № 1-118-15.

Издательство Тольяттинского государственного университета

445020, г. Тольятти, ул. Белорусская, 14,

тел. 8 (8482) 53-91-47, www.tltsu.ru

Содержание

ВВЕДЕНИЕ	6
Критерии оценки выполнения практической работы	13
Модуль I. РАСЧЕТ И ПРОЕКТИРОВАНИЕ СИСТЕМ	
ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ АТМОСФЕРЫ	14
1.1. Классификация пылегазовых выбросов	14
1.2. Основные методы очистки пылегазовых выбросов	16
1.3. Физико-химические и массообменные методы и аппараты очистки пылегазовых выбросов	18
1.4. Пылеулавливающие и сепарационные методы и аппараты очистки пылегазовых выбросов	26
1.5. Коагуляция	37
Практическая работа 1. Расчет характеристик рукавных фильтров	39
Практическая работа 2. Расчет и проектирование аппаратов механической очистки пылегазовых выбросов	55
Модуль II. РАСЧЕТ И ПРОЕКТИРОВАНИЕ СИСТЕМ	
ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ОБЪЕКТОВ ГИДРОСФЕРЫ ..65	
2.1. Загрязнения и классификация сточных вод	65
2.2. Классификация способов очистки сточных вод	67
2.3. Отстаивание сточных вод	69
2.4. Центробежное осаждение примесей из сточных вод	73
2.5. Фильтрование сточных вод	77
2.6. Разбавление примесей в гидросфере	82
2.7. Массообменные процессы и аппараты очистки сточных вод	84
2.8. Химические процессы очистки сточных вод	89
2.9. Физико-химические процессы и аппараты очистки сточных вод	94
2.10. Биохимические процессы очистки сточных вод	107
2.11. Термические процессы обработки сточных вод	110
Практическая работа 3. Расчет решеток для очистки сточных вод	114
Практическая работа 4. Расчет песколовков для очистки сточных вод	119
Практическая работа 5. Расчет аккумулирующей емкости для очистки сточных вод	126

Модуль III. РАСЧЕТ И ПРОЕКТИРОВАНИЕ СИСТЕМ	
ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ОБЪЕКТОВ ЛИТОСФЕРЫ ..	136
3.1. Классификация промышленных отходов и методы защиты литосферы	136
3.2. Термические методы обработки твердых отходов	139
3.3. Биотехнологии	151
3.4. Механическая переработка твердых отходов	155
3.5. Обогащение при рекуперации твердых отходов	159
3.6. Обезвреживание твердых отходов	162
Практическая работа 6. Расчет вместимости полигонов для складирования ТБО	164
Модуль IV. ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ СИСТЕМ	
ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ	172
4.1. Основные понятия теории надежности технических систем	172
4.2. Надежность невосстанавливаемых элементов или изделий	175
4.3. Надежность восстанавливаемых элементов или изделий	177
4.4. Надежность сложных систем	178
4.5. Конструктивные способы обеспечения надежности	182
4.6. Повышение надежности резервированием элементов системы	189
4.7. Повышение надежности наиболее ненадежного узла системы	195
4.8. Технологические способы обеспечения надежности в процессе изготовления	196
4.9. Обеспечение надежности сложных технических систем в условиях эксплуатации	200
Практическая работа 7. Количественный анализ надежности систем обеспечения безопасности	205
Практическая работа 8. Выбор и обоснование методов повышения надежности систем обеспечения безопасности	217
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	222
Приложение А	223
Приложение Б	225

ВВЕДЕНИЕ

Защита окружающей среды является составной частью концепции устойчивого развития человеческого общества, обеспечивающего потребности ныне живущих людей без ущерба удовлетворению потребностей будущих поколений. Концепция устойчивого развития не сможет реализоваться, если не будут разработаны конкретные программы действий по предотвращению загрязнения окружающей среды, включающие организационные, технические и технологические разработки.

Загрязнением окружающей среды можно назвать изменение качества среды, способное вызвать отрицательные последствия. Оптимальные для жизни и деятельности человека условия окружающей среды находятся в определенных, относительно узких пределах. Увеличение или уменьшение границ этих пределов означает качественное изменение условий жизни человека.

Нормирование в области охраны окружающей среды заключается в установлении нормативов качества окружающей среды, нормативов допустимого воздействия на окружающую среду при осуществлении хозяйственной и иной деятельности. При их соблюдении обеспечивается устойчивое функционирование естественных экологических систем и сохраняется биологическое разнообразие. Нормирование также заключается в разработке нормативных документов в области охраны окружающей среды.

Нормативы качества окружающей среды – нормативы, которые установлены в соответствии с физическими, химическими, биологическими и иными показателями для оценки состояния окружающей среды. Нормативы качества окружающей среды устанавливаются в целях сохранения естественных экологических систем, генетического фонда растений, животных и других организмов. В настоящее время основным таким нормативом является предельно допустимая концентрация:

ПДК – предельно допустимая концентрация химического вещества в воздухе рабочей зоны, мг/м³, которая не должна вызывать заболевания или отклонения в состоянии здоровья, обнаруживаемая современными методами исследования, в процессе работы или

в отдаленные сроки жизни настоящего и последующего поколений при ежедневной (кроме выходных дней) работе в пределах 8 часов или другой продолжительности, но не более 41 часа в неделю, в течение всего рабочего стажа;

ПДК_{сс} — предельно допустимая среднесуточная концентрация химического вещества в воздухе населенных мест, мг/м³, которая не должна оказывать на человека прямого или косвенного вредного воздействия при неопределенно долгом (годы) вдыхании;

ПДК_{мр} — предельно допустимая максимальная разовая концентрация химического вещества в воздухе населенных мест, мг/м³, которая не должна вызывать рефлекторных (в том числе субсенсорных) реакций в организме человека при вдыхании в течение 30 минут. Этот показатель устанавливается для веществ, обладающих специфическим действием (например, резким запахом), и может рассматриваться как норматив, если его значение ниже, чем ПДК_{сс}.

При установлении нормативов качества окружающей среды учитываются природные особенности территорий и акваторий, назначение природных объектов и природно-антропогенных объектов, в том числе особо охраняемых территорий.

Нормативы допустимого воздействия на окружающую среду:

- нормативы допустимых выбросов и сбросов веществ и микроорганизмов;
- нормативы образования отходов производства и потребления и лимиты на их размещение;
- нормативы допустимых выбросов и сбросов веществ и микроорганизмов;
- нормативы образования отходов производства и потребления и лимиты на их размещение;
- нормативы допустимых физических воздействий (количество тепла, уровни шума, вибрации, ионизирующего излучения, напряженности электромагнитных полей и др.);
- нормативы допустимого изъятия компонентов природной среды;
- нормативы допустимой антропогенной нагрузки;
- нормативы иного допустимого воздействия на окружающую среду.

Качество атмосферного воздуха — совокупность физических, химических и биологических свойств воздуха, отражающих степень

его соответствия гигиеническим и экологическим нормативам качества атмосферного воздуха.

Гигиенический норматив качества атмосферного воздуха – критерий, который отражает предельно допустимое содержание вредных или загрязняющих веществ в атмосферном воздухе и при котором отсутствует вредное воздействие на здоровье человека.

Экологический норматив качества атмосферного воздуха – критерий, который отражает предельно допустимое содержание вредных или загрязняющих веществ в воздухе и при котором отсутствует вредное воздействие на окружающую природную среду.

Качество природных вод и почв зависит от состава и количества растворенных и взвешенных веществ, микроорганизмов, гидробионтов, а также от температуры, кислотности и других физико-химических показателей. Таким образом, оценка качества воды и почвы может производиться по физическим, химическим, бактериологическим и гидробиологическим показателям.

Организационно-технические методы охраны окружающей среды можно условно разделить на активные и пассивные [1].

Активные методы защиты окружающей среды представляют собой технологические решения по созданию ресурсосберегающих и малоотходных технологий.

Пассивные методы защиты окружающей среды делятся на две подгруппы: 1) рациональное размещение источников загрязнения; 2) локализация источников загрязнения.

В основе многих средозащитных технологий лежат физические и химические превращения.

Специфическую группу составляют биохимические процессы – химические превращения, протекающие с участием субъектов живой природы.

В зависимости от основных закономерностей, характеризующих протекание средозащитных процессов, эти процессы подразделяют на следующие группы:

- механические;
- гидромеханические;
- массообменные,
- химические;

- физико-химические;
- тепловые;
- биохимические;
- процессы, осложненные химической реакцией.

К *механическим* процессам, основой которых является механическое воздействие на твердые и аморфные материалы, относят измельчение (дробление), сортирование (классификация), прессование и смешивание сыпучих материалов. Движущей силой этих процессов являются силы механического давления или центробежная сила.

К *гидромеханическим* процессам, в основе которых лежит гидростатическое или гидромеханическое воздействие на среды и материалы, относят перемешивание, отстаивание (осаждение), фильтрование, центрифугирование. Движущей силой этих процессов является гидростатическое давление или центробежная сила.

К *массообменным (диффузионным)* процессам, в которых большую роль наряду с теплопередачей играет переход вещества из одной фазы в другую за счет диффузии, относят абсорбцию, адсорбцию, десорбцию, экстрагирование, ректификацию, сушку и кристаллизацию. Движущей силой этих процессов является разность концентраций переходящего вещества во взаимодействующих фазах.

Химические процессы, протекающие с изменением физических свойств и химического состава исходных веществ, характеризуются превращением одних веществ в другие, изменением их поверхностных и межфазных свойств. К этим процессам можно отнести процессы катализа, нейтрализации, окисления и восстановления. Движущей силой химических процессов является разность химических (термодинамических) потенциалов.

Физико-химические процессы характеризуются взаимосвязанной совокупностью химических и физических процессов. К физико-химическим процессам разделения, основой которых являются физико-химические превращения веществ, можно отнести коагуляцию и флокуляцию, флотацию, ионный обмен, обратный осмос и ультрафильтрацию, дезодорацию и дегазацию, электрохимические методы, в частности, электрическую очистку газов. Движущей силой этих процессов является разность физических и термодинамических потенциалов разделяемых компонентов на границах фаз.

К *тепловым* процессам, основой которых является изменение теплового состояния взаимодействующих сред, относят нагревание, охлаждение, выпаривание и конденсацию. Движущая сила этих процессов – разность температур (термических потенциалов) взаимодействующих сред.

Биохимические процессы, в основе которых лежат каталитические ферментативные реакции биохимического превращения веществ в процессе жизнедеятельности микроорганизмов, характеризуются протеканием биохимических реакций и синтезом веществ на уровне живой клетки. Движущая сила этих процессов – энергетический уровень (потенциал) живых организмов.

Указанная классификация не является жесткой и неизменной. В реальной действительности многие процессы осложнены протеканием смежно-параллельных процессов. Например, массообменные и химические процессы часто сопровождаются тепловыми процессами. Так, ректификацию, сушку и кристаллизацию можно отнести к комбинированным тепломассообменным процессам. Процессы абсорбции, адсорбции часто сопровождаются химическими превращениями.

В процессе изучения дисциплины «Расчет и проектирование систем обеспечения безопасности» студенты осваивают:

- основные методологические подходы и принципы расчета и проектирования систем обеспечения безопасности;
- основы проектирования сооружений для очистки воздуха;
- основы проектирования сооружений для очистки сточных вод;
- основы проектирования сооружений для очистки и переработки техногенных отходов;
- применение основных принципов создания систем экологической безопасности в профессиональной деятельности;
- методы расчетов основных технологических параметров систем обеспечения безопасности техногенных объектов;
- основные методы повышения надежности систем обеспечения безопасности.

Цель дисциплины – повышение качества подготовки магистров по вопросам расчета и проектирования систем обеспечения безопасности.

Задачи:

- 1) изучить методологические подходы и основные принципы расчетов и проектирования систем обеспечения безопасности, основы проектирования сооружений для очистки воздуха, сточных вод, переработки техногенных отходов;
- 2) освоить применение основных принципов создания систем экологической безопасности в профессиональной деятельности, методы расчетов основных технологических параметров и методы повышения надежности систем обеспечения безопасности техногенных объектов;
- 3) получить навыки использования методов фундаментальных и прикладных естественно-научных дисциплин в профессиональной деятельности.

Задачи решаются путем выполнения практических работ, демонстрирующих процесс расчета и проектирования систем обеспечения безопасности.

Курс «Расчет, проектирование и повышение надежности систем обеспечения безопасности» относится к дисциплинам по выбору общенаучного цикла дисциплин ФГОС ВО.

Дисциплина (учебный курс) базируется на изучении следующих дисциплин: «Информационные технологии в сфере безопасности», «Мониторинг безопасности» «Организация проектной работы в системе техносферной безопасности».

Знания, умения, навыки, приобретаемые в результате изучения дисциплины (учебного курса), необходимы для формирования профессиональных знаний, умений, компетенций магистра.

В результате изучения курса студент должен:

- обладать следующими профессиональными компетенциями (ПК):
 - способностью выполнять сложные инженерно-технические разработки в области техносферной безопасности;
 - способностью к реализации новых методов повышения надежности и устойчивости технических объектов, поддержания их функционального назначения;

- знать:
 - методологические подходы и основные принципы расчетов и проектирования систем обеспечения безопасности;
 - основы проектирования сооружений механической очистки пылегазовых выбросов, химической очистки отходящих газов, термического обезвреживания отходящих газов;
 - основы проектирования сооружений механической, физико-химической, биохимической очистки сточных вод;
 - основы проектирования сооружений механической, физико-химической, биохимической, термической подготовки и переработки техногенных отходов;
 - методы повышения надежности систем обеспечения безопасности техногенных объектов;
 - уметь:
 - пользоваться научной, справочной и нормативной литературой в сфере обеспечения экологической безопасности;
 - применять основные принципы создания систем экологической безопасности в профессиональной деятельности;
 - осуществлять выбор технологической схемы очистки отходящих газов, сточных вод, переработки техногенных отходов в зависимости от их состава, свойств и объема;
 - выполнять расчеты основных технологических параметров систем обеспечения безопасности техногенных объектов;
 - владеть:
 - практическими навыками применения нормативно-правовой и методической базы, основных технологических разработок при проектировании систем обеспечения безопасности техногенных объектов;
 - практическими умениями использовать методы фундаментальных и прикладных естественно-научных дисциплин в профессиональной деятельности;
 - практическими навыками разработки проектной документации и грамотного составления заданий на проектирование;
 - практическими приемами комплексной технико-экономической оценки и обоснования проектных решений.

Изучение дисциплины предполагает овладение профессиональной терминологией, отражающей сущность и форму проявления рассматриваемых процессов расчета и проектирования систем обеспечения безопасности.

Студенты практически осваивают способы, приёмы, методы расчета и проектирования систем обеспечения безопасности.

Программой дисциплины предусмотрены практические работы и самостоятельная работа студента.

Предусмотрены такие виды контроля деятельности студента, как проверка выполнения практических работ, экзамен.

Критерии оценки выполнения практической работы

№ п/п	Наименование критерия	Значение критерия	Значение критерия в баллах
1	Выполнение практического задания	Практическое задание не выполнено	0 баллов
		Практическое задание выполнено с ошибками	1 балл
		Практическое задание выполнено без ошибок	2 балла
2	Теоретическая часть	Ответы на контрольные вопросы не получены	0 баллов
		Ответы содержат ошибки	1 балл
		Ответы на вопросы получены	2 балла
3	Оформление практической работы	Практическая работа оформлена с ошибками	0 баллов
		Практическая работа оформлена без замечаний	1 балл

Модуль I. РАСЧЕТ И ПРОЕКТИРОВАНИЕ СИСТЕМ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ АТМОСФЕРЫ

1.1. Классификация пылегазовых выбросов

Основными путями решения задачи рационального использования природных ресурсов и уменьшения отрицательного воздействия на окружающую среду являются разработка и внедрение безотходных производств в замкнутом цикле. Ввиду сложности и длительности подобных технологических процессов ограничить загрязнение окружающей среды можно посредством нормирования количества выбрасываемых веществ и контроля за такими выбросами.

Основными источниками загрязнения атмосферного воздуха являются автомобили, промышленные предприятия и тепловые электростанции. Загрязнение атмосферы оказывает неблагоприятное воздействие на человека, флору и фауну, строительные сооружения, транспортные средства и другие объекты.

Промышленные источники выбросов подразделяются на организованные и неорганизованные. К организованным промышленным источникам относят трубы, шахты, аэрационные фонари, фрамуги и т. п. К неорганизованным промышленным выбросам относят открытые склады минерального сырья, карьеры, хранилища твёрдых и жидких отходов, места загрузки и выгрузки железнодорожных вагонов, автомашин, негерметичное оборудование, транспортные эстакады и т. п. В ряде случаев неорганизованные источники являются наземными.

Организованные промышленные источники выбросов можно подразделить на три типа: высокие, низкие и промежуточные.

Низкие источники являются наиболее распространёнными для сброса вентиляционного воздуха и технологических сдувов в атмосферу. Выбросы из таких источников производятся непосредственно в зону аэродинамической тени, создаваемой зданиями и сооружениями, и загрязняют в основном территорию около этих зданий и сооружений.

Аэродинамическая тень — зона, возникающая около зданий и сооружений при обтекании их ветром и характеризующаяся дви-

жением части воздушных потоков по замкнутому контуру, что увеличивает в ней загрязнение. Выше зоны аэродинамической тени создаётся область возмущенного потока (промежуточная зона), для которой характерна повышенная турбулентная диффузия. По мере удаления от низкого источника концентрация примесей в атмосферном воздухе резко снижается.

Выбросы из промежуточных источников, попадающие в область возмущенных потоков над зоной аэродинамической тени, рассеиваются так же, как от высоких труб. Однако под действием более интенсивной вертикальной диффузии нижняя часть факела может при определенных условиях затягиваться внутрь аэродинамической тени, вызывая её дополнительное загрязнение, так же как и от низких источников. К промежуточным источникам можно отнести трубы, верхняя отметка которых находится ниже границы промежуточной зоны, но не менее чем на 20 % выше границы зоны аэродинамической тени.

Через высокие источники осуществляется сброс в атмосферу технологических газов и загрязненного вентиляционного воздуха. К ним относятся трубы, выбросы из которых производятся в верхние слои атмосферы, выше границы промежуточной зоны, что обеспечивает их хорошее рассеивание. Распространение в атмосфере выбрасываемых из высоких источников (труб) загрязняющих веществ подчиняется законам турбулентной диффузии. На процесс рассеивания выбросов существенное влияние оказывают состояние атмосферы, расположение предприятий, характер местности, физические свойства выбросов, высота трубы, диаметр ее устья и др.

Предельно допустимый выброс (ПДВ) является техническим нормативом, устанавливаемым из условия, чтобы содержание загрязняющих веществ в приземном слое воздуха от источника или их совокупности не превышало нормативов качества воздуха для населения, животного и растительного мира.

Основной критерий качества атмосферного воздуха – предельно допустимые концентрации (ПДК) загрязняющих веществ в атмосферном воздухе населённых мест. Условия истечения газовой смеси, истекающей из трубы, должны быть такими, чтобы максимальная приземная концентрация не превышала максимальной разовой ПДК.

Расчетная величина наибольшей концентрации каждой примеси C_m (мг/м³) в приземном слое атмосферы от всей совокупности источников не должна превышать величины ее ПДК в атмосферном воздухе:

$$C_m \leq \text{ПДК}.$$

При совместном присутствии в атмосфере нескольких вредных веществ, обладающих суммирующим действием (например, SO₂, NO₂, HF, H₂SO₄ и др.), критерием качества воздуха служит соотношение

$$\sum_{i=1}^n \frac{C_i}{\text{ПДК}_i} \leq 1,$$

где n – количество загрязнителей с суммирующимся вредным действием; C – концентрация вредных веществ в атмосферном воздухе в одной и той же точке местности, мг/м³; ПДК – соответствующие максимальные разовые предельно допустимые концентрации вредных веществ в атмосферном воздухе, мг/м³.

1.2. Основные методы очистки пылегазовых выбросов

Под обезвреживанием пылегазовых выбросов понимают отделение от газа или превращение в безвредное состояние загрязняющих примесей. Оба принципа могут быть реализованы через различные физические и химические процессы, для осуществления которых требуются определенные условия.

Расчеты процессов и аппаратов пылегазоочистки при их проектировании должны быть направлены на создание условий, обеспечивающих максимально полное обезвреживание выбросов.

Для обезвреживания аэрозолей (пылей и туманов) используют сухие, мокрые и электрические методы. В основе сухих методов лежат гравитационные, инерционные, центробежные механизмы осаждения или фильтрационные механизмы. При использовании мокрых методов очистка газовых выбросов осуществляется путем тесного взаимодействия между жидкостью и запыленным газом на поверхности газовых пузырей, капель или жидкой пленки. Электрическая очистка газов основана на ионизации молекул газа электрическим разрядом и электризации взвешенных в газе частиц.

При обработке выбросов, содержащих твердые аэрозольные загрязнители, низких величин проскока загрязняющих частиц

(1...2 % и менее) можно достичь только двухступенчатой очисткой. Для предварительной очистки могут быть применены жалюзийные решетки и циклонные аппараты (иногда для небольших выбросов — пылеосадительные камеры), а для окончательной — пористые фильтры, электрофильтры или мокрые пылеосадители.

Жидкие аэрозоли (туманы) могут быть скоагулированы посредством изменения параметров состояния (охлаждения и повышения давления) с целью осаждения в последующем с использованием, как правило, мокрых способов улавливания в мокрых скрубберах, пористых и электрических фильтрах, абсорберах.

Мокрые способы очистки твердых и жидких аэрозолей имеют существенный недостаток — необходимость отделения уловленного загрязнителя от улавливающей жидкости. По этой причине мокрые способы следует применять только при отсутствии других методов очистки, отдавая предпочтение способам с минимальным расходом жидкости.

Если твердые или жидкие аэрозоли по элементному составу не содержат других элементов, кроме углерода, водорода и кислорода (пыль растительного происхождения, шерстяные волокна, туманы минеральных масел и др.), то они могут быть обезврежены в одну стадию — непосредственным сжиганием в топках котлов и печей.

Для обезвреживания отходящих газов от токсичных газо- и парообразных веществ применяют абсорбционные, адсорбционные, каталитические, термические и конденсационные методы. Абсорбционные методы основаны на поглощении газов или паров жидкими поглотителями. Адсорбционные методы основаны на поглощении примесей твердыми пористыми телами. Каталитические методы очистки основаны на химических превращениях токсичных примесей в нетоксичные на поверхности твердых катализаторов. Термические методы основаны на сжигании горючих вредных примесей. В основе конденсационных методов лежит явление уменьшения давления насыщенного пара растворителя при понижении температуры.

С целью улавливания газообразных примесей применяют процессы конденсации, сорбции (абсорбции и адсорбции), хемосорбции, а превращают загрязнители в безвредные соединения посредством термохимических (термическая деструкция, термическое и термока-

талитическое окисление) и химических процессов. Соответствующие аппараты называются конденсаторами, абсорберами, адсорберами, установками (печами) термодеструкции (пиролиза, крекинга, реформинга), термоокисления (дожигания), термokatалитическими установками (печами, реакторами), химическими реакторами.

1.3. Физико-химические и массообменные методы и аппараты очистки пылегазовых выбросов

1.3.1. Абсорбция

Абсорбция – избирательное поглощение одного или нескольких компонентов из газовой смеси жидкими поглотителями. В качестве абсорбента чаще всего используются вода или органические жидкости, кипящие при высокой температуре. Абсорбция представляет процесс химической технологии, включающей массоперенос между газообразным компонентом и жидким растворителем, осуществляемый в аппарате для контактирования газа с жидкостью. Аппараты, в которых осуществляют процесс абсорбции, называют абсорберы.

Абсорбцию широко применяют для очистки выбросов от сероводорода, других сернистых соединений, паров соляной, серной кислот, цианистых соединений, органических веществ (фенола, формальдегида и др.).

Различают абсорбцию физическую и химическую.

При физической абсорбции молекулы абсорбента и молекулы абсорбируемого компонента не вступают между собой в химическое взаимодействие. При физической абсорбции происходит физическое растворение абсорбируемого компонента в растворителе.

При химической абсорбции (в дальнейшем – хемосорбция) абсорбируемый компонент вступает в химическую реакцию с поглотителем, образуя новые химические соединения в жидкой фазе. При хемосорбции в качестве абсорбента используют водные растворы солей, органические вещества и водные суспензии различных веществ. Абсорбция органическим растворителем наиболее эффективна для удаления органических газообразных загрязнителей, поскольку в этом случае обеспечивается хорошая растворимость. В качестве органических жидких абсорбентов применяются диметиланилин, моно-, ди- и триэтаноламин и метилдиэтаноламин.

Схема абсорбционной установки приведена на рис. 1.1. Газ на абсорбцию подается газодувкой в нижнюю часть колонны 2, где равномерно распределяется перед поступлением на контактный элемент. Абсорбент из промежуточной емкости 9 насосом 10 подается в верхнюю часть колонны и равномерно распределяется по поперечному сечению абсорбера с помощью оросителя 4. В колонне осуществляется противоточное взаимодействие газа и жидкости. Газ после абсорбции, пройдя брызгоотбойник 3, выходит из колонны. Абсорбент стекает через гидрозатвор в промежуточную емкость 13, откуда насосом 12 направляется на регенерацию в десорбер 7 после предварительного подогрева в теплообменнике-рекуператоре 14. Исчерпывание поглощенного компонента из абсорбента производится в кубе 8, обогреваемом насыщенным водяным паром. Перед подачей на орошение колонны абсорбент, пройдя теплообменник-рекуператор 14, дополнительно охлаждается в холодильнике 5.

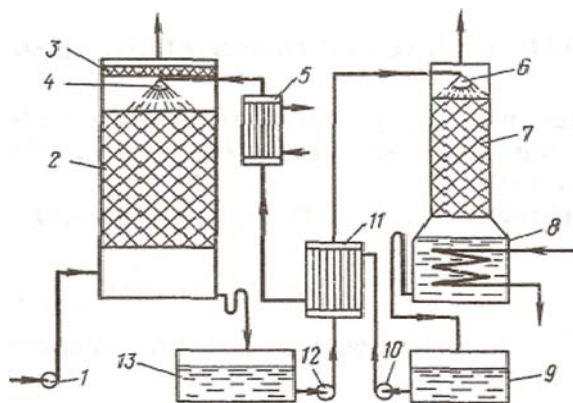


Рис. 1.1. Схема абсорбционной установки: 1 – вентилятор (газодувка); 2 – абсорбер; 3 – брызгоотбойник; 4, 6 – оросители; 5 – холодильник; 7 – десорбер; 8 – куб десорбера; 9 – теплообменник-рекуператор; 10, 12 – емкости для абсорбента; 11 – насосы

Движущей силой абсорбции является разность между парциальным давлением растворимого газа в газовой смеси и его равновесным давлением над пленкой жидкости, контактирующей с газом. Абсорбция происходит в том случае, если парциальное давление абсорбируемого компонента в газовой фазе больше равновесного пар-

циального давления этого же компонента над данным раствором. Чем больше разница между этими давлениями, тем больше движущая сила и тем с большей скоростью протекает абсорбция.

В практике абсорбции используются несколько принципиальных схем проведения процесса. Наиболее широко применяются прямоточная (рис. 1.2, а) и противоточная (рис. 1.2, б) схемы.

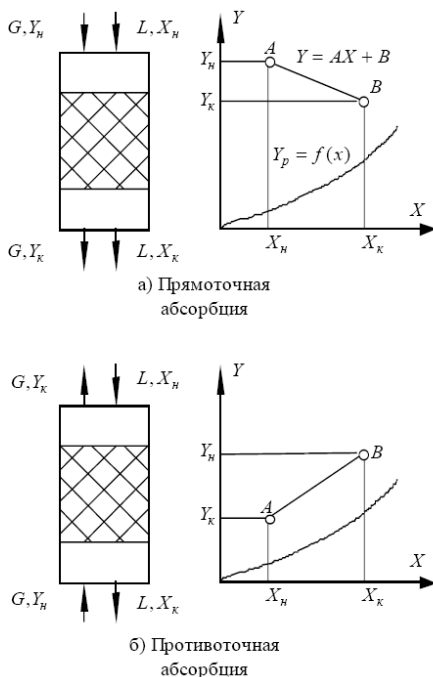


Рис. 1.2. Основные схемы абсорбционных процессов

В прямоточной схеме абсорбции потоки газа и абсорбента движутся параллельно друг другу. В этой схеме взаимодействия веществ в процессе абсорбции газ с большей концентрацией распределяемого вещества Y_n приводится в контакт с жидкостью, имеющей меньшую концентрацию X_n распределяемого вещества, а газ с меньшей концентрацией Y_k взаимодействует на выходе из аппарата с жидкостью, имеющей большую концентрацию X_k распределяемого вещества.

По противоточной схеме абсорбции в одном конце аппарата приводятся в контакт газ и жидкость, имеющие большие концентрации

распределяемого вещества Y_n и X_k , а в противоположном конце — меньшие Y_k и X_n . При противотоке можно достичь более полного извлечения компонента из газовой смеси, чем при проточной схеме.

В технике абсорбции используют также одноступенчатые схемы с рециркуляцией (рис. 1.3) и многоступенчатые с рециркуляцией, которые предусматривают многократный возврат в аппарат либо жидкости, либо газа.

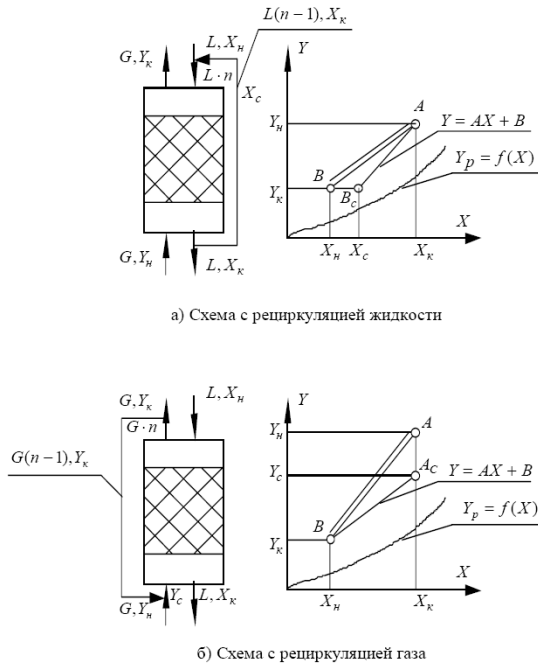


Рис. 1.3. Рециркуляционные схемы абсорбции

1.3.2. Адсорбция

Адсорбция — процесс избирательного поглощения одного или нескольких компонентов из газовой среды с помощью адсорбентов — твердых материалов с большой удельной поверхностью.

Адсорбцию применяют для очистки газов с невысоким содержанием газообразных или парообразных загрязнений до получения их очень низких объемных концентраций. Адсорбцию применяют для

улавливания из газов, вентиляционных выбросов сернистых соединений, углеводов, хлора, окислов азота, паров органических растворителей и др. В отличие от абсорбционных методов адсорбция позволяет проводить очистку газов при повышенных температурах. Адсорбция на настоящее время остается самым универсальным средством очистки выбросов от газообразных загрязнителей, а наиболее универсальным адсорбентом – активированный уголь.

Адсорбент – твердое тело на поверхности, в порах которого происходит адсорбция. Адсорбенты отличаются высокой пористостью, имеют большую удельную поверхность. Адсорбент должен иметь высокую *сорбционную емкость*, т. е. возможность поглощать большое количество адсорбтива при его малой концентрации в газовой среде, что зависит от удельной площади поверхности и физико-химических свойств поверхностных частиц. Адсорбент должен иметь высокую *селективность (избирательность)* в отношении адсорбируемого компонента. Он должен обладать достаточной механической прочностью. Чтобы аэродинамическое сопротивление слоя было невысоким, плотность адсорбента должна быть небольшой, а форма частиц обтекаемой и создавать высокую пористость.

Активированный уголь – пористый углеродный адсорбент. Применяют несколько марок активированного угля, различающихся размером микропор. Активированный уголь является единственным адсорбентом, удовлетворительно работающим во влажных средах. Он удовлетворяет и большинству других требований, в связи с чем широко применяется. Одним из основных недостатков активированного угля является химическая нестойкость к кислороду, особенно при повышенных температурах.

Силикагель – синтетический минеральный адсорбент. Силикагели представляют собой гидратированные аморфные кремнеземы ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$). Силикагель применяется главным образом для поглощения влаги.

Алюмогель – активная окись алюминия. Алюмогель ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$) используется, как и силикагель, для осушки газов и поглощения из них ряда полярных органических веществ.

Цеолиты – алюмосиликаты, содержащие оксиды щелочных и щелочноземельных металлов. Этот адсорбент называют «молекулярные сита» за их способность разделять вещества на молекуляр-

ном уровне благодаря структуре и размерам своих пор. Цеолиты адсорбируют газы, молекулы которых соответствуют размерам «окон» в кристаллической решетке.

Процессы адсорбции являются избирательными и обратимыми. Каждый поглотитель обладает способностью поглощать лишь определенные вещества и не поглощать другие. Поглощенное вещество всегда может быть выделено из поглотителя путем *десорбции*.

Различают физическую и химическую адсорбцию (хемосорбцию). Адсорбент для процесса физической сорбции должен быть химически инертным по отношению к компонентам очищаемой газовой среды, а для хемосорбции — вступать с молекулами загрязнителей в химическую реакцию.

При физической адсорбции между молекулами адсорбента и молекулами адсорбируемого вещества не происходит химического взаимодействия. Физическая адсорбция обуславливается силами межмолекулярного взаимодействия (дисперсионный, ориентационный и индукционный эффекты). Межмолекулярные силы слабы, поэтому при физической адсорбции происходит лишь небольшая деформация адсорбированных частиц.

При химической адсорбции молекулы адсорбента и адсорбтива химически взаимодействуют. Химическая адсорбция (хемосорбция) осуществляется за счет ненасыщенных валентных сил поверхностного слоя.

Для процессов хемосорбции используется импрегнирование некоторых из приведенных сорбентов. Импрегнирующие (пропитывающие) вещества могут действовать двояко: вступать в реакции с определенными загрязнителями или катализировать реакции, ведущие к их обезвреживанию — распаду, окислению и т. д.

Под активностью адсорбента понимают его способность поглощать вещество. Адсорбенты характеризуются статической и динамической активностью.

Динамическая активность адсорбента — количество вещества, поглощенное единицей веса (объема) адсорбента за время от начала адсорбции до начала проскока.

Статическая активность адсорбента — количество вещества, поглощенное тем же количеством адсорбента за время от начала адсорбции до установления равновесия.

Динамическая активность всегда меньше статической, поэтому расход адсорбента определяется по его динамической активности. От активности адсорбента зависят размеры адсорбционной аппаратуры, эффективность очистки газов.

Процесс адсорбции в течение определенного времени протекает при постоянном значении степени поглощения адсорбируемого вещества. Это время называется *временем защитного действия слоя адсорбента*.

Процесс работы адсорберов (рис. 1.4) состоит из следующих основных фаз: адсорбция, десорбция, сушка адсорбента и его охлаждение. Адсорбционная установка для обеспечения непрерывности действия имеет не менее двух адсорберов, в одном из которых протекает адсорбция, а во втором – десорбция.

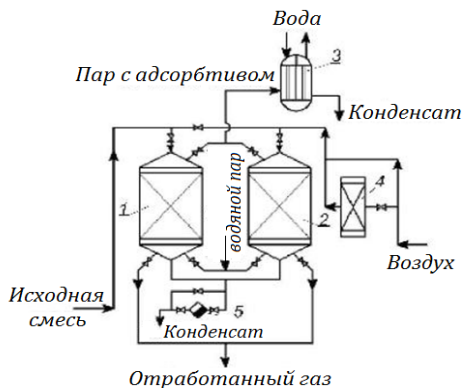


Рис. 1.4. Схема адсорбционной установки: 1, 2 – адсорберы; 3 – конденсатор; 4 – калорифер; 5 – конденсатоотводчик

Исходную газовую смесь подают в адсорбер 1, заполненный активным углем. После насыщения слоя в адсорбере 1 его переключают на стадию десорбции, а исходную смесь направляют в адсорбер 2. Адсорбент регенерируют острым динамическим водяным паром, подаваемым в нижнюю часть адсорбера. Динамический пар уносит пары адсорбата в конденсатор 3. Конденсат адсорбата в смеси с водой идет далее на разделение. Сушку адсорбента производят горячим воздухом, подаваемым в адсорбер через калорифер 4. Охлаждают адсорбент атмосферным воздухом, подаваемым по обводной линии.

1.3.3. Каталитические и термические методы очистки

Каталитические методы очистки основаны на взаимодействии удаляемых веществ с вводимым в очищаемую газовую среду веществом в присутствии катализатора. В результате реакций находящиеся в газе примеси превращаются в другие соединения, представляющие меньшую опасность, или легко отделяются от газа.

Каталитическое обезвреживание газовых выбросов используют обычно тогда, когда содержание горючих органических продуктов в отходящих газах мало и не выгодно использовать для их обезвреживания метод прямого сжигания. В этом случае процесс протекает при 200...300 °С, что значительно меньше температуры, требуемой для полного обезвреживания при прямом сжигании в печах и равной 950...1100 °С.

Различают два вида катализа: гомогенный (однородный) и гетерогенный (неоднородный).

При *гомогенном катализе* реагирующие вещества и катализатор образуют однофазную (жидкую или газовую) систему. Примером гомогенного катализа могут служить реакции горения водорода и оксида углерода, в которых роль катализаторов выполняют активированные частицы, а также реакция окисления диоксида серы в присутствии диоксида при производстве серной кислоты. Установлено, что скорость химической реакции при гомогенном катализе пропорциональна концентрации катализатора.

При *гетерогенном катализе* катализатор составляет самостоятельную фазу (обычно твердую). Этот тип катализа получил очень широкое распространение в промышленности. Большую часть продукции, вырабатываемой химической и смежными отраслями промышленности, получают с помощью гетерогенного катализа, как правило, газового, т. е. когда ускоряются реакции газовой фазы. Менее распространен гетерогенный катализ в жидкой фазе (гидрогенизация жиров). Все реакции при гетерогенном катализе протекают на поверхности катализатора.

Благодаря применению катализаторов можно достичь высокой степени очистки газа, достигающей в ряде случаев 99,9 %. Основным достоинством каталитического метода очистки газов является то, что он дает высокую степень очистки, а недостатком — образо-

вание новых веществ, которые надо удалять из газа абсорбцией или адсорбцией. Каталитическая очистка позволяет обезвреживать оксиды азота, оксид углерода, другие вредные газовые загрязнения.

Катализаторы должны обладать высокой активностью и теплопроводностью, развитой пористой структурой, стойкостью к ядам, механической прочностью, селективностью, термостойкостью, иметь низкие температуры «зажигания», обладать низким гидравлическим сопротивлением, иметь низкую стоимость.

В процессах санитарной каталитической очистки отходящих газов высокой активностью обладают катализаторы на основе благородных металлов (платина, палладий, серебро и др.), оксидов марганца, меди, кобальта, а также оксидные контактные массы, активированные благородными металлами (1,0...1,5 %).

Дожигание представляет собой метод очистки газов путем термического окисления углеводородных компонентов до CO_2 и H_2O . В ходе процесса дожигания другие компоненты газовой смеси, например, галоген- и серосодержащие органические соединения, также претерпевают химические изменения и в новой форме могут эффективно удаляться или извлекаться из газовых потоков.

К сожалению, часто в качестве универсального средства очистки выбросов рассматривается *термообезвреживание*, каковым оно на самом деле не является. В термоокислительных процессах необратимо теряется качество воздуха, использованного для горения, а продукты окисления, выбрасываемые в атмосферу, содержат некоторое количество новых токсичных веществ — оксида углерода CO и оксидов азота NO . Вообще область применения термообезвреживания ограничена только соединениями, в молекулах которых нет других элементов, кроме углерода, водорода и кислорода. Получить нетоксичные продукты реакции для любых других соединений принципиально невозможно.

1.4. Пылеулавливающие и сепарационные методы и аппараты очистки пылегазовых выбросов

В основу действия пылеулавливающих и сепарационных устройств положен определенный физический механизм. В пылеуловителях и сепарационных устройствах находят применение

следующие способы отделения взвешенных частиц от взвешивающей среды, т. е. воздуха (газа): осаждение в гравитационном поле, осаждение под действием сил инерции, осаждение в центробежном поле, фильтрование, осаждение в электрическом поле, мокрая газоочистка. В практике пылеулавливания и сепарации аэрозольных частиц находят применение и другие методы: *фотофорез, воздействие магнитного поля, биологическая очистка* и др.

При *гравитационном осаждении* частицы аэрозоля осаждаются из потока загрязненного газа под действием силы тяжести. Для этого необходимо создать соответствующий режим движения загрязненного газа в аппарате с учетом размера частиц, их плотности и т. д.

Параметр гравитационного осаждения G равен отношению силы тяжести F_T к силе сопротивления среды F_c и может быть выражен отношением скорости осаждения частицы $w_{\text{ч}}$ к скорости газового потока v_0

$$G = \frac{F_T}{F_c} = \frac{\pi d_{\text{ч}}^3 \rho_{\text{ч}} g}{6 \cdot 3\pi \mu_0 d_{\text{ч}} v_0} = \frac{d_{\text{ч}}^2 \rho_{\text{ч}} g}{18 \mu_0 v_0} = \frac{w_{\text{ч}}}{v_0},$$

где $w_{\text{ч}}$ — скорость частицы, м/с; $d_{\text{ч}}$ — диаметр частицы, м; μ_0 — динамическая вязкость воздуха (газа), Па·с (Н·с/м²); $g = 9,81$ м/с² — ускорение свободного падения; $\rho_{\text{ч}}$ — плотность частицы, кг/м³.

Инерционное осаждение основано на том, что частицы аэрозоля и взвешивающая среда ввиду значительной разности плотностей обладают различной инерцией. Частицы аэрозоля, двигаясь по инерции, отделяются от газовой среды. Движущиеся в потоке аэрозольные частицы вследствие большой инерции не следуют за потоком, а стремятся сохранить первоначальное направление движения, двигаясь в котором оседают на стенках, перегородках, сетках и других элементах аппарата. Коэффициент эффективности инерционного осаждения определяется долей частиц, покинувших поток при изменении им направления вследствие обтекания им различного рода препятствий.

Осаждение под действием центробежной силы происходит при криволинейном движении пылегазового потока. Под действием возникающих центробежных сил частицы аэрозоля отбрасываются на периферию аппарата и осаждаются. Этот метод отделения частиц аэрозолей от воздуха (газа) значительно эффективнее гравитацион-

ного осаждения, так как возникающая центробежная сила во много раз больше, чем сила тяжести. Центробежная сепарация может применяться по отношению к более мелким частицам. Скорость осаждения взвешенных частиц в центробежных пылеуловителях прямо пропорциональна квадрату диаметра частицы.

Если по аналогии с гравитационным осаждением выразить параметр центробежного осаждения как отношение центробежной силы $F_{ц}$, действующей на шаровую частицу, к силе сопротивления среды F_c , то получим:

$$\omega = \frac{F_{ц}}{F_c} = \frac{\pi d_{ч}^3}{6} \rho_{ч} \frac{w_{\omega}^2}{r} / (3\pi\mu_0 d_{ч} w_{\omega}) = \frac{d_{ч}^2 \rho_{ч} w_{\omega}}{18\mu_0 r},$$

где w_{ω} – скорость вращения потока вокруг неподвижной оси, м/с; r – радиус вращения потока, м.

Могут применяться два принципиальных конструктивных решения этого метода:

- 1) поток аэрозоля вращается в неподвижном корпусе аппарата;
- 2) поток движется во вращающемся роторе.

Первое решение применено в циклонах (рис. 1.5, а), второе – в ротационных пылеуловителях (рис. 1.5, б).

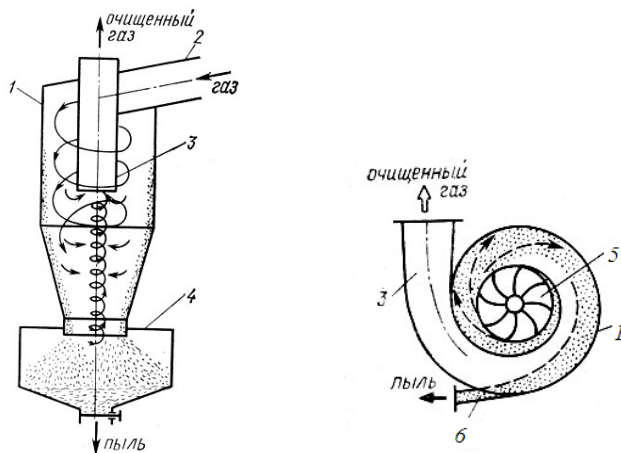


Рис. 1.5. Схемы циклона (а) и ротационного пылеуловителя (б):
 1 – корпус (кожух); 2 – патрубок; 3 – выхлопная труба; 4 – бункер;
 5 – вентиляторное колесо; 6 – пылеприемное отверстие

Корпус циклона состоит из цилиндрической и конической частей. По форме циклоны разделяют на цилиндрические ($H_{\text{ц}} > H_{\text{к}}$) и конические ($H_{\text{к}} > H_{\text{ц}}$), где $H_{\text{ц}}$ и $H_{\text{к}}$ соответственно высота цилиндрической и конической частей циклона. Строение конической части определяет особенности движения пылевоздушного потока в этой части циклона и оказывает существенное влияние на процесс сепарации, а также коагуляцию некоторых видов пыли в аппарате, на устойчивость его работы при улавливании данных видов пыли.

Улавливание частиц аэрозоля в циклонных аппаратах основано на использовании центробежных сил. Рассмотрим общепринятую схему движения потока аэрозоля и сепарации его частиц в циклоне. Поток аэрозоля с большой скоростью по касательной поступает в цилиндрическую часть корпуса циклона и совершает движение по нисходящей спирали вначале в кольцевом пространстве между корпусом и выхлопной трубой и продолжает это движение в конической части корпуса, делая несколько витков (рис. 1.5, *a*). Под действием центробежной силы, возникающей при вращательном движении потока, аэрозольные частицы перемещаются радиально к стенкам циклона. Взвешенные частицы отделяются от воздуха в основном при переходе потока в восходящий, что происходит в конической части корпуса. Поток, продолжая движение в корпусе циклона, поворачивая на 180° , входит в выхлопную трубу и, совершая в ней движение по восходящей спирали, выходит из циклона. Частицы, выделившиеся из потока, поступают через нижнее выпускное отверстие в бункер.

В циклоне создаются два вихревых потока: внешний — загрязненного воздуха от входного патрубка в нижнюю часть конуса и внутренний — относительно очищенного воздуха из нижней части конуса во внутреннюю трубу.

Процессы, происходящие в циклоне, весьма сложны и зависят от многих факторов, поэтому при теоретических расчетах приходится делать много допущений и упрощений. Так, принимают, что частицы аэрозоля, поступающие с воздушным потоком в циклон, имеют сферическую форму и при входе загрязненного потока в аппарат равномерно распределены по сечению. Частицы, которые при перемещении достигли стенок, осаждаются, хотя в действительности часть этих частиц будет выброшена в выхлопную трубу след-

ствии турбулизации потока и т. д. Кроме того, не учитывается такой фактор, как коагуляция частиц, происходящая в циклоне.

Ротационные пылеуловители (рис. 1.5, б) предназначены для очистки воздуха от частиц размером более 5 мкм и относятся к аппаратам центробежного действия, которые одновременно с перемещением воздуха очищают его от пыли. Аппараты ротационного типа отличаются компактной конструкцией, так как вентилятор и пылеуловитель совмещены в одном корпусе и обеспечивают достаточно высокую эффективность очистки воздуха или газа.

При *фильтровании* частицы аэрозоля, взвешенные в воздушной (газовой) среде, задерживаются в узких извилистых каналах и порах при прохождении потока через фильтровальные материалы. Для тонкой очистки газов от частиц и капельной жидкости применяют процесс фильтрования. Фильтрование заключается в пропускании аэрозоля через фильтровальные перегородки, которые допускают прохождение воздуха, но задерживают аэрозольные частицы.

В фильтр (рис. 1.6) поступает загрязненный газ, частицы примесей оседают на входной части волокнистой перегородки (*фильтроэлемента*) и задерживаются в порах между волокон, образуя на поверхности перегородки слой.

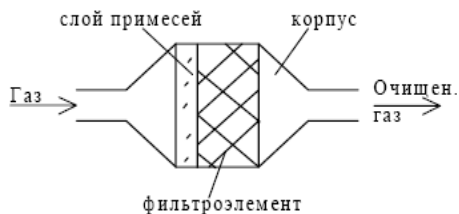


Рис. 1.6. Схема фильтра

Фильтрование запыленного потока через слой пористого материала – сложный процесс, включающий действие ситового эффекта, инерционного столкновения, броуновской диффузии, касания (зацепления), действия гравитационных и электрических сил.

При приближении частицы к волокну действует несколько механизмов, которые могут привести к ее улавливанию:

- 1) касание;
- 2) инерционный захват;

- 3) диффузия;
- 4) электростатическое осаждение;
- 5) термофорез;
- 6) гравитационное осаждение;
- 7) ситовой эффект.

Эффективность осаждения ε_δ частиц одиночными волокнами при броуновском движении (температура потока ниже 100 °С) может быть определена по приближенной формуле

$$\varepsilon_\delta = \frac{1,35 \cdot 10^{-2}}{(v_0 d_{\text{ч}} d_{\text{в}})^{1/2}},$$

где v_0 — скорость газового потока, м/с; $d_{\text{ч}}$ — диаметр частиц пыли, мкм; $d_{\text{в}}$ — диаметр волокна, м.

Нужно учесть, что на пути движения запыленного потока расположено обычно несколько рядов волокон, что, естественно, значительно повысит общую эффективность осаждения. Из-за сложности процесса в фильтрах практически невозможно определить влияние всех факторов на параметры фильтрации.

Фильтрующие перегородки газовых фильтров весьма разнообразны по своей структуре, но в основном состоят из волокнистых или зернистых элементов и условно подразделяются на типы.

К гибким пористым перегородкам относятся тканевые материалы из природных, синтетических или минеральных волокон; нетканые волокнистые материалы; ячеистые листы.

Полужесткие пористые перегородки — это слои волокон, стружка, вязанные сетки, расположенные на опорных устройствах или зажатые между ними.

Жесткие пористые перегородки могут быть выполнены из зернистых, волокнистых материалов, а также из металлических сеток и перфорированных листов.

Зернистые слои состоят из неподвижных, свободно насыпанных материалов или из периодически или непрерывно перемещающихся материалов.

Конструктивно перегородки могут быть оформлены в виде сменных патронов, кассет, неподвижного, движущегося или псевдооживленного слоя зернистых частиц.

Из всех фильтров газоочистки тканевые имеют наибольшее распространение. В тканевых фильтрах применяют фильтрующие материалы двух типов: обычные ткани, например хлопчатобумажные, шерстяные, нитроновые и другие; нетканые материалы типа фетра, войлока. В типичных фильтровальных тканях размер сквозных пор между нитями достигает 100...200 микрометров.

Тканевые фильтры подразделяются по нескольким признакам.

По форме тканевых фильтровальных элементов бывают фильтры рукавные или с плоской разверткой ткани.

По месту расположения вентилятора или дымососа по отношению к фильтру они бывают всасывающими или нагнетательными.

По способу и устройству регенерации ткани – встряхивание механическое, вибрационное, импульсное сжатым воздухом, продувка обратным током воздуха или очищенного газа.

По наличию и форме корпуса, в котором размещены тканевые фильтровальные элементы, бывают закрытые или открытые фильтры.

По числу секций в одной установке различают одно- или много-секционные фильтры.

По длительности работы фильтры бывают непрерывного и периодического действия.

Волокнистые фильтры представляют собой слои материала различной толщины, в которых более или менее однородно распределены волокна. Это фильтры объемного действия, так как они рассчитаны на улавливание и накопление частиц преимущественно по всей глубине слоя. Сплошной слой пыли образуется только на поверхности наиболее плотных материалов при фильтрации относительно крупных частиц и к концу срока службы фильтра. Волокнистые фильтры обычно используют для тонкой очистки газов при концентрации дисперсной твердой фазы в диапазоне от 0,5 до 5 мг/м³. При таких концентрациях основная доля частиц обычно имеет размеры менее 10 мкм.

Для фильтров используют естественные или специально получаемые волокна, а также их смеси. Толщина фильтрующих сред составляет от десятых долей миллиметра, например бумага, и до двух метров – это многослойные глубокие насадочные фильтры длительного использования.

Различают следующие виды промышленных волокнистых фильтров: сухие фильтры предварительной очистки и мокрые — сеточные, самоочищающиеся, с периодическим или непрерывным орошением.

В зернистых фильтрах пыль улавливается в слое дисперсного твердого материала. Их применяют реже, чем фильтры из волокнистых материалов. Различают жесткие зернистые фильтры и насадочные или насыпные зернистые фильтры. В жестких зернистых фильтрах зерна прочно связаны друг с другом в результате спекания, прессования или склеивания и образуют прочную неподвижную систему. К ним относятся пористая керамика, пористые металлы, пористые пластмассы. Такие фильтры устойчивы к высокой температуре, коррозии и механическим нагрузкам и применяются для фильтрования сжатых газов.

В насыпных зернистых фильтрах улавливающие элементы в виде гранул, кусков не связаны друг с другом. К ним относятся статические фильтры с неподвижным зернистым слоем, динамические фильтры с движущимся зернистым слоем и фильтры с псевдооживленным слоем насадки. В качестве насадки используют гальку, песок, шлак, опилки, дробленые горные породы, кокс, крошку резины, пластмассы, а также отходы различных производств.

Осаждение в электрическом поле. Если при прохождении ионизированного потока газа в электрическом поле между электродами создать определенное напряжение, то носители зарядов, т. е. ионы и электроны, получают значительное ускорение, и при их столкновении с молекулами происходит ионизация последних. Проходя электрическое поле, частицы аэрозоля получают заряд. Двигаясь к электродам противоположного знака, они осаждаются на них.

При электроосаждении частицам небольших размеров удастся сообщить значительный электрический заряд и, благодаря этому, осуществить процесс осаждения очень малых частиц, который невозможно провести под действием силы тяжести или центробежной силы.

В промышленности электроосаждение взвешенных частиц из газа проводится таким образом, что газовый поток направляется внутрь трубчатых (или между пластинчатыми) положительных электродов, которые заземляются (рис. 1.7). Внутри трубчатых электродов натягиваются тонкие проволочные или стержневые электроды, являющиеся катодами.

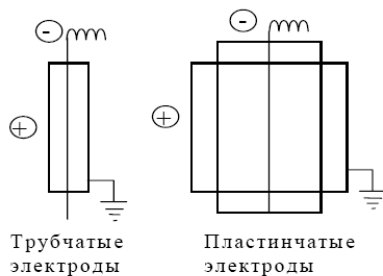


Рис. 1.7. Схемы электродов газоочистки

Скорость осаждения частицы в электрическом поле при ламинарном режиме движения:

$$w_0 = \frac{n \cdot e_0 \cdot E_x}{3\pi \cdot d_{\text{ч}} \cdot \mu_{\text{с}}},$$

где n — число зарядов, полученных частицей; e_0 — величина элементарного заряда; E_x — напряженность электрического поля, В/м; $d_{\text{ч}}$ — диаметр частиц пыли, мкм; $\mu_{\text{с}}$ — коэффициент динамической вязкости газового потока.

Аппарат для очистки газов от взвешенных жидких или твердых частиц путем их ионизации и последующего осаждения на электродах называется электрофильтром.

Основное применение электрофильтры нашли в очистке промышленных газов в черной и цветной металлургии, топливной и химической промышленности, а также в производстве строительных материалов.

Электрофильтр относится к наиболее эффективным пылеулавливающим аппаратам. Эффективность очистки достигает 99,9 %. Размер улавливаемых частиц доли микрон с температурой газовой среды до 500 градусов. Производительность электрофильтров достигает сотен тысяч кубометров очищаемого газа.

Недостатки электрофильтров — высокая чувствительность к поддержанию параметров очистки, а также повышенные требования при обслуживании и обеспечении электровзрывобезопасности. Электрофильтр не может быть использован для улавливания пылей с высоким электрическим сопротивлением, а также для очистки взрывоопасных сред.

Достоинства электрофильтров — сравнительно малая энергоёмкость, большая пропускная способность и возможность применения при температуре газов.

Электрофильтры в системах воздухоочистки обычно komponуют с другими пылеулавливающими устройствами, устанавливаемыми на начальных ступенях очистки. В результате обеспечивается более полная очистка газов.

Несколько слов скажем о *термофорезе* — это отталкивание частиц нагретыми телами, которое происходит под действием сил со стороны газообразной фазы на взвешенные в ней неровно нагретые частицы. Термофорез не имеет применения в промышленных целях. Однако по этому принципу происходит осаждение пыли на поверхностях около приборов отопления.

Скорость частиц при термофорезе не зависит от размера частиц и равна

$$v_{\text{ч}} = \frac{6\mu_{\text{с}}\Delta T_{\text{г}}}{(8 + \pi\alpha)T_{\text{г}}\rho_{\text{с}}},$$

где $\Delta T_{\text{г}}$ — градиент температуры в газах, К/м; $T_{\text{г}}$ — абсолютная температура газа, К; $\mu_{\text{с}}$ — коэффициент динамической вязкости газового потока; $\rho_{\text{с}}$ — плотность газа, кг/м³; α — доля рассеянных частицей молекул газа; $\alpha \approx 0,9$ для частиц неправильной формы и с очень гладкой поверхностью (аморфные и жидкие); $\alpha \approx 1,0$ для частиц, образованных механическим путем и с острыми углами.

Процесс *мокрой газоочистки* основан на контакте запыленного газового потока с жидкостью, которая захватывает взвешенные частицы и уносит их из аппарата в виде шлама. Смачивание поверхности элементов аппаратов водой или другой жидкостью способствует задержанию частиц на данной поверхности. В качестве орошающей жидкости в мокрых пылеуловителях чаще всего применяется вода.

В результате контакта запыленного газового потока с жидкостью в мокрых пылеуловителях образуется межфазная поверхность контакта. В различных аппаратах характер поверхности контакта фаз различный: она может состоять из газовых струек, пузырьков, жидкостных струй, капель, пленок жидкости. Поскольку в пылеуловителях наблюдаются различные виды поверхностей, то пыль улавливается в них по различным механизмам.

Существуют следующие механизмы процессов:

- 1) улавливание каплями жидкости, двигающимися через газ;
- 2) улавливание цилиндрами (обычно твердыми, типа проволоки);
- 3) улавливание пленками жидкости (обычно текущими по твердым поверхностям);
- 4) улавливание пузырьками газа (обычно поднимающимися в жидкости);
- 5) улавливание при ударе газовых струй о жидкие или твердые поверхности.

При каждом аппаратном механизме частицы отделяются от газа благодаря одному или нескольким механизмам улавливания: гравитационной седиментации, центробежному осаждению, инерции и касанию, броуновской диффузии, термофорезу, диффузиофорезу, электростатическому осаждению. Скорость осаждения может быть увеличена благодаря укрупнению частиц вследствие агломерации и конденсационного роста.

Мокрые пылеуловители подразделяются на капельные, пленочные, барботажные в зависимости от характера поверхности контакта фаз.

Мокрую очистку газов применяют в тех случаях, когда допустимы процессы охлаждения и увлажнения очищаемых газов. В ряде случаев мокрое пылеулавливание является более целесообразным, чем сухие методы.

Перечислим основные достоинства мокрых пылеуловителей по сравнению с аппаратами сухого типа. Аппараты мокрого пылеулавливания проще по конструкции. Они обладают более высокой эффективностью улавливания взвешенных частиц. Позволяют проводить очистку при высокой температуре и повышенной влажности газа, а также при взрывопожароопасности газов и уловленной пыли. Обеспечивают возможность очистки газов от частиц размером крупнее одной десятой микрона. Существует возможность одновременно улавливать парообразные и газообразные компоненты вместе с пылью.

Недостатки метода – необходимость обработки сточных вод от шлама, возможность осаждения капель жидкости с пылью в газоходах и дымососах. При очистке агрессивных газов возникает необхо-

димось защищать аппаратуру и коммуникации антикоррозионными материалами.

1.5. Коагуляция

Коагуляция — это процесс укрупнения дисперсных частиц в результате их взаимодействия и объединения в агрегаты. Наибольшая роль в коагуляции пылей принадлежит молекулярным силам и силам электрического притяжения.

Коагуляция взвешенных в газах частиц существенно влияет на эффективность действия пылеулавливающих устройств. С точки зрения обеспыливания воздуха (газов) коагуляция весьма полезное явление, так как благодаря укрупнению пылевых частиц повышается эффективность их улавливания. Мелкодисперсная пыль, плохо или совсем не улавливаемая в более простых аппаратах, может быть задержана ими после коагуляции. Соединение и укрупнение частиц происходит при слипании их вследствие столкновения под действием гравитационных сил, сил инерции, броуновского движения, взаимного притяжения и т. д. Параллельно с процессом образования агломератов происходит процесс разрушения образовавшихся укрупненных частиц.

Тепловая (броуновская) коагуляция имеет в основе броуновское (хаотическое, беспорядочное) движение весьма малых частиц — до 0,1 мкм. Процесс тепловой (броуновской) коагуляции мало зависит от природы пылевых частиц. Коагуляция происходит тем быстрее, чем больше диапазон размеров частиц, так как имеет место процесс поглощения крупными частицами мелких. Увеличение скорости коагуляции за счет полидисперсности по сравнению с коагуляцией монодисперсной пыли не превышает 10 %. Скорость тепловой коагуляции повышается с увеличением абсолютной температуры дисперсной среды. Скорость коагуляции малых частиц также возрастает с повышением давления. Замечено, что дисперсность пыли в технологических газах, поступающих на очистку, обычно выше, чем в источнике пылеобразования. Это можно объяснить тем, что броуновская коагуляция происходит почти мгновенно.

Градиентная коагуляция обусловлена наличием градиента скорости в потоке запыленных газов. Наиболее характерным примером является течение газов около твердой стенки канала. В соответствии с законами гидравлики, частица вблизи стенки движется с меньшей скоростью, чем частица, находящаяся ближе к продольной оси канала. Контакт частиц возможен, если расстояние между ними меньше суммы их размеров. Действие градиентной коагуляции ограничивается в основном пристенным слоем. Поэтому она играет существенную роль при значительной длине каналов и большой поверхности, по которой происходит контакт.

Турбулентная коагуляция. Скорость коагуляции частиц в дисперсной среде может быть искусственно повышена путем турбулизации аэрозоля. Вихревое движение среды, возникающее вследствие турбулизации, увеличивает вероятность столкновения частиц и повышает скорость коагуляции. Турбулизацию пылегазовых потоков осуществляют для укрупнения пылевых частиц и повышения благодаря этому эффективности очистки. Вихревое движение, возникающее вследствие турбулизации, увеличивает вероятность столкновения и, следовательно, укрупнения частиц.

Кинематическая коагуляция происходит при относительном движении частиц различного размера под действием внешних сил — силы гравитации, центробежных сил и др. Частицы различного размера движутся с различными скоростями. Вследствие этого происходит их столкновение и укрупнение. Примером кинематической коагуляции является осаждение частиц на каплях, находящихся под действием силы тяжести (этот процесс называется также гравитационной коагуляцией). Кинематическая коагуляция происходит при встречном движении распыленной воды и аэрозоля в мокрых пылеуловителях.

При *электрической коагуляции* между заряженными частицами, а также между заряженными и незаряженными частицами возникают электрические силы взаимодействия, что в значительной мере определяет поведение частиц. Частицы сталкиваются, слипаются, образуя агрегаты. Между частицами действуют следующие электрические силы взаимодействия: кулоновская сила притяжения или отталкивания, возникающая между двумя заряженными частицами, находящимися на определенном расстоянии друг от друга; сила ин-

дукции между заряженной частицей и соседней незаряженной; сила взаимодействия между заряженной частицей и другими частицами с тем же знаком; сила внешнего электрического поля (если оно имеется). Электрическая коагуляция широко используется в технике пылеулавливания. Принципы электрической коагуляции применяются при искусственной ионизации газопылевых потоков с целью укрупнения пылевых частиц.

Акустическая коагуляция. Пылегазовый поток проходит через акустическое поле, создаваемое источником звука и ультразвука. При определенных параметрах поля и характеристиках пылегазового потока вследствие колебания среды значительно возрастает число столкновений между пылевыми частицами, что приводит к их слипанию, т. е. к укрупнению пыли. Акустическая обработка осуществляется с целью повышения эффективности пылеулавливания.

Практическая работа 1

Расчет характеристик рукавных фильтров

Цели работы: изучить методику и произвести расчет количественных и качественных характеристик рукавных фильтров.

Основные теоретические сведения

В промышленности наибольшее применение получили рукавные фильтры (рис. 1.8). При регенерации материала загрязненных рукавных фильтров используют обычно комбинированные методы.

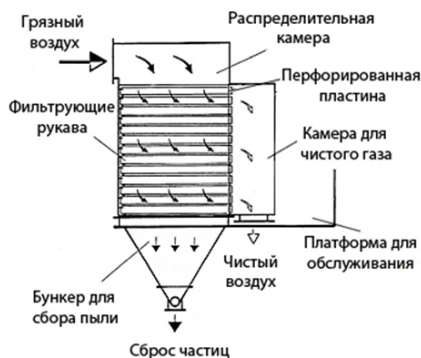


Рис. 1.8. Схема рукавного фильтра

Зернистые (насыпные) фильтры применяются в основном в цементной промышленности. Их недостаток – высокое гидравлическое сопротивление и сложность регенерации.

В табл. 1.1...1.3 приводятся характеристики ряда рукавных и зернистых фильтров.

Фильтры рассмотренных типов имеют достаточно хорошую эффективность. Степень очистки достигает 99,5 %, в том числе для мелкодисперсных (<3 мкм) пылей. Для зернистых фильтров концентрации на входе могут достигать 100 г/м³. Их производительность до 20...25 м³/м²·мин.

Таблица 1.1

Нормальный ряд фильтров ФРО (фильтры рукавные с обратной продувкой)

Марка	Площадь фильтрующей поверхности, м ²	Число рукавов	Число секций	Высота рукавов, мм	Диаметр рукава, мм
ФРО-1250-1	1266	252	6	8	200
ФРО-1650-1	1688	336	8	8	200
ФРО-2500-1	2530	504	12	8	200
ФРО-4100-2	4104	432	8	10	300
ФРО-5100-2	5130	540	10	10	300
ФРО-6000-2	6156	648	12	10	300
ФРО-7000-2	7182	756	14	10	300
ФРО-8000-2	8208	864	16	10	300
ФРО-20000-3	20520	2160	10	10	300
ФРО-24000-3	24624	2592	12	10	300

Примечание. Ткань – лавсан (130 °С) или стеклоткань (220 °С).

Таблица 1.2

Фильтры типа УРФМ с регенерацией обратной продувкой и встряхиванием

Характеристика фильтра	Марка фильтра	
	УРФМ II М	УРФМ III
Площадь фильтрующей поверхности, м ²	2300	1610
Количество секций	20	14
Число рукавов	840	488
Габаритные размеры L×B×H	23×4,8×13,1	16,1×4,8×13,1
Масса, т	109	78,3

Примечание. Диаметр рукавов 220 мм, высота 4,063 м, ткань – нитрон (130 °С).

Таблица 1.3

Технические характеристики насыпных фильтров
с обратной продувкой и вибрацией

Марка	Площадь фильтрующей поверхности, мм ²	Число		<i>d</i> гранул, мм	$\frac{g}{M^3/(M^2 \cdot \text{мин})}$	Δp , Па	T_{max} газов	C_o , г/м ³
		секций	фильтрующих слоев					
ЗФ-4м	2...4	2...4	3	3...10	20	600...1500	140	20
ЗФ-6м	7,8...31,2	2...8	3	3...10	20	600...1500	140	20
ЗФ-8м	8...120	2...30	3	3...10	20	600...1500	140	20

Необходимая поверхность фильтра определяется из газовой нагрузки, м³/(м²·мин):

$$q_{\phi} = q_n C_1 C_2 C_3 C_4 C_5, \quad (1.1)$$

где q_n – константа газовой нагрузки для различных видов пылей; C_1 – коэффициент, учитывающий способ регенерации; C_2 – коэффициент, учитывающий начальную запыленность газов z , г/м³; C_3 – коэффициент, учитывающий среднегеометрический диаметр пыли d_m ; C_4 – коэффициент, учитывающий температуру газа T_r ; C_5 – коэффициент, учитывающий требования к уровню очистки.

Указанные величины определяются по табл. 1.4. C_2 находится по табл. 1.5.

Таблица 1.4

Значения констант для определения необходимой поверхности фильтра

Параметр	Условия	Значение
q_n	Жмых. Зерно. Комбикорм. Мука. Кожа. Опилки. Табак. Картон	3,5
	Асбест и другие волокнистые материалы, в том числе целлюлозные; пыль, образующаяся при выбивке отливок из формы, кальцинированная сода, тальк, при полировке; гипс, гашеная известь, соль, песок и пыль от пескоструйных аппаратов, кальцинированная сода, тальк	2,6

Параметр	Условия	Значение
	Глинозем, плавиковый шпат, каолин, известняк, кварц, руда, минеральная пыль, уголь, цемент, порошковые пигменты, резина, сахар	2,0
	Кокс, летучая зола, порошки металлов, оксиды металлов, пластмассы, красители, силикаты, крахмал, сухие химикаты из нефтяного сырья	1,7
	Технический углерод, активированный уголь, моющие вещества, порошковое молоко, возгоны цветных и черных металлов	1,2
C ₁	Импульсная регенерация ткани	1,0
	Импульсная регенерация нетканых материалов	1,1
	Обратная продувка со встряхиванием	0,7...0,85
	Обратная продувка без встряхивания	0,55...0,7
C ₃	$d_m > 100$ мкм	1,2...1,4
	$50 < d_m < 100$	1,1
	$10 < d_m < 50$	1,0
	$3 < d_m < 10$	0,9
	$d_m < 3$ мкм	0,7...0,9
C ₄	$t_{го} = 20$ °С	1
	$t_{го} = 40$ °С	0,9
	$t_{го} = 60$ °С	0,84
	$t_{го} = 80$ °С	0,78
	$t_{го} = 100$ °С	0,75
	$t_{го} = 120$ °С	0,73
	$t_{го} = 140$ °С	0,72
	$t_{го} = 160$ °С	0,70
C ₅	Концентрация пыли в очищенном газе 30 мг/м ³ и выше	1
	Концентрация пыли в очищенном газе 30 мг/м ³ и ниже	0,95

Таблица 1.5

Зависимость коэффициента C₂ от запыленности газа

Запыленность газа, z _о , Г/М ³	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Коэффициент C ₂	1,00	0,95	0,92	0,90	0,87	0,86	0,855	0,85	0,84	0,83

Скорость фильтрации (м/с) эквивалентна понятию газовой нагрузки и определяется по формуле

$$\omega_{\phi} = q_{\phi}/60. \quad (1.2)$$

Полное гидравлическое сопротивление фильтра вычисляется по формуле

$$\Delta p = \Delta p_{\kappa} + \Delta p_{\phi}, \quad (1.3)$$

где Δp – полное гидравлическое сопротивление корпуса аппарата и фильтра; Δp_{κ} – потеря давления при прохождении очищаемого газа через корпус аппарата, Па; Δp_{ϕ} – гидравлическое сопротивление фильтровальной перегородки, Па.

Потеря давления при прохождении очищаемого газа через корпус аппарата определяется по формуле

$$\Delta p_{\kappa} = \xi \frac{\omega_{\text{вх}}^2 \rho_{\Gamma}}{2}, \quad (1.4)$$

где ξ – коэффициент аэродинамического сопротивления корпуса аппарата (без фильтровального слоя); средняя плотность воздуха $\rho = 1,2 \text{ кг/м}^3$.

Гидравлическое сопротивление фильтровальной перегородки складывается из постоянной составляющей Δp_1 – сопротивления фильтровальной перегородки с учетом пыли, оставшейся после регенерации, и переменной составляющей и Δp_2 – сопротивления, накапливающегося на перегородке за счет осевшей на ней пыли,

$$\Delta p_{\phi} = \Delta p_1 + \Delta p_2, \quad (1.5)$$

$$\Delta p_1 = A \mu \omega_{\phi}, \quad (1.6)$$

где A – коэффициент, м^{-1} ; μ – коэффициент динамической вязкости газа, Па·с.

Исходя из оптимальных условий работы фильтра, величина Δp_2 может приниматься равной 600...800 Па для пыли со среднемедианным диаметром $d_m < 20 \text{ мкм}$ и 250...350 Па при $d_m > 20 \text{ мкм}$.

Необходимая продолжительность периода фильтрации между регенерациями определяется по формуле

$$t_{\phi} = \frac{\Delta p_2}{B \mu \omega_{\phi}^2 z}, \quad (1.7)$$

где B – коэффициент, м/кг ; z – начальная запыленность газов, кг/м^3 .

Фактическая вязкость газа вычисляется по формуле

$$\mu = \mu_0 \frac{273+C}{273+t+C} \left(\frac{273+t}{273} \right)^{3/2}, \quad (1.8)$$

где C – константа Сюзерленда (для воздуха $C = 124$); t – температура газа, °С.

Определяют значения коэффициентов по формулам:

$$A = 670 \cdot 10^{-6} \frac{(1-\varepsilon_n)^2 \varepsilon_{тк}^3 h_0^{2/3}}{d_m^{1,75} \varepsilon_0^3}, \quad (1.9)$$

$$B = 817 \frac{1-\varepsilon_0}{d_m^2 \varepsilon_0^3 \rho_q}, \quad (1.10)$$

где ε_n и $\varepsilon_{тк}$ – пористость слоя пыли и ткани соответственно, доли единиц; h_0 – удельное сопротивление ткани, отнесенное к толщине 1 м при скорости 1 м/с, Па; ρ_q – плотность частиц пыли, кг/м³; d_m – среднегеометрический диаметр частиц пыли, м; для определения величин $\varepsilon_{тк}$ и h_0 можно воспользоваться табл. 1.6 или справочной литературой.

Таблица 1.6

Некоторые свойства фильтровальных материалов

Основное волокно	Термостойкость, °С	Пористость $\varepsilon_{тк}$, доли единиц	Удельное гидравлическое сопротивление h_0 , Па
Шерсть	80...100	0,86	$0,84 \cdot 10^5$
Нитрон	130	0,83	$0,83 \cdot 10^5$
Стекловолокно	250...300	0,55	$27 \cdot 10^4$

Пористость слоя пыли приближенно определяется выражением

$$\varepsilon_0 = 1 - 79d_m^{0,47}. \quad (1.11)$$

Начальная запыленность газа перед фильтром при рабочих условиях находится из соотношения

$$Z = Z_0 \frac{V_r'}{V_r}. \quad (1.12)$$

Для выбора аппарата определяется площадь поверхности фильтрации по формуле

$$F_\phi = \frac{V_r + V_p'}{60q_\phi}, \quad (1.13)$$

где V_r – заданный расход газа, идущего на фильтрование, м³/ч; V_p' – предварительно рассчитанная величина расхода воздуха на регене-

рацию, м³/ч, определяемая при допущении, что скорость обратной продувки равна скорости фильтрования, определяемой по формуле

$$V_p' = \frac{V_r n_p t_p}{3600}, \quad (1.14)$$

где t_p – время отключения секции на обратную продувку (принимается в пределах 15...20 с); n_p – количество регенераций в течение 1 часа.

Фильтр выбирается по каталогу в соответствии с принятыми условиями фильтрации (тип ткани, способ регенерации) с запасом 10...15 % по площади фильтрации. Затем уточняются параметры фильтра.

Площадь поверхности фильтрации, отключаемая на регенерацию в течение 1 ч, равна

$$F_p = \frac{N_c F_c n_p t_p}{3600}, \quad (1.15)$$

где N_c – число секций выбранного аппарата; F_c – площадь фильтрования одной секции, м².

Далее уточняется расход воздуха, подаваемого на обратную продувку в течение часа,

$$V_p = N_c F_c n_p t_p \omega_{\text{обр}}, \quad (1.16)$$

где $\omega_{\text{обр}}$ – скорость обратной продувки, равная

$$\omega_{\text{обр}} = \frac{k_p \varepsilon_{\text{ТК}}}{60}, \quad (1.17)$$

где k_p – коэффициент регенерируемости тканей, равный 1,6...2,0 м/мин.

Окончательная площадь фильтрации должна быть равна или близка к площади фильтрации выбранного аппарата:

$$F_\phi = \frac{V_r + V_p}{60 q_\phi}. \quad (1.18)$$

Уточненная газовая нагрузка определяется по формуле

$$q_\phi' = \frac{\frac{V_r}{60} + F_c q_\phi}{F_\phi - F_c}, \quad (1.19)$$

результат по которой должен быть близок к расчетному значению q_ϕ .

Продолжительность периода фильтрования между двумя регенерациями всегда должна быть больше суммарной продолжительности регенерации остальных секций

$$t_\phi > (N_c - 1)t_p. \quad (1.20)$$

Пример расчета

Рассчитать и выбрать фильтровальный агрегат для следующих условий:

- объем очищаемого газа $V'_r = 34000 \text{ м}^3/\text{ч}$ при нормальных условиях;
- температура газа $t_{го} = 150 \text{ °C}$, газовая фаза по составу сходна с воздухом;
- подсос воздуха с температурой для охлаждения газа до допустимой по применению нитрона $t_r = 130 \text{ °C}$;
- требуемая рабочая температура очищаемого газа $t_b = 25 \text{ °C}$;
- пыль – летучая зола со среднемедианным диаметром $d_m = 1 \text{ мкм}$;
- плотность материала пыли $\rho_q = 2900 \text{ кг/м}^3$;
- начальная запыленность при нормальных условиях $z_o = 15,2 \text{ г/м}^3$;
- марка ткани фильтра – нитрон;
- регенерация – обратная продувка со встряхиванием.

1. Объем очищаемого газа с учетом подсоса воздуха, необходимо-го для создания допустимой температуры для ткани нитрон, равен

$$V_{во} = V'_r \frac{t_{го} - t_r}{t_r - t_b} = 34000 \frac{150 - 130}{130 - 25} = \frac{6,48 \cdot 10^3 \text{ м}^3}{\text{ч}}$$

2. Полный объем очищаемого газа с учетом подсоса воздуха при нормальных условиях равен

$$V_{го} = V'_r + V_{во} = 3,4 \cdot 10^4 + 6,48 \cdot 10^3 = 4,05 \cdot 10^4 \text{ м}^3/\text{ч}$$

3. Расход газа, идущего на фильтрацию, при рабочих условиях:

$$V_r = V_{го} = \frac{273 + t_r}{273} = 4,05 \cdot 10^4 \frac{273 + 150}{273} = 6,28 \cdot 10^4 \text{ м}^3/\text{ч}$$

4. Начальная запыленность газа перед фильтром при рабочих условиях:

$$Z = Z_o \frac{V'_r}{V_r} = 15,2 \frac{3,4 \cdot 10^4}{6,28 \cdot 10^4} = 8,24 \text{ г/м}^3$$

5. Допустимая газовая нагрузка по формуле (1.1):

$$q_\phi = q_n C_1 C_2 C_3 C_4 C_5 = 1,7 \cdot 0,8 \cdot 1 \cdot 0,8 \cdot 0,71 \cdot 0,95 = 0,771 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{мин}),$$

где $C_2 = 1$ из табл. 1.5, остальные значения из табл. 1.4.

Параметр	Условия	Значение
q_n	Кокс, летучая зола, порошки металлов, оксиды металлов, пластмассы, красители, силикаты, крахмал, сухие химикаты из нефтяного сырья	1,7
C_1	Обратная продувка со встряхиванием	0,7...0,85
C_3	$d_m < 3\text{мкм}$	0,7...0,9
C_4	$t_{\text{го}} = 140\text{ }^\circ\text{C}$	0,72
	$t_{\text{го}} = 160\text{ }^\circ\text{C}$	0,70
C_5	Концентрация пыли в очищенном газе 30 мг/м ³ и ниже	0,95

6. Потеря давления при прохождении очищаемого газа через корпус аппарата при принятом коэффициенте гидравлического сопротивления корпуса $\xi = 2$ и скорости на входе $\omega_{\text{вх}} = 8\text{ м/с}$

$$\Delta p_{\text{к}} = \xi \frac{\omega_{\text{вх}}^2 \rho_{\text{г}}}{2} = 2 \cdot 8^2 \cdot \frac{1,2}{2} = 76,8\text{ Па.}$$

7. Коэффициент динамической вязкости газа при рабочих условиях (коэффициент динамической вязкости при нормальных условиях $17,5 \cdot 10^{-6}\text{ Па}\cdot\text{с}$ и константа Сюзерленда $C = 124$) по формуле (1.8)

$$\mu = \mu_0 \frac{273 + C}{273 + t + C} \left(\frac{273 + t}{273} \right)^{3/2} = 17,5 \cdot 10^6 \frac{273 + 124}{273 + 150 + 124} \left(\frac{273 + 150}{273} \right)^{3/2} = 24,5 \cdot 10^{-6}\text{ Па}\cdot\text{с.}$$

8. Пористость слоя пыли по формуле (1.11)

$$\varepsilon_0 = 1 - 79d_m^{0,47} = 1 - 79(1 \cdot 10^{-6})^{0,47} = 0,880.$$

9. Удельное гидравлическое сопротивление нитрона по табл. 1.6 $h_0 = 0,83 \cdot 10^5$.

10. Пористость нитрона также по табл. 1.6 $\varepsilon_{\text{тк}} = 0,830$.

11. Скорость фильтрации в соответствии с формулой (1.2)

$$\omega_{\text{ф}} = q_{\text{ф}}/60 = 0,771/60 = 0,0129\text{ м/с.}$$

12. Коэффициент А по формуле (1.9)

$$A = 670 \cdot 10^{-6} \frac{(1 - \varepsilon_{\text{п}})^2 \varepsilon_{\text{тк}}^3 h_0^{2/3}}{d_m^{1,75} \varepsilon_0^3} =$$

$$= \frac{670 \cdot 10^{-6} (1 - 0,880)^2 \cdot 0,830^3 (0,83 \cdot 10^5)^{\frac{2}{3}}}{(1 \cdot 10^{-6})^{1,75} \cdot 0,880^3} = 4,87 \cdot 10^8 \text{ м}^{-1}.$$

Коэффициент В по формуле (1.10)

$$B = 817 \frac{1 - \varepsilon_0}{d_m^2 \varepsilon_0^3 \rho_{\text{ч}}} = \frac{817(1 - 0,880)}{(1 \cdot 10^{-6})^2 0,880^3 \cdot 2900} = 4,96 \cdot 10^{10} \text{ м/кг}.$$

13. Постоянное гидравлическое сопротивление фильтровальной перегородки с учетом пыли, оставшейся на ней после регенерации, по формуле (1.6)

$$\Delta p_1 = A \omega_{\phi} = 4,87 \cdot 10^8 \cdot 24,5 \cdot 10^{-6} \cdot 1,29 \cdot 10^{-2} = 154 \text{ Па}.$$

14. Гидравлическое сопротивление накапливающегося на фильтре слоя перед регенерацией из условий его устойчивости $\Delta p_2 = 700 \text{ Па}$ (для мелкой пыли $d_m < 20 \text{ мкм}$).

15. Общее гидравлическое сопротивление аппарата по формуле (1.3)

$$\Delta p = 76,8 + 154 + 700 = 930,8 \text{ Па}.$$

16. Продолжительность периода фильтрации между двумя регенерациями по формуле (1.7)

$$t_{\phi} = \frac{\Delta p_2}{B \omega_{\phi}^2 z} = \frac{700}{4,96 \cdot 10^{10} \cdot 24,5 \cdot 10^{-6} \cdot (1,29 \cdot 10^{-2})^2 \cdot 8,24 \cdot 10^{-3}} = 420 \text{ с}.$$

17. Предварительно рассчитанная величина расхода воздуха на регенерацию в соответствии с формулой (1.14)

$$V_p' = \frac{V_r n_p t_p}{3600} = \frac{6,28 \cdot 10^4 \cdot 9 \cdot 20}{3600} = 3,14 \cdot 10^3 \text{ м}^3/\text{ч},$$

где t_p – время отключения секции на обратную продувку (принимается в пределах 15...20 с); $n_p = 3600/420 \approx 9$ – количество регенераций в течение 1 часа.

18. Для выбора аппарата определяется площадь поверхности фильтрации:

$$F_{\phi} = \frac{V_r + V_p'}{60 q_{\phi}} = \frac{6,28 \cdot 10^4 + 0,314 \cdot 10^4}{60 \cdot 0,771} = 1,425 \cdot 10^3 \text{ м}^2,$$

$$F_{\phi} = N_c F_c,$$

где N_c – количество секций, F_c – площадь 1-й секции, м²:

$$F_c = \frac{1610}{14} = 115 \text{ м}^2.$$

С учетом запаса по площади фильтрации выбираем фильтр УРФМ-III, $F_\phi = 1610 \text{ м}^2$.

19. Площадь поверхности фильтрации, отключаемая на регенерацию в течение 1 ч,

$$F_p = \frac{N_c F_c n_p t_p}{3600} = \frac{1610 \cdot 9 \cdot 20}{3600} = 80,5 \text{ м}^2.$$

Принимаем к отключению 1 секцию в течение часа $F_p = F_c = 115 \text{ м}^2$. Тогда количество регенераций определится по формуле

$$n_p = \frac{3600}{N_c F_c t_p} F_p = \frac{3600}{1610 \cdot 20} 115 = 12,85.$$

20. Находим скорость обратной продувки:

$$\omega_{\text{обр}} = \frac{k_p \varepsilon_{\text{ТК}}}{60} = \frac{1,6 \cdot 0,83}{60} = 0,022 \text{ м/с}.$$

21. Уточняем расход воздуха, подаваемого на обратную продувку в течение часа,

$$V_p = N_c F_c n_p t_p \omega_{\text{обр}} = 1610 \cdot 20 \cdot 12,85 \cdot 0,022 = 9209,2 \text{ м}^3.$$

22. Окончательная площадь фильтрации должна быть равна или близка к площади фильтрации выбранного аппарата 1610 м^2 :

$$F_\phi = \frac{V_\Gamma + V_p}{60 q_\phi} = \frac{6,28 \cdot 10^4 + 0,921 \cdot 10^4}{60 \cdot 0,771} = 1,557 \cdot 10^3 \text{ м}^2.$$

23. Уточняем газовую нагрузку:

$$q_\phi' = \frac{\frac{V_\Gamma}{60} + F_c q_\phi}{F_\phi - F_c} = \frac{\frac{6,28 \cdot 10^4}{60} + 115 \cdot 0,771}{1610 - 115} = 0,759 \text{ м/мин}.$$

24. Проверяем суммарное время регенерации:

$$(N_c - 1) t_p = (14 - 1) \cdot 20 = 260 \text{ с},$$

что меньше продолжительности времени фильтрования $t_\phi = 420 \text{ с}$.

Так как полученные данные выполнены при соблюдении всех условий, фильтр марки УРФМ-III выбран правильно.

Алгоритм выполнения практической работы

1. Изучить теоретические сведения по методике определения количественных и качественных характеристик рукавных фильтров, которая представлена в методических указаниях к работе.
2. Выбрать вариант задания (табл. 1.7).
3. Произвести необходимые расчеты. При этом можно пользоваться дополнительно нормативной и справочной литературой, рекомендуемой в указаниях к практической работе.
4. Составить отчет о практической работе в соответствии с требованиями (прил. А).
5. Ответить на вопросы для самоконтроля.

Таблица 1.7

Варианты заданий

Вариант	Объем очищаемого газа при нормальных условиях $V', \text{ м}^3/\text{ч}$	Температура очищаемого газа $t_{г0}, \text{ }^\circ\text{C}$	Требуемая температура очищенного газа, $t_{г}, \text{ }^\circ\text{C}$	Среднегеометрический диаметр пыли $d_m, \text{ мкм}$	Плотность материала пыли $\rho, \text{ кг/м}^3$	Начальная запыленность при нормальных условиях $Z_0, \text{ г/м}^3$	Метод регенерации	Пыль
1	37000	160	20	1	1300	13,7	Обратная продувка и встряхивание	Целлюлоза
2	29000	140	21	1,5	2700	15,4	Обратная продувка	Гипс
3	35000	250	22	2	2700	18,3	Обратная продувка	Асбест
4	27000	145	23	4	2330	14,1	Обратная продувка и встряхивание	Песок
5	25000	140	24	2,5	1900	16,8	Обратная продувка и встряхивание	Минеральная пыль
6	38000	155	25	2	1940	12,8	Обратная продувка	Летучая зола
7	32500	160	20	2,5	1800	13,4	Обратная продувка и встряхивание	Минеральная пыль

Вариант	Объем очищаемого газа при нормальных условиях $V', \text{ м}^3/\text{ч}$	Температура очищаемого газа $t_{\text{го}}, \text{ }^\circ\text{C}$	Требуемая температура очищенного газа, $t_{\text{в}}, \text{ }^\circ\text{C}$	Среднегеометрический диаметр пыли $d_m, \text{ мкм}$	Плотность материала пыли $\rho, \text{ кг/м}^3$	Начальная запыленность при нормальных условиях $Z_0, \text{ г/м}^3$	Метод регенерации	Пыль
8	26700	150	21	2	1450	15,2	Обратная продувка и встряхивание	Пласт-масса
9	38000	160	22	2,8	2300	12,4	Обратная продувка	Металлические порошки
10	35500	120	23	3,5	2300	16,2	Обратная продувка и встряхивание	Песок
11	36000	140	24	1,5	2830	14,7	Обратная продувка и встряхивание	Химикаты из нефтяного сырья
12	28500	135	25	1	2650	17,4	Обратная продувка	Тальк
13	38500	110	20	2	600	14,3	Обратная продувка и встряхивание	Картон
14	26000	145	21	2,5	700	18,3	Обратная продувка и встряхивание	Опилки
15	28500	310	22	1	2700	14,9	Обратная продувка	Гипс
16	37000	150	23	2	1700	12,8	Обратная продувка и встряхивание	Глинозем
17	32500	90	24	3,5	700	12,9	Обратная продувка и встряхивание	Опилки
18	23700	210	25	1,7	2350	17,2	Обратная продувка	Асбест
19	40000	160	20	2,5	1300	11,4	Обратная продувка и встряхивание	Целлюлоза

Вариант	Объем очищаемого газа при нормальных условиях V_2 , м ³ /ч	Температура очищаемого газа $t_{г0}$, °С	Требуемая температура очищенного газа, $t_{гв}$, °С	Среднегеометрический диаметр пыли d_m , мкм	Плотность материала пыли ρ_p , кг/м ³	Начальная запыленность при нормальных условиях Z_0 , г/м ³	Метод регенерации	Пыль
20	34500	125	21	2	2350	16,2	Обратная продувка и встряхивание	Соль
21	37000	220	22	1	700	18,2	Обратная продувка	Мука
22	29000	100	23	1,5	2700	15,4	Обратная продувка и встряхивание	Гипс
23	40000	350	24	2	2700	18,3	Обратная продувка и встряхивание	Известняк
24	28000	250	25	2,5	1200	17,1	Обратная продувка	Резина
25	34000	140	20	4	700	16,8	Обратная продувка и встряхивание	Опилки
26	39000	155	21	1	2700	12,8	Обратная продувка и встряхивание	Тальк
27	32000	260	22	3,5	120	13,4	Обратная продувка и встряхивание	Жмых
28	24700	150	23	1	2900	15,2	Обратная продувка и встряхивание	Оксиды металлов
29	40000	160	24	3	2300	15,4	Обратная продувка и встряхивание	Руда
30	33500	280	25	2,5	1640	13,5	Обратная продувка	Кокс
31	36000	90	20	1,5	2600	15,0	Обратная продувка и встряхивание	Асбест

Вариант	Объем очищаемого газа при нормальных условиях $V', \text{ м}^3/\text{ч}$	Температура очищаемого газа $t_{\text{го}}, \text{ }^\circ\text{C}$	Требуемая температура очищенного газа, $t_{\text{в}}, \text{ }^\circ\text{C}$	Среднегеометрический диаметр пыли $d_m, \text{ мкм}$	Плотность материала пыли $\rho, \text{ кг/м}^3$	Начальная запыленность при нормальных условиях $Z_0, \text{ г/м}^3$	Метод регенерации	Пыль
32	28000	130	21	1,5	1650	15,8	Обратная продувка и встряхивание	Пласт-массы
33	38500	320	22	2	2540	14,3	Обратная продувка	Извест-няк
34	26500	140	23	2,5	120	19,3	Обратная продувка и встряхивание	Жмых
35	28500	120	24	1	1800	14,8	Обратная продувка и встряхивание	Краси-тели
36	37500	300	25	2	2940	12,8	Обратная продувка	Метал-лические порошки
37	32500	80	20	2	1800	12,9	Обратная продувка и встряхивание	Химика-ты из нефтяного сырья
38	23700	110	21	1,8	1450	17,2	Обратная продувка и встряхивание	Цемент
39	40000	130	22	4,5	700	8,4	Обратная продувка	Опилки
40	34500	125	23	2	1300	16,2	Обратная продувка и встряхивание	Цел-люлоза
41	38000	180	24	1,5	2920	13,7	Обратная продувка и встряхивание	Летучая зола
42	28000	140	25	2	2800	15,8	Обратная продувка и встряхивание	Мине-ральная пыль
43	34000	340	20	2,5	1600	20,3	Обратная продувка	Глино-зем

Вариант	Объем очищаемого газа при нормальных условиях $V', \text{ м}^3/\text{ч}$	Температура очищаемого газа $t_{\text{го}}, \text{ }^\circ\text{C}$	Требуемая температура очищенного газа, $t_{\text{в}}, \text{ }^\circ\text{C}$	Среднегеометрический диаметр пыли $d_m, \text{ мкм}$	Плотность материала пыли $\rho, \text{ кг/м}^3$	Начальная запыленность при нормальных условиях $Z_0, \text{ г/м}^3$	Метод регенерации	Пыль
44	22000	115	21	1	1330	14,3	Обратная продувка и встряхивание	Красители
45	25000	80	22	3,2	1580	16,8	Обратная продувка и встряхивание	Пластмассы
46	38000	290	23	2	1300	19,8	Обратная продувка	Кокс
47	33500	130	24	4	2140	20,4	Обратная продувка и встряхивание	Песок
48	26000	120	25	2	1200	15,3	Обратная продувка и встряхивание	Резина
49	38500	270	24	2,5	2350	12,8	Обратная продувка	Уголь
50	23000	140	23	4,5	120	17,8	Обратная продувка и встряхивание	Жмых

Вопросы для самоконтроля

1. Назовите основные количественные и качественные характеристики рукавных фильтров.
2. От каких величин зависит необходимая продолжительность периода фильтрации между регенерациями?
3. Как определяется площадь поверхности фильтрации для выбора аппарата?

Практическая работа 2

Расчет и проектирование аппаратов механической очистки пылегазовых выбросов

Цели работы: ознакомиться с принципом работы циклона — аппарата сухой механической очистки от пыли и рассчитать основные его параметры для выбранного источника образования пыли.

Теоретические сведения

Основными источниками загрязнения атмосферного воздуха являются автомобили, промышленные предприятия и тепловые электростанции. Загрязнение атмосферы оказывает неблагоприятное воздействие на человека, флору и фауну, различные сооружения и транспортные средства и др. Очистка промышленных выбросов осуществляется в аппаратах сухой и мокрой очистки.

Широкое применение для сухой очистки газов от пыли получили циклоны различных типов. Циклоны не применяются для очистки влажных газов и взрывоопасных сред. В настоящее время применяется около двадцати типов циклонов. Сравнительные испытания показали, что для промышленного применения в большинстве случаев подходят цилиндрические и конические циклоны. Наиболее часто применяются цилиндрические циклоны марок ЦН-11 (рис. 1.9), ЦН-15, ЦН-24, конические СК ЦН-34, СК ЦН-34М, СДК ЦН-33. Геометрические размеры цилиндрических и конических циклонов указываются в долях от внутреннего диаметра.

Газовый поток вводится в циклон через патрубок по касательной к внутренней поверхности корпуса и совершает вращательно-поступательное движение вдоль корпуса к бункеру. На частицу пыли действуют сила тяжести, сила сопротивления среды, центробежная сила. Центробежная сила направлена по радиусу к стенкам циклона и определяется по формуле

$$F_{ц} = \frac{\pi d_{ц}^3 W_{тг}^2}{6R} (\rho_{ч} - \rho_{г}), \quad (1.21)$$

где $d_{ц}$ — диаметр частиц, м; $W_{тг}$ — тангенциальная составляющая скорости газа, м/с; R — радиус циклона, м; $\rho_{ч}$ — плотность частиц пыли, кг/м³; $\rho_{г}$ — плотность газа, кг/м³.

Эффективность циклона (табл. 1.8) тем выше, чем больше диаметр частиц пыли, её удельный вес, скорость вращения газового потока и чем меньше диаметр циклона. Отделение частиц пыли от газа, попавшего в бункер, происходит под действием центробежной силы при повороте газового потока в бункере. Освободившись от пыли, газовый поток образует вихрь и выходит через выходную трубу, а частицы пыли образуют на стенках циклона пылевой слой, который постепенно опускается в бункер.

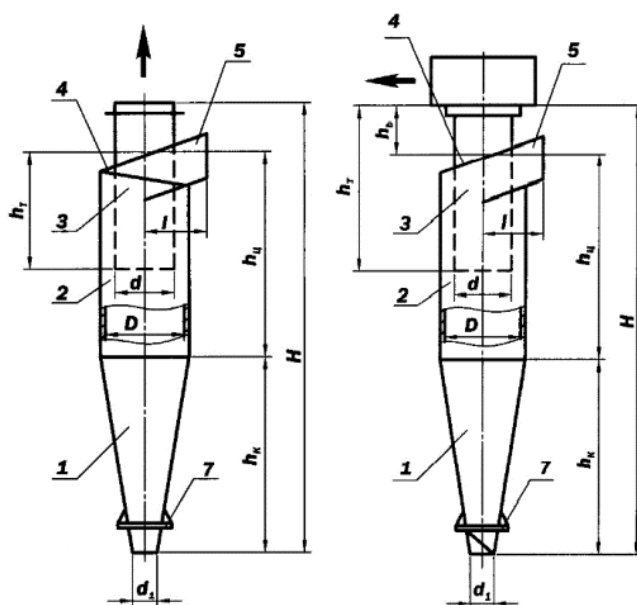


Рис. 1.9. Конструктивная схема циклона ЦН-11:
 1 – конус; 2 – цилиндр; 3 – выхлопная труба;
 4 – винтовая крышка; 5 – входной патрубок; 6 – улитка;
 7 – опорный фланец

Таблица 1.8

Параметры, определяющие эффективность циклонов

Параметры	Тип циклона						
	ЦН-24	ЦН-15У	ЦН-15	ЦН-11	СДК-ЦН-33	СКЦН-34	СК-ЦН-34М
Скорость движения газа в циклоне $\omega_{\text{оп}}$, м/с	4,5	3,5	3,5	3,5	2,0	1,7	2,0
Диаметр частиц, осаждаемых с эффективностью 50 % $d_{\text{оп}}^T$, мкм	8,50	6,00	4,50	3,65	2,31	1,95	1,13
Стандартное отклонение функции распределения парциальных коэффициентов очистки $\lg \delta_{\eta}^T$	0,308	0,283	0,352	0,352	0,364	0,308	0,340

При выборе и расчете циклонов необходимо учитывать абразивность и слипаемость пыли. Для уменьшения абразивного износа следует выбирать циклоны, исходя из наименьших значений скорости газа. При улавливании сильно слипающейся пыли не рекомендуется применять циклоны малого диаметра (менее 0,8 м), которые склонны к залипанию. Так, для очистки газов от сажи применяются конические циклоны серии СК, которые обладают высокой эффективностью за счет более высокого гидравлического сопротивления.

Расчет циклонов ведут методом последовательных приближений [5]. Расчет начинают с циклона, для которого диаметр частиц пыли должен быть ориентировочно $d_m > 2d_{50}^T$, где d_m – медианный размер частиц, который представляет такой размер, при котором количество частиц крупнее d_m равно количеству частиц мельче d_m .

Диаметр циклона вычисляется по формуле

$$D = \sqrt{\frac{4Q}{\pi\omega_{\text{оп}}}}, \quad (1.22)$$

где Q – количество очищаемого газа, м³/с.

Полученное значение диаметра D округляется до ближайшего типового значения внутреннего диаметра циклона $D_{\text{ц}}$ (табл. 1.9).

Таблица 1.9

Типовые значения внутреннего диаметра циклона

$D_{и'}$ м	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0	2,2	2,4	2,6	2,8	3,0
---------------	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----

По выбранному диаметру циклона находится действительная скорость движения газа в циклоне, м/с:

$$\omega_p = \frac{4Q}{\pi D_{ц}^2}. \quad (1.23)$$

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

$$100 \cdot \left| \frac{\omega_p - \omega_{оп}}{\omega_{оп}} \right| \leq 15 \%. \quad (1.24)$$

При отклонении более чем 15 % выбирают другой тип циклона.

Параметр d_{50} – это диаметр частиц, реально осаждаемых с эффективностью 50 % при рабочих условиях. Величина d_{50} определяется по формуле

$$d_{50} = d_{50}^T \sqrt{\frac{D_{ц} \rho_{ч} \mu \omega_T}{D_T \rho_{чT} \mu_T \omega_p}}. \quad (1.25)$$

Значение d_{50}^T соответствует следующим параметрам работы циклона:

$$\omega_T = 3,5 \text{ м/с},$$

$$D_T = 0,6 \text{ м},$$

$$\rho_{чT} = 1930 \text{ кг/м}^3,$$

$$\mu_T = 22,2 \cdot 10^{-6} \text{ Па} \cdot \text{с}.$$

С учетом этих значений формула (1.25) принимает вид

$$d_{50} = d_{50}^T \sqrt{\frac{D_{ц} \cdot 1930 \cdot \mu \cdot 3,5}{0,6 \cdot \rho_{чT} \cdot 22,2 \cdot 10^{-6} \cdot \omega_p}}. \quad (1.26)$$

Полученное значение d_{50} должно быть меньше d_m (заданного). Если это не выполняется, то необходимо выбрать другой циклон с меньшим значением d_{50}^T .

Расчет параметра X ведут по формуле

$$X = \frac{\lg(d_m/d_{50})}{\sqrt{(\lg \delta_{\eta}^T)^2 + (\lg \delta_{ч})^2}}. \quad (1.27)$$

По величине параметра X определяют значение нормальной функции распределения $\Phi(X)$. $\Phi(X)$ – это полный коэффициент очистки газа, выраженный в долях.

$$\Phi(X) = \begin{cases} 0,3762X + 0,5, & \text{при } 0 \leq X \leq 0,6 \\ 1 - \frac{1}{5,8X+0,5}, & \text{при } X > 0,6 \end{cases} \quad (1.28)$$

Эффективность очистки газа в циклоне η определяется:

$$\eta = \frac{1+\Phi(X)}{2}. \quad (1.29)$$

Полученное значение сопоставляют с требуемым значением эффективности. Если η окажется меньше требуемого, то необходимо выбрать другой тип циклона с меньшим значением $\omega_{оп}$ и d_{50}^T .

Определение коэффициента гидравлического сопротивления циклона производят по формуле

$$\xi = K_1 \cdot K_2 \cdot \xi_{500}, \quad (1.30)$$

где K_1 – поправочный коэффициент на диаметр циклона (табл. 1.10); K_2 – поправочный коэффициент на запыленность газа (табл. 1.11); ξ_{500} – коэффициент гидравлического сопротивления одиночного циклона диаметром 500 мм (табл. 1.12).

Вычисление гидравлического сопротивления циклона производят по формуле, Па,

$$\Delta P = \xi \frac{\rho \omega_p^2}{2}, \quad (1.31)$$

где ρ – плотность газа, кг/м³; ω_p – скорость газа в циклоне, м/с.

Таблица 1.10

Поправочный коэффициент K_1

$D_{ц}$, м	ЦН-11	ЦН-15, ЦН-15У, ЦН-24	СДК ЦН-3, СДК ЦН-34, СДК ЦН-34М
0,2	0,95	0,90	1,00
0,3	0,96	0,93	1,00
0,4	0,99	1,00	1,00
$\geq 0,5$	1,00	1,00	1,00

Таблица 1.11

Поправочный коэффициент K_2

Тип циклона	Запыленность на входе, г/м ³ ($C_{вх}$)						
	0	10	20	40	80	120	150
ЦН-11	1,00	0,96	0,94	0,92	0,90	0,87	0,85
ЦН-15	1,00	0,93	0,92	0,91	0,90	0,87	0,86
ЦН-15У	1,00	0,93	0,92	0,91	0,89	0,88	0,87
ЦН-24	1,00	0,95	0,93	0,92	0,90	0,87	0,86
СДК ЦН-33	1,00	0,81	0,785	0,78	0,77	0,76	0,745
СК ЦН-34	1,00	0,98	0,947	0,93	0,915	0,91	0,90
СК ЦН-34М	1,00	0,99	0,97	0,95	—	—	—

Таблица 1.12

Коэффициент гидравлического сопротивления ξ_{500}

Тип циклона	ЦН-24	ЦН-15, ЦН-15У	ЦН-11	СДК ЦН-33	СК ЦН-34, СК ЦН-34М
ξ_{500}	75	155	245	520	1050

Величина гидравлического сопротивления ΔP и объемный расход Q очищаемого газа определяют мощность N , Вт, привода устройства для подачи газа к циклону:

$$N = \frac{K_3 \Delta P Q}{\eta_M \eta_B}, \quad (1.32)$$

где $K_3 = 1,2$ – коэффициент запаса мощности; $\eta_M = 0,8$ – КПД передачи мощности от электродвигателя к вентилятору; $\eta_B = 0,8$ – КПД вентилятора.

Определение концентрации пыли на выходе из циклона, кг/м³, производят по формуле

$$C_{вх} = C_{вх} (1 - \eta). \quad (1.33)$$

Требуемые исходные данные для расчета:

- Q – объем очищаемого газа, м³/с;
- ρ – плотность газа при рабочих условиях, кг/м³;
- μ – вязкость газа при рабочей температуре, Па·с;
- d_m – медианный размер частиц пыли, мкм;
- $\lg \delta_q$ – стандартное отклонение размеров частиц пыли;
- $C_{вх}$ – входная концентрация пыли, г/м³;

- $\rho_{\text{ч}}$ – плотность частиц пыли, кг/м³;
- $\dot{\eta}$ – требуемая эффективность очистки газа.

В результате необходимо выбрать и рассчитать циклон, обеспечивающий требуемую эффективность очистки газа.

Пример расчета

Исходные данные:

- оборудование – вращающаяся цементная печь;
- вязкость газа при рабочей температуре $\mu = 17 \cdot 10^{-6}$ Па·с;
- объём очищаемого газа $Q = 12$ м³/с;
- плотность газа при рабочих условиях $\rho = 1,29$ кг/м³;
- медианный размер частиц пыли $d_{\text{М}} = 18$ мкм;
- стандартное отклонение размеров частиц пыли $\lg \delta_{\text{ч}} = 0,652$;
- входная концентрация пыли $C_{\text{вх}} = 20$ г/м³;
- плотность частиц пыли $\rho_{\text{ч}} = 2000$ кг/м³;
- требуемая эффективность очистки газа $\dot{\eta} = 0,8$.

Исходя из заданного размера частиц пыли ($d_{\text{М}} = 18$ мкм), выбираем циклон, который очищает от частиц пыли размером $d_{50}^{\text{T}} = 8,5$ мкм – циклон ЦН-24 с характеристиками:

$$\omega_{\text{оп}} = 4,5 \text{ м/с}; d_{50}^{\text{T}} = 8,5 \text{ мкм}; \lg \delta_{\eta}^{\text{T}} = 0,308.$$

Определяем диаметр циклона:

$$D = \sqrt{\frac{4 \cdot 12}{3,14 \cdot 4,5}} = 1,84 \text{ м.}$$

По табл. 1.9 выбираем ближайшее значение типового диаметра $D_{\text{ц}} = 1,8$ м.

Далее получим действительную скорость движения газа в циклоне:

$$\omega_{\text{р}} = \frac{4 \cdot 12}{\pi \cdot 1,8^2} = 4,72 \text{ м/с,}$$

которую сравним с оптимальной:

$$100 \left| \frac{4,72 - 4,5}{4,5} \right| = 4,8 \% \leq 15 \%.$$

Диаметр частиц, реально осаждаемых с эффективностью 50 %, при рабочих условиях равен:

$$d_{50} = 8,5 \sqrt{\frac{1,8 \cdot 1930 \cdot 17,3 \cdot 10^{-6} \cdot 3,5}{0,6 \cdot 2000 \cdot 22,2 \cdot 10^{-6} \cdot 4,72}} = 9,7 \text{ мкм};$$

$$d_{50} = 9,7 < d_m = 18.$$

Рассчитываем параметр X

$$X = \frac{\lg(18/9,7)}{\sqrt{(0,308)^2 + (0,652)^2}} = 0,372.$$

По величине параметра X определяем значение нормальной функции распределения $\Phi(X)$

$$\Phi(X) = 0,3762 \cdot 0,372 + 0,5 = 0,64.$$

Эффективность очистки газа в циклоне равна:

$$\eta = \frac{1 + 0,64}{2} = 0,82;$$

$$\eta > 0,8.$$

Находим коэффициент гидравлического сопротивления

$$\xi = 1 \cdot 0,93 \cdot 75,$$

откуда гидравлическое сопротивление циклона равно:

$$\Delta P = 69,75 \frac{1,29 \cdot 4,72^2}{2} = 1002 \text{ Па}.$$

Мощность привода устройства для подачи газа к циклону равна:

$$N = \frac{1,2 \cdot 1002 \cdot 12}{0,8 \cdot 0,8} = 22551 \text{ Вт}.$$

Определим концентрацию пыли на выходе из циклона:

$$C_{\text{вых}} = 20(1 - 0,82) = 3,76 \text{ г/м}^3.$$

Вывод: выбираем циклон ЦН-24; $D_{\text{ц}} = 1,8 \text{ м}$; $\eta = 0,82$;
 $N = 22551 \text{ Вт}$; $C_{\text{вых}} = 3,76 \text{ г/м}^3$.

Алгоритм выполнения практической работы

1. Изучить теоретические сведения по принципу действия циклона и методу его расчета, представленные в указаниях к данной работе.
2. Получить у преподавателя вариант задания к работе (табл. 1.13).
3. Произвести необходимые расчеты для выбора типа циклона, обеспечивающего требуемую эффективность очистки газа. При необходимости дополнительно можно пользоваться нормативной и

справочной литературой, рекомендуемой в указаниях к практической работе.

4. Составить отчет о практической работе в соответствии с требованиями (прил. А).
5. Начертить эскиз циклона с указанием размеров.
6. Ответить на вопросы для самоконтроля.

Таблица 1.13

Варианты заданий

№ варианта	Объем очищаемого газа Q , м ³ /с	Плотность газа при рабочих условиях ρ , кг/м ³	Вязкость газа при рабочей температуре μ , Па·с	Медианный размер частиц пыли d_m , мкм	Стандартное отклонение размеров частиц пыли $lg \delta_3$	Плотность частиц пыли ρ_p , кг/м ³	Входная концентрация пыли $C_{вх}$, г/м ³	Требуемая эффективность очистки газа η
1	10	1,15	14·10 ⁻⁶	18	0,65	2000	11	0,75
2	11	1,16	15·10 ⁻⁶	12	0,55	2100	12	0,76
3	12	1,17	16·10 ⁻⁶	9	0,45	2200	13	0,77
4	13	1,18	17·10 ⁻⁶	8	0,4	2300	14	0,78
5	14	1,19	18·10 ⁻⁶	6	0,35	2400	15	0,79
6	15	1,20	19·10 ⁻⁶	4	0,3	2500	16	0,8
7	16	1,21	20·10 ⁻⁶	3	0,25	2600	17	0,81
8	17	1,22	21·10 ⁻⁶	18	0,65	2700	18	0,82
9	18	1,23	14·10 ⁻⁶	12	0,55	2800	19	0,83
10	19	1,24	15·10 ⁻⁶	9	0,45	2900	20	0,84
11	20	1,25	16·10 ⁻⁶	8	0,4	3000	21	0,85
12	19	1,26	17·10 ⁻⁶	6	0,35	2050	22	0,86
13	18	1,27	18·10 ⁻⁶	4	0,3	2150	23	0,87
14	17	1,28	19·10 ⁻⁶	3	0,25	2250	24	0,88
15	16	1,29	20·10 ⁻⁶	18	0,65	2350	25	0,90
16	15	1,3	21·10 ⁻⁶	12	0,55	2450	26	0,91
17	14	1,29	14·10 ⁻⁶	9	0,45	2550	27	0,92
18	13	1,28	15·10 ⁻⁶	8	0,4	2650	28	0,93
19	12	1,27	16·10 ⁻⁶	6	0,35	2750	29	0,94
20	11	1,26	17·10 ⁻⁶	4	0,3	2850	30	0,95
21	10	1,25	18·10 ⁻⁶	3	0,25	2950	29	0,75
22	11	1,24	19·10 ⁻⁶	18	0,65	3000	28	0,76
23	12	1,23	20·10 ⁻⁶	12	0,55	2000	27	0,77
24	13	1,22	21·10 ⁻⁶	9	0,45	2100	26	0,78

№ варианта	Объем очищаемого газа Q , м ³ /с	Плотность газа при рабочих условиях ρ , кг/м ³	Вязкость газа при рабочей температуре μ , Па·с	Медианный размер частиц пыли d_m , мкм	Стандартное отклонение размеров частиц пыли $\lg \delta_{\text{ст}}$	Плотность частиц пыли $\rho_{\text{ч}}$, кг/м ³	Входная концентрация пыли $C_{\text{вх}}$, г/м ³	Требуемая эффективность очистки газа η
25	14	1,21	14·10 ⁻⁶	8	0,4	2200	25	0,79
26	15	1,20	15·10 ⁻⁶	6	0,35	2300	24	0,8
27	16	1,19	16·10 ⁻⁶	4	0,3	2400	23	0,81
28	17	1,18	17·10 ⁻⁶	3	0,25	2500	22	0,82
29	18	1,17	18·10 ⁻⁶	18	0,65	2600	21	0,83
30	19	1,16	19·10 ⁻⁶	12	0,55	2700	20	0,84
31	20	1,15	20·10 ⁻⁶	9	0,45	2800	19	0,85
32	21	1,16	21·10 ⁻⁶	8	0,4	2900	18	0,86
33	22	1,17	14·10 ⁻⁶	6	0,35	3000	17	0,87
34	23	1,18	15·10 ⁻⁶	4	0,3	2050	16	0,88
35	24	1,19	16·10 ⁻⁶	3	0,25	2150	15	0,90
36	25	1,20	17·10 ⁻⁶	18	0,65	2250	14	0,91
37	26	1,21	18·10 ⁻⁶	12	0,55	2350	13	0,92
38	27	1,22	19·10 ⁻⁶	9	0,45	2450	12	0,93
39	28	1,23	20·10 ⁻⁶	8	0,4	2550	11	0,94
40	29	1,24	21·10 ⁻⁶	6	0,35	2650	10	0,95
41	30	1,25	14·10 ⁻⁶	4	0,3	2750	12	0,80
42	29	1,26	15·10 ⁻⁶	3	0,25	2850	14	0,81
43	27	1,27	16·10 ⁻⁶	18	0,65	2950	16	0,82
44	26	1,28	17·10 ⁻⁶	12	0,55	3000	18	0,83
45	25	1,29	18·10 ⁻⁶	9	0,45	2900	20	0,84
46	24	1,3	19·10 ⁻⁶	8	0,4	2800	22	0,85
47	23	1,29	20·10 ⁻⁶	6	0,35	2700	24	0,86
48	22	1,28	21·10 ⁻⁶	4	0,3	2600	26	0,87
49	21	1,27	14·10 ⁻⁶	3	0,25	2500	28	0,88
50	20	1,26	15·10 ⁻⁶	8	0,4	2400	30	0,89

Вопросы для самоконтроля

1. Какие методы очистки пылегазовых выбросов существуют?
2. Опишите принцип действия циклона.
3. Назовите основные технические характеристики циклона.
4. Опишите порядок расчета циклона.

Модуль II. РАСЧЕТ И ПРОЕКТИРОВАНИЕ СИСТЕМ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ОБЪЕКТОВ ГИДРОСФЕРЫ

2.1. Загрязнения и классификация сточных вод

В промышленности воду используют как сырье и источник энергии, как хладагент, растворитель, экстрагент, для транспортирования сырья и материалов. Воду, используемую в промышленности, подразделяют на охлаждающую, технологическую и энергетическую.

В промышленности 65...80 % расхода воды потребляется для охлаждения жидких и газообразных продуктов в теплообменных аппаратах. В этих случаях вода не соприкасается с материальными потоками и не загрязняется, а лишь нагревается.

Технологическая вода непосредственно контактирует со средой. Технологическую воду подразделяют на средообразующую, промывающую и реакционную. Средообразующую воду используют для растворения и образования пульп, при обогащении и переработке руд, гидротранспорте продуктов и отходов производства; промывающую — для промывки газообразных (абсорбция), жидких (экстракция) и твердых продуктов и изделий; реакционную — в составе реагентов, а также при отгонке и других процессах.

Энергетическая вода потребляется для получения пара и нагревания оборудования, помещений, продуктов.

Для уменьшения потребления свежей воды создают оборотные и замкнутые системы водоснабжения. При оборотном водоснабжении предусматривают необходимую очистку сточной воды, охлаждение оборотной воды, обработку и повторное использование сточной воды. Применение оборотного водоснабжения позволяет в 10...15 раз уменьшить потребление природной воды. Обратную воду в основном используют в теплообменной аппаратуре для отведения избыточного тепла. Она многократно нагревается до 40...45 °С и охлаждается в градирнях или брызгальных бассейнах. Значительная часть ее теряется в результате брызг и испарения. Из-за неисправностей и неплотностей теплообменников она загрязняется до определенного предела.

Сточная вода — это вода, бывшая в бытовом, производственном или сельскохозяйственном употреблении, а также прошедшая через

загрязненную территорию. В зависимости от условий образования сточные воды делятся на бытовые или хозяйственно-фекальные (БСВ), атмосферные (АСВ) и промышленные (ПСВ).

Хозяйственно-бытовые воды – это стоки душевых, прачечных, столовых, туалетов, от мытья полов и др. Они содержат примеси, из которых 58 % органических веществ и 42 % минеральных.

Атмосферные воды – воды, образующиеся в результате выпадения атмосферных осадков и стекающие с территорий предприятий. Они загрязняются органическими и минеральными веществами.

Промышленные сточные воды – это жидкие отходы, которые возникают при добыче и переработке органического и неорганического сырья.

Все категории сточных вод в той или иной степени содержат загрязнения, состав которых позволяет делить стоки по виду содержащихся в них веществ:

- 1) биологически нестойкие органические соединения;
- 2) малотоксичные неорганические соли;
- 3) нефтепродукты;
- 4) биогенные соединения;
- 5) вещества со специфическими токсичными свойствами, в том числе тяжелые металлы, биологически жесткие неразлагающиеся органические синтетические соединения.

Различают три основные группы загрязнений.

Первая группа – минеральные загрязнения. К ним относятся песок, глинистые частицы, частицы руды, шлака, растворимые неорганические соли, кислоты и щелочи.

Вторая группа – органические загрязнения. Могут быть разделены на загрязнения растительного происхождения, в которых преобладает химический элемент углерод, и животного происхождения, в которых преобладает азот. В бытовых стоках содержится примерно 60 % загрязнений органического происхождения и 40 % минерального.

Органические загрязнения являются благоприятной средой для развития микроорганизмов, поэтому третья группа загрязнений – биологические. К этой категории относятся бактерии, дрожжевые и плесневелые грибки, яйца гельминтов и вирусы.

2.2. Классификация способов очистки сточных вод

Для создания замкнутых систем водоснабжения промышленные сточные воды подвергаются очистке до необходимого качества механическими, химическими, физико-химическими, биологическими и термическими методами. Основные методы очистки различной природы используются как для очистки сточной воды от суспендированных и эмульгированных примесей, так и для очистки от растворенных примесей. Указанные методы очистки подразделяются на рекуперационные и деструктивные.

Рекуперационные методы очистки гетерогенных систем предусматривают извлечение из сточных вод и дальнейшую переработку всех ценных веществ. Они подразделяются на методы очистки от грубодисперсных примесей и методы очистки от мелкодисперсных примесей. В эту группу также можно отнести методы устранения и уничтожения примесей путем закачки в скважины, захоронения и термического уничтожения. Методы очистки от грубодисперсных примесей включают способы отстаивания, процеживания и фильтрации, флотации, центробежного осаждения. Методами очистки от мелкодисперсных примесей являются коагуляция, флокуляция и электрофлотация.

В *деструктивных методах* загрязняющие вещества подвергаются разрушению путем окисления или восстановления, а продукты разрушения удаляются из воды в виде газов или осадков. В эту группу входят методы очистки воды от минеральных примесей путем дистилляции, ионного обмена, обратного осмоса, электролиза; методы очистки от органических примесей, включающие регенеративные способы экстракции, ректификации, адсорбции, обратного осмоса и ультрафильтрации, и деструктивные способы: биохимические, жидко- и парофазного окисления, радиационного и электрохимического окисления; а также методы очистки от растворенных газов, включая способы отдувки, нагрева и реагентные.

Механические методы удаления взвешенных частиц из сточных вод основаны на законах гидромеханических процессов. В большинстве случаев эти методы являются предварительными, в процессе применения которых удаляются наиболее крупные и взве-

шенные вещества. Для механического типа очищения стоков используют процеживание, фильтрование и отстаивание.

Сооружениями для механической очистки сточных вод являются решётки и сита; песколовки; первичные отстойники, а также мембранные элементы.

Для задержания крупных загрязнений органического и минерального происхождения применяются решётки. Для более полного выделения грубодисперсных примесей используют сита. Отбросы с решёток либо дробят и направляют для совместной переработки с осадками очистных сооружений, либо вывозят в места обработки твёрдых бытовых и промышленных отходов.

Затем стоки проходят через песколовки, где происходит осаждение таких мелких частиц, как песок, шлак, битое стекло и прочего под действием силы тяжести. Песок из песколовок обычно складывается или используется в дорожных работах.

В жироловках происходит удаление с поверхности воды гидрофобных веществ путём флотации.

Очищенные таким образом сточные воды переходят на первичные отстойники для выделения взвешенных веществ. В результате механической очистки удаляется от 60 до 70 % минеральных загрязнений. Кроме того, механическая стадия очистки важна для создания равномерного движения сточных вод, что позволяет избежать колебаний объёма стоков на биологическом этапе.

Физико-химические методы очистки сточных вод используют для удаления из сточных вод тонкодисперсных твердых и жидких взвешенных частиц, растворимых газов, минеральных и органических веществ. Механизмы этих методов основаны на использовании законов физико-химической гидромеханики, физической и коллоидной химии, электрохимии, процессов химической технологии. Основными из этих методов являются флотация; сорбция; центрифугирование; гиперфильтрация; ионообменная и электрохимическая очистка. К этим методам также относятся экстракция; эвапорация; выпаривание и кристаллизация.

Химические методы применяют для удаления растворимых веществ в замкнутых системах водоснабжения. Химическая очистка включает процессы нейтрализации, окисления и восстановления.

Биохимические методы применяют для очистки хозяйственно-бытовых и промышленных сточных вод от растворенных органических и неорганических веществ. Процесс биохимической очистки основан на способности микроорганизмов использовать загрязняющие вещества для своего питания в процессе жизнедеятельности.

Термические методы применяют в основном для обезвреживания сточных вод, содержащих минеральные соли. Термическая утилизация технологических сточных вод производится путём их сжигания в печах, горелках и различного рода установках. Суть огневого метода термической утилизации заключается в том, что технологические стоки в распыленном мелкодисперсном состоянии впрыскиваются в факел, образуемый при сжигании газообразного или жидкого топлива. При этом происходит испарение воды, а вредные примеси разлагаются до простейших составляющих – углекислого газа и воды.

Выбор метода очистки производится с учетом санитарных и технологических требований к качеству очищенных вод, количества сточных вод, наличия необходимых энергетических и материальных ресурсов, эффективности процесса обезвреживания.

2.3. Отстаивание сточных вод

Основным параметром, который используют при расчете осаждения, является скорость осаждения частиц (гидравлическая крупность).

Скорость осаждения w_{oc} можно найти из условия равенства силы, движущей частицу, и силы сопротивления водной среды:

$$w_{oc} = \sqrt{\frac{4d_{ч} \cdot (\rho_{ч} - \rho_0) \cdot g}{3\xi \cdot \rho_0}},$$

где $d_{ч}$ – диаметр частицы, м; $\rho_{ч}$ – плотность частицы, кг/м³; ρ_0 – плотность жидкости, кг/м³; $g = 9,81$ м/с² – ускорение свободного падения; ξ – коэффициент сопротивления водной среды, который зависит от режима осаждения.

В ламинарном режиме осаждения при $\xi = 24/Re$ получим формулу Стокса

$$w_{oc} = \frac{g \cdot d_{ч}^2 (\rho_{ч} - \rho_0)}{18\mu_0}.$$

Существует и минимальный размер частиц, ниже которого наблюдаются отклонения от закона Стокса и при $Re \leq 10^{-4}$ на скорость осаждения очень мелких частиц начинает влиять тепловое движение молекул среды. В таких условиях размер $d_{\text{ч}}$ частиц становится соизмеримым со средней длиной свободного пробега молекул среды. Расчеты показывают, что при $d_{\text{ч}} \approx 0,1$ мкм частицы не осаждаются, а наблюдается лишь их хаотичное броуновское движение.

Скорость осаждения частиц нешарообразной формы меньше скорости осаждения шарообразных частиц. Для нешарообразных частиц в расчетных формулах используют эквивалентный диаметр $d_{\text{э}}$, который определяют по объему $V_{\text{ч}}$ или массе $G_{\text{ч}}$ частицы

$$d_{\text{э}} = \sqrt[3]{6V_{\text{ч}}/\pi} = \sqrt[3]{6G_{\text{ч}}/\pi\rho_{\text{ч}}}.$$

При отстаивании сточных вод наблюдается стесненное осаждение, которое сопровождается столкновением частиц, трением между ними и изменением скоростей больших и малых частиц. Скорость стесненного осаждения меньше скорости свободного осаждения вследствие возникновения восходящего потока жидкости и увеличения вязкости среды:

$$W_{\text{ос}} = d^2 \cdot g(\rho_{\text{ч}} - \rho_0)R/(18\mu_0),$$

где R — поправочный коэффициент; μ_0 — динамическая вязкость среды, Па·с.

На стадии первичной очистки, когда в основном используются отстойники, из воды под действием гравитационных сил извлекаются механические примеси, взвешенные вещества. Параллельно могут начинаться процессы биологической очистки воды. В отстойниках происходит осаждение мелкодисперсных и коллоидных примесей, а также сорбционные процессы.

В зависимости от того, какое место занимают отстойники в схеме очистной системы, их подразделяют на первичные и вторичные. Первичные отстойники располагаются до сооружений для биочистки сточных вод, а вторичные — после.

Различают отстойники и по режиму работы. Выделяют отстойники непрерывного действия или проточные, в которых оседание примесей происходит при медленном течении жидкости. Также выделяют отстойники контактные или периодического действия, где

жидкость находится в стационарном состоянии. Контактные отстойники чаще всего небольшого объема.

Различают горизонтальные, радиальные, вертикальные, трубчатые, пластинчатые отстойники с наклонными перегородками.

Горизонтальные отстойники (рис. 2.1) представляют собой прямоугольные резервуары, имеющие два или более одновременно работающих отделения. Вода движется с одного конца отстойника к другому. Глубина отстойника равна 1,5...4 м, длина 12...48 м, ширина коридора 3...6 м. Горизонтальные отстойники применяют при расходе сточной воды свыше 15000 м³/сут. Эффективность отстаивания достигает 60 %.

Вертикальный отстойник имеет в сечении круглую или квадратную форму и оснащен камерой хлопьеобразования и желобами для отвода осветленной воды. К нему подводят трубопровод подачи сточных вод, а также специальную трубу для опорожнения отстойника и удаления осадка. Применяют отстойники этого типа для очистки хозяйственно-бытовых стоков, пропускная способность их относительно невысока.

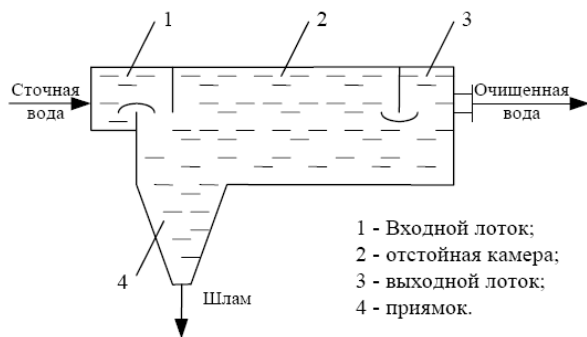


Рис. 2.1. Схема горизонтального отстойника

Радиальный отстойник — круглый в плане резервуар, в который загрязненная жидкость подается снизу и движется от центра к периферии. Взвешенные частицы удаляются с поверхности специальным подвесным устройством, размещенным на вращающейся ферме. Осадок с помощью скребков перемещается в приемок отстойника.

Тонкослойное отстаивание применяется в случае необходимости сокращения объема очистных сооружений при ограниченности выделяемой площади и при необходимости повышения эффективности существующих отстойников. В первом случае тонкослойные отстойники выполняют роль самостоятельных сооружений, во втором — существующие отстойники дополняются тонкослойными модулями, располагаемыми в совершенствуемом отстойнике, перед водосборным устройством.

Отстойники проектируются в расчете на осаждение самых мелких частиц, находящихся в сточной воде. Поэтому время пребывания обрабатываемой сточной воды в аппарате должно быть больше времени осаждения мелких частиц или в пределе равного времени, необходимого для стесненного осаждения частицы наименьшего размера на дно аппарата с заданной высоты.

Производительность отстойника по осветленной воде $Q_{\text{осв}}$ (м³/с) выражается уравнением

$$Q_{\text{осв}} = v_n \cdot B \cdot H,$$

где v_n — скорость потока сточной воды вдоль аппарата, м/с; B — ширина отстойника, м; H — высота слоя осветленной воды, м.

Время прохождения τ (с) сточной воды отстойника составит:

$$\tau_n = \frac{L}{v_n},$$

где L — длина отстойника, м.

За это же время частицы, осаждающиеся со скоростью $w_{\text{ос}}$ (м/с), должны пройти наибольший путь H . Следовательно, время отстаивания определится из уравнения

$$\tau_{\text{ос}} = \frac{H}{w_{\text{ос}}},$$

откуда производительность отстойника по осветленной воде составит:

$$Q_{\text{осв}} = w_{\text{ос}} \cdot L \cdot B = w_{\text{ос}} \cdot F,$$

где $F = L \cdot B$ — поверхность отстойника в плане, м².

2.4. Центробежное осаждение примесей из сточных вод

Для очистки сточных вод методом центробежного осаждения примесей используют напорные и открытые низконапорные гидроциклоны. Напорные гидроциклоны применяют для осаждения твердых примесей, а открытые гидроциклоны – для удаления осаждающихся и всплывающих примесей.

Посредством применения напорных гидроциклонов производят осветление сточных вод, например стекольных заводов, автохозяйств, литейных производств, нефтепромыслов, мясокомбинатов и других объектов.

При применении напорного гидроциклона производят обогащение твердой фазы стоков, то есть удаление из твердой фазы частиц минерального или органического происхождения, снижающих ценность основного продукта. Например, производят обогащение твердой фазы сточных вод галтовочных барабанов, в которых содержится ценный карборундовый порошок и отходы процесса шлифования керамики. В дальнейшем обеспечивается повторное использование порошка карборунда при шлифовании.

Для обезвоживания сырых осадков напорные гидроциклоны надлежит применять для предварительного удаления абразивных частиц твердой фазы осадка, обеспечивающего защиту центрифуг от абразивного износа.

В зависимости от особенностей решаемых технологических задач могут применяться двухпродуктовые и многопродуктовые напорные гидроциклоны. В последнем случае аппараты имеют несколько сливных трубопроводов, отводящих целевые продукты из различных зон восходящего вихревого потока гидроциклонов. Такие конструкции аппаратов, как правило, применяются при разделении многофазных сред.

При вращении жидкости в гидроциклонах (рис. 2.2) на частицы действуют центробежные силы, отбрасывающие тяжелые частицы к периферии потока, силы сопротивления движущегося потока, гравитационные силы и силы потока. Силы инерции в потоке жидкости незначительны и ими можно пренебречь. При высоких скоростях вращения центробежные силы значительно больше сил тяжести. Кроме физических свойств жидкости на эффективность

работы гидроциклонов влияют конструктивные параметры: диаметр аппарата, соотношение входного и сливных патрубков.

Скорость разделения неоднородных систем в поле центробежных сил выше по сравнению со скоростью разделения этих систем в поле силы тяжести. Отношение центробежной силы к силе тяжести можно сделать сравнением ускорений, действующих на частицы примесей в центробежном и гравитационном полях, так как применительно к частице определенной массы силы пропорциональны ускорениям.

Отношение центробежного ускорения v_0^2/r к ускорению силы тяжести g называют фактором разделения:

$$K_p = \frac{v_0^2}{g \cdot r},$$

где v_0 – окружная скорость вращения, м/с; r – радиус вращения, м; $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ – ускорение свободного падения.

Фактор разделения является важной характеристикой гидроциклонов и центрифуг, так как при прочих равных условиях разделяющее действие при осадительном центрифугировании возрастает пропорционально величине K_p .

Производительность напорных гидроциклонов (ГЦ) определяется выражением

$$Q = k_1 \cdot D_{\text{ц}} \cdot d_{\text{вх}} \cdot \sqrt{2g \cdot \Delta H},$$

где k_1 – безразмерный коэффициент; $D_{\text{ц}}$ – диаметр ГЦ, м; $d_{\text{вх}}$ – диаметр входного патрубка, м; ΔH – перепад давлений между сливными и выходными патрубками, Па.

Гидроциклоны изготавливаются диаметром от 10 до 700 мм, высота цилиндрической части равна диаметру аппарата. Угол конусности равен 10...20°. Эффективность гидроциклонов находится на уровне 70 %. При изменении вязкости сточной воды скорость осаждения частиц увеличивается. С ростом плотности жидкости уменьшается разность плотности фаз $\Delta \rho = (\rho_{\text{ч}} - \rho_0)$. Это сопровождается снижением скорости осаждения частиц тяжелее воды, а для частиц легче воды – увеличением скорости всплывания.

Гидроциклоны малого диаметра объединяют в общий агрегат, в котором они работают параллельно. Такие аппараты называют

мультигидроциклонами. Мультигидроциклоны наиболее эффективны при очистке небольших количеств воды от тонкодисперсных примесей.

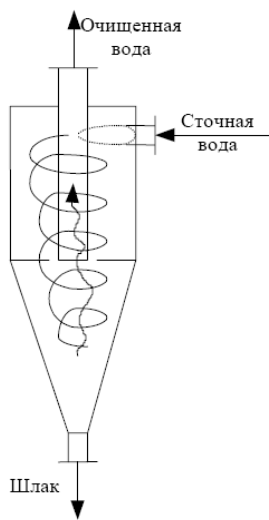


Рис. 2.2. Напорный гидроциклон

Скорость осаждения пропорциональна квадрату скорости вращения частиц, которую можно считать равной скорости воды на входе в аппарат.

Производительность напорных гидроциклонов равна:

$$Q = K_1 \cdot D_{\text{ц}} \cdot d_{\text{вх}} \cdot \sqrt{2g \cdot \Delta H},$$

где K_1 – безразмерный коэффициент; $D_{\text{ц}}$ – диаметр гидроциклона, м; $d_{\text{вх}}$ – диаметр входного патрубка, м; ΔH – переход давлений между сливными и выходными патрубками, Па.

Открытые (безнапорные) гидроциклоны применяют для очистки сточных вод от крупных примесей (гидравлической крупностью 5 мм/с). От напорных гидроциклонов они отличаются большей производительностью и меньшим гидравлическим сопротивлением.

Для удаления осадков из сточных вод используются отстойные и фильтрующие центрифуги.

В процессах очистки сточных вод фильтрующие центрифуги используют для разделения грубодисперсных систем. Отстойные – для

разделения труднофильтрующихся тонко- и грубодисперсных суспензий, а также для классификации суспензий по размерам и плотности частиц. В отстойных центрифугах (рис. 2.3) со сплошными стенками ротора производят разделение суспензий и эмульсий по принципу отстаивания.

Центрифуги используются обычно для удаления мелкодисперсных осадков из сточных вод.

В центрифуге в отличие от гидроциклона очищаемая суспензия вместе с барабаном при постоянной угловой скорости совсем или почти не движется относительно барабана.

В гидроциклоне в отличие от центрифуги на частицы очищаемой суспензии действуют большие тангенциальные силы, поддерживающие их в непрерывном относительном движении.

В центрифугах поле центробежных сил обеспечивается за счет вращения корпуса. Центрифуга представляет собой цилиндрический ротор со сплошными или перфорированными боковыми стенками. Ротор укрепляется на валу, который приводится во вращение электродвигателем, и помещается в соосный цилиндрический неподвижный кожух. На внутренней поверхности ротора с перфорированными стенками закреплена фильтровальная ткань или тонкая металлическая сетка. Под действием центробежной силы суспензия разделяется на осадок и жидкую фазу. Осадок остается в роторе, а жидкая фаза удаляется из него. Разделение суспензий в отстойных центрифугах складывается из стадий осаждения твердых частиц на стенках ротора и уплотнения образовавшегося осадка. Первая из этих стадий протекает по законам гидродинамики, вторая — по закономерностям механики грунтов или пористых сред.

При малой концентрации твердых частиц в сточной воде, равной не более 4 процентов, наблюдается свободное осаждение их в роторе без образования четкой поверхности раздела между чистой жидкостью и еще не расслоившейся суспензией. При повышенной концентрации образуется ясная граница раздела в результате стесненного осаждения твердых частиц. Вследствие неоднократности по радиусу интенсивности поля центробежных сил и площади осаждения закономерности процессов осаждения в отстойных центрифугах отличаются от осаждения в отстойниках.

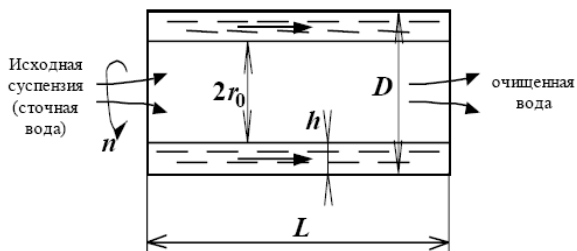


Рис. 2.3. Схема действия отстойной центрифуги

Фактор разделения для отстойной центрифуги равен:

$$K_p = \frac{r \cdot n^2}{900} = \frac{(D - h)n^2}{2 \cdot 900},$$

где $r = (D - h)/2$ — средний радиус слоя жидкости в центрифуге, м;
 n — число оборотов в минуту.

Производительность отстойных центрифуг снижается по сравнению с теоретической вследствие отставания скорости вращения жидкости от скорости вращения ротора, неравномерности течения жидкости вдоль ротора, образования вихревых зон, увлекающих осажденные частицы.

Применение центрифуг наиболее целесообразно и экономически оправдано в ряде случаев. Во-первых, для локальной очистки производственных сточных вод, когда выделенный осадок представляет собой продукт, предназначенный для дальнейшего использования. Во-вторых, при мелкодисперсном составе загрязнений в воде, когда для ее очистки не могут быть применены реагенты. В-третьих, для сокращения площади, на которой размещают установку.

2.5. Фильтрация сточных вод

Фильтрация применяют для выделения из сточных вод тонкодисперсных твердых или жидких веществ. В процессе очистки сточных вод приходится иметь дело с большим количеством воды, поэтому преимущественно применяют фильтры, для работы которых не требуется высоких давлений. Исходя из этого, используют фильтры с сетчатыми элементами (микрофильтры и барабанные сетки) и фильтры с фильтрующим зернистым слоем.

Механизм извлечения частиц из воды на фильтрах с зернистой перегородкой:

- 1) процеживание с механическим извлечением частиц;
- 2) гравитационное осаждение;
- 3) инерционное захватывание;
- 4) химическая адсорбция;
- 5) физическая адсорбция;
- 6) адгезия;
- 7) коагуляционное осаждение;
- 8) биологическое выращивание.

В общем случае эти механизмы могут действовать совместно, и процесс фильтрования состоит из трех стадий:

- 1) перенос частиц вещества на поверхность фильтрующего материала;
- 2) прикрепление к поверхности;
- 3) отрыв от поверхности.

По характеру механизма задерживания взвешенных частиц различают два вида фильтрования:

- 1) фильтрование через пленку (осадок) загрязнений, образующихся на поверхности зерен загрузки;
- 2) фильтрование без образования пленки загрязнений.

В первом случае задерживаются частицы, размер которых больше пор материала, а затем образуется слой загрязнений, который является также фильтрующим материалом. Такой процесс характерен для медленных фильтров, которые работают при малых скоростях фильтрования. Во втором случае фильтрование происходит в толще слоя загрузки, где частицы задерживаются на зернах фильтрующего материала адгезионными силами. Такой процесс характерен для скоростных фильтров. Величина сил адгезии зависит от крупности и формы зерен, от шероховатости поверхности и ее химического состава, от скорости потока и температуры жидкости, от свойств примесей.

Скоростные фильтры бывают одно- и многослойными. У однослойного фильтра слой состоит из одного материала, у многослойных — из различных материалов (например, из антрацита и песка).

Медленные фильтры используют для фильтрования некоагулируемых сточных вод. Скорость фильтрования зависит в них от

концентрации взвешенных частиц: до 25 мг/л скорость принимают 0,2...0,3 м/ч; при 25...30 мг/л – 0,1...0,2 м/ч.

Различают фильтры открытые и закрытые. Высота слоя в открытых фильтрах равна 1...2 м, в закрытых 0,5...1 м. Напор воды в закрытых фильтрах создается насосами.

Выбор типа фильтра для очистки сточных вод зависит от количества фильтруемых вод, концентрации загрязнений и степени их дисперсности, физико-химических свойств твердой и жидкой фаз и от требуемой степени очистки.

Прилипшие частицы постоянно испытывают влияние движущегося потока, который срывает их с поверхности фильтрующего материала. При равенстве числа частиц, поступающих в единицу времени на поверхность фильтрующего слоя и покидающих ее, наступает насыщение поверхности и она перестает осветлять сточные воды. Продолжительность работы фильтра до «проскока» является временем защитного действия τ_3 . Продолжительность работы фильтра до «проскока» частиц в фильтрат определяют по формуле

$$\tau_3 = \frac{1}{k} \left(\frac{l}{v_\phi^{1,7} \cdot d_\phi^{0,7}} - \frac{s_0 \cdot d_\phi}{v_\phi} \right),$$

где l – толщина фильтрующего слоя, м; d_ϕ – размер частиц фильтрующего слоя; k и S_0 – константы, зависящие от концентрации взвешенных веществ в исходной и осветленной сточной воде; v_ϕ – скорость фильтрования, м/с.

Разделение проводят при помощи пористых или зернистых перегородок, пропускающих жидкость и задерживающих диспергированную фазу. Процесс идет под действием гидростатического давления столба жидкости, повышенного давления над перегородкой или вакуума после перегородки.

Выбор перегородок зависит от свойств сточной воды, температуры, давления фильтрования и конструкции фильтра.

В качестве перегородок используют металлические перфорированные листы и сетки, тканевые перегородки из природного, искусственного и синтетического волокна. Фильтровальные перегородки должны обладать минимальным гидравлическим сопротивлением, механической прочностью и гибкостью, химической стойкостью,

они не должны набухать и разрушаться при заданных условиях фильтрования.

Разность давлений по обе стороны фильтровальной перегородки создают разными способами.

Если пространство над суспензией сообщают с источником сжатого газа или пространство под перегородкой присоединяют к источнику вакуума, то происходит процесс фильтрования при постоянной разности давлений. При этом скорость процесса уменьшается в связи с увеличением сопротивления слоя осадка возрастающей толщины.

Если суспензию подают на фильтр поршневым насосом с постоянной производительностью, то осуществляется процесс фильтрования при постоянной скорости; при этом разность давлений увеличивается вследствие увеличения сопротивления слоя осадка возрастающей толщины.

Если суспензию подают на фильтр центробежным насосом, производительность которого уменьшается при возрастании сопротивления осадка, что обуславливает повышение разности давлений, то производится процесс фильтрования при переменных разности давлений и скорости.

Фильтрование производят при следующих разностях давлений:

- под вакуумом — $5 \cdot 10^4 \dots 9 \cdot 10^4$ Па;
- под давлением сжатого воздуха — не более $3 \cdot 10^5$ Па;
- при подаче поршневым или центробежным насосом — до $5 \cdot 10^5$ Па;
- под гидростатическим давлением — до $5 \cdot 10^4$ Па.

Процесс фильтрования проводят с образованием осадка на поверхности фильтрующей перегородки или с закупоркой пор фильтрующей перегородки.

Фильтрование с образованием осадка наблюдается при достаточно высокой концентрации твердой фазы в суспензии (более 1 % на объем).

Фильтрование с закупориванием пор фильтрующей перегородки называют осветлением, оно происходит при концентрации твердой фазы менее 0,7 %.

При разделении суспензий с небольшой концентрацией тонкодисперсированной твердой фазы часто применяют фильтровальные

вспомогательные вещества, препятствующие прониканию твердых частиц в поры фильтровальной перегородки.

В качестве вспомогательных веществ используют тонкодисперсные или тонковолокнистые материалы: диатомит, перлит, асбест, целлюлозу, активированный уголь, древесную муку. При добавлении вспомогательного вещества к разделяемой суспензии концентрация твердых частиц в ней увеличивается, что предотвращает закупоривание пор фильтрующей перегородки.

Центробежное фильтрование осадков сточных вод достигается вращением суспензии в перфорированном роторе — барабане. Фильтрование под действием центробежной силы проводят на фильтрующих центрифугах. Принцип работы данного аппарата заключается в том, что центробежная сила, которая возникает как результат вращения барабана, отесняет частицы в растворе в направлении, противоположном оси вращения. Процесс осуществляется при условии, что плотность частиц выше плотности самого раствора. Разделение суспензии в фильтрующих центрифугах складывается из стадии образования, уплотнения и механической сушки осадка с возможной промывкой осадка.

Центробежное фильтрование происходит с образованием или без образования осадка на фильтровальной перегородке, а также при одновременном протекании в ее зонах обоих процессов. Метод наиболее эффективен для получения осадков с минимальной влажностью. Разделение суспензии в фильтрующих центрифугах складывается из стадии образования, уплотнения и механической сушки осадка с возможной промывкой осадка.

По способу выгрузки осадка из ротора центрифуги бывают с ручной, ножевой, поршневой, шнековой, вибрационной или центробежной выгрузкой.

Различают центрифуги непрерывного и периодического действия.

Центрифуги периодического действия целесообразно использовать при концентрации нерастворимых примесей в стоках не более двух-трех грамм на литр, если образующиеся осадки цементируются или характеризуются высокими абразивными свойствами. Центрифуги периодического действия применяют при расходах суспензии

менее 5 м³/ч в широком диапазоне концентраций с частицами диаметром более 10 мкм.

Из центрифуг непрерывного действия в системах очистки вод наибольшее распространение получили горизонтальные шнековые центрифуги. Их используют для выделения веществ с гидравлической крупностью примерно от 0,2 до 0,05 мм/с. Центрифуги непрерывного действия со шнековой выгрузкой осадка применяются для разделения концентрированных суспензий с размером частиц более 100 мкм.

По принципу расположения оси вращения центрифуги бывают горизонтальными, вертикальными или наклонными.

В системах очистки сточных вод используют горизонтальные шнековые центрифуги для выделения частиц гидравлической крупностью 0,2 мм (противоточные) и 0,05 мм (прямоточные).

2.6. Разбавление примесей в гидросфере

Условия выпуска частично очищенных сточных вод в водоемы определяются их экономической и социально-хозяйственной значимостью и характером водопользования. После выпуска сточных вод допускается некоторое ухудшение качества воды в водоемах, однако это не должно отражаться на его жизнеспособности и на возможности дальнейшего использования водоема в качестве источника водоснабжения, для социально-бытового использования, для рыбохозяйственных целей.

Условия спуска сточных вод при совместном присутствии в них нескольких вредных веществ выражаются в том, что сумма концентраций всех веществ, выраженных в долях от соответствующих ПДК для каждого вещества в отдельности, не должна превышать 1,0 (единицы).

Взаимосвязь между санитарными требованиями к условиям спуска сточных вод в водоемы, т. е. соответствие состава и свойств воды водоема, который используется для водопользования, установленным нормативам, и необходимой степенью очистки сточных вод перед спуском их в водоем в общем виде выражается формулой

$$C_{ст} \cdot q + C_p \cdot \alpha \cdot Q \leq (\alpha \cdot Q + q) \cdot C_{пл},$$

где $C_{ст}$ — концентрация загрязнения (вредного вещества) сточных вод, при которой не будут превышены допустимые пределы; q — расход сточных вод, поступающих в водоем, $м^3/ч$; C_p — концентрация этого же вида загрязнения в воде водоема выше места выпуска рассматриваемого стока; α — коэффициент смешения, показывающий, какая часть расхода воды в водоеме смешивается со сточными водами в расчетном створе; Q — расход воды в водоеме, $м^3/ч$; $C_{пд}$ — предельно допустимое содержание загрязнения (вредного вещества) в воде водоема. Коэффициент смешения α зависит от многих факторов: конструкции выпуска, расстояния до расчетного створа, гидравлических и гидрологических параметров водоема.

Преобразуя вышеуказанную формулу, можно получить значение $C_{ст}$, т. е. величину концентрации загрязнения (вредного вещества) в сточных водах, которая должна быть достигнута в результате их очистки и обезвреживания:

$$C_{ст} \leq \alpha \cdot Q \cdot (C_{пд} - C_p) / q + C_{пд}.$$

Суммарный эффект воздействия на санитарное состояние водоема нескольких вредных веществ определяется по формуле

$$C_1/C_{1п.д} + C_2/C_{2п.д} + \dots + C_i/C_{iп.д} \leq 1,$$

где C_1, C_2, \dots, C_i — концентрации вредных веществ в воде водоема; $C_{1п.д}, C_{2п.д}, \dots, C_{iп.д}$ — ПДК, установленные для соответствующих вредных веществ в воде их источника.

Если это условие не соблюдается, то санитарное состояние водоема не удовлетворяет нормативным требованиям и необходимо осуществить мероприятия по повышению эффективности очистки сточных вод перед их спуском в водоем.

Кратность разбавления в проточных водоемах определяется по формуле

$$n_p = (\alpha Q + q) / q.$$

При расчете необходимой степени очистки сточных вод, спускаемых в непроточные водоемы, в расчетные формулы вводится либо общее разбавление (для озер, водохранилищ и морей), либо наименьшее разбавление:

$$C_{ст} \leq C_B + n(C_{пд} - C_B),$$

где C_B — концентрация загрязнения в воде непроточного водоема.

Кроме расчета предельно допустимой концентрации загрязнения (вредного вещества) в спускаемых сточных водах производится определение необходимой степени очистки по количеству взвешенных веществ, БПК_{полн}, растворенному в воде водоема кислороду, температуре воды водоема, общесанитарному показателю вредности, изменению активной реакции воды с учетом коэффициента смешения α для проточных водоемов и коэффициента разбавления n_p для непроточных водоемов.

2.7. Массообменные процессы и аппараты очистки сточных вод

2.7.1. Экстракция загрязнений из растворов и твердых тел

Жидкостную экстракцию применяют для очистки сточных вод, содержащих фенолы, масла, органические кислоты, ионы металлов. Целесообразность использования экстракции определяется концентрацией органических примесей. Для каждого вещества существует концентрационный предел рентабельности извлечения его из сточных вод. Для большинства веществ можно считать, что при концентрации выше 3...4 г/л примеси рациональнее извлекать экстракцией, чем адсорбцией. При концентрации меньше 1 г/л экстракцию следует применять только в особых случаях.

Очистка сточных вод экстракцией состоит из трех стадий. Первая стадия – смешение сточной воды с экстрагентом (органическим растворителем). При этом образуются две жидкие фазы. Одна фаза – экстракт содержит извлекаемое вещество и экстрагент, другая фаза – рафинат содержит сточную воду и экстрагент. Вторая стадия – разделение экстракта и рафината. Третья стадия – регенерация экстрагента из экстракта и рафината.

При выборе растворителя следует учитывать его селективность, физико-химические свойства, стоимость и возможные способы регенерации.

Экстрагент должен:

- растворять извлекаемое вещество значительно лучше, чем вода, т. е. обладать высоким коэффициентом распределения;

- обладать большой селективностью растворения, т. е. чем меньше экстрагент будет растворять компоненты, которые должны остаться в сточной воде, тем более полно будут извлекаться вещества, которые необходимо удалить;
- иметь по возможности наибольшую растворяющую способность по отношению к извлекаемому компоненту, так как чем она выше, тем меньше потребуется экстрагента;
- иметь низкую растворимость в сточной воде и не образовывать устойчивых эмульсий, так как затрудняется разделение экстракта и рафината;
- значительно отличаться по плотности от сточной воды для обеспечения быстрого и полного разделения фаз;
- обладать большим коэффициентом диффузии; чем он больше, тем выше скорость массообмена;
- регенерироваться простым и дешевым способом;
- иметь температуру кипения, отличающуюся от температуры экстрагируемого вещества;
- иметь небольшие удельную теплоту испарения и теплоемкость;
- не взаимодействовать с извлекаемым веществом, так как это может затруднить регенерацию экстрагента;
- не быть вредным, взрыво- и огнеопасным и не вызывать коррозию материала аппаратов;
- иметь небольшую стоимость.

При содержании в сточной воде нескольких примесей целесообразно извлекать экстракцией сначала один из компонентов – наиболее ценный или токсичный, а затем другой и т. д. Для каждого компонента может быть разный экстрагент. При одновременной экстракции нескольких веществ из сточной воды экстрагент не должен обладать селективностью извлечения, а иметь близкие и достаточно высокие коэффициенты распределения для всех извлекаемых веществ. Проведение такого процесса очистки затрудняет выбор экстрагента и его регенерацию.

Экстракция производится в аппаратах различной конструкции: распылительных, насадочных; тарельчатых колоннах, а также в центробежных экстракторах.

Способы экстрагирования органических веществ по схемам контакта экстрагента и сточной воды можно разделить на перекрестноточные, ступенчато-противоточные и непрерывно-противоточные. Прямоток в процессах экстракции не применяется.

При многоступенчатой перекрестноточной схеме сточная вода на каждой ступени контактирует со свежим экстрагентом, что требует значительных его расходов. Большее практическое применение получили методы ступенчато-противоточной и непрерывно-противоточной экстракции. В противоточных схемах вода и экстрагент движутся навстречу друг другу, экстракт последующей ступени смешивается в смесителе с водной фазой экстракта предыдущей ступени.

При непрерывно-противоточной экстракции вода и экстрагент движутся навстречу друг другу в одном аппарате, обеспечивающем диспергирование экстрагента в воде; при этом примеси сточной воды непрерывно переходят в экстрагент.

Регенерация экстрагента из сточной воды в зависимости от свойств экстрагента может осуществляться отдувкой воздухом или другими газами, а также реэкстракцией. Наиболее распространенным способом извлечения растворителя из рафината является адсорбция или отгонка паром. Регенерация экстрагента из экстракта производится путем ректификации.

2.7.2. Адсорбция

Адсорбцию используют для обезвреживания сточных вод от фенолов, гербицидов, пестицидов, ароматических нитросоединений, поверхностно-активных веществ, красителей и других веществ. Кроме того, адсорбция — это практически единственный метод, позволяющий очищать сточные воды от нефтепродуктов до любого требуемого уровня без внесения в воду каких-либо вторичных загрязнений.

Достоинством метода является высокая эффективность, возможность очистки сточных вод, содержащих несколько веществ, а также рекуперации этих веществ.

Адсорбционная очистка сточных вод может быть регенеративной, то есть с извлечением вещества из адсорбента и его утилизацией, и деструктивной, при которой извлеченные из сточных вод вещества уничтожаются вместе с адсорбентом. Эффективность ад-

сорбционной очистки достигает 80...95 % и зависит от природы адсорбента, величины адсорбционной поверхности и ее доступности, от химического строения вещества и его состояния в растворе.

В качестве адсорбентов применяют различные природные и искусственные пористые материалы: древесные стружки, опилки, торф, золу, алюмогели, силикагели, активные глины и другие. Эффективными и часто применяемыми адсорбентами являются активные угли, способные самопроизвольно отделяться от воды. Исходным сырьем для получения активного угля служат практически любые углеродсодержащие материалы: уголь, торф, древесина и другие. При очистке стоков от нефтепродуктов уголь регенерируют растворителями: метанолом, бензолом, этанолом, метиленхлоридом. При адсорбции фенолов регенерацию углей проводят термическим способом в многоподовых печах или печах с кипящим слоем при температуре около 900 градусов Цельсия.

Для очистки и доочистки сточных вод от нефтепродуктов также используют различные материалы. Например, применяют асбестосодержащий материал – отход производства асбестовых бумаг и картона, регенерацию которого осуществляют прокаливанием. Или применяют пенополиуретан, в который введены гранулы ферромагнитного материала размером до 0,1 миллиметра в количестве до 0,08 % для фильтрования в магнитном поле, его регенерация производится отжимом. Регенерация сорбента позволяет использовать его в системах очистки нефтесодержащих стоков 8...10 раз и более.

Процесс адсорбционной очистки сточной воды ведут при интенсивном перемешивании адсорбента с водой или при фильтровании воды через слой адсорбента. Обычно сорбционная установка (рис. 2.4) представляет собой несколько параллельно работающих секций, состоящих из трех-пяти последовательно расположенных фильтров.

Процесс сорбции может осуществляться в статических условиях, при которых частица жидкости не перемещается относительно частицы сорбента, то есть движется вместе с ней. В динамических условиях частица жидкости перемещается относительно сорбента.

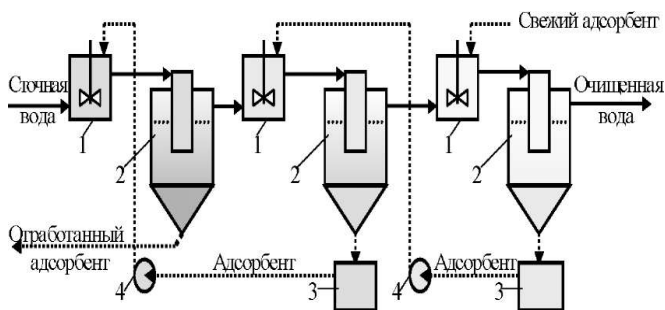


Рис. 2.4. Схема противоточной адсорбционной установки:
 1 – смесители; 2 – отстойники; 3 – приемники адсорбента; 4 – насосы

Таким образом, сорбцию называют статической, когда поглощаемое вещество находится в газообразной или жидкой фазе, приведено в контакт с неподвижным сорбентом или перемешивается с ним.

Динамической сорбцию называют в тех случаях, когда поглощаемое вещество находится в подвижной жидкой или газообразной фазе, которая фильтруется через слой сорбента.

Аппаратурное оформление сорбционной очистки стоков выполняют обычно в виде напорных фильтров с плотным слоем гранулированных активных углей, перед которыми расположены механические фильтры. Двухступенчатое фильтрование применяется при глубокой очистке сточных вод, содержащих эмульгированные и растворенные нефтепродукты. Обычно используют комбинацию из трех фильтров: два рабочих, соединенных последовательно, и один резервный. Исходную воду подают в первый адсорбер, доочистку стоков проводят во втором. При полной отработке первый адсорбер отключают на регенерацию, а подключают резервный и другие, затем цикл повторяется.

Безнапорные фильтры, конструктивно аналогичные механическим, используют для очистки больших объемов сточных вод. *Безнапорные фильтры* применяют в различных случаях очистки нефте-содержащих вод на нефтеперерабатывающих, машиностроительных и других предприятиях. Схема работы таких фильтров основана на движении воды снизу вверх.

Безнапорный фильтр представляет собой цилиндрическую емкость из стеклопластика с патрубками для поступления и отвода воды. Принцип работы фильтра основан на динамической адсорбции, при которой вода протекает через неподвижный слой сорбента. В качестве сорбента используются шунгит, активированный уголь, природный камень и гидрофобный сорбент.

2.8. Химические процессы очистки сточных вод

К химическим методам очистки сточных вод относят нейтрализацию, окисление и восстановление. Их применяют для удаления растворимых веществ в замкнутых системах водоснабжения. Химическую очистку проводят иногда как предварительную перед биологической очисткой или после нее как метод доочистки сточных вод.

2.8.1. Нейтрализация сточных вод

Сточные воды, содержащие минеральные кислоты или щелочи, перед сбросом их в водоемы или перед использованием в технологических процессах нейтрализуют. Практически нейтральными считаются воды, имеющие $pH = 6,5 \dots 8,5$. Кислые воды с $pH \leq 6,5$ встречаются чаще, чем щелочные, и представляют большую опасность. Наиболее часто сточные воды загрязнены минеральными кислотами: серной, азотной, соляной, а также их смесями.

Нейтрализацию можно проводить различным путем: смешением кислых и щелочных сточных вод, добавлением реагентов, фильтрованием кислых вод через нейтрализующие материалы, абсорбцией кислых газов щелочными водами или абсорбцией аммиака кислыми водами. В процессе нейтрализации могут образовываться осадки.

Наиболее простым и дешевым способом нейтрализации является смешение кислых сточных вод со щелочными. Метод взаимной нейтрализации широко используется в химической промышленности. Вследствие различного режима образования и сброса этих вод применяют регулирующие и усредняющие устройства. С их помощью сточные воды равномерно выпускаются в канализацию в нужном объеме, что обеспечивает максимальное использование кислых или щелочных агентов, содержащихся в стоках.

Реагенты выбирают в зависимости от состава и концентрации кислой сточной воды. Различают три вида кислотосодержащих сточных вод:

- 1) воды, содержащие слабые кислоты (H_2CO_3 , CH_3COOH);
- 2) воды, содержащие сильные кислоты (HCl , HNO_3);
- 3) воды, содержащие серную и сернистую кислоты.

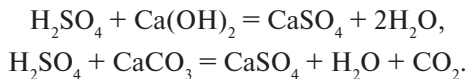
Для нейтрализации кислых вод могут быть использованы: NaOH , KOH , Na_2CO_3 , NH_4OH (аммиачная вода), CaCO_3 , MgCO_3 , доломит ($\text{CaCO}_3 \cdot \text{MgCO}_3$), цемент. Наиболее доступным реагентом является гидроксид кальция (известковое молоко) с содержанием 5...10 % активной извести $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Иногда для нейтрализации применяют отходы производства: шлаки металлургических производств.

Для нейтрализации щелочных сточных вод используют различные кислоты или кислые газы, например, отходящие газы, содержащие CO_2 , SO_2 , NO_2 , N_2O_3 и др. Применение кислых газов позволяет не только нейтрализовать сточные воды, но и одновременно производить очистку самих газов от вредных компонентов.

Нейтрализация щелочных вод дымовыми газами является ресурсосберегающей технологией, так как при этом ликвидируется сброс сточных вод, сокращается потребление свежей воды, экономится тепловая энергия на подогрев свежей воды, а также очищаются дымовые газы от кислых компонентов (CO_2 , SO_2 и др.) и от пыли.

Фильтрование через нейтрализующие материалы осуществляется с использованием известняка, доломита, магнезита, мела.

При нейтрализации стоков, содержащих серную кислоту, в зависимости от реагента происходят следующие реакции:



Выбор нейтрализующего реагента в каждом конкретном случае должен быть обоснован. Во-первых, следует учитывать, что в результате реакций нейтрализации образуются хорошо растворимые соли, вследствие чего возрастает солесодержание обработанной воды. Во-вторых, выделяющийся в реакциях углекислый газ может вызвать ряд нежелательных явлений, например пенообразование или флотацию взвешенных частиц. В-третьих, некоторые реакции

нейтрализации сопровождаются образованием осадка, поэтому требуется отстаивание нейтрализованной воды.

Выбор способа нейтрализации зависит от вида и концентрации кислот, загрязняющих сточные воды, расхода и режима поступления вод на нейтрализацию, наличия тех или иных реагентов и прочего.

2.8.2. Окисление загрязнителей сточных вод

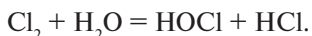
Окисление сточных вод проводится с целью обеззараживания или когда извлечение вредных компонентов является нецелесообразным. Для очистки сточных вод окислением используют различные окислители: газообразный и сжиженный хлор, диоксид хлора, гипохлориты кальция и натрия, перманганат или бихромат калия, пероксид водорода, кислород воздуха, озон и др.

В процессе окисления токсичные загрязнения, содержащиеся в сточных водах, в результате химических реакций переходят в менее токсичные, которые удаляют из воды.

Такой метод особенно эффективен для отработанных стоков, в составе которых имеются цианид меди, цинка и другие похожие соединения. Эти стоки являются продуктом машиностроения и приборостроения, свинцово-цинковых производств, горнодобывающей и целлюлозобумажной промышленности.

Для очистки сточных вод используют следующие окислители: газообразный и сжиженный хлор, диоксид хлора, хлорат кальция, гипохлориты кальция и натрия, перманганат калия, бихромат калия, пероксид водорода, кислород воздуха, пероксосерные кислоты, озон, пиролюзит и др.

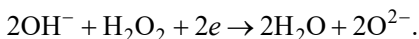
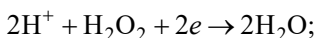
Хлор и вещества, содержащие «активный» хлор, являются наиболее распространенными окислителями. Их используют для очистки воды от сероводорода, гидросульфида, метилсернистых соединений, фенолов, цианидов и др. При введении хлора в воду образуется хлорноватистая и соляная кислоты:



В сильноокислой среде равновесие этой реакции сдвинуто влево, в воде присутствует молекулярный хлор. При значениях pH больше четырех молекулярный хлор в воде практически отсутствует. В свою

очередь, образовавшаяся в растворе хлорноватистая кислота диссоциирует на ион гипохлорита и ион водорода. Степень диссоциации хлорноватистой кислоты также зависит от pH среды. Процесс хлорирования проводят в напорных и вакуумных хлораторах периодического и непрерывного действия.

Пероксид водорода используется для окисления нитритов, альдегидов, фенолов, цианидов, серосодержащих отходов, активных красителей. Пероксид водорода в кислой и щелочной средах разлагается по следующим схемам:

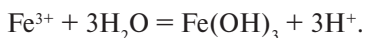


В кислой среде более отчетливо выражена окислительная функция, а в щелочной – восстановительная. В кислой среде пероксид водорода переводит соли двухвалентного железа в соли трехвалентного, азотистую кислоту – в азотную, сульфиды – в сульфаты. В нейтральной и слабощелочной средах он легко взаимодействует с хлором и гипохлоритами, переводя их в хлориды,



Цианиды в цианаты окисляются в щелочной среде.

Кислород воздуха используют при очистке воды от железа. Реакция окисления в водном растворе протекает по схеме:



Кислород применяется значительно шире, чем хлорсодержащие реагенты, для окисления сульфидных сточных вод целлюлозных, нефтеперерабатывающих и нефтехимических заводов.

Окисление в стоках ионов аммония с помощью гипохлоритов является наиболее приемлемым, так как их растворы безопасны, обеспечивают высокую степень очистки, способ прост в осуществлении, не требует создания специальных установок.

По сравнению с другими окислителями озон имеет ряд преимуществ. Его можно получать непосредственно на очистных установках, причем сырьем служит технический кислород или атмосферный воздух. Перспективность применения озонирования обусловлена

также тем, что оно не приводит к увеличению солевого состава очищаемых сточных вод, не загрязняет воду продуктами реакции.

Окисление озоном позволяет одновременно обеспечить обезцветивание воды, устранение привкусов и запахов и обеззараживание. Озон окисляет как неорганические, так и органические вещества, растворенные в сточной воде. Озонированием можно очищать сточные воды от фенолов, нефтепродуктов, сероводорода, соединений мышьяка, ПАВ, цианидов, красителей, канцерогенных ароматических углеводородов, пестицидов и др. При обработке воды озоном происходит разложение органических веществ и обеззараживание воды; бактерии погибают в несколько тысяч раз быстрее, чем при обработке воды хлором.

2.8.3. Очистка сточных вод восстановлением

Методы восстановительной очистки сточных вод применяют для удаления из сточных вод соединений ртути, хрома, мышьяка.

В процессе очистки неорганические соединения ртути восстанавливают до металлической ртути, которую отделяют от воды отстаиванием, фильтрованием или флотацией. Для восстановления ртути и ее соединений применяют сульфид железа, боргидрид натрия, гидросульфит натрия, гидразин, железный порошок, сероводород, алюминиевую пудру.

Наиболее распространенным способом удаления мышьяка из сточных вод является осаждение в виде труднорастворимых соединений диоксидом серы.

Метод очистки сточных вод от веществ, содержащих шестивалентный хром, основан на восстановлении его до трехвалентного с последующим осаждением в виде гидроксида в щелочной среде.

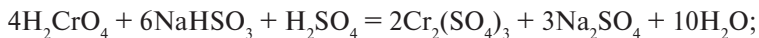
В качестве восстановителей используют активный уголь, сульфат железа, бисульфат натрия, водород, диоксид серы, отходы органических веществ, пиритный огарок.

Сильными восстановительными свойствами обладает боргидрид лития. Он применяется для восстановления в сточных водах металлоорганических соединений. Его используют, например, для удаления тетраэтилсвинца, который восстанавливается до металлического свинца с последующим удалением его из раствора фильтрацией.

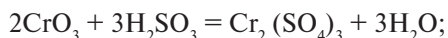
Эффективным восстановителем является водород. Он применяется на атомных электростанциях, где нельзя использовать другие восстановители, а также для дезактивации кислорода, образующегося в процессе распада воды при бомбардировке нейтронами.

Далее представлены некоторые реакции восстановления:

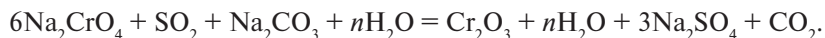
– восстановление хрома гидросульфитом натрия



– восстановление хрома диоксидом серы



– осаждение хрома содой



Очистку восстановлением проводят на установках периодического или непрерывного действия.

На установке периодического действия сточные воды из сборника насосами перекачивают в реактор.

В установках непрерывного действия сточные воды сначала поступают в усреднитель, затем в смеситель и нейтрализатор. Усреднитель рассчитывают на пребывание воды в нем от 10 до 20 минут. Процесс обезвреживания длится около 30 минут. Осадок образуется в нейтрализаторе, выпадает, уплотняется и обезвреживается.

2.9. Физико-химические процессы и аппараты очистки сточных вод

К физико-химическим процессам очистки сточных вод относят коагуляцию, флокуляцию, флотацию, ионный обмен, обратный осмос, ультрафильтрацию и др. Эти методы используют для удаления из сточных вод тонкодисперсных взвешенных твердых и жидких частиц, растворимых газов, минеральных и органических веществ. Выбор того или иного метода очистки (или нескольких методов) производят с учетом санитарных и технологических требований, предъявляемых к очищенным производственным сточным водам с целью дальнейшего их использования, а также с учетом количества сточных вод и концентрации загрязнений в них.

2.9.1. Коагуляция и флокуляция загрязнений сточных вод

Рассмотрим процессы коагуляции и флокуляции примесей сточных вод. Процесс очистки сточных вод коагуляцией и флокуляцией осуществляется по схеме, представленной на рис. 2.5.

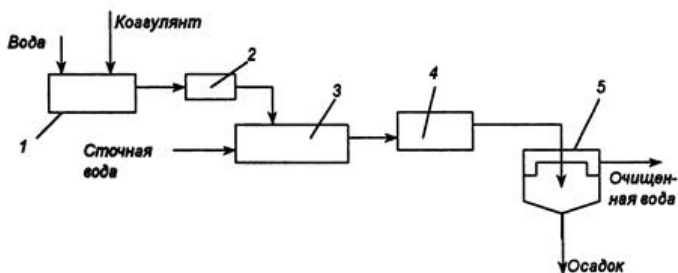


Рис. 2.5. Схема процессов коагуляции и флокуляции:
1 – емкость для приготовления раствора; 2 – дозатор; 3 – смеситель;
4 – камера хлопьеобразования; 5 – отстойник

Коагуляция – это процесс слипания частиц коллоидной системы в результате их взаимодействия под действием молекулярных сил сцепления при перемешивании или направленном перемещении во внешнем силовом поле. В результате коагуляции образуются более крупные вторичные частицы, состоящие из скопления мелких первичных частиц.

Коагуляция может происходить самопроизвольно или под влиянием химических и физических процессов. В очистке сточных вод коагуляцию применяют для ускорения процесса осаждения тонкодисперсных примесей и эмульгированных веществ, так как скорость осаждения частиц будет возрастать с увеличением их размера. Она наиболее эффективна для удаления из воды коллоидно-дисперсных частиц размером от 1 до 100 мкм. В процессе очистки сточных вод коагуляция происходит под влиянием специальных веществ – коагулянтов, в результате чего под действием молекулярных сил сцепления происходит слипание мелких частиц в крупные конгломераты.

В сточных водах частицы примесей, не реагирующие со смачивающими жидкостями, при перемешивании могут образовывать с ними механические смеси, коллоидные растворы и истинные растворы.

Истинные растворы отличаются от взвесей — коллоидов и механических смесей размерами частиц, на которые распадается вещество при перемешивании. Истинные растворы содержат вещества в виде молекул, атомов, ионов и других частиц с характерными размерами 10^{-9} м и менее.

К жидким коллоидным растворам относят высокодисперсные и грубодисперсные смеси с размерами частиц соответственно от 10^{-9} до 10^{-7} м и от 10^{-7} до 10^{-5} м. Грубодисперсные жидкие коллоиды с твердой дисперсной частью называют суспензиями, с жидкой — эмульсиями.

Коагулянты в воде образуют хлопья гидроксидов металлов, которые быстро оседают под действием силы тяжести. Хлопья обладают способностью улавливать коллоидные и взвешенные частицы и агрегировать их. Так как коллоидные частицы имеют слабый отрицательный заряд, а хлопья коагулянтов — слабый положительный заряд, то между ними возникает взаимное притяжение. В качестве коагулянтов используют бентонит, электролиты, растворимые в воде соли алюминия $Al_2(SO_4)_3$, соли железа $FeCl_3$ или их смеси, полиакриламид, которые, гидролизуясь, образуют хлопьевидные гидраты окислов металлов.

Выбор коагулянта зависит от его состава, физико-химических свойств и стоимости, концентрации примесей в воде, от рН и солевого состава воды.

В полидисперсных системах коагуляция происходит быстрее, чем в монодисперсных, так как крупные частицы при оседании увлекают за собой более мелкие. Форма частиц также влияет на скорость коагуляции. Например, удлиненные частицы коагулируют быстрее, чем шарообразные.

Коагуляция вод, содержащих мелкодисперсные и коллоидные частицы, может происходить при пропуске сточных вод через электролизер с анодом, изготовленным из алюминия или железа. Металл анода под действием постоянного тока ионизируется и переходит в сточную воду, частицы загрязнений которой коагулируются образовавшимися труднорастворимыми гидроксидами алюминия или железа.

Метод электрохимического коагулирования может быть применен для обработки сточных вод, содержащих эмульгированные частицы масел, жиров и нефтепродуктов, хроматы, фосфаты.

Флокуляция — это процесс агрегации взвешенных частиц при добавлении в сточную воду высокомолекулярных соединений, называемых флокулянтами. В отличие от коагуляции при флокуляции агрегация происходит не только при непосредственном контакте частиц, но и в результате взаимодействия молекул адсорбированного на частицах флокулянта.

Флокуляцию проводят для интенсификации процесса образования хлопьев гидроксидов алюминия и железа с целью повышения скорости их осаждения. Использование флокулянтов позволяет снизить дозы коагулянтов, уменьшить продолжительность процесса коагуляции и повысить скорость осаждения образующихся хлопьев.

Для очистки сточных вод используют природные и синтетические флокулянты. К природным флокулянтам относятся крахмал, декстрин, эфиры, целлюлозы и др. Активный диоксид кремния является наиболее распространенным неорганическим флокулянтом. Из синтетических органических флокулянтов наибольшее применение получил полиакриламид (ПАА). При выборе состава и дозы флокулянта учитывают свойства его макромолекул и природу дисперсионных частиц. Оптимальная доза ПАА для очистки промышленных сточных вод колеблется в пределах 0,4...1 г/м³.

Механизм действия флокулянтов основан на явлении адсорбции молекул флокулянта на поверхности коллоидных частиц, на образовании сетчатой структуры молекул флокулянта, на слипании коллоидных частиц.

Флокуляция в процессах очистки сточных вод может использоваться в нескольких случаях: очистка сточных вод от суспендированных твердых частиц, биохимическая потребность в кислороде в первичных отстойниках, кондиционирование сточных вод. Кроме того, флокуляция бывает необходима для улучшения работы вторичных отстойных резервуаров после процесса обработки активным илом, а также как этап предварительной очистки сточных вод для фильтрации вторичных промышленных отходов.

Флокуляция может проводиться в отдельных емкостях или резервуарах, специально спроектированных для этой цели, в трубопроводах, соединяющих оборудование очистки сточных вод, или в комбинации с флокулятором. Флокуляция обычно следует за бы-

стрым перемешиванием, в процессе которого к нестабильным частицам добавляют химические реагенты.

В установке (рис. 2.5) для осуществления процессов коагуляции и флокуляции имеется растворный бак, в котором в чистой водопроводной воде разводят порошкообразный коагулянт или флокулянт. Приготовленный раствор с помощью насоса-дозатора подают в смесительную камеру, где происходит реакция взаимодействия коллоидных частиц с реагентами, продолжающаяся около тридцати минут. В камеру подается загрязненная вода, которая смешивается с раствором коагулянта или флокулянта. Для ускорения процесса камеру хлопьеобразования оборудуют лопастной мешалкой или устройством барботажа. По истечении времени реакции воду с помощью насоса перекачивают в специальную емкость для отстаивания. Чистая вода забирается через устройство в верхней части отстойника – водосборный карман. Оседающие хлопья, которые скапливаются в конусообразной части отстойника, периодически удаляются с помощью электродвигки.

2.9.2. Процессы флотационной очистки сточных вод

Флотация – процесс молекулярного прилипания частиц флотируемого материала к поверхности раздела газа и жидкости, обусловленный избытком свободной энергии поверхностных пограничных слоев, а также поверхностными явлениями смачивания.

Флотацию применяют для удаления из сточных вод нерастворимых дисперсионных примесей, которые самопроизвольно плохо отстаиваются, а также для удаления растворенных веществ, например, поверхностно-активных веществ (ПАВ). Процесс очистки сточных вод от ПАВ называют пенной сепарацией или пенным концентрированием. Флотацию применяют для очистки сточных вод нефтеперерабатывающих производств, искусственного волокна, целлюлозно-бумажного, кожевенного, пищевых, химических производств. Ее используют также для выделения активного ила после биохимической очистки.

Процесс очистки сточных вод методом флотации заключается в образовании комплексов «частицы – пузырьки» – всплывание

этих комплексов и удаление образовавшегося пенного слоя с поверхности обрабатываемой жидкости.

Прилипание частицы к поверхности газового пузырька возможно только тогда, когда наблюдается несмачивание или плохое смачивание частицы жидкостью. Элементарный акт флотации заключается в следующем: при сближении поднимающегося в воде пузырька воздуха с твердой гидрофобной частицей разделяющая их прослойка воды прорывается при некоторой критической толщине и происходит слипание пузырька с частицей. Затем комплекс «пузырек – частица» поднимается на поверхность воды, где пузырьки собираются, и возникает пенный слой с более высокой концентрацией частиц, чем в исходной сточной воде. ПАВ (реагенты-собиратели), адсорбируясь на частицах, понижают их смачиваемость, т. е. делают их гидрофобными. В качестве реагентов-собирателей используют масла, жирные кислоты и их соли, меркаптаны, ксантогенаты, алкилсульфаты, амины. Повышения гидрофобности частиц можно достичь также адсорбцией молекул растворенных газов на их поверхности.

Достоинствами флотации являются непрерывность процесса, широкий диапазон применения, невысокие капитальные и эксплуатационные затраты, простая аппаратура, селективность выделения примесей, большая скорость процесса по сравнению с отстаиванием, возможность получения шлама более низкой влажности, высокая степень очистки (95...98 %), возможность рекуперации удаляемых веществ. Флотация сопровождается также аэрацией сточных вод, снижением концентрации ПАВ и легкоокисляемых веществ, бактерий и микроорганизмов.

Различают следующие способы флотационной обработки сточных вод:

- с выделением воздуха из растворов;
- с механическим диспергированием воздуха;
- с подачей воздуха через пористые материалы;
- электрофлотацию;
- химическую флотацию.

Флотация с *выделением воздуха из раствора*. Этот способ применяют для очистки сточных вод, которые содержат очень мелкие частицы загрязнений. Сущность способа заключается в создании

пересыщенного раствора воздуха в сточной жидкости. При уменьшении давления из раствора выделяются пузырьки воздуха, которые флотируют загрязнения. В зависимости от способа создания перенасыщенного раствора воздуха в воде различают вакуумную, напорную и эрлифтную флотацию.

При вакуумной флотации сточную воду предварительно насыщают воздухом при атмосферном давлении в аэрационной камере, а затем направляют во флотационную камеру, где вакуум-насосом поддерживается разрежение 29,9...39,3 кПа (225...300 мм рт. ст.). Выделяющиеся в камере мельчайшие пузырьки выносят часть загрязнений. Процесс флотации длится около 20 минут. Достоинства этого способа: образование пузырьков газа и их слипание с частицами происходит в спокойной среде, что сводит к минимуму вероятность разрушения агрегатов «пузырек — частица»; затрата энергии на процесс минимальна. Недостатки: незначительная степень насыщения стоков пузырьками газа, поэтому этот способ нельзя применять при высокой концентрации взвешенных частиц (не более 250...300 мг/л); необходимость создавать герметически закрытые флотаторы и размещать в них скребковые механизмы.

Напорные флотационные установки имеют большее распространение, чем вакуумные. Они просты и надежны в эксплуатации. Напорная флотация (рис. 2.6) позволяет очищать сточные воды с концентрацией взвесей до 4...5 г/л. Для увеличения степени очистки в воду добавляются коагулянты. Аппараты напорной флотации обеспечивают по сравнению с нефтеловушками в 5...10 раз меньше остаточное содержание загрязнений и имеют в 5...10 раз меньшие габариты. Процесс осуществляется в две стадии:

- 1) насыщение воды воздухом под давлением;
- 2) выделение растворенного газа под атмосферным давлением.

При напорной флотации сточные воды из приемного резервуара 1 по трубопроводу насосом 2 подаются в напорный бак 3. На всасывающем трубопроводе имеется патрубок для подсоса воздуха. Сатуратор или напорная емкость служит для равномерного растворения воздуха в сточной воде. Насыщенная воздухом вода подается во флотационную камеру 4, где при атмосферном давлении растворенный воздух выделяется в виде пузырьков и флотирует взвешенные

частицы. Всплывающая масса непрерывно удаляется механизмами для сгребания пены в пеносборники. Отвод пены осуществляется по линии III в верхней части флотатора. Осветленная вода отводится из нижней части флотатора по линии IV.

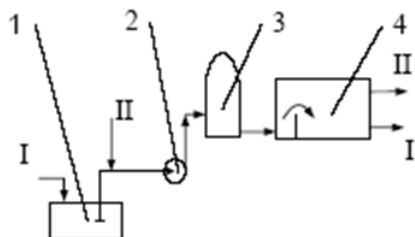


Рис. 2.6. Схема напорной флотации: 1 – емкость; 2 – насос; 3 – напорный бак; 4 – флотатор; I – подача сточной воды; II – подача воздуха; III – отвод пены; IV – отвод очищенной воды

Эрлифтные установки применяют для очистки сточных вод в химической промышленности (рис. 2.7). Они просты по устройству, затрата энергии на проведение процесса в них в 2...4 раза меньше, чем в напорных установках. Недостаток этих установок – необходимость размещения флотационных камер на большой высоте.

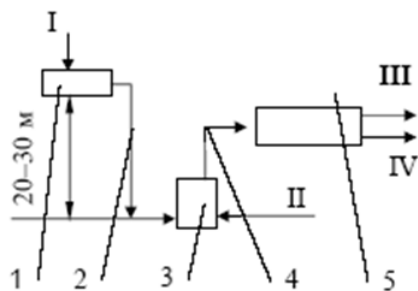


Рис. 2.7. Схема эрлифтной флотации: 1 – емкость; 2 – трубопровод; 3 – аэратор; 4 – труба эрлифта; 5 – флотатор; I – подача сточной воды; II – подача воздуха; III – отвод шлама; IV – отвод очищенной воды

Сточная вода из емкости 1, находящейся на высоте от 20 до 30 м, поступает в аэратор 3 по трубопроводу 2. Туда же подается сжатый воздух по линии II, который растворяется в воде под повышенным давлением. Поднимаясь по эрлифтному трубопроводу 4, жидкость

обогащается пузырьками воздуха, который выделяется во флотаторе 5. Образующаяся пена с частичками загрязнений удаляется самооттеком или скребками по линии III. Осветленную воду направляют на дальнейшую очистку по линии IV.

Флотация *с механическим диспергированием воздуха* осуществляется во флотационных машинах. Механическое диспергирование воздуха обеспечивается турбинами насосного типа – импеллерами, представляющими собой диск с радиальными обращенными вверх лопатками. Такие установки применяются для очистки сточных вод с высоким содержанием взвешенных частиц (более 2 г/л). Степень измельчения вихревых газовых потоков на пузырьки и эффективность очистки зависят от скорости вращения импеллера: чем больше скорость, тем меньше пузырек и тем больше эффективность процесса.

Пневматические установки применяют для очистки сточных вод, содержащих растворенные примеси, агрессивные к движущимся механизмам. Измельчение пузырьков воздуха достигается при пропускании его через специальные сопла с отверстиями диаметром 1...1,2 мм, с давлением перед ними 0,3...0,5 МПа. Скорость струи воздуха на выходе из сопла 100...200 м/с. Продолжительность флотации – в пределах 15...20 мин.

Флотация *при помощи пористых пластин*. При пропускании воздуха через керамические пористые пластины или колпачки получают мелкие пузырьки. Этот метод имеет следующие преимущества: простая конструкция флотационной камеры; меньшие затраты энергии из-за отсутствия насосов, импеллеров. Недостатки способа: частое засорение и зарастание отверстий пористого материала; неоднородность размеров отверстий пористого материала.

Электрофлотация основана на проведении электролиза воды на нерастворимых электродах и флотационном эффекте. В процессе электрофлотации нерастворимые загрязняющие вещества поднимаются на поверхность сточной воды, переносимые всплывающими микропузырьками электролитических газов. Метод применяется для очистки сточных вод гальванического производства и производства печатных плат от различных загрязнений в виде взвешенных веществ, фосфатов, нефтепродуктов, жиров и поверхностно-активных веществ.

Химическая флотация отличается тем, что для получения пузырьков газа в очищаемую воду добавляются специальные реагенты. При реакции реагентов с водой или загрязнениями воды выделяются газообразные вещества: кислород, диоксид углерода, хлор и другие. В качестве примера такой флотации можно привести хлорирование сточных вод органического синтеза с добавлением коагулирующих реагентов, а также обработку сточных вод шерстистой смеси оксида алюминия и серной кислоты.

2.9.3. Обратный осмос и ультрафильтрация в растворах сточных вод

Обратным осмосом и ультрафильтрацией называют процессы фильтрования растворов через полупроницаемые мембраны, избирательно пропускающие растворитель и полностью или частично задерживающие молекулы растворенных в них веществ, под давлением, превышающим осмотическое давление.

В основе этих способов лежит явление осмоса — самопроизвольного перехода растворителя (воды) в раствор через полупроницаемую мембрану. Давление π в растворе, заставляющее растворитель переходить через мембрану, называют осмотическим. Создав над раствором давление p_1 , равное осмотическому, осмос прекращается и наступает состояние равновесия. Если же над раствором создать избыточное давление p_2 , превышающее осмотическое давление π на величину Δp , то переход растворителя будет осуществляться в обратном направлении и тогда процесс называют обратным осмосом.

Наиболее распространены полимерные мембраны из ацетатцеллюлозы, полиэтилена, политетрафторэтилена, пористого стекла.

Механизм фильтрования через пористую мембрану объясняется тем, что поры такой мембраны достаточно велики, чтобы пропускать молекулы растворителя, но слишком малы, чтобы пропускать молекулы растворенных веществ.

При обратном осмосе отделяются частицы (молекулы, гидратированные ионы), размеры которых не превышают размеров молекул растворителя. При обратном осмосе мембраной задерживаются как высокомолекулярные вещества, так и большая часть низкомолекулярных веществ, а проходит через поры мембраны только поч-

ти чистый растворитель. Механизм обратного осмоса состоит в том, что мембраны собирают воду, которая в поверхностном слое не обладает растворяющей способностью, и через поры мембраны будет проходить только чистая вода, несмотря на то, что размер многих ионов загрязнителей меньше, чем размер молекул воды. Это объясняется явлением адсорбции молекул воды у поверхности мембраны.

При ультрафильтрации размер отделяемых частиц $d_{\text{ч}}$ на порядок больше. В процессе ультрафильтрации мембраной задерживаются высокомолекулярные вещества, а низкомолекулярные вещества и растворитель свободно проходят через поры мембраны. При ультрафильтрации растворенные вещества задерживаются на мембране потому, что размер молекул их больше, чем размер пор, или вследствие большого трения их молекул о стенки пор мембраны.

Условные границы применения этих процессов:

- обратный осмос – $d_{\text{ч}} = 0,0001 \dots 0,001$ мкм;
- ультрафильтрация – $d_{\text{ч}} = 0,001 \dots 0,02$ мкм;
- макрофильтрация – $d_{\text{ч}} = 0,02 \dots 10$ мкм.

Давление, необходимое для проведения процесса обратного осмоса (6...10 МПа), значительно больше, чем для процесса ультрафильтрации (0,1...0,5 МПа).

Обратный осмос и ультрафильтрация принципиально отличаются от обычного фильтрования. Если при обычном фильтровании осадок откладывается на фильтровальной перегородке, то при обратном осмосе и ультрафильтрации образуются два раствора, один из которых обогащен растворенным веществом.

Установка обратного осмоса (рис. 2.8) состоит из насоса высокого давления и модуля (мембранного элемента), соединенных последовательно.

Обратный осмос широко используется для обессоливания воды в системах водоподготовки теплоэлектростанций (ТЭЦ) и предприятий по производству полупроводников, кинескопов, медикаментов, для очистки некоторых промышленных и городских сточных вод.

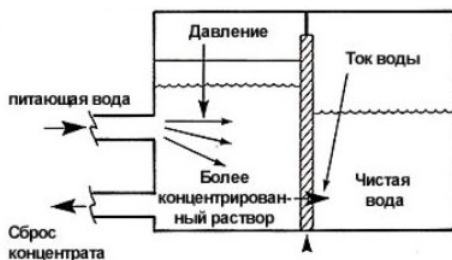


Рис. 2.8. Схема установки обратного осмоса: 1 – насос; 2 – модуль обратного осмоса; 3 – мембрана; 4 – выпускной клапан

2.9.4. Электрохимические процессы очистки сточных вод

Для очистки сточных вод от различных растворимых и диспергированных примесей применяются процессы анодного окисления и катодного восстановления, электрокоагуляции, электрофлокуляции и электродиализа.

Эти процессы разработаны для очистки сточных вод от растворенных примесей (цианидов, аминов, спиртов, альдегидов, нитросоединений, сульфидов, меркаптанов). В процессах электрохимического окисления вещества, находящиеся в сточной воде, полностью распадаются с образованием CO_2 , NH_3 и воды или образуются более простые и нетоксичные вещества, которые можно удалять другими методами.

Все эти процессы протекают на электродах при прохождении через сточную воду постоянного электрического тока (рис. 2.9).

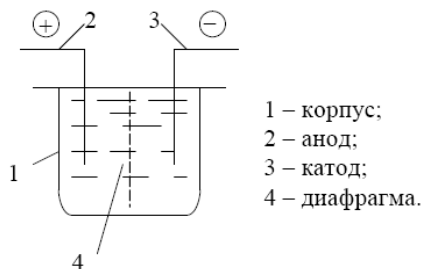


Рис. 2.9. Схема электролизера

При прохождении сточной воды через межэлектродное пространство электролизера осуществляются электролиз воды, поляризация частиц, электрофорез, окислительно-восстановительные процессы, взаимодействие продуктов электролиза друг с другом. В электролизере на положительном электроде — аноде ионы отдают электроны, т. е. протекает реакция электрохимического окисления; на отрицательном электроде — катоде происходит присоединение электронов, т. е. протекает реакция восстановления.

В качестве анодов используют электрохимически нерастворимые материалы: графит, магнетит, диоксиды свинца, марганца и рутения, которые наносят на титановую основу.

Катоды изготавливают из молибдена, сплава вольфрама с железом или никелем, из графита, нержавеющей стали и других металлов, покрытых молибденом, вольфрамом или их сплавами.

Процесс проводят в электролизерах с диафрагмой и без нее.

Кроме основных процессов электроокисления и восстановления одновременно могут протекать электрофлотация, электрофорез и электрокоагуляция.

Электрокоагуляция осуществляется при использовании нерастворимых электродов. Коагуляция может происходить в результате электрофоретических явлений и разряда заряженных частиц на электродах, образования в растворе веществ, разрушающих сольватные оболочки на поверхности частиц загрязнений. Такой процесс можно использовать для очистки сточных вод при невысоком содержании коллоидных частиц и низкой устойчивости загрязнений.

При *электрофлотации* очистка сточных вод проходит при помощи пузырьков газа, образующихся при электролизе воды. На аноде возникают пузырьки кислорода, а на катоде — водорода. При использовании растворимых электродов происходит образование хлопьев коагулянтов и пузырьков газа, что способствует более эффективной флотации. Основную роль при электрофлотации играют пузырьки, образующиеся на катоде. Размер пузырьков водорода значительно меньше, чем при других методах флотации. Диаметр пузырьков меняется от 20 до 100 мкм. Мелкие пузырьки водорода обладают большей растворимостью, чем крупные.

Процесс очистки сточных вод *электродиализом* основан на разделении ионизированных веществ под действием электродвижущей силы, создаваемой в растворе по обе стороны мембран. Этот процесс широко используют для опреснения соленых вод. Процесс проводят в электродиализаторах, простейшая конструкция которых состоит из трех камер, отделенных одна от другой мембранами. В среднюю камеру заливают раствор, а в боковые, где расположены электроды, — чистую воду. Анионы током переносятся в анодное пространство. На аноде выделяется кислород и образуется кислота. Одновременно катионы переносятся в катодное пространство. На катоде выделяется водород и образуется щёлочь. По мере прохождения тока концентрация солей в средней камере уменьшается до тех пор, пока не станет близкой к нулю.

Электрохимические методы позволяют извлекать из сточных вод ценные продукты при относительно простой технологической схеме очистки, без использования химических реагентов. Основным недостатком этих методов является большой расход электроэнергии. Очистку сточных вод электрохимическими методами можно проводить периодически или непрерывно.

2.10. Биохимические процессы очистки сточных вод

Биохимические методы применяют для очистки хозяйственно-бытовых и промышленных сточных вод от многих растворенных органических и некоторых неорганических (сероводорода, сульфидов, аммиака, нитритов) веществ. Процесс очистки основан на способности микроорганизмов, находящихся в активном иле, использовать эти вещества для питания в процессе жизнедеятельности, так как органические вещества для микроорганизмов являются источником углерода.

Активный ил состоит из живых организмов и твердого субстрата. Сообщество всех живых организмов, населяющих ил, называют биоценозом. Активный ил представляет собой амфотерную коллоидную систему, имеющую отрицательный заряд при $\text{pH} = 4 \dots 9$. Сухое вещество активного ила содержит от 70 до 90 % органических и от 10 до 30 % неорганических веществ. Субстрат представляет собой

твердую отмершую часть остатков водорослей и различных твердых остатков; к нему прикрепляются организмы активного ила. Субстрат составляет до 40 % в активном иле.

В активном иле находятся микроорганизмы различных групп. По экологическим группам микроорганизмы делятся на аэробов и анаэробов, термофилов и мезофилов, галофилов и галофобов.

Контактируя с органическими веществами, микроорганизмы частично разрушают их, превращая в воду, диоксид углерода, нитрит- и сульфатионы и др. Другая часть вещества идет на образование биомассы. Разрушение органических веществ называют биохимическим окислением.

Обработка осадка активного ила включает:

- 1) уплотнение осадка гравитационным, флотационным, центробежным и вибрационным методами;
- 2) стабилизацию осадков в аэробных и анаэробных условиях;
- 3) кондиционирование осадков реагентными и безреагентными способами;
- 4) тепловую обработку;
- 5) жидкофазное окисление органической части осадка кислородом воздуха;
- 6) обезвоживание осадков на иловых площадках естественным путем и механическим способом;
- 7) сушку осадков;
- 8) сжигание осадков.

Известны аэробные и анаэробные методы биохимической очистки сточных вод.

Аэробный метод основан на использовании аэробных групп организмов, для жизнедеятельности которых необходим постоянный приток кислорода и температура 20...40 °С. При аэробной очистке микроорганизмы культивируются в активном иле или биопленке.

Анаэробные методы очистки протекают без доступа кислорода; их используют в основном для обезвреживания осадков. Анаэробные методы обезвреживания используют для сбраживания осадков, образующихся при биохимической очистке производственных сточных вод, а также как первую ступень очистки очень концентрированных промышленных сточных вод ($\text{БПК}_{\text{полн}} \approx 4...5 \text{ г/л}$), содер-

жащих органические вещества, которые разрушаются анаэробными бактериями в процессах брожения. В зависимости от конечного вида продукта различают виды брожения: спиртовое, пропионовокислое, молочнокислое, метановое и др. Конечными продуктами брожения являются спирты, кислоты, ацетон, газы брожения (CO_2 , H_2 , CH_4).

Биочистка в природных условиях осуществляется через поля орошения и биологические пруды.

Поля орошения — это специальные подготовленные земельные участки, очистка на которых идёт под действием солнца, воздуха и под влиянием живой растительности. Поля орошения после биологической очистки сточных вод используются для выращивания овощей, зерновых и силосных культур. Если на полях не выращиваются сельскохозяйственные культуры и они предназначены только для биологической очистки сточных вод, то они называются полями фильтрации.

Биологические пруды — каскад прудов с естественной или искусственной аэрацией, состоящий из 3...5 ступеней. Искусственная аэрация осуществляется компрессором.

Очистка в искусственных сооружениях производится в аэротенках и биофильтрах.

Аэротенки — железобетонные аэрирующие резервуары, в которых находится аэрированная смесь сточной воды и активного ила.

Аэротенки подразделяются по разным признакам. По гидродинамическому режиму бывают аэротенки-вытеснители, аэротенки-смесители и промежуточного типа. Аэротенки различаются также по способу регенерации активного ила и по нагрузке на активный ил. По конструктивным признакам аэротенки различают по количеству ступеней очистки и по режиму ввода сточных вод — проточные, полупроточные, контактные и другие.

Биофильтр — это прямоугольный или круглый резервуар обычно из железобетона или кирпича с двойным дном. На верхнем дырчатом дне располагают фильтрующую загрузку из прочных химически стойких материалов типа шлака, кокса, керамзита и других. Нижнее сплошное дно служит для сбора воды, прошедшей фильтрующую загрузку. На поверхности фильтрующей загрузки прикрепляют биопленку, на которую при помощи специальных насадок или реактив-

ных оросителей периодически подают на обработку сточную воду, равномерно распределяя по всей площади биофильтра.

Выбор типа сооружений определяется характером и количеством сточных вод, местными природными условиями, требованиями к качеству очищенной воды, наличием свободных земельных площадей.

2.11. Термические процессы обработки сточных вод

Термическими методами обезвреживаются сточные воды, содержащие минеральные соли кальция, магния, натрия, а также органические вещества. Классификация термических методов показана на рис. 2.10.



Рис. 2.10. Классификация термических методов обезвреживания сточных вод

Концентрирование растворов сточных вод. Этот метод в основном используют для обезвреживания минеральных сточных вод. Он позволяет выделять из стоков соли с получением условно чистой воды, пригодной для оборотного водоснабжения. Процесс разделения минеральных веществ и воды может быть осуществлен в две стадии: стадия концентрирования и стадия выделения сухих веществ.

Концентрирование сточных вод может быть проведено испарением (выпариванием), вымораживанием и кристаллизацией.

Выпаривание связано с процессом нагрева сточной воды от начальной температуры до температуры ее испарения. В испарительных установках концентрация раствора повышается вследствие удаления паров раствора при испарении жидкости. Эти установки

наиболее распространены в технике концентрирования растворов. Они подразделяются на выпарные установки, в которых кипение осуществляется на поверхности нагрева или в вынесенной зоне, и установки адиабатного испарения, в которых испарение перегретой жидкости происходит в адиабатной камере. Испарительные установки можно условно подразделить на установки, в которых раствор контактирует с поверхностью нагрева, и установки, в которых раствор не контактирует с поверхностью нагрева.

В установках первого типа образуются отложения солей с соответствующим снижением плотности теплового потока и производительности установок. Это обуславливает периодические остановки агрегатов для очистки поверхностей нагрева, что снижает технико-экономические показатели и усложняет их эксплуатацию. Степень концентрирования раствора в них существенно ограничена из-за резкого увеличения отложений с ростом концентрации раствора. Для улучшения условий работы приходится применять специальные меры по снижению отложений.

В установках второго типа тепло передается промежуточному гидрофобному жидкому, твердому или газовому теплоносителю, который затем при непосредственном контакте нагревает или испаряет раствор. Нагретый раствор подается в камеры адиабатного испарения. Степень концентрирования раствора в таких установках существенно повышается, так как опасность отложений на поверхностях нагрева практически исключается.

Вымораживание заключается в том, что при температуре ниже температуры замерзания чистая вода образует кристаллы пресного льда, в котором растворенные в нем соли размещаются в ячейках между этими кристаллами. Температура замерзания рассола всегда ниже температуры замерзания чистой воды и зависит от концентрации растворенных солей. Для исключения образования мелких кристаллов и отделения межкристаллитного рассола процесс вымораживания проводят при режимах медленного переохлаждения. В установках, использующих методы вымораживания, концентрирование минерализованных стоков основано на том, что количество солей в кристаллах льда значительно меньше, чем в растворе, и образуется пресный лед. Вследствие этого по мере образования льда

концентрация солей в растворе повышается. Концентрирование минерализованных вод можно также осуществить двумя способами: вымораживанием при испарении под вакуумом либо замораживанием с помощью специального холодильного агента.

Для выделения веществ из концентрированных растворов используют методы кристаллизации и сушки.

Кристаллизация — это процесс выделения твердой фазы в виде кристаллов из насыщенных растворов, расплавов или паров.

Создание необходимого для кристаллизации пересыщенного раствора обеспечивают охлаждением горячих насыщенных растворов (изогидрическая кристаллизация) и удалением частиц растворителя путем выпаривания (изотермическая кристаллизация) или комбинацией этих методов (вакуум-кристаллизация, фракционированная кристаллизация, кристаллизация с испарением растворителя в токе воздуха или другого газа-носителя).

Вещества, растворимость которых существенно возрастает с повышением температуры (положительная растворимость), кристаллизуют при охлаждении их насыщенных растворов — это политермическая или изогидрическая кристаллизация, идущая при неизменном содержании воды в системе. Если с ростом температуры растворимость вещества уменьшается, то кристаллизацию проводят при нагревании раствора. Вещества, мало изменяющие растворимость при изменении температуры, кристаллизуют путем испарения воды при постоянной температуре — изотермическая кристаллизация.

Положительной растворимостью обладают растворы MgCl_2 , MgSO_4 , NaCl ; отрицательной — растворы CaSO_4 , CaSiO_3 и др.

В *кристаллогидратных установках* концентрирование сточных вод основано на способности некоторых веществ (фреоны, хлор и др.) при определенных условиях образовывать кристаллогидраты. При этом молекулы воды переходят в кристаллогидраты, а концентрация растворов повышается. При плавлении кристаллов вновь выделяется вода, которая является гидратообразующим агентом. Процесс гидратообразования может происходить при температуре ниже и выше окружающей среды. В первом случае, как правило, необходимо применение холодильных установок, а во втором случае кристаллогидратная установка может использовать низкопотенциальное

тепло. Холодильные и кристаллогидратные методы опреснения и концентрирования минерализованных стоков применяются еще сравнительно редко, но в силу своих положительных качеств могут найти в будущем широкое применение.

В практике кристаллизации из растворов иногда используют кристаллизацию высаливанием (введение в раствор веществ, понижающих растворимость соли), вымораживанием (охлаждением растворов до отрицательных температур с выделением кристаллов соли или их концентрирование удалением частиц растворителя в виде льда) или за счет химической реакции, обеспечивающей пресыщение раствора, а также высокотемпературную (автоклавную) кристаллизацию, обеспечивающую получение кристаллогидратов с минимальным содержанием влаги.

Для оценки поведения растворов при их кристаллизации и рационального выбора способа проведения этого процесса используют диаграммы состояния растворов, выражающие зависимость растворимости солей от температуры. Скорость процесса кристаллизации зависит от степени пресыщения раствора, температуры, интенсивности перемешивания, содержания примесей и других показателей, она изменяется во времени, проходя через максимум.

При использовании *термоокислительного метода* все органические вещества, загрязняющие сточные воды, полностью окисляются кислородом воздуха при высоких температурах до нетоксичных соединений. К этим методам относят метод жидкофазного окисления, метод парофазного каталитического окисления и пламенный или «огневой» метод.

Метод жидкофазного окисления основан на окислении органических веществ, растворенных в воде, кислородом при температурах 100...350 °С и давлениях 2...28 МПа. При высоких давлениях растворимость в воде кислорода значительно возрастает, что способствует ускорению процесса окисления органических веществ. Эффективность процесса окисления увеличивается с повышением температуры. Летучие вещества окисляются в основном в парогазовой фазе, а нелетучие – в жидкой фазе. С увеличением концентрации органических примесей в воде экономичность процесса жидкофазного окисления возрастает. Метод начинают использовать для очистки сточных

вод в химической, нефтеперерабатывающей, целлюлозно-бумажной, фармацевтической и других отраслях промышленности.

В основе метода *парофазного каталитического окисления* находится гетерогенное каталитическое окисление кислородом воздуха при высокой температуре летучих органических веществ, находящихся в сточных водах. Процесс протекает интенсивно в паровой фазе в присутствии медно-хромового, цинк-хромового, медно-марганцевого или другого катализатора. Основной недостаток метода — возможность отравления катализаторов соединениями фосфора, фтора, серы. Поэтому необходимо предварительное удаление каталитических ядов из сточных вод.

Огневой метод обезвреживания сточных вод является наиболее эффективным и универсальным из термических методов. Сущность его заключается в распылении сточных вод непосредственно в топочные газы, нагретые до 900...1000 °С. При этом вода полностью испаряется, а органические примеси сгорают. Огневой метод применяют для обезвреживания сточных вод, содержащих только минеральные вещества. Метод может быть использован также для обезвреживания небольшого объема сточных вод, содержащих высокотоксичные органические вещества, очистка от которых другими методами невозможна или неэффективна. Кроме того, огневой метод целесообразен, если имеются горючие отходы, которые можно использовать как топливо.

Практическая работа 3 **Расчет решеток для очистки сточных вод**

Цели работы: изучить методику и произвести расчет решеток для очистки сточных вод.

Основные теоретические сведения

Нормы проектирования для вновь строящихся и реконструируемых систем наружной канализации постоянного назначения городских и близких к ним по составу производственных сточных вод, а также дождевой канализации устанавливает СП 32.13330.2012 «Канализация. Наружные сети и сооружения. Актуализированная редакция СНиП 2.04.03-85» [6].

При расчете решеток (рис. 2.11) для поверхностных сточных вод определяют их размеры и потери напора при прохождении стока через решетку.

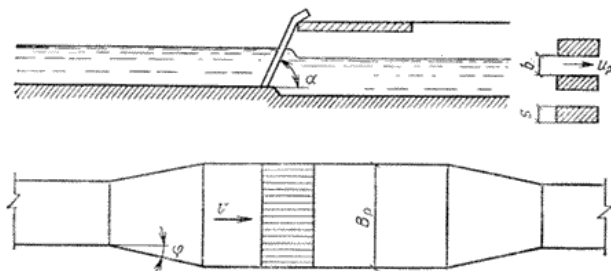


Рис. 2.11. Схема решетки для очистки сточных вод

Величину расхода стоков q , м³/с, определяют по формуле

$$q = \omega v_p = b n h_1 v_p, \quad (2.1)$$

где ω — площадь живого сечения решетки, м²; v_p — заданная скорость движения через решетку, принимаемая равной 0,8...1 м/с; b — ширина прозоров решетки, м; n — число прозоров решетки, шт; h_1 — глубина потока воды, м.

Прозоры решеток (размеры отверстий сит) должны быть не более 16 мм. Рекомендуется использовать решетки с прозорами не более 10 мм. Допускается в зависимости от принимаемой технологической схемы очистных сооружений применение решеток (сит) с меньшими прозорами, процеживателей, измельчителей, двухступенчатых схем процеживания (грубые и тонкие решетки) и т. п.

Для решеток с ручной очисткой $h_1 = 1$ м; с механизированной очисткой — $h_1 = 1,2...3$ м.

Число прозоров решетки:

$$n = k \frac{q}{b h_1 v_p}, \quad (2.2)$$

где k — коэффициент, учитывающий стеснение потока граблями и задержанными загрязнениями ($k = 1,05$).

Общая ширина решеток, м:

$$B_p = b \cdot n + S \cdot (n - 1), \quad (2.3)$$

где S — толщина стержней, м.

Затем принимается число решеток N и ширина B_1 каждой из них:

$$\begin{aligned} B_1 &= B_p/N, \\ N &= B_p/B_1. \end{aligned} \quad (2.4)$$

Потери напора в решетках равны:

$$h_m = p \cdot \xi \cdot v^2/2g, \quad (2.5)$$

где p – коэффициент, учитывающий увеличение потерь напора вследствие засорения решетки, принимается $p \approx 3$; v – скорость движения воды в камере перед решеткой, $v = 0,7 \dots 0,8$ м/с; g – ускорение свободного падения, $g = 9,8$ м/с²; ξ – коэффициент местного сопротивления решетки, зависит от формы стержней и определяется по формуле

$$\xi = \beta \cdot (S/b)^{4/3} \cdot \sin\alpha, \quad (2.6)$$

где $\alpha = 60 \dots 70^\circ$ – угол установки решетки к горизонту; β – коэффициент, равный для прямоугольных стержней $\beta = 2,42$, для круглых стержней $\beta = 1,72$.

Количество плавающего мусора на 1000 га в среднем составляет: для дождевых и поливочных вод – 0,2 м³, для талых вод – 0,3 м³.

Методика расчета решеток применима и для промышленных сточных вод, содержащих нефтепродукты и механические загрязнения.

Пример расчета

Рассчитать параметры решетки для очистки сточных вод, если известно, что средний расход стоков на объекте $q = 50$ л/с = 0,05 м³/с. Чистка решеток осуществляется ручным способом, стержни каждой решетки прямоугольного сечения с толщиной 8 мм, угол установки решеток к горизонту – 60°.

Число прозоров решетки определим по формуле (2.2):

$$n = 1,05 \cdot 0,05 / (0,016 \cdot 1 \cdot 0,8) = 4,1.$$

Принимаем число прозоров – 5.

Общая ширина решеток (2.3) равна

$$B_p = 0,016 \cdot 5 + 0,008 \cdot 4 = 0,112 \text{ м.}$$

Ширина каждой из решеток ($N = 1$) будет равна (2.4):

$$B_1 = 0,112/1 = 0,112 \text{ м.}$$

Коэффициент местного сопротивления решетки (2.6) равен

$$\xi = 2,42 \cdot (0,008/0,016)^{4/3} \cdot 0,866 = 0,83.$$

Потери напора в решетках равны (2.5):

$$h_m = 3 \cdot 0,83 \cdot 0,7^2 / (2 \cdot 9,8) = 0,062 \text{ м.}$$

Алгоритм выполнения практической работы

1. Изучить теоретические сведения и пример по методике расчета решеток для очистки сточных вод, которые представлены в методических указаниях к работе.
2. Выбрать вариант задания к работе (табл. 2.1).
3. Произвести необходимые расчеты.
4. Составить отчет по практической работе в соответствии с требованиями (прил. А).
5. Ответить на вопросы для самоконтроля.

Таблица 2.1

Варианты заданий

№ варианта	Средний расход сточков на объекте q , л/с	Угол установки решеток к горизонту α , °	Толщина стержней решетки S , мм	Форма стержней решетки	Очистка решеток
1	50	60	6	Круглая	Ручная
2	60	65	8	Прямоуг.	Механич.
3	70	70	10	Круглая	Ручная
4	80	60	6	Прямоуг.	Механич.
5	90	65	8	Круглая	Ручная
6	100	70	10	Прямоуг.	Механич.
7	110	60	6	Круглая	Ручная
8	120	65	8	Прямоуг.	Механич.
9	130	70	10	Круглая	Ручная
10	140	60	12	Прямоуг.	Механич.
11	150	65	14	Круглая	Ручная
12	160	70	16	Прямоуг.	Механич.
13	170	60	18	Круглая	Ручная
14	180	65	20	Прямоуг.	Механич.
15	190	70	10	Круглая	Ручная
16	200	60	12	Прямоуг.	Механич.
17	210	65	14	Круглая	Ручная

№ варианта	Средний расход сточков на объекте q , л/с	Угол установки решеток к горизонту α , °	Толщина стержней решетки S , мм	Форма стержней решетки	Очистка решеток
18	220	70	16	Прямоуг.	Механич.
19	230	60	18	Круглая	Ручная
20	240	65	20	Прямоуг.	Механич.
21	250	60	6	Прямоуг.	Механич.
22	50	65	8	Круглая	Ручная
23	60	70	10	Прямоуг.	Механич.
24	70	60	6	Круглая	Ручная
25	80	65	8	Прямоуг.	Механич.
26	90	70	10	Круглая	Ручная
27	100	60	6	Прямоуг.	Механич.
28	110	65	8	Круглая	Ручная
29	120	70	10	Прямоуг.	Механич.
30	130	60	12	Круглая	Ручная
31	140	65	14	Прямоуг.	Механич.
32	150	70	16	Круглая	Ручная
33	160	60	18	Прямоуг.	Механич.
34	170	65	20	Круглая	Ручная
35	180	70	10	Прямоуг.	Механич.
36	190	60	12	Круглая	Ручная
37	200	65	14	Прямоуг.	Механич.
38	210	70	16	Круглая	Ручная
39	220	60	18	Прямоуг.	Механич.
40	230	65	20	Круглая	Ручная
41	240	60	14	Прямоуг.	Механич.
42	250	65	16	Круглая	Ручная
43	100	70	18	Прямоуг.	Механич.
44	110	60	20	Круглая	Ручная
45	120	65	10	Прямоуг.	Механич.
46	130	70	12	Круглая	Ручная
47	140	60	14	Прямоуг.	Механич.
48	150	65	16	Круглая	Ручная
49	160	70	18	Прямоуг.	Механич.
50	170	60	20	Круглая	Ручная

Вопросы для самоконтроля

1. Для очистки каких сточных вод могут применяться решетки?
2. От чего зависят потери напора воды в решетках?
3. Назовите основные расчетные параметры решеток.

Практическая работа 4 **Расчет песколовок для очистки сточных вод**

Цели работы: ознакомиться с методикой и рассчитать параметры песколовок для очистки сточных вод.

Основные теоретические сведения

Нормы проектирования для вновь строящихся и реконструируемых систем наружной канализации постоянного назначения городских и близких к ним по составу производственных сточных вод, а также дождевой канализации устанавливает СП 32.13330.2012 «Канализация. Наружные сети и сооружения. Актуализированная редакция СНиП 2.04.03-85» [6].

Для очистки поверхностного стока наиболее целесообразно применять горизонтальные или тангенциальные песколовки.

В горизонтальных песколовках (рис. 2.12) сточная вода поступает в прямоугольную емкость и перемещается вдоль нее, при этом песок оседает под действием силы тяжести по всей длине емкости. Очищенная от песка вода переливается через поперечную перегородку в карман чистой воды и отводится на последующие стадии очистки по трубопроводу. Осевший на дно песок собирается скребками в бункер для сбора и удаления песка и периодически отводится на обезвоживание.

Длину горизонтальных песколовок L , м, рекомендуется определять по формуле

$$L = 1000 \cdot k \cdot h_p \cdot v / u_0, \quad (2.7)$$

где $k = 1,7$ – коэффициент, учитывающий неполное использование зоны отстаивания; h_p – расчетная глубина песколовки, принимается в диапазоне от 0,5 до 2 м; v – скорость движения сточных вод, при максимальном притоке $v_{\text{макс}} = 0,3$ м/с; u_0 – гидравлическая крупность частиц песка (средняя скорость осаждения частиц песка

заданной крупности), на задержание которых рассчитывается песколовка, мм/с.

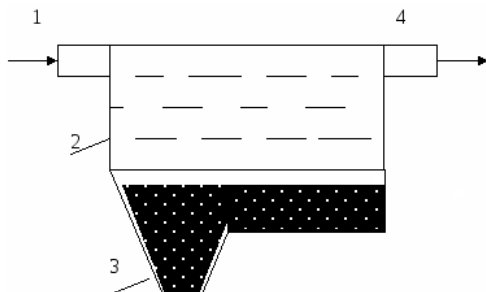


Рис. 2.12. Горизонтальная песколовка: 1 – входной патрубок; 2 – корпус; 3 – шламоборник; 4 – выходной патрубок

Площадь живого сечения песколовки F определяется из уравнения неразрывности струи:

$$q = F \cdot v_{\text{макс}}, \quad (2.8)$$

$$F = q/v_{\text{макс}}, \quad (2.9)$$

где q – максимальный расход сточных вод, $\text{м}^3/\text{с}$; $v_{\text{макс}}$ – максимальная скорость движения сточных вод, $\text{м}/\text{с}$.

Откуда определяют ширину песколовки B , м :

$$B = F/h_p. \quad (2.10)$$

При нескольких отделениях песколовки ширина одного отделения, м :

$$b = B/n, \quad (2.11)$$

где n – количество песколовок или их отделений.

Ширина отделений обычно принимается от 0,5 до 2 м .

Для определения высоты слоя осадка, задерживаемого в песколовке ($h_{\text{ос}}$), устанавливается общий объем задержанного осадка $W_{\text{ос}}$, $\text{м}^3/\text{ч}$,

$$W_{\text{ос}} = q \cdot C_0 \cdot 0,15 / [(100 - w) \cdot v \cdot 10^4], \quad (2.12)$$

где C_0 – концентрация взвешенных веществ в поступающем стоке, $\text{мг}/\text{л}$; w – влажность осадка, % (60...70 %); v – плотность осадка, $\text{г}/\text{см}^3$ (1,2...1,5 $\text{г}/\text{см}^3$).

Обычно число суток между чистками песколовки принимается $N = 0,5 \dots 2$ суток.

Толщина осажденного слоя между чистками, м, равна

$$h_{oc} = 24W_{oc} \cdot N / (L \cdot B). \quad (2.13)$$

Общая строительная глубина песколовки, м, определяется по формуле

$$H = h_6 + h_p + h_{oc}, \quad (2.14)$$

где h_6 – высота бортов над уровнем воды в песколовке (принимается 0,2...0,4 м).

Время протекания сточных вод в песколовке, с, вычисляется из уравнения

$$t = L / v_{\max}. \quad (2.15)$$

Продолжительность протекания сточных вод в горизонтальной песколовке должна быть не менее 30 с.

В *тангенциальных песколовках* (рис. 2.13) сточная вода поступает в проточную зону конусообразной емкости и перемещается по кругу вдоль ее стенок за счет движения перемешивающего устройства. Песок сползает по стенкам конусообразной емкости и поступает в узел промывки. Отделенная от песка сточная вода по отводящему патрубку направляется на последующие стадии очистки.

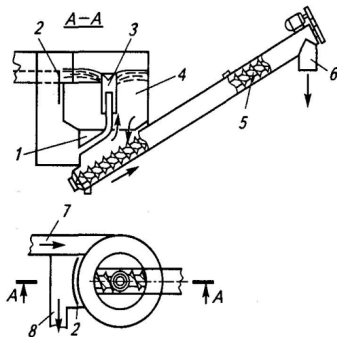


Рис. 2.13. Тангенциальная песколовка: 1 – осадочная часть; 2 – подвижный водослив; 3 – телескопическая труба; 4 – рабочая часть; 5 – шнек; 6 – отвод песка; 7 – подающий лоток; 8 – отводящий лоток

Расчет тангенциальных песколовок осуществляется по гидравлической нагрузке на поверхность песколовки в плане.

Необходимая площадь песколовок в плане, m^2 , определяется по формуле

$$F = Q/q_0,$$

где Q – расчетный расход сточных вод, $m^3/ч$; q_0 – расчетная гидравлическая нагрузка, $m^3/(m^2 \cdot ч)$.

Расчетную гидравлическую нагрузку на поверхность тангенциальных песколовок в плане рекомендуется принимать в пределах 90...130 $m^3/(m^2 \cdot ч)$, на маленьких очистных станциях – 60...80 $m^3/(m^2 \cdot ч)$. По СП 32.13330.2012 расчет тангенциальных песколовок рекомендуется осуществлять по гидравлической нагрузке 110 $m^3/(m^2 \cdot ч)$.

Диаметр песколовки, m , должен составлять:

$$D = \sqrt{\frac{F}{0,785 \cdot N}},$$

где N – количество песколовок (не менее двух).

Диаметр тангенциальных песколовок не должен превышать 6 m , а рабочая глубина принимается не больше величины радиуса.

Для подсушивания песка, поступающего из песколовок, необходимо предусматривать площадки с ограждающими валиками высотой 1...2 m . Допускается применять накопители со слоем напуска песка до 3 m в год. Удаляемую с песковых площадок воду необходимо направлять в начало очистных сооружений.

Расчетная площадь песковых площадок, m^2 , составляет:

$$F_{\text{пп}} = W_{\text{ос год}}/q_{\text{пп}}, \quad (2.16)$$

где $W_{\text{ос год}}$ – общий объем задержанного осадка, $m^3/\text{год}$; $q_{\text{пп}}$ – нагрузка на песковые площадки, предусматривается 3 m^3/m^2 в год.

При повышении расчетного расхода поверхностного стока для предупреждения нарушения режима работы песколовки (выноса песка) предусматривается обводной канал отвода воды, превышающей расчетный расход, на последующие сооружения, например, аккумулирующую емкость.

При применении песколовок для очистки сточных вод (поверхностных, промышленных и т. д.) необходимо определять их тип с учетом производительности очистных сооружений, схемы очистки сточных вод, характеристики взвешенных веществ и т. п.

Пример расчета

Определить параметры горизонтальной песколовки, если расчетная глубина песколовки h_p должна быть 0,5 м, гидравлическая крупность частиц песка, на задержание которых рассчитывается песколовка, $u_0 = 18$ мм/с, максимальный расход сточных вод на объекте $q = 0,1$ м³/с, концентрация взвешенных веществ в поступающем стоке $C_0 = 800$ мг/л.

Длину горизонтальной песколовки определим по формуле (2.7)

$$L = 1000 \cdot 1,7 \cdot 0,5 \cdot 0,3/18 = 14,17 \text{ м.}$$

Время протекания сточных вод в песколовке (2.15), с, равно

$$t = 14,17/0,3 = 47,22,$$

что, согласно требованиям, составляет не менее 30 с.

Площадь живого сечения песколовки (2.9) определяется:

$$F = 0,1/0,3 = 0,33 \text{ м}^2.$$

Находим ширину песколовки (2.10):

$$B = 0,33/0,5 = 0,66 \text{ м.}$$

Если ширина одного отделения составляет 0,66 м, то согласно (2.11) число отделений песколовки $n = 1$.

Устанавливаем общий объем задержанного осадка (2.12):

$$W_{oc} = 0,1 \cdot 60^2 \cdot 800 \cdot 0,15 / [(100 - 65) \cdot 1,2 \cdot 10^4] = 102,85 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{ч.}$$

Толщина осажденного слоя (2.13) за 2 суток равна:

$$h_{oc} = 24 \cdot 2 \cdot 102,85 \cdot 10^{-3} / (14,17 \cdot 0,66) = 0,528 \text{ м.}$$

Общая строительная глубина песколовки (2.14):

$$H = 0,3 + 0,528 + 1 = 1,828 \text{ м.}$$

Алгоритм выполнения практической работы

1. Изучить теоретические сведения и пример расчета песколовки для очистки сточных вод, представленные в указаниях к данной работе.
2. Выбрать вариант задания к работе (табл. 2.2).
3. Произвести необходимые расчеты.
4. Составить отчет по практической работе в соответствии с требованиями (прил. А).
5. Ответить на вопросы для самоконтроля.

Варианты заданий

№ варианта	Максимальный расход сточных вод q , м ³ /с	Гидравлическая крупность частиц песка, на задержание которых рассчитывается песколовка, мм/с	Концентрация взвешенных веществ в поступающем стоке C_0 , мг/л
1	0,15	15	500
2	0,20	16	550
3	0,25	17	600
4	0,30	18	650
5	0,35	19	700
6	0,40	20	750
7	0,45	15	800
8	0,50	16	850
9	0,55	17	900
10	0,60	18	950
11	0,65	19	1000
12	0,70	20	500
13	0,75	15	550
14	0,80	16	600
15	0,85	17	650
16	0,90	18	700
17	0,1	19	750
18	0,15	20	800
19	0,2	15	850
20	0,25	16	900
21	0,15	17	950
22	0,2	18	1000
23	0,25	19	500
24	0,30	20	550
25	0,35	15	600
26	0,40	16	650
27	0,45	17	700
28	0,50	18	750
29	0,55	19	800
30	0,60	20	850
31	0,65	15	900
32	0,70	16	950
33	0,75	17	1000

№ ва-ри-анта	Максимальный расход сточных вод q , м ³ /с	Гидравлическая крупность частиц песка, на задержание которых рассчитывается песколовка, мм/с	Концентрация взвешенных веществ в поступающем стоке C_0 , мг/л
34	0,80	18	500
35	0,85	19	550
36	0,90	20	600
37	0,1	15	650
38	0,15	16	700
39	0,2	17	750
40	0,25	18	800
41	0,5	19	850
42	0,7	20	900
43	0,075	15	950
44	0,8	16	1000
45	0,85	17	500
46	0,9	18	550
47	0,1	19	600
48	0,15	20	650
49	0,2	15	700
50	0,25	16	750

Вопросы для самоконтроля

1. Какие типы песколовки могут применяться для очистки сточных вод?
2. Опишите принцип расчета горизонтальной песколовки.
3. Какой тип песколовки рассчитывается по гидравлической нагрузке?
4. Как определяется площадь песковых площадок?
5. Опишите принцип расчета тангенциальной песколовки.

Практическая работа 5

Расчет аккумулирующей емкости для очистки сточных вод

Цели работы: ознакомиться с методикой и рассчитать параметры аккумулирующей емкости для очистки сточных вод.

Основные теоретические сведения

Нормы проектирования для вновь строящихся и реконструируемых систем наружной канализации постоянного назначения городских и близких к ним по составу производственных сточных вод, а также дождевой канализации устанавливает СП 32.13330.2012 «Канализация. Наружные сети и сооружения. Актуализированная редакция СНиП 2.04.03-85» [6].

При накоплении стока в аккумулирующей емкости происходит усреднение его состава, а при последующем выдерживании перед опорожнением – удаление из стока основной массы нерастворенных примесей.

Годовое количество дождевых w_d и талых w_t вод, м³, стекающих с 1 га площади водосбора, определяется по формулам:

$$w_d = 10 \cdot h_d \cdot \psi_d; \quad (2.17)$$

$$w_t = 10 \cdot h_t \cdot \psi_t, \quad (2.18)$$

где h_d – слой осадков за теплый период года, мм; h_t – слой осадков за холодный период года (определяет общее годовое количество талых вод) или запас воды в снежном покрове к началу снеготаяния (определяет количество талых вод в весеннее половодье), мм; ψ_d , ψ_t – общие коэффициенты стока дождевых и талых вод соответственно. Значение $\psi_t = 0,5 \dots 0,7$, а ψ_d определяется как средневзвешенная величина для всей площади водосбора с учетом средних значений коэффициентов стока для различного рода поверхности (последние могут приниматься для водонепроницаемых покрытий в пределах 0,6...0,8, для грунтовых поверхностей 0,2, для газонов 0,1).

Рабочий объем аккумулирующей емкости W_d , м³, для однократного дождевого стока определяется по формуле

$$W_d = 10 \cdot h_d \cdot \psi_d \cdot F, \quad (2.19)$$

где h_d – максимальный слой осадков за один дождь, стекающих с 1 га площади водосбора, мм, сток от которого аккумулируется

в полном объеме, для промпредприятий первой группы принимается $h_d = 10...15$ мм, а для промпредприятий второй группы равен среднему суточному максимуму осадков; ψ_d — общий коэффициент стока дождевых вод, $\psi_d = 0,1...0,8$; F — площадь предприятия, га.

Аналогично (согласно (5.2) и (5.3) определяется рабочий объем аккумулирующей емкости для однократного талого стока, величины $h_T = 25...30$ мм, $\psi_T = 0,5...0,7$.

Общее количество поливомоечных вод W_M , м³, стекающих с территории промплощадок за период отстаивания (1...2 суток), определяется по формуле

$$W_M = 10 \cdot m \cdot k \cdot F_M \cdot \psi_M, \quad (2.20)$$

где m — расход воды на одну мойку дорожных покрытий, $m = 1,2...1,5$ л/м²; ψ_M — коэффициент стока (может быть принят 0,5); k — среднее количество моек за период отстаивания; F_M — площадь покрытий, подвергающихся мокрой уборке, га.

Средняя продолжительность сухой погоды при слое осадков ≥ 5 мм составляет до 10 суток.

В зависимости от состава примесей, накапливающихся на территории промплощадок и смываемых поверхностным стоком, промышленные предприятия и отдельные его участки можно разделить на две группы.

К первой группе относятся предприятия черной металлургии (за исключением коксохимпроизводства), машино- и приборостроительной, электротехнической, угольной, нефтяной, легкой, хлебопродуктовой, молочной, пищевой промышленности, серной и содовой подотраслей химической промышленности, энергетики, автотранспортные предприятия, речные порты, ремонтные заводы, а также отдельные производства нефтеперерабатывающих, нефтехимических и химических предприятий, на территорию которых не попадают специфические загрязнения.

Средние концентрации основных примесей в стоке дождевых вод на этих предприятиях могут быть приняты:

— по взвешенным веществам 500...2000 мг/л, при этом более высокие значения относятся к предприятиям с интенсивным движением автотранспорта;

- по нефтепродуктам 30...70 мг/л для предприятий с интенсивным движением автотранспорта и значительным потреблением горюче-смазочных материалов и 10...30 мг/л для остальных (исключение составляют предприятия нефтяной промышленности, где содержание нефтепродуктов в поверхностном стоке может достигать 0,5 г/л за счет сброса совместно с атмосферными водами некоторых видов производственных сточных вод);
- по ХПК и БПК 100...150 мг/л и 20...30 мг/л соответственно в пересчете на растворенные примеси, а с учетом диспергированных примесей эти показатели увеличиваются в 2...3 раза;
- по общему содержанию в основном 0,2...0,5 г/л, а на предприятиях химической промышленности (содовых и серных) 0,5...3 мг/л.

Ко второй группе относятся предприятия цветной металлургии, коксохимии, химической, лесохимической, целлюлозно-бумажной, нефтеперерабатывающей, нефтехимической и микробиологической промышленности, кожсырьевые и кожевенные заводы, мясокомбинаты, шпалопиточные заводы.

В поверхностном стоке предприятия второй группы, помимо примесей, перечисленных в первой группе, могут присутствовать также примеси, специфические для данного производства.

Высоту зоны отстаивания в емкости следует принимать в пределах 1,5...4 м, высоту свободной зоны над уровнем воды 0,3...0,5 м, высоту нейтральной зоны над уровнем осадка 0,4...0,5 м.

Секции аккумулирующей емкости должны быть оборудованы устройствами для периодического удаления всплывших нефтепродуктов и осадка.

При проектировании нефтесгонных и нефтесборных устройств следует учитывать периодическое колебание уровня заполнения секций ниже расчетного.

Иловые приямки в аккумулирующей емкости рекомендуется располагать в средней части. Уклон днища к приямкам и поперечный уклон дна следует принимать не менее 0,05, а уклон стенок приямка не менее 450. Для удаления осадка с площади днища в приямок следует предусматривать гидросмыв. Объем иловой части емкости определяется из заданной периодичности удаления осадка.

Для периодического удаления накапливающегося осадка из аккумулирующей емкости следует предусмотреть устройство гидроэлеваторной установки или насосной станции, оборудованной плунжерными или вторыми насосами, предназначенными для перекачки шламов с высоким содержанием механических примесей.

Для обезвоживания осадка рекомендуется применять выдерживание его на иловых площадках или на площадках-уплотнителях, нагрузка на площадки обезвоживания может принята равной 3 м^3 на 1 м^2 в год. Площадки следует разделить на карты, оборудованные выпускными устройствами для отвода иловой воды.

На основании данных о средней продолжительности периодов между стокообразующими осадками, продолжительность отстаивания стока в аккумулирующей емкости может быть принята равной 1...2 суткам. В таких же пределах может быть принята и продолжительность отвода осветленной воды.

При продолжительности отстаивания 1...2 суток эффект снижения содержания взвешенных веществ и показателя ХПК в аккумулирующей емкости колеблется в основном в пределах 80...90 %, а показатели БПК в пределах 60...80 %. Остаточное содержание взвешенных веществ в отстоянной воде ориентировочно может быть принято в пределах 50...200 мг/л, нефтепродуктов 0,5...5 мг/л, а органических примесей 50...100 мг/л в пересчете на ХПК и 20...30 мг/л в пересчете на БПК.

При известном часовом расходе ($\text{м}^3/\text{ч}$) поверхностных сточных вод расчет ведется следующим образом.

Определяется количество поверхностного стока $W_{\text{п}}$, м^3 , которое может поступить за сутки (24 часа):

$$W_{\text{п}} = 24Q, \quad (2.21)$$

где Q – расход поверхностных сточных вод, $\text{м}^3/\text{ч}$.

Согласно справочным данным, средняя продолжительность сухой погоды между дождями слоем ≥ 1 мм около 3,5 суток, а слоем ≥ 5 мм – до 10 суток. Для расчета принимаем продолжительность сухой погоды исходя из слоя дождя.

Аккумулирующие емкости рекомендуется проектировать прямоугольными в плане, разделенными на секции. Полезный объем

одной секции следует рассчитывать на прием стока от слоя осадков 2,5...5 мм.

Рабочий объем секции:

$$W_{\text{секции}} = L \cdot B_c \cdot H, \quad (2.22)$$

где H – рабочая высота секции, равна 1,5...4 м; B_c – ширина секции, может быть принята кратная 3 м; L – длина секции, принимается из объема сооружения, м. Количество секций должно быть не менее двух.

Объем секции при приеме стока от слоя осадка, например, 2,5 мм при расчетном слое осадков 15 мм составит соответственно одну шестую от рабочего объема аккумулирующей емкости, т. е. количество секций при этом составит – шесть, что, согласно нормативным данным, приемлемо:

$$L = W_a / 6 \cdot H \cdot B. \quad (2.23)$$

При определении объема аккумулирующей емкости необходимо учитывать накопление осадка и свободный объем:

$$W_a = W_{\text{п}} + W_o + W_c, \quad (2.24)$$

где W_a – общий объем аккумулирующей емкости, м³; $W_{\text{п}}$ – общий объем поверхностного стока, м³; W_c – свободный объем ($\approx 10...12\%$ от $W_{\text{п}}$); W_o – объем накопленного осадка

$$W_o = \frac{W_{\text{п год}} (C_o - C_{\text{оч}}) \cdot t}{(100 - b) \cdot \gamma \cdot 10^4}, \quad (2.25)$$

где C_o , $C_{\text{оч}}$ – концентрации взвешенных веществ в исходной и очищенной воде, мг/л; t – период накопления осадка, лет; b – влажность осадка, (50...60 %); γ – плотность осадка, (2...2,2 г/см³); $W_{\text{п год}}$ – общий годовой объем поверхностного стока, м³/год.

Пример расчета

Рассчитать размеры аккумулирующей емкости для очистки сточных вод, если известно, что

- площадь электротехнического предприятия составляет 120 га;
- общий коэффициент стока дождевых вод $\psi_d = 0,5$;
- площадь покрытий, подвергающихся мокрой уборке, $F_m = 60$ га;
- среднее количество моек $k = 2$;

- концентрация взвешенных веществ в исходной воде $C_o = 600$ мг/л;
- концентрация взвешенных веществ в очищенной воде $C_{оч} = 80$ мг/л.

Рабочий объем аккумулирующей емкости для однократного дождевого стока определяется по формуле (2.19):

$$W_d = 10 \cdot 10 \cdot 0,5 \cdot 120 = 6000 \text{ м}^3.$$

Аналогично вычисляется рабочий объем аккумулирующей емкости для талого стока:

$$W_T = 10 \cdot 25 \cdot 0,6 \cdot 120 = 18000 \text{ м}^3.$$

Общее количество поливомоечных вод (2.20)

$$W_M = 10 \cdot 1,3 \cdot 2 \cdot 60 \cdot 0,5 = 780 \text{ м}^3.$$

Общий объем поверхностного стока будет равен

$$W_{п} = 6000 + 18000 + 780 = 24780 \text{ м}^3.$$

Общий годовой объем поверхностного стока с учетом количества сухих дней в году до 10 суток определится как

$$W_{п \text{ год}} = 24780 \cdot 36,5 = 904470 \text{ м}^3/\text{год}.$$

Объем осадка определится из (2.25)

$$W_0 = \frac{904470(600 - 80) \cdot 2}{(100 - 50) \cdot 2,1 \cdot 10^4} = 895,9 \text{ м}^3.$$

Объем аккумулирующей емкости, следовательно, будет

$$W_a = 24780 + 895,9 + 0,1 \cdot 24780 = 28153,9 \text{ м}^3.$$

Количество секций на прием стока от слоя осадков 2,5 мм при принятом слое осадков $h_d = 10$ мм принимаем равным 4.

Рабочий объем секции составит:

$$W_{\text{секции}} = 28153,9/4 = 7038,48 \text{ м}^3.$$

Ширину секции принимаем из условия кратности 3 – $B_c = 60$ м. Согласно требованиям рабочая высота секции $H = 1,5 \dots 4$ м, принимаем $H = 1,5$ м.

Длина секции (из 2.22) равна

$$L = 2,5 \cdot 28153,9/10 \cdot 1,5 \cdot 60 = 78,205 \text{ м}.$$

Таким образом, аккумулирующая емкость будет состоять из 4 секций, ее размеры примем из условия кратности трем: $81 \times 60 \times 1,5$ м, что составит больший объем, чем расчетный $W_{\text{секции}} = 7038,48 \text{ м}^3$.

Алгоритм выполнения практической работы

1. Изучить теоретические сведения по методике расчета аккумулирующей емкости для очистки сточных вод, представленные в указаниях к данной работе.
2. Выбрать вариант задания к работе (табл. 2.3).
3. Произвести необходимые расчеты.
4. Составить отчет по практической работе в соответствии с требованиями (прил. А).
5. Ответить на вопросы для самоконтроля.

Вопросы для самоконтроля

1. Какие функции выполняет аккумулирующая емкость?
2. От каких величин зависит объем аккумулирующей емкости?
3. На какие группы делятся промышленные предприятия?
4. Какой документ устанавливает нормы проектирования для систем наружной канализации?

Таблица 2.3

Варианты заданий

№ варианта	Площадь предприятия F , га	Площадь предприятия, подвергающаяся мокрой уборке F_m , га	Отрасль предприятия	Общий коэффициент стока дождевых вод ψ_d	Концентрации взвешенных веществ в исходной воде C_0 , мг/л	Концентрации взвешенных веществ в очищенной воде $C_{от}$, мг/л	Период накопления осадка t , лет	Среднее количество моек в год
1	50	30	Черная металлургия	0,1	500	60	2	2
2	60	30	Машиностроение	0,2	600	70	3	3
3	70	40	Пищевая промышл.	0,3	700	80	4	4
4	80	40	Автотранспорт	0,4	800	90	5	5
5	90	45	Нефтепереработка	0,5	900	100	2	2

№ варианта	Площадь предприятия F , га	Площадь предприятия, подвергающаяся мокрой уборке F_m , га	Отрасль предприятия	Общий коэффициент стока дождевых вод ψ_d	Концентрации взвешен- ных веществ в исходной воде C_0 , мг/л	Концентрации взвешен- ных веществ в очищен- ной воде $C_{от}$, мг/л	Период накопления осадка t , лет	Среднее количество моек в год
6	100	50	Цветная метал- лургия	0,6	1000	110	3	3
7	110	60	Химия	0,7	1100	120	4	4
8	120	60	Микробио- логия	0,8	1200	130	5	5
9	130	65	Черная метал- лургия	0,1	1300	140	2	3
10	140	70	Машино- строение	0,2	1400	150	3	4
11	150	80	Пищевая промышл.	0,3	1500	160	4	5
12	50	25	Автотранс- порт	0,4	1600	170	5	2
13	60	35	Нефтепере- работка	0,5	1700	180	2	3
14	70	40	Цветная метал- лургия	0,6	1800	190	3	4
15	80	50	Химия	0,7	1900	200	4	5
16	90	40	Микробио- логия	0,8	2000	200	5	4
17	100	45	Черная метал- лургия	0,1	500	60	2	5
18	110	50	Машино- строение	0,2	600	70	3	2
19	120	50	Пищевая промышл.	0,3	700	80	4	3
20	130	60	Автотранс- порт	0,4	800	90	5	4
21	140	65	Нефтепере- работка	0,5	900	100	2	5
22	150	80	Цветная метал- лургия	0,6	1000	110	3	2
23	50	30	Химия	0,7	1100	120	4	3

№ варианта	Площадь предприятия F , га	Площадь предприятия, подвергающаяся мокрой уборке F_M , га	Отрасль предприятия	Общий коэффициент стока дождевых вод Ψ_d	Концентрации взвешенных веществ в исходной воде C_0 , мг/л	Концентрации взвешенных веществ в очищенной воде $C_{от}$, мг/л	Период накопления осадка t , лет	Среднее количество моек в год
24	60	30	Микробиология	0,8	1200	130	5	4
25	70	45	Черная металлургия	0,1	1300	140	2	5
26	80	35	Машиностроение	0,2	1400	150	3	2
27	90	40	Пищевая промышл.	0,3	1500	160	4	3
28	100	45	Автотранспорт	0,4	1600	170	5	4
29	110	50	Нефтепереработка	0,5	1700	180	2	5
30	120	50	Цветная металлургия	0,6	1800	190	3	2
31	130	60	Химия	0,7	1900	200	4	3
32	140	65	Микробиология	0,8	2000	200	5	4
33	150	70	Черная металлургия	0,1	500	60	2	5
34	50	20	Машиностроение	0,2	600	70	3	2
35	60	25	Пищевая промышл.	0,3	700	80	4	3
36	70	30	Автотранспорт	0,4	800	90	5	4
37	80	35	Нефтепереработка	0,5	900	100	2	5
38	90	40	Цветная металлургия	0,6	1000	110	3	2
39	100	45	Химия	0,7	1100	120	4	3
40	110	45	Микробиология	0,8	1200	130	5	4

№ варианта	Площадь предприятия F , га	Площадь предприятия, подвергающаяся мокрой уборке F_M , га	Отрасль предприятия	Общий коэффициент стока дождевых вод ψ_d	Концентрации взвешен- ных веществ в исходной воде C_0 , мг/л	Концентрации взвешен- ных веществ в очищен- ной воде $C_{от}$, мг/л	Период накопления осадка t , лет	Среднее количество моек в год
41	120	50	Черная ме- таллургия	0,1	1300	140	2	5
42	130	60	Машино- строение	0,2	1400	150	3	2
43	140	60	Пищевая промышл.	0,3	1500	160	4	3
44	150	65	Автотранс- порт	0,4	1600	170	5	4
45	50	20	Нефтепере- работка	0,5	1700	180	2	5
46	60	25	Цветная ме- таллургия	0,6	1800	190	3	2
47	70	30	Химия	0,7	1900	200	4	3
48	80	35	Микробио- логия	0,8	2000	200	5	4
49	90	40	Пищевая промышл.	0,4	600	80	2	5
50	100	45	Автотранс- порт	0,5	700	90	3	4

Модуль III. РАСЧЕТ И ПРОЕКТИРОВАНИЕ СИСТЕМ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ОБЪЕКТОВ ЛИТОСФЕРЫ

3.1. Классификация промышленных отходов и методы защиты литосферы

Отходы производства и потребления – вещества или предметы, которые образованы в процессе производства, выполнения работ, оказания услуг или в процессе потребления, которые удаляются или подлежат удалению в соответствии с законодательством Российской Федерации.

Порядок обращения с отходами регламентирован Федеральным законом Российской Федерации № 89-ФЗ «Об отходах производства и потребления» (в посл. редакции).

В соответствии с названным законом, обращение с отходами – деятельность по сбору, накоплению, транспортированию, обработке, утилизации, обезвреживанию и размещению отходов.

Рассмотрим основные понятия данного определения.

Сбор отходов – прием или поступление отходов от физических и юридических лиц в целях дальнейшей обработки, утилизации, обезвреживания, транспортирования, размещения таких отходов.

Накопление отходов – временное складирование отходов на срок не более чем шесть месяцев, в местах, обустроенных в соответствии с требованиями законодательства Российской Федерации.

Транспортирование отходов – перемещение отходов с помощью транспортных средств вне границ земельного участка, находящегося в собственности юридического лица или индивидуального предпринимателя либо предоставленного им на иных правах.

Обработка отходов – предварительная подготовка отходов к дальнейшей утилизации, включая их сортировку, разборку, очистку.

Утилизация отходов – использование отходов для производства продукции, выполнения работ, оказания услуг, включая их повторное применение. Повторное применение отходов может осуществляться по прямому назначению – рециклинг, с возвратом в производственный цикл после регенерации, а также с извлечением – рекуперацией – полезных компонентов для их повторного применения.

Обезвреживание отходов – уменьшение массы отходов, изменение их состава, физических и химических свойств в целях снижения негативного воздействия отходов на здоровье человека и окружающую среду.

Размещение отходов – это их хранение и захоронение.

Хранение отходов – складирование отходов в специализированных объектах сроком более чем одиннадцать месяцев в целях утилизации, обезвреживания, захоронения.

Захоронение отходов – изоляция отходов, не подлежащих дальнейшей утилизации, в специальных хранилищах в целях предотвращения попадания вредных веществ в окружающую среду.

Объекты размещения отходов – специально оборудованные сооружения, предназначенные для размещения отходов и включающие объекты хранения и захоронения отходов. К сооружениям для размещения отходов относятся полигоны, шламохранилища, отвалы горных пород и др.

Классификация промышленных отходов (ПО), образующихся в результате производственной деятельности человека, необходима как средство установления определенных связей между ними с целью определения оптимальных путей использования или обезвреживания отходов.

Классификация отходов возможна по разным показателям, но самым главным из них является степень опасности для здоровья человека.

Вредными отходами, например, считаются инфекционные, токсичные и радиоактивные. Их сбор и ликвидация регламентируются специальными санитарными правилами.

Согласно вышеназванному федеральному закону, отходы в зависимости от степени негативного воздействия на окружающую среду подразделяются на пять классов опасности:

- 1 класс – чрезвычайно опасные;
- 2 класс – высокоопасные;
- 3 класс – умеренно опасные;
- 4 класс – малоопасные;
- 5 класс – неопасные.

Принадлежность к классу опасности иных по химическому составу отходов можно определить расчетным методом по ПДК для данного химического вещества в почве, пользуясь математической формулой и справочной литературой.

Отходы производства и потребления подлежат сбору, накоплению, транспортированию, обработке, утилизации, обезвреживанию, размещению, условия и способы которых должны быть безопасными для здоровья населения и среды обитания. Указанные процессы должны осуществляться в соответствии с санитарными правилами и иными нормативными правовыми актами Российской Федерации.

Защита литосферы включает не только утилизацию отходов путем их размещения на полигонах и свалках, но и переработку жидких и твердых отходов с использованием различных методов.

Механическое обезвреживание осадков промышленных стоков может производиться экстенсивными и интенсивными методами. Экстенсивные методы осуществляются в различного рода уплотнителях, интенсивное обезвреживание и сгущение производится при помощи фильтрования, центрифугирования, гидроциклонирования и т. п.

В практике обработки осадков промышленных сточных вод чаще всего применяются химические (реагентные) методы обработки. При использовании термоокислительного метода все органические вещества, загрязняющие сточные воды, полностью окисляются кислородом воздуха при высоких температурах до нетоксичных соединений. К этим методам относят метод *жидкофазного окисления*, *метод парофазного каталитического окисления* и *пламенный или «огневой» метод*.

Переработка твердых и опасных отходов осуществляется по разным технологиям: физико-химическим, термическим и биотехнологиям.

Многие процессы утилизации твердых отходов основаны на использовании методов выщелачивания (экстрагирования), растворения и кристаллизации перерабатываемых материалов.

В практике рекуперации твердых отходов промышленности используют методы обогащения перерабатываемых материалов: гравитационные, магнитные, электрические, флотационные и специальные.

3.2. Термические методы обработки твердых отходов

При утилизации и переработке твердых отходов используют различные методы термической обработки исходных твердых материалов и полученных продуктов — это различные приемы пиролиза, переплава, обжига и огневого обезвреживания (сжигания) многих видов твердых отходов на органической основе.

Термические технологии применимы для утилизации многих видов твердых, растворимых, жидких и газообразных отходов. Их суть заключается в термической обработке отходов высокотемпературным теплоносителем контактным или бесконтактным методом. Теплоносителем могут быть продукты сгорания топлива: плазменная струя, расплав металла или окисла, нагрев отходов. Продукты терморазложения подвергаются окислению, другим химическим взаимодействиям с образованием нетоксичных газообразных, жидких и твердых продуктов.

3.2.1. Сушка влажных материалов

Сушка или выпаривание представляет собой процесс удаления влаги из твердого или пастообразного материала путем испарения содержащейся в нем жидкости за счет подведенного к материалу тепла.

Сушка широко применяется в химической, химико-фармацевтической, пищевой и других отраслях промышленности. Относительно широкое распространение сушка получила в области обработки осадка городских сточных вод (барабанные сушилки, сушка во встречных струях). Процессы термического удаления той части влаги, которую невозможно удалить механическим путем, могут также найти применение при обработке ПО, которые необходимо подготовить к транспортированию и дальнейшей переработке (например, гальванические шламы), а также при обработке некоторых отходов химической, пищевой и других отраслей промышленности.

Сушка и выпаривание — это термические тепломассообменные процессы, требующие значительных затрат тепла. Они осуществляются конвективным, контактным, радиационным и комбинированными способами.

Контактная сушка — это нагрев влажных материалов теплоносителем через твердую непроницаемую перегородку.

Конвективная или газовая сушка — нагрев влажных материалов путем непосредственного контакта с газовым теплоносителем.

Радиационная сушка — нагрев инфракрасными лучами; диэлектрическая — нагрев высокочастотным полем.

Способ сушки выбирают на основе технологических требований к высушиваемому продукту и с учетом технико-экономических показателей.

По мере удаления влаги с поверхности материала за счет разности концентрации влаги внутри материала и на его поверхности происходит движение влаги к поверхности путем диффузии. В некоторых случаях имеет место так называемая термодиффузия, когда движение влаги внутри материала происходит за счет уменьшения разности температур на поверхности и внутри материала. При конвективной сушке оба процесса имеют противоположное направление, а при сушке токами высокой частоты — одинаковое.

Удаление влаги с поверхности тесно связано с продвижением ее изнутри к поверхности. Сушка отличается от выпаривания тем, что в первом случае удаление влаги происходит при любой температуре, во втором — давление образующихся паров равно давлению окружающей среды. Например, кипение воды происходит при давлении, равном барометрическому. Выпаривание происходит из всей массы жидкости, при сушке же влага удаляется с поверхности высушиваемого материала. Выпаривание — более интенсивный процесс, чем сушка, однако не все материалы можно подвергать выпариванию. Так, влага из твердых материалов удаляется только тепловой сушкой.

3.2.2. Пиролиз и газификация

Пиролиз представляет собой процесс разложения органических соединений под действием высоких температур при отсутствии или недостатке кислорода. Характеризуется протеканием реакций взаимодействия и уплотнения остаточных фрагментов, исходных молекул.

В результате пиролиза происходит расщепление органической массы, рекомбинация продуктов расщепления с получением термодинамически стабильных веществ: твердого остатка, смолы, газа.

Применяя термин «пиролиз» к термическому преобразованию органического материала, подразумевают не только его распад, но и синтез новых продуктов. Эти стадии процесса взаимосвязаны и протекают одновременно с тем лишь различием, что каждая из них преобладает в определенном интервале температуры или времени.

Пиролиз — один из наименее требовательных к исходному сырью и наиболее доступных в финансовом плане методов. Пиролизу подвергаются твердые бытовые и близкие к ним по составу промышленные отходы, отходы пластмасс, резины, другие органические отходы.

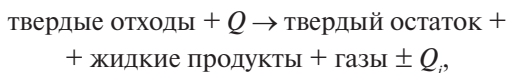
Анализ перспективного опыта по плазменному пиролизу твердых бытовых отходов позволяет сформулировать некоторые его основные принципы [1]. Во-первых, взаимодействие плазменного теплоносителя с твердыми бытовыми отходами должно протекать в противотоке: сверху в реактор загружают твердые бытовые отходы, снизу подают распределенный по сечению реактора поток плазмы. При таком режиме работы в нижней зоне реактора происходит пиролиз твердых бытовых отходов, в верхней — сушка. Во-вторых, для повышения теплопроводности сырья и удержания его в объеме плазменного реактора твердых бытовых отходов следует предварительно брикетировать. В-третьих, энергозатраты плазменного процесса достаточно велики. В качестве энергоносителя на первой стадии используется сжатый азот. В дальнейшем азот выдавливается из смеси с пиролизными газами и возвращается на питание плазмотронов. Пиролизные газы после соответствующей очистки сжигаются в газовой турбине; генерированная при этом электроэнергия возвращается во внешнюю электросеть или используется на месте.

Другим направлением термических технологий является безокислительный пиролиз. Безокислительный пиролиз — это процесс термического разложения органических соединений без доступа кислорода, протекающий при относительно низких температурах по сравнению с обычными процессами горения.

Преимущества пиролизных методов заключаются в возможности получения технологического газа, а в ряде случаев — минерального продукта. При этом использование полученного газа для технических и бытовых целей, значительное уменьшение твердого

остатка характеризуют достаточную экологическую чистоту и безопасность процесса.

Общую схему пиролиза можно представить следующим образом:



где Q — дополнительное тепло; Q_i — вторичное тепло.

Следует отличать пиролиз от близкого к нему процесса газификации. Газификация является термохимическим высокотемпературным процессом взаимодействия органической массы или продуктов ее термической переработки с газифицирующими агентами, в результате чего органическая масса или продукты ее термической переработки обращаются в горючие газы. В качестве газифицирующих агентов применяют воздух, кислород, водяной пар, диоксид углерода, а также их смеси.

Процессы пиролиза отходов получили большее распространение, чем газификация.

3.2.3. Метод термического разложения и сжигание ТБО

Сжигание требует предварительной обработки твердых бытовых отходов. При разделении из твердых бытовых отходов стараются удалить крупные объекты, металлы и дополнительно их измельчить. Для того чтобы уменьшить вредные выбросы из отходов, также извлекают батарейки и аккумуляторы, пластик, листья. Сжигание неразделенного потока отходов в настоящее время считается чрезвычайно опасным. Таким образом, мусоросжигание может быть только одним из компонентов комплексной программы утилизации.

Для сжигания бытового мусора традиционно применяются решетчатые печи. Сжигание производится при температуре около 850 °С. Каждая из ступеней лестницы-решетки подвижна в горизонтальном и вертикальном направлениях, чем обеспечивается переворачивание отходов, возможность притока кислорода, а также продвижение массы отходов вниз по решетке. Оставшиеся при сжигании шлаки после охлаждения и ряда подготовительных операций утилизируются, например, в дорожном строительстве. Отработанные газы после утилизации тепла проходят пылеочистку с последу-

ющей двухступенчатой мокрой очисткой известковым молоком и доочисткой. Пыль из фильтров и котельный пепел организованно размещаются на полигонах вследствие высокого содержания в них токсичных веществ.

При высокой температуре (1500...1700 °С) в электродуговой печи в результате интенсивного разложения горючих составляющих ТБО образуются коксовый остаток и газ, содержащий в основном водород и оксид углерода. Минеральная часть — главным образом силикаты и металлы — плавится и разделяется на металл и шлак. Оксид железа, содержащийся в шлаке, вступает в реакцию с коксовым остатком, восстанавливается до металла и образует оксид углерода. Восстановившийся металл непрерывно отделяется от шлака. Полученный расплав состоит в основном из железа, других металлов и кремния. Состав этой массы и количество электроэнергии, необходимое для ее получения, зависят от количества и состава исходных материалов. Для нормального протекания процесса необходимо регулировать подачу отходов в печь. В небольших печах отходы следует предварительно измельчать. Шлаковый покров должен постоянно перемешиваться с поступающими холодными отходами, что достигается вращением мусороприемника печи.

Способ разложения отходов в электродуговой печи имеет ряд преимуществ по сравнению с распространенными способами обезвреживания: цикл процесса замкнут; процесс является безотходным; при переплавке отходов полностью разрушаются все органические соединения, уничтожается болезнетворная микрофлора; продукты, полученные при сжигании газа, содержат меньше вредных примесей, чем газы мусоросжигательных установок.

В целом сжигание позволяет уменьшить вес и объем отходов в 3...10 раз и снижает загрязнение отходами воды и почвы. Сжигание позволяет также устранить некоторые неприятные свойства: запах, выделение токсичных жидкостей, бактерий, привлекательность для птиц и грызунов, а также получить дополнительную энергию, которую можно использовать для получения электричества или отопления. Однако оно заодно уничтожает ценные компоненты, загрязняет атмосферу и дает достаточно много (до 25 %) золошлаковых отходов, которые затем подлежат захоронению на полигонах.

Сжигание требует предварительной обработки ТБО. При разделении из ТБО стараются удалить крупные объекты, металлы (как магнитные, так и немагнитные) и дополнительно их измельчить. Для того чтобы уменьшить вредные выбросы из отходов, также извлекают батарейки и аккумуляторы, пластик, листья. Сжигание неразделенного потока отходов в настоящее время считается чрезвычайно опасным. Таким образом, мусоросжигание может быть только одним из компонентов комплексной программы утилизации.

Сжигание отходов в развитых странах производится в системах с тремя наиболее распространенными типами печей: решетчатыми печами, вращающимися барабанными печами и печами кипящего слоя.

Термоселект не требует никакой предварительной сортировки отходов и позволяет устранять многие виды особых отходов, сочетая эти достоинства с довольно доступной ценой. Мусор подается на гидравлический пресс. Далее спрессованные отходы и отжатая из них вода попадают в горизонтальный канал. Объем спрессованных отходов очень мал, за счет чего достигается хорошая теплопроводность массы отходов. Это обеспечивает полный контакт со стенками канала, который снаружи обогревается до достижения температуры стенок около 600 °С. Органическая составляющая отходов разлагается на оксид углерода, углекислый газ, водород, смесь простейших углеводородов и твердый углерод. Неорганическая часть мусора нагревается до 600 °С. Брикетты, содержащие из органики один углерод, а также образовавшиеся в канале газообразные продукты реакций разложения, обрабатывают при 500 °С и давлении 200...400 бар. Время превращения — от 15 минут до нескольких часов в зависимости от состава исходного сырья. В результате образуются газовая фаза, масляная фракция и твердый негидрирующийся осадок, включающий и неорганические примеси, содержащиеся в отходах. Даже в случае когда эта фаза не может быть подвергнута утилизации, требуемый объем на захоронение сокращается на 90 % по сравнению с необработанными органическими отходами. Стоимость данного метода довольно высока, но она частично компенсируется доходом от реализации полученных продуктов.

3.2.4. Метод паротермической деструкции

Перспективность метода паротермической деструкции заключается в возможности создания на основе данного метода высокоэффективных технологий переработки различного рода органических отходов, таких как пластмасса, автомобильные покрышки, осадки сточных вод и пр.

Процесс паротермической утилизации пластмассовых отходов происходит следующим образом. В реактор подаются пластмассовые отходы. Одновременно через пароперегреватель в реактор подается перегретый пар, который проходит через слой дисперсного материала и отходы. Контактруя с паром и дисперсным материалом, отходы нагреваются и расплавляются. Под действием тепла происходит разложение отходов с образованием газообразных продуктов, которые смешиваются с потоком пара и увлекаются им на выход из реактора. Смесь газообразных продуктов и водяного пара подается в холодильник. В результате охлаждения смеси образуется конденсат и несконденсировавшийся газ.

При паротермической деструкции автомобильных покрышек в реактор подается исходный продукт переработки. Одновременно от парогенератора в реактор подается перегретый пар. Пар, проходя через отходы покрышек, нагревает и расплавляет их. Температура пара и нагрева отходов контролируется. Смесь газообразных продуктов разложения и водяного пара поступает в холодильник. Газ подается в топку парогенератора. Конденсат пара возвращается в парогенератор. Жидкая фракция насосом закачивается в накопительную емкость. Углесодержащий остаток отделяется от металлокорда. Твердые фракции транспортером подаются на склад. Металлокорд прессуется в брикеты.

Вся система технологического оборудования соединена герметично, что исключает выход в атмосферу продуктов разложения. Загрузка сырья производится через два шлюзовых устройства, которые открываются и закрываются поочередно. Это исключает выход продуктов разложения в верхней части камеры.

Все технологические процессы загрузки сырья, выгрузки и перекачки продуктов автоматизированы. Поддерживаются также технологические параметры подачи пара, воды, температуры и давления.

Метод паротермической деструкции представляется перспективным в следующих направлениях:

- создание эффективных экологически чистых технологий термической переработки различных органических отходов в твердое, жидкое или газообразное топливо;
- концентрирование продуктов разложения и доведение их содержания в конечном продукте практически до 100 %;
- возможность перерабатывать по данному методу пластмассы, продуктами разложения которых являются хлористый водород и сернистые соединения;
- простота в осуществлении рециркуляции теплоносителя;
- получение исходных продуктов, которые могут быть использованы в качестве сырья для производства пластмасс;
- высокая экономичность процесса, которая достигается как за счет рециркуляции теплоносителя, так и за счет получения ценного химического сырья;
- отсутствие вредных выбросов в окружающую среду, поскольку все вредные вещества растворяются в конденсате и могут быть достаточно просто обезврежены в растворе;
- высокая взрывопожаробезопасность процесса, обусловленная использованием водяного пара.

3.2.5. Высокотемпературные методы окускования

В целях рационального использования отходов в виде шламов и пыли металлургии, глинозёмных заводов, сернокислотного производства, а также других видов мелких сыпучих материалов возникает необходимость их укрупнения или окускования.

Крупность продуктов, подлежащих окускованию, определяется особенностями технологии дальнейшей переработки или использования окускованного сырья.

В рекуперационной технологии твердых отходов распространены методы, связанные с укрупнением мелкодисперсных частиц, использующие низкотемпературные методы гранулирования, таблетирования, брикетирования и высокотемпературной агломерации, экструзии и другие.

Гранулирование – процесс формирования агрегатов шарообразной или цилиндрической формы из порошков, паст, расплавов или растворов перерабатываемых материалов.

Эти процессы основаны на различных приемах обработки: окатывание, прессование порошков, гранулирование расплавов или диспергирование, экструзия.

Способность гранулируемых материалов к уплотнению и формированию характеризуют значениями коэффициентов их гранулируемости:

$$K_1 = (\gamma/\gamma_0)P_{пл};$$

$$K_2 = \sigma/P_{пл},$$

где γ и γ_0 – текущая и исходная плотность гранулируемого материала, т/м³; σ – предел прочности гранул при сжатии, Па; $P_{пл}$ – давление уплотнения, Па.

Величины K_1 и K_2 позволяют обоснованно рекомендовать метод гранулирования для данного материала: чем больше значения K_1 и K_2 , тем меньшими усилиями обеспечивается заданная степень уплотнения материала.

В зависимости от исходного материала гранулирование производится со связующими веществами при средних давлениях и без связующих веществ при высоких давлениях. Кроме того, гранулирование может быть низкотемпературным и высокотемпературным.

Рассмотрим низкотемпературные методы гранулирования: окатывание, прессование и гранулирование в дисперсных потоках.

Гранулирование *окатыванием* осуществляется при послойном нанесении дисперсных частиц на исходные гранулы в присутствии жидкой фазы – связующего. Гранулирование порошкообразных материалов окатыванием наиболее часто проводят в ротационных и вибрационных грануляторах различных конструкций. Производительность аппаратов и характеристики гранул зависят от свойств исходных материалов, а также от технологических и конструктивных параметров оборудования. Например, от расхода порошков и связующих, температурного режима, частоты вращения и другого.

Схема прессования гранул, например, прокатывающими роликами выглядит следующим образом. В процессе прокатки сыпучее сырье запрессовывается в каналы матрицы вращающимися роликами.

После прохождения ролика над каналом в нем происходит уплотнение и продвижение очередной порции материала в свободный объем. Затем в канал поступает следующая порция сыпучего материала.

Отдельную группу грануляторов представляют *аппараты гранулирования порошков в дисперсных потоках*. Процесс в них основан на столкновении частиц порошка или порошка жидкой фазы в турбулизованном потоке циркулирующего в аппарате воздуха или газа. К этой группе процессов могут быть отнесены также различные процессы распылительной сушки суспензий и растворов.

Процесс прессования порошков в формах подразделяется на *брикетирование* и *таблетирование*. В целом отличие таблетирования от брикетирования связано с размером и формой получаемых «кусочков». При брикетировании получаемая форма — брикет, а при таблетировании получаемая форма — строго одинаковые по размеру цилиндры, таблетки.

При производстве из промышленных отходов некоторых адсорбентов, катализаторов и ряда других изделий порошковые материалы гранулируют с использованием таблеточных машин различных типов. Технологический процесс в этих машинах осуществляется автоматически и включает операции дозирования, прессования и выталкивания таблеток.

По виду привода таблеточные машины разделяют на гидравлические и механические — кривошипные и роторные.

Принцип действия большинства таких машин также основан на прессовании пуансонами дозируемых в матричные каналы порошков. Прессование — это процесс образования таблеток из гранулированного или порошкообразного материала под действием давления от 25 до 250 МПа.

Изготавливаемые таблетки характеризуются разнообразной формой: цилиндры, сферы, полусферы, диски, кольца, с диаметром поперечного сечения от 6 до 12 мм.

Брикетирование может быть как подготовительной, так и самостоятельной операцией в практике утилизации твердых отходов. На процесс брикетирования дисперсных материалов существенное влияние оказывают состав, влажность и крупность материала, температура, удельное давление и продолжительность прессования.

Необходимое удельное давление прессования обычно находится в обратной зависимости от влажности материала.

Для брикетирования используют прессы различных конструкций. Наибольшее распространение получили штемпельные прессы с давлением прессования до 120 МПа, а также вальцовые и кольцевые с давлением прессования около 200 МПа.

К достоинствам брикетирования можно отнести следующее:

- уплотненные отходы дают меньше фильтрата и газовых выбросов, что снижает вероятность возникновения пожаров;
- эффективнее используется площадь полигонов за счет снижения объема отходов;
- брикетирование древесных отходов – опилок и стружки – повышает их теплоту сгорания, брикеты затем используются в качестве топлива.

Различают высокотемпературные (агломерация, обжиг окатышей) и низкотемпературные (без обжига) методы окускования.

Агломерация представляет процесс высокотемпературного спекания подготовленной крошки в комки неправильной формы.

Высокотемпературная агломерация используется при переработке пылей, окалины, шламов в металлургических производствах, пиритных огарков и других дисперсных железосодержащих отходов.

Для проведения агломерации приготавливают шихту, включающую твердое топливо и компоненты руды или флюсы. Усредненную и увлажненную до 8 % шихту размещают в виде слоя определенной высоты на решетках движущихся обжиговых тележек агломерационной машины, покрытых слоем возвратного агломерата крупностью от 12 до 18 мм. Возвратный агломерат предотвращает спекание шихты с материалом тележек и прогар решеток. Воспламенение и нагрев шихты обеспечивают просасыванием через ее слой продуктов сжигания газообразного или жидкого топлива и воздуха. Процесс спекания минеральных компонентов шихты идет при горении твердого топлива в диапазоне от 1100 до 1600 °С. Мелкие зерна шихты нагреваются до температуры, при которой происходит их размягчение и частичное плавление. При этом зерна слипаются, последующее быстрое охлаждение приводит к их кристаллизации и образованию пористого, но довольно прочного кускового продукта, пригодного для металлургического передела.

Агломерация может применяться также для переработки и утилизации термопластичных отходов пластмасс. Рассмотрим один из видов используемого для этого оборудования. На первом этапе исходный материал при помощи ножа-гранулятора перерабатывается в так называемую «дробленку». Затем измельченный материал по пневматической линии поступает в промежуточную емкость. При помощи шнека с плавно регулируемой скоростью вращения материал равномерно подается в пласткомпактор. В пространстве между роторным и статорным дисками за счет фрикционного тепла происходит агломерация. После этого материал скатывается к краям дисков и подхватывается холодным воздушным потоком от подключенного вентилятора. Необходимый уровень температуры на дисках пласткомпактора поддерживается при помощи водного охлаждения, при этом контакт перерабатываемого материала с водой отсутствует. При помощи пневмотранспорта агломерат поступает на промежуточное охлаждение или напрямую в нож-гранулятор, который оборудован ситом с заданным диаметром отверстий. Здесь агломерированный материал режется на примерно равные фракции, но гранулы при этом получаются неправильной формы.

Обжиг окатышей проводят при окусковании железорудных мелкодисперсных концентратов с размером частиц менее 100 мкм. Материалы такой крупности хорошо окомковываются, особенно при введении в шихту 0,5...2,0 % пластичной связующей добавки – *бентонита* (особого сорта высококачественной глины). С целью получения офлюсованных окатышей в шихту вводят также необходимое количество известняка.

Экструзия – это образование гранул путем продавливания пластично-вязкой массы с помощью шнека через головку экструдера с последующим разрезанием или дроблением материала. Метод используют в основном для гранулирования отходов термопластов, каучуков и резиновых смесей.

Гранулирование расплавов индивидуальных солей ограничено в практике рекуперации твёрдых отходов. Гранулирование силикатных расплавов, напротив, широко используется при переработке шлаков в черной и ограничено в цветной металлургии, электро-термическом производстве фосфора. Данный процесс заключается

в нанесении расплава, истекающего в капельном режиме из диспергатора, на охлаждаемую поверхность гранулятора с последующим срезанием полученных гранул, их дополнительным высушиванием и кондиционированием. Среди диспергирующих устройств наиболее перспективными являются ротационные диспергаторы.

3.3. Биотехнологии

К числу наиболее перспективных технологий обезвреживания и переработки отходов относятся биотехнологии. Биотехнологическими методами целесообразно перерабатывать отходы сельского хозяйства, пищевой промышленности, лесопереработки, коммунального хозяйства и др.

Основной биотехнологий при переработке отходов являются биохимические процессы, в основе которых лежат каталитические ферментативные реакции биохимического превращения веществ в процессе жизнедеятельности микроорганизмов. Эти процессы характеризуются протеканием биохимических реакций и синтезом веществ на уровне живой клетки. Движущей силой этих процессов является энергетический уровень или потенциал живых организмов.

Основной недостаток биотехнологических методов – невысокая скорость протекания процессов. Важнейшей задачей при этом является подбор микроорганизмов, бактерий, грибов для переработки конкретных отходов или их композиций. Ведутся работы по ускорению роста бактерий в соответствующей среде и регулированию параметров среды с целью сокращения цикла переработки отходов.

Некоторые из биотехнологий мы рассмотрели при изучении систем обеспечения безопасности гидросферы. Что касается переработки твердых бытовых отходов, то основным из методов здесь является *компостирование* – технология переработки отходов, основанная на их естественном биоразложении.

Компостирование твердых бытовых отходов можно разделить на процессы аэробного компостирования в промышленных и полевых условиях и анаэробного компостирования.

Широко компостирование применяется для переработки отходов органического – прежде всего растительного – происхождения,

таких как листья, ветки и скошенная трава. Существуют разные технологии компостирования пищевых и твердых бытовых отходов.

Технологический процесс аэробного компостирования в промышленных условиях полностью механизирован и схематично показан на рис. 3.1.

Твердые бытовые отходы доставляются мусоровозами и разгружаются в приемные бункеры с днищами, выполненными в виде пластинчатых питателей. Из приемных бункеров отходы разгружают на ленточные конвейеры, по которым они направляются на первичную сортировку в сортировочный корпус, оснащенный грохотами, электромагнитными и аэродинамическими сепараторами.

Крупные некомпостируемые фракции, например картонные коробки, бумага, текстиль и прочее, ссыпают на конвейер и направляют в бункер балласта.

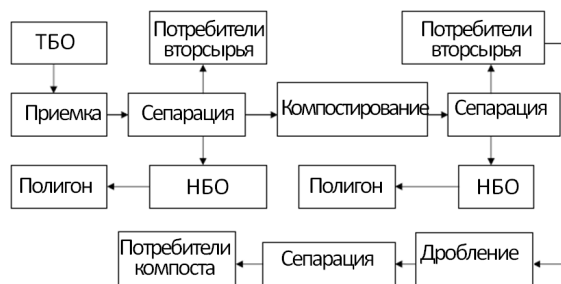


Рис. 3.1. Технологическая схема аэробного компостирования в промышленных условиях

Просеянный материал по конвейерам подается на технологическую линию, где проходит последовательно сепараторы черного, цветного металла и аэросепараторы, выделяющие легкие фракции – пленку и бумагу. Легкая фракция отправляется либо потребителю, либо на пиролиз.

Отсортированный черный металл конвейерами подается в бункер металла и далее на пресс. Цветной металл по конвейерам доставляется в бункеры-накопители.

Отсортированные отходы, предназначенные для компостирования, по конвейерам подают в загрузочные устройства биотермиче-

ских барабанов, где происходит биотермический процесс обезвреживания отходов аэробными микроорганизмами. Под действием микрофлоры быстро гниющие органические вещества разлагаются, образуя компост.

Разгружают биобарабаны на ленточные конвейеры, которые доставляют компост в сортировочный корпус для дополнительной очистки в баллистических стеклосепараторах с пневмоотсевом пленки и инерционных грохотах.

Отсортированный материал с помощью разделительной воронки помещается в различные отсеки.

Далее компост попадает на мелкое сито от 10 до 15 миллиметров инерционного грохота для очистки от балластных фракций.

Стекло и мелкий балласт ссыпаются в тележки-прицепы, а компост по системе конвейеров подается на складские площадки. Далее с помощью бульдозеров формируют штабеля компоста, которые периодически перелопачивают и при необходимости увлажняют. Время дозревания компоста на складе обычно составляет не менее двух месяцев при высоте штабеля до двух метров.

Хранение дозревшего компоста – три месяца при высоте штабеля до пяти метров.

В городах с населением 50...500 тыс. человек при наличии свободных территорий вблизи города целесообразно применять полевое компостирование с целью получения компоста.

Существуют две принципиальные схемы полевого компостирования: с предварительным дроблением и без предварительного дробления отходов.

В первом случае отходы измельчают специальными дробилками. Во втором – измельчение, хотя и менее эффективно, происходит за счет естественного разрушения при многократном «перелопачивании» компостируемого материала. Неизмельченные фракции отделяют на контрольном грохоте.

Установки полевого компостирования, оснащенные дробилками для предварительного измельчения ТБО, обеспечивают больший выход компоста и дают меньше отходов производства. При компостировании ТБО формируют штабеля, в которых происходят процессы аэробного биотермического компостирования. Затем штабеля

покрывают слоем торфа или земли толщиной 20 см. Продолжительность обезвреживания ТБО на площадках компостирования колеблется в пределах 1...6 месяцев в зависимости от используемого оборудования, принятой технологии и сезона закладки штабелей.

В процессе компостирования интенсивно снижается влажность материала, в связи с чем для повышения активности биотермического процесса наряду с перелопачиванием и принудительной аэрацией производят увлажнение материала. Зрелый компост перед отправкой потребителю направляют на грохот, где его очищают от крупных балластных фракций. В некоторых схемах ТБО разделяют на фракции до его компостирования.

В последние годы ведутся работы по метановому сбраживанию отходов, которое реализуется в технологии их переработки в анаэробных производственных условиях с получением горючего газа и органических удобрений.

Технологический процесс анаэробной переработки заключается в следующем. Отходы разгружают в приемный бункер, откуда грейферным краном их подают через питатель в коническую дробилку с вертикальным валом. Из дробилки измельченные отходы перегружают на ленточный конвейер, проходящий под электромагнитным сепаратором, предназначенным для извлечения черного металлолома. Очищенные от черного лома отходы подают в метантенк, где их выдерживают с целью сбраживания в анаэробных условиях от 10 до 16 суток при температуре 25 °С. В результате из каждой тонны отходов получают от 120 до 140 м³ биогаза. Часть биогаза поступает в газгольдер, а другая часть подается компрессором через уравнительную камеру под давлением под слой перерабатываемых отходов с целью перемешивания сбраживаемой массы.

Отработанную твердую фракцию выгружают и затем подают в шнековый пресс для частичного обезвоживания. Затем обезвоженная твердая фракция поступает в разрыхлитель и оттуда в цилиндрический грохот, в котором материал разделяют на крупный отсев и массу, используемую в качестве органических удобрений.

Методом анаэробного компостирования могут быть переработаны некоторые виды отходов сельскохозяйственного производства и пищевой промышленности.

3.4. Механическая переработка твердых отходов

3.4.1. Методы измельчения и компактирования отходов

Утилизация твердых отходов приводит к необходимости либо их разделения на компоненты с последующей переработкой сепарированных материалов различными методами, либо придания им определенного вида.

Для тех промышленных отходов, утилизация которых не связана с необходимостью проведения фазовых превращений или воздействия химических реагентов, но которые не могут быть использованы непосредственно, применяются два вида механической обработки: *измельчение* или *компактирование (прессование)*. Кроме того, интенсивность и эффективность химических диффузионных и биохимических процессов возрастает с уменьшением размеров кусков (зерен) перерабатываемых материалов. Это в равной степени относится к отходам как органического, так и неорганического происхождения.

Измельчением называется процесс многократного разрушения твердого тела под действием внешних нагрузок, превышающих силы молекулярного притяжения в измельчаемом теле.

Процессы измельчения широко распространены в технологии рекуперации твердых отходов при переработке отвалов полезных ископаемых, отходов углеобогащения, вышедших из строя строительных конструкций и изделий. Также измельчение используется при переработке лома изделий из черных и цветных металлов, топливных и металлургических шлаков, некоторых производственных шламов и отходов пластмасс, пиритных огарков и ряда других отходов.

Твердый материал можно разрушить и измельчить до частиц желаемого размера раздавливанием, раскалыванием, разламыванием, резанием, распиливанием, истиранием и различными комбинациями этих способов.

По размеру кусков исходного сырья и конечного продукта измельчение условно делят на несколько классов, исходя из которых выбирают измельчающее оборудование.

Метод измельчения (помола) используют для получения из кусковых отходов зерновых и мелкодисперсных фракций крупностью

менее 5 мм. При переработке твердых отходов используют агрегаты грубого и тонкого измельчения: стержневые, шаровые и ножевые мельницы, дезинтеграторы, дисковые и кольцевые мельницы, бегуны. В качестве несущей среды при сухом измельчении чаще всего применяют воздух, реже дымовые или инертные газы, а при мокром – воду. Измельчение отходов пластмасс и резиновых технических изделий проводят при низких температурах (криогенное измельчение). После измельчения, за которым может следовать фракционирование, отходы превращаются в продукты, готовые для дальнейшего использования.

Метод дробления используется для получения из крупных кусков перерабатываемых материалов продуктов крупностью свыше пяти миллиметров. В качестве основных технологических показателей дробления рассматривают степень и энергоемкость дробления.

Степень измельчения или дробления определяется отношением размеров кусков до измельчения к размерам кусков раздробленного материала. По размеру кусков исходного сырья и конечного продукта измельчение условно делят на несколько классов, исходя из которых выбирают измельчающее оборудование. Приблизительная характеристика принятой классификации измельчения приведена в табл. 3.1.

Таблица 3.1

Классификация методов измельчения

Класс	Размер кусков, мм		Класс	Размер кусков, мм	
	до измельчения	после измельчения		до измельчения	после измельчения
	Дробление			Помол	
Крупное	>500	100...300	Крупный	20...100	1...4
Среднее	100...500	20...100	Средний	5...50	0,1...1
Мелкое	50...100	4...20	Тонкий	1...10	0,01...0,1

Дробление твердых материалов обычно осуществляют сухим способом, а тонкое измельчение – мокрым способом, что исключает пылеобразование.

Для дробления большинства видов твердых отходов используют щековые, конусные, валковые и роторные дробилки различных типов. Для разделки очень крупных агломератов отходов применяют

копровые механизмы, механические ножницы, дисковые пилы, ленточнопильные станки и другие механизмы. При выборе измельчителя необходимо знать вид и характер отходов, их размеры и количество, необходимую степень измельчения, конечный размер дробленого материала, особые свойства измельчаемых отходов. Если требуется измельчить очень крупные отходы, их предварительно режут на куски, используя ленточные пилы и ленточно-пильные станки.

Механическое *прессование* и *компактирование* твердых отходов — еще один из основных методов уменьшения их объема с целью более рационального использования транспорта, перевозящего отходы к местам их утилизации и складирования.

Процессы предварительного уплотнения с целью повышения производительности стадии измельчения иногда необходимо применять для тех отходов, которые обладают низкой насыпной плотностью, например, отходы пенопластов, пленочные обрезки и другие.

Прессование при высоких давлениях — один из способов улучшения условий эксплуатации полигонов. Уплотненные отходы дают меньшее количество фильтрата и газовых выбросов, при этом снижается вероятность возникновения пожаров, эффективнее используется земельная площадь полигона.

3.4.2. Классификация и сортировка отходов

В ряде случаев переработка измельченных отходов должна сопровождаться их разделением на фракции по крупности.

Для разделения кусковых и сыпучих материалов применяют различные способы:

- просеивание или грохочение;
- разделение под действием гравитационно-инерционных сил;
- разделение под действием гравитационно-центробежных сил.

Грохочение представляет собой процесс разделения на классы по крупности различных по размерам кусков (зерен) материала при его перемещении на ячеистых поверхностях (колосниковых решетках, решетках, проволочных сетках, щелевидных ситах).

Основным показателем грохочения является его эффективность E , определяемая отношением количества подрешетного продукта к его общему количеству в исходном материале, %:

$$E = 10 \cdot (\alpha - \upsilon) / \alpha(100 - \upsilon),$$

где α и υ – содержание нижнего класса в исходном материале и надрешетном продукте, %.

Для разделения твердых материалов в виде пульпы используются *классификаторы* грубой и тонкой классификации. Полноту разделения при классификации характеризуют коэффициентом разделения:

$$K_E = \beta - \upsilon,$$

где β и υ – содержание данного класса в сливе и песках, %.

При *гравитационном и центробежном способах* разделение измельченных продуктов на классы или выделение целевого продукта осуществляется методом раздельного высаживания частиц из несущей среды под действием гравитационно-инерционных или гравитационно-центробежных сил.

Разделение сыпучих материалов под действием гравитационных и инерционных сил производится в *газовых осадителях и гидравлических классификаторах*, а под действием гравитационно-центробежных сил – в *сепараторах* циклонного типа, с вращающимися лопастями и т. п.

В качестве несущей среды при сухом измельчении чаще всего применяют воздух, реже дымовые или инертные газы, а при мокром – воду.

Рассмотрим некоторые особенности конструкций вышеназванного оборудования.

Сепаратор с вертикальным воздушным потоком состоит из камеры, в которую снизу по трубе подается пылевоздушная смесь со скоростью, превышающей скорость витания наиболее мелких частиц. Поскольку площадь поперечного сечения камеры в несколько раз больше, то скорость восходящего потока снижается и становится недостаточной для удержания крупных частиц. Они осаждаются и разгружаются через низ камеры. Мелкие частицы продолжают движение с воздушным потоком и выносятся через верх камеры.

Сепаратор с горизонтальным воздушным потоком имеет несколько рядом расположенных камер, над которыми движется пылевоздушная смесь, поступающая из трубопровода. Крупные частицы попадают в ближний бункер, мелкие – в последующие камеры, мел-

кодисперсные выносятся из камеры и осаждаются в специальных устройствах.

В *центробежном дисковом сепараторе* материал из бункера по трубе поступает на быстровращающийся диск и разбрасывается с него веером под действием центробежных сил. Более крупные частицы попадают в удаленные от оси вращения концентрические желоба, а мелкие — в ближайшие и отдельно из них удаляются. Применение таких сепараторов экономически целесообразно для частиц менее 100 микрометров. Коэффициент эффективности их работы составляет от 65 до 80 %.

Гидравлическая классификация получила весьма широкое распространение в обогащении руд черных и цветных металлов, в химической промышленности. Как и воздушные сепараторы, гидравлические классификаторы по характеру действующих сил можно разделить на гравитационные и центробежные.

Принцип работы *гидравлических классификаторов гравитационного действия* основан на том, что пульпа поступает в емкости той или иной формы, в которых крупные частицы оседают, а тонкие сливаются через борт емкости.

В ряде случаев применяются *гидравлические центробежные классификаторы* — гидроциклоны и центрифуги, значительно более производительные и компактные, по устройству аналогичные аппаратам очистки сточных вод. Гидроциклоны используют для классификации частиц размером от 10 до 500 микрометров.

Если отходы содержат металлические включения, их обычно пропускают через *магнитный сепаратор*, например, с движущейся лентой. В магнитном поле, создаваемом с помощью электромагнитов, происходит отделение магнитных металлов от органической части отходов.

3.5. Обогащение при рекуперации твердых отходов

Рекуперации отходов — это деятельность по технологической обработке отходов, включающая извлечение и восстановление ценных компонентов отходов, с возвращением их для повторного использования.

Обогащение обычно является промежуточной стадией между основными технологиями переработки твердых материалов и отходов и их глубокой механической, химической и физико-химической переработкой или рекуперацией.

В результате обогащения твердых отходов получают несколько продуктов: концентраты, хвосты и промежуточные продукты.

Концентраты — продукты обогащения, в которых содержание полезных компонентов выше, а вредных примесей ниже, чем в исходном сырье. Концентраты получают название по преобладающему в них ценному компоненту, например: железорудные, угольные, пиритные и другие.

Хвосты — продукты обогащения, в которые переходят пустая порода, вредные примеси и часть полезных компонентов отходов. Хвосты как отходы конкретного технологического цикла могут быть в ряде случаев использованы в других отраслях производства в качестве исходного сырья.

Промежуточные продукты имеют содержание основных компонентов меньше, чем в концентрате, но больше, чем в исходных отходах. Их качество всегда ниже требований к концентратам и выше допустимого для хвостов.

Технологический процесс обогащения отходов характеризуется рядом показателей. Выход концентрата и хвостов — это их количество, выраженное в абсолютных весовых единицах, в долях единицы или в процентах от количества исходного продукта. Извлечение — выраженное в процентах отношение количеств компонента в каком-либо продукте и в исходном отходе. Сумма извлечений компонента во все продукты технологического процесса или операции составляет 100 %.

В практике рекуперации твердых отходов промышленности используют методы обогащения перерабатываемых материалов: гравитационные, магнитные, электрические, флотационные и специальные.

Гравитационные методы основаны на различии в скорости в жидкой (воздушной) среде частиц различного размера и плотности. К ним можно отнести обогащение отсадкой под действием переменных по направлению вертикальных струй воды (воздуха). Обогащение может осуществляться в тяжелых суспензиях, плотность

которых является промежуточной между плотностями разделяемых частиц. Существует обогащение в перемещающихся по наклонным поверхностям потоках, а также промывка для разрушения и удаления глинистых и органических примесей.

Магнитное обогащение используют для отделения парамагнитных (слабомагнитных) и ферромагнитных (сильномагнитных) компонентов (т. е. веществ с удельной магнитной восприимчивостью χ выше $10 \text{ м}^3/\text{кг}$) смесей твердых материалов от их диамагнитных (немагнитных) составляющих. Удельной магнитной восприимчивостью χ (в $\text{м}^3/\text{кг}$) называют объемную магнитную восприимчивость веществ, отнесенную к его плотности.

Слабомагнитные материалы, обогащенные в сильных магнитных полях (напряженностью $H = 800 \dots 1600 \text{ кА/м}$), сильномагнитные – в слабых полях ($H = 70 \dots 160 \text{ кА/м}$).

Электрические методы обогащения основаны на различии электрофизических свойств разделяемых материалов и включают сепарацию в электростатическом поле, поле коронного разряда, коронноэлектростатическом поле и трибоадгезионную сепарацию. Электростатическая сепарация основана на различии электропроводности и способности к электризации трением (трибоэлектрический эффект) минеральных частиц разделяемой смеси. При небольшой разнице в электропроводности частиц используют электризацию их трением. Наэлектризованные частицы направляют в электрическое поле, где происходит их сепарация.

Сепарация в поле коронного разряда, создаваемого между коронирующим (заряженным до $20 \dots 50$ тыс. В) и осадительным (заземленным) электродами, основана на ионизации пересекающих это поле минеральных частиц оседающими на них ионами воздуха и на различии интенсивности передачи приобретенного заряда поверхности осадительного электрода, что выражается в различных траекториях движения частиц.

Трибоадгезионная сепарация основана на различии в адгезии (*прилипанию*) к поверхности наэлектризованных трением частиц разделяемого материала.

Флотационное обогащение основано на различиях в смачиваемости тех или иных материалов. Процесс флотации протекает по сле-

дующей схеме. Тонкоизмельченные твердые отходы в виде пульпы с небольшим количеством специальных реагентов насыщают воздухом. При этом поверхность смачиваемых частиц покрывается водой, а на поверхности несмачиваемых частиц закрепляется пузырек воздуха, вытесняющий с нее воду. Прилипшие к пузырькам воздуха частицы поднимаются на поверхность и образуют пенный продукт, а смачиваемые частицы остаются в пульпе и поступают на дальнейшую переработку или в хвосты.

Флотация материала пузырьками воздуха называется пенной флотацией. Существуют также масляная и пленочная флотации. Масляная флотация осуществляется капельками масла, а пленочная — пленками несмачивающих жидкостей.

3.6. Обезвреживание твердых отходов

Как показывает мировая и отечественная практика, наиболее распространенными сооружениями по обезвреживанию твердых бытовых отходов являются полигоны.

Современные полигоны — это комплексы природоохранных сооружений, предназначенные для складирования, изоляции и обезвреживания твердых бытовых отходов. Полигоны обеспечивают защиту от загрязнения атмосферы, почвы, поверхностных и грунтовых вод, препятствуют распространению грызунов, насекомых и болезнетворных микроорганизмов.

Полигоны размещаются за пределами городов и других населенных пунктов. Размер санитарно-защитной зоны от жилой застройки до границ полигона должен составлять не менее 500 метров. Кроме того, размер санитарно-защитной зоны уточняется при расчете газообразных выбросов.

Площадь участка, отводимого под полигон, выбирается, как правило, из условия срока его эксплуатации не менее 15 лет.

Проектируемую вместимость полигона рассчитывают с учетом удельной обобщенной годовой нормы накопления твердых бытовых отходов на одного жителя. Указанная норма включает накопление твердых бытовых отходов в учреждениях, число обслуживаемого полигоном населения, расчетный срок эксплуатации, степень

уплотнения отходов в процессе их укладки в тело полигона и после его закрытия.

Перед проектированием заказчик с заинтересованными организациями определяет район, в котором осуществляется подбор участка для размещения полигона. К таким организациям относятся архитектурно-планировочное управление, отдел по делам строительства и архитектуры, органы экологии, санэпиднадзора и гидрогеологической службы.

По гидрогеологическим условиям лучшими являются участки с глинами или тяжелыми суглинками и грунтовыми водами, расположенными на глубине не менее двух метров. Исключается использование под полигон болот глубиной более одного метра и участков с выходами грунтовых вод в виде ключей, затопляемых паводковыми водами территорий, районов геологических разломов. Исключается также использование земельных участков, расположенных ближе 15 километров от аэропортов.

Под полигоны отводятся отработанные карьеры, свободные от ценных пород деревьев, участки в лесных массивах, овраги и другие территории.

При отводе участка выдается задание на дальнейшее его использование после закрытия полигона. Например, это создание лесопаркового комплекса, устройство открытых складов строительных материалов и тары непищевого применения и прочее.

Возможность капитального строительства на участках складирования отходов определяется в каждом конкретном случае дополнительными исследованиями.

Проектирование полигона ведется на основе плана отведенного земельного участка.

Основными элементами полигона являются подъездная дорога, участок складирования отходов, хозяйственная зона, инженерные сооружения и коммуникации.

Основное сооружение полигона — участок складирования. Он занимает основную, до 95 %, площадь полигона, в зависимости от объема принимаемых отходов. На участке складирования проектируется устройство котлована с целью получения грунта для промежуточной и окончательной изоляции. Средняя глубина котлована,

отрываемого в основании полигона, рассчитывается из условия баланса земельных работ и уровня грунтовых вод. Уровень грунтовых вод должен быть на 1 метр ниже днища котлована. Размер участка складирования должен обеспечивать прием отходов с размещением их в одном ярусе в течение не менее пяти лет.

В санитарно-защитной зоне полигона запрещается размещение жилой застройки, скважин и колодцев для питьевых целей. При отсутствии в санитарно-защитной зоне зеленых насаждений или земляных насыпей по периметру полигона устраиваются кавальеры грунта, необходимого для изоляции при его закрытии. Режим санитарно-защитной зоны определяется действующими нормами и правилами.

Для полигона разрабатывается специальный проект мониторинга, включающий разделы: контроль состояния подземных и поверхностных водных объектов, атмосферного воздуха, почв и растений. Осуществляется также мониторинг системы управления технологическими процессами на полигоне, обеспечивающей предотвращение загрязнения окружающей среды.

Проект мониторинга полигона разрабатывается по техническому заданию владельца полигона и согласовывается с уполномоченными на это органами.

Система мониторинга должна включать устройства и сооружения по контролю состояния подземных и поверхностных вод, атмосферного воздуха, почвы и растений, а также шумового загрязнения в зоне возможного влияния полигона.

На полигоне выполняются следующие основные виды работ: прием, складирование и изоляция ТБО. Все работы по складированию, уплотнению и изоляции ТБО на полигонах механизированы.

Практическая работа 6

Расчет вместимости полигонов для складирования ТБО

Цели работы: изучить методику и произвести расчет вместимости полигонов для складирования твердых бытовых отходов (ТБО).

Основные теоретические сведения

В настоящее время наиболее распространенными сооружениями по обезвреживанию твердых бытовых отходов являются полигоны.

Современные полигоны – это комплексы природоохранных сооружений, предназначенные для складирования, изоляции и обезвреживания ТБО, обеспечивающие защиту от загрязнения атмосферы, почвы, поверхностных и грунтовых вод, препятствующие распространению грызунов, насекомых и болезнетворных микроорганизмов.

Проектируемую вместимость полигона рассчитывают с учетом удельной обобщенной годовой нормы накопления ТБО на одного жителя, которая включает накопление ТБО в учреждениях и организациях, число обслуживаемого полигоном населения, расчетный срок эксплуатации, степень уплотнения ТБО в процессе их укладки в тело полигона и после его закрытия [7; 8].

Вместимость полигона E_T на расчетный срок определяется по формуле

$$E_T = (Y_1 + Y_2) \cdot (H_1 + H_2) \cdot T \cdot K_2 / 4K_1, \quad (3.1)$$

где Y_1 и Y_2 – удельные годовые нормы накопления ТБО по объему на 1-й и последний годы эксплуатации полигона, м³/чел·год; H_1 и H_2 – количество обслуживаемого полигоном населения на 1-й и последний годы эксплуатации полигона, чел; T – расчетный срок эксплуатации полигона, год; K_1 – коэффициент, учитывающий уплотнение ТБО в процессе эксплуатации полигона на весь срок T ; K_2 – коэффициент, учитывающий объем наружных изолирующих слоев грунта (промежуточный и окончательный).

Удельная годовая норма накопления ТБО по объему на n -й год эксплуатации определяется из условия ежегодного роста ее по объему (среднее значение по РФ 3...5 %):

$$Y_2 = Y_1 \cdot 1,03^T. \quad (3.2)$$

Коэффициент K_1 , учитывающий уплотнение ТБО в процессе эксплуатации полигона за весь срок T , принимаем по табл. 3.2. Коэффициент K_2 , учитывающий объем изолирующих слоев грунта в зависимости от общей высоты, принимаем по табл. 3.3.

Таблица 3.2

Коэффициент K_1 , учитывающий уплотнение ТБО

Масса бульдозера или катка, т	Полная проектируемая высота полигона, м	K_1
3...6	20...30	3
12...14	Менее 20	3,7
12...14	20...40	4
20...22	50 и более	4,5

Примечание. Значения K_1 приведены при соблюдении послойного уплотнения ТБО, оседания в течение не менее 5 лет и плотности ТБО в местах сбора $\rho = 200 \text{ кг/м}^3$.

Таблица 3.3

Коэффициент K_2 , учитывающий объем изолирующих слоев грунта

Общая высота, м	5,25	7,5	9,75	12...15	16...39	40...50	≥ 50
K_2	1,37	1,27	1,25	1,22	1,2	1,18	1,16

Примечания.

1. При обеспечении работ по промежуточной и окончательной изоляции полностью за счет грунта, разрабатываемого в основании полигона, $K_2 = 1$.
2. В таблице слой промежуточной изоляции принят 0,25 м. При применении катков КМ-305 допускается слой промежуточной изоляции 0,15 м.

При расчете вместимости полигона необходимо учитывать демографические изменения численности населения в обслуживаемом районе за расчетный период:

$$H_2 = H_1 K_3, \quad (3.3)$$

где K_3 – коэффициент, учитывающий демографические изменения в обслуживаемом районе за счет рождаемости и миграции населения, $K_3 = 1...1,4$.

Площадь участка складирования ТБО, м^2 , определяется по формуле

$$S_{y.c} = \frac{3 \cdot E_T}{H_{\Pi}^1}, \quad (3.4)$$

где H_{Π}^1 – высота складирования ТБО, предварительно согласованная с архитектурно-планировочным управлением, м.

Так как при эксплуатации полигона необходима площадь для размещения вспомогательной зоны, для полосы вокруг полигона и для подъездных дорог (это учтено введением коэффициента 1,1 пе-

ред $S_{y.c}$), а также дополнительная хозяйственная площадь, требуемая площадь полигона S_{Π} должна быть несколько больше:

$$S_{\Pi} = 1,1S_{y.c} + S_{\text{доп}}, \quad (3.5)$$

где хозяйственная зона $S_{\text{доп}}$ занимает в зависимости от количества принимаемых полигоном ТБО и специальных требований заказчика от 5 до 15 % от общей площади.

После определения величины $S_{y.c}$ можно уточнить значение высоты H_{Π}^1 . Для этого надо учесть, что на самом деле «холм» ТБО имеет форму усеченной пирамиды, причем размеры верхней площадки должны обеспечивать безопасные развороты мусоровозов. Следовательно, ширина верхней площадки должна быть не менее 40 м. В связи с вышеизложенным получим формулу для определения объема «холма» ТБО:

$$E_T = \frac{H_{\Pi}^1(S_{y.c} + S_{\text{в.п}} + \sqrt{S_{y.c} \cdot S_{\text{в.п}}})}{3}, \quad (3.6)$$

где $S_{\text{в.п}} = 40 \cdot 40 = 1600 \text{ м}^2$ – площадь верхней площадки, м^2 .

Откуда определим уточненную высоту складирования:

$$H_{\Pi}^1 = \frac{3 \cdot E_T}{S_{y.c} + S_{\text{в.п}} + \sqrt{S_{y.c} \cdot S_{\text{в.п}}}}. \quad (3.7)$$

Потребный объем грунта для изоляции V_r , м^3 , рассчитывают по формуле

$$V_r = E_T \left(1 - \frac{1}{K_2}\right). \quad (3.8)$$

Проектируемый котлован должен полностью обеспечить потребность в грунте, следовательно, его объем должен быть равен V_r . С учетом наличия откосов и картовой схемы полигона можно рассчитать глубину котлована H_k , м:

$$H_k = 1,1 \frac{V_r}{S_{y.c}}. \quad (3.9)$$

В формуле (3.9) площадь дна для котлована равна $S_{y.c}$.

На последнем этапе находят верхнюю отметку полигона ТБО, м, после его наружной изоляции слоем грунта толщиной 1 м:

$$H_{\text{во}} = H_{\Pi}^1 - H_k + 1. \quad (3.10)$$

Пример расчета

Исходные данные. Расчетный срок эксплуатации полигона $T = 20$ лет. Годовая удельная норма накопления ТБО с учетом жилых зданий и непромышленных объектов на год проектирования $V_1 = 1,1 \text{ м}^3/\text{чел} \cdot \text{год}$. Количество обслуживаемого населения на год проектирования $H_1 = 250$ тыс. чел. Высота складирования ТБО, предварительно согласованная с архитектурно-планировочным управлением, $H_{\text{п}}^1 = 40$ м.

Решение. Количество обслуживаемого населения прогнозирует-ся через 20 лет с учетом близко расположенных населенных пунктов согласно (3.3) $H_2 = 350$ тыс. чел. Определим значение параметров, отсутствующих в исходных данных: $K_1 = 4$, $K_2 = 1,18$. Удельная годовая норма накопления ТБО по объему на 20-й год эксплуатации определяется из условия ежегодного роста ее по объему на 3 %:

$$V_2 = 1,1 \cdot 1,03^{20} = 1,99 \text{ м}^3/\text{чел} \cdot \text{год}.$$

Проектируемая вместимость полигона E_T согласно (3.1) составит $E_T = (1,1 + 1,99) \cdot (250000 + 350000) \cdot 20 \cdot 1,18/16 = 2734650 \text{ м}^3$.

Площадь участка складирования ТБО равна

$$S_{\text{уч}} = 3 \cdot 2734650/40 = 205099 \text{ м}^2.$$

Находим требуемую площадь полигона

$$S_{\text{п}} = 1,1 \cdot 205099 + 0,15 \cdot 205099 = 256374 \text{ м}^2.$$

Определим уточненную высоту складирования ТБО

$$H_{\text{п}}^1 = \frac{3 \cdot 2734650}{205099 + 1600 + \sqrt{205099 \cdot 1600}} = 36,5 \text{ м}^2.$$

Потребный объем грунта для изоляции равен

$$V_T = 2734650 \left(1 - \frac{1}{1,18}\right) = 417150 \text{ м}^3.$$

Глубина котлована составит

$$H_{\text{к}} = 1,1 \cdot 417150/205099 = 2,24 \text{ м}.$$

Находим верхнюю отметку полигона ТБО после его наружной изоляции слоем грунта толщиной 1 м:

$$H_{\text{во}} = 36,5 - 2,24 + 1 = 35,26.$$

Полученная высота складирования не превышает высоту, согласованную архитектурно-планировочным управлением. Примем габаритные размеры участка складирования 410×500 м.

Алгоритм выполнения практической работы

1. Изучить теоретические сведения по методике расчета вместимости полигонов для складирования твердых бытовых отходов, которая представлена в методических указаниях к работе.
2. Выбрать вариант задания к работе (табл. 3.4).
3. Произвести необходимые расчеты.
4. Составить отчет о практической работе в соответствии с требованиями (прил. А).
5. Ответить на вопросы для самоконтроля.

Таблица 3.4

Варианты заданий

№ варианта	Расчетный срок эксплуатации полигона T , лет	Годовая удельная норма накопления ТБО в населенном пункте Y_1 , м ³ /чел · год	Количество обслуживаемого населения на год проектирования H_1 , тыс. чел	Высота складирования ТБО H_n , м
1	15	1,1	100	10
2	20	1,2	130	15
3	25	1,3	150	20
4	30	1,4	200	25
5	15	1,5	250	30
6	20	1,6	300	35
7	25	1,7	350	40
8	30	1,8	400	45
9	15	1,9	450	50
10	20	2,0	500	55
11	25	1,1	130	60
12	30	1,2	150	10
13	15	1,3	200	15
14	20	1,4	250	20
15	25	1,5	300	25
16	30	1,6	350	30
17	15	1,7	400	35
18	20	1,8	450	40

№ варианта	Расчетный срок эксплуатации полигона T , лет	Годовая удельная норма накопления ТБО в населенном пункте Y_1 , м ³ /чел · год	Количество обслуживаемого населения на год проектирования H_1 , тыс. чел	Высота складирования ТБО H_n , м
19	25	1,9	500	45
20	30	2,0	600	50
21	15	1,1	110	55
22	20	1,2	120	60
23	25	1,3	130	10
24	30	1,4	150	15
25	15	1,5	200	20
26	20	1,6	250	25
27	25	1,7	300	30
28	30	1,8	350	35
29	15	1,9	400	40
30	20	2,0	450	45
31	25	1,1	500	50
32	30	1,2	300	55
33	15	1,3	450	60
34	20	1,4	500	10
35	25	1,5	550	15
36	30	1,6	130	20
37	15	1,7	150	25
38	20	1,8	200	30
39	25	1,9	250	35
40	30	2,0	300	40
41	15	1,1	350	45
42	20	1,2	400	50
43	25	1,3	450	55
44	30	1,4	500	60
45	15	1,5	130	20
46	20	1,6	150	25
47	25	1,7	200	30
48	30	1,8	250	35
49	20	1,9	300	40
50	25	2,0	350	45

Вопросы для самоконтроля

1. Какие данные необходимы для расчета вместимости полигона ТБО?
2. Как учитывается изменение численности населения при расчете вместимости полигона?
3. Какая средняя плотность ТБО соответствует благоустроенным жилым домам?

Модуль IV. ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ СИСТЕМ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ

4.1. Основные понятия теории надежности технических систем

Одной из важнейших характеристик сложных технических систем является их надежность. *Надежность* – свойство объекта (системы) сохранять во времени в установленных пределах значения всех параметров, характеризующих способность выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях применения, технического обслуживания, хранения и транспортирования. Согласно другому определению, которое используют только для общего не-количественного описания, надежность – это свойство готовности и влияющие на него свойства безотказности, ремонтпригодности и поддержки технического обслуживания.

Рассмотрим основные определения, которые будем использовать далее в учебном материале.

Изделие – это любая функциональная единица, которую можно рассматривать в отдельности.

Примерами изделий могут быть любые система, подсистема, оборудование, устройство, аппаратура, узел, деталь и элемент. Изделие может состоять из технических средств, программного обеспечения или их сочетания и может также в частных случаях включать людей. Группу изделий можно рассматривать и как самостоятельное изделие.

Готовность – способность изделия выполнить требуемую функцию при данных условиях в предположении, что необходимые внешние ресурсы обеспечены.

Вышеназванные в этом определении и далее условия могут включать климатические, технические или экономические обстоятельства и факторы.

Готовность изделия зависит от сочетания свойств безотказности, ремонтпригодности и поддержки технического обслуживания. Необходимые внешние ресурсы, кроме ресурсов технического обслуживания, не влияют на свойство готовности.

Безотказность – способность изделия выполнить требуемую функцию в заданном интервале времени при данных условиях.

Обычно предполагают, что в начале заданного интервала времени изделие в состоянии выполнить требуемую функцию.

Ремонтпригодность — способность изделия при данных условиях использования и технического обслуживания к поддержанию или восстановлению состояния, в котором оно может выполнить требуемую функцию.

Долговечность — способность изделия выполнять требуемую функцию до достижения предельного состояния при данных условиях использования и технического обслуживания.

Комплексное материально-техническое обеспечение — это процесс скоординированного управления по обеспечению всех материалов и ресурсов, требуемых для эксплуатации изделия.

Работоспособное состояние — состояние изделия, при котором оно способно выполнить требуемую функцию при условии, что предоставлены необходимые внешние ресурсы.

Изделие в одно и то же время может находиться в работоспособном состоянии для одних функций и в неработоспособном состоянии для других функций.

Неработоспособное состояние — состояние изделия, при котором оно не способно выполнить требуемую функцию по любой причине.

Наработка — это интервал времени, в течение которого изделие находится в состоянии функционирования.

Наработка может быть непрерывной величиной — например, продолжительность работы в часах, километраж пробега. Также она может быть дискретной величиной — например, число циклов, срабатываний, запусков и прочее.

Ресурс — суммарная наработка изделия в течение срока службы.

Несколько важных понятий характеризуют отказ изделий.

Отказ — потеря способности изделия выполнить требуемую функцию.

Отказ является событием, которое приводит к состоянию неисправности.

Рассмотрим классификацию отказов *по причинам возникновения*.

Конструктивные отказы бывают вызваны недостатками конструкции, производственные отказы — нарушениями технологии

изготовления, а причина эксплуатационных отказов заключается в неправильной эксплуатации.

Отказы *по характеру возникновения* подразделяют на случайные и неслучайные. Случайные или внезапные отказы вызваны превышением нагрузок, скрытыми дефектами материалов, погрешностями изготовления, ошибками при эксплуатации. Неслучайные или постепенные отказы – это закономерные явления, которые вызывают постепенное накопление повреждений и связаны с влиянием параметров окружающей среды, длительностью работы и прочими факторами.

В зависимости от возможности *прогнозирования* момента наступления отказа все отказы подразделяют на внезапные и постепенные. К внезапным отказам относятся, например, поломки, заедания. Постепенные отказы – это износ, старение, коррозия.

Интенсивность отказов – это показатель надежности невосстанавливаемых объектов, равный отношению среднего числа отказавших в единицу времени объектов к числу объектов, оставшихся работоспособными.

Интенсивность отказов определяется по формуле

$$\lambda(t) = \frac{n(\Delta t)}{(N_{\text{ср}} \cdot \Delta t)},$$

где N – среднее число элементов, работоспособных в интервал времени Δt ; $n(\Delta t)$ – количество отказавших элементов за период времени Δt .

Средняя интенсивность отказов – это среднее значение мгновенной интенсивности отказов в интервале времени.

Наработка до отказа – это наработка, накопленная от первого использования изделия или от его восстановления до отказа.

Наработка между отказами – это суммарная наработка восстанавливаемого изделия между двумя последовательными отказами.

Средняя наработка до отказа – это математическое ожидание наработки от начала эксплуатации до отказа изделия. Под наработкой понимается продолжительность или объем выполненной работы объектом.

Гамма-процентная наработка до отказа – это наработка, в течение которой отказ объекта не возникает с вероятностью, выраженной в процентах.

Вероятность безотказной работы — это вероятность выполнить требуемую функцию при данных условиях в заданном интервале времени. То есть можно отметить, что понятия надежности и вероятности безотказной работы равнозначны.

Вероятность отказа — это величина, противоположная вероятности безотказной работы.

Надежность $P(t)$ и вероятность отказа $Q(t)$ элемента или системы связаны между собой соотношением

$$P(t) + Q(t) = 1.$$

Расчеты показателей безотказности и надежности обычно проводятся в предположении, что система и любой ее элемент могут находиться только в одном из двух возможных состояний — работоспособном и неработоспособном. Отказы элементов считаются независимыми друг от друга.

Состояние системы определяется состоянием элементов и их сочетанием. Поэтому теоретически возможно расчет безотказности любой системы свести к перебору всех возможных комбинаций состояний элементов, определению вероятности каждого из них и сложению вероятностей работоспособных состояний системы.

4.2. Надежность невосстанавливаемых элементов или изделий

Невосстанавливаемое изделие — это изделие, которое при данных условиях после отказа не может быть возвращено в состояние, в котором оно способно выполнить требуемую функцию.

Изделие, которое является невосстанавливаемым при одних данных условиях, может быть восстанавливаемым при других условиях.

В качестве примеров невосстанавливаемых элементов можно назвать подшипники, диоды, конденсаторы, триоды, пиропатроны и прочие изделия.

В общем виде статистически *вероятность безотказной работы* элементов определяется как отношение числа элементов, оставшихся исправными в конце времени испытания, к начальному числу элементов, поставленных на испытание:

$$P(t) = (N - n)/N,$$

где N — начальное число испытываемых элементов; n — число отказавших элементов за t ; $N - n = n_0$ — число элементов, сохранивших работоспособность.

С помощью общего выражения можно получить формулу для вероятности безотказной работы любого элемента технической системы при любом известном распределении времени наработки на отказ:

$$P(t) = \exp \left[- \int_0^t \lambda(t) dt \right].$$

Важнейшим показателем невосстанавливаемого элемента является *среднее время безотказной работы*. Среднее время безотказной работы, или среднюю наработку до отказа, можно получить по результатам испытаний. Для этого нужно проводить испытания до тех пор, пока не откажет последний из элементов.

Пусть по результатам проведённых испытаний время жизни каждого из элементов соответственно равно τ_1, τ_2 и так далее. Тогда средняя наработка до отказа определится по формуле

$$T_0 = \frac{\tau_1 + \tau_2 + \dots + \tau_N}{N} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \tau_i.$$

Другой важной характеристикой надёжности невосстанавливаемого элемента является *интенсивность отказов*, которая определяет надёжность элемента в каждый данный момент времени. Иначе говоря, интенсивность отказов невосстанавливаемого элемента — это условная плотность распределения времени безотказной работы для определённого момента времени при условии, что до этого момента отказ не произошёл. Интенсивность отказов также может быть установлена по результатам испытаний.

Предположим, что испытаниям подвергают N элементов, из которых есть некоторое число элементов, отказавших и не отказавших за период времени Δt . Тогда получим формулу для определения интенсивности отказов невосстанавливаемых элементов:

$$\lambda(t) = \Delta n / \Delta t n(t),$$

где $n(t)$ — число элементов, не отказавших к моменту времени t ; Δn — число отказов на участке времени Δt .

Таким образом, *статистическая интенсивность отказов* невосстанавливаемых элементов равна отношению числа отказов, проис-

шедших в единицу времени, к общему числу неотказавших элементов к этому моменту времени.

Частотой отказов по статистическим данным называется отношение числа отказавших элементов в единицу времени к первоначальному числу работающих при условии, что все вышедшие из строя изделия не восстанавливаются. Частота отказов есть плотность вероятности или закон распределения времени работы элемента до первого отказа.

4.3. Надежность восстанавливаемых элементов или изделий

Большинство сложных технических изделий с длительными сроками службы являются *восстанавливаемыми*, то есть возникающие в процессе эксплуатации отказы устраняют при ремонте. Технически исправное состояние изделий в процессе эксплуатации поддерживают проведением профилактических и восстановительных работ.

Иначе говоря, *восстанавливаемое изделие* – это изделие, которое при данных условиях после отказа может быть возвращено в состояние, в котором оно может выполнять требуемую функцию.

Изделие, которое является восстанавливаемым при одних данных условиях, может быть невосстанавливаемым при других.

К показателям надежности, присущим только восстанавливаемым элементам, следует отнести среднюю наработку на отказ, наработку между отказами, среднее время восстановления, коэффициент готовности и коэффициент технического использования.

Средняя наработка на отказ – это наработка восстанавливаемого элемента, приходящаяся в среднем на один отказ в рассматриваемом интервале суммарной наработки или определенной продолжительности эксплуатации:

$$T_0 = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m t_i,$$

где t_i – наработка элемента до i -го отказа; m – число отказов в интервале суммарной наработки.

Нарботка между отказами определяется объемом работы элемента от одного отказа до следующего.

Среднее время до восстановления — это математическое ожидание времени до восстановления.

Среднее время восстановления одного отказа в рассматриваемом интервале суммарной наработки или определенной продолжительности эксплуатации определяется по формуле

$$T_B = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m t_{Bi},$$

где t_{Bi} — время восстановления i -го отказа; m — число отказов в рассматриваемом интервале суммарной наработки.

Кроме вышеназванных характеристик, для восстанавливаемых элементов оценивается и ремонтпригодность, которая характеризуется коэффициентами готовности и технического использования.

Ремонтпригодность — это способность изделия при данных условиях использования и технического обслуживания к поддержанию или восстановлению состояния, в котором оно может выполнить требуемую функцию.

Коэффициент готовности — это вероятность того, что изделие в данный момент времени находится в работоспособном состоянии, определенная в соответствии с проектом при заданных условиях функционирования и технического обслуживания.

Коэффициент технического использования — это доля времени нахождения изделия в работоспособном состоянии относительно общей продолжительности эксплуатации в заданном интервале времени, включая все виды технического обслуживания.

4.4. Надежность сложных систем

Большинство технических изделий являются сложными системами, состоящими из отдельных деталей, узлов, агрегатов и прочего. Под сложной системой понимается объект, предназначенный для выполнения заданных функций, который может быть расчленен на элементы, выполняющие определенные функции и находящиеся во взаимодействии с другими элементами системы.

С целью определения количественных показателей надежности технической системы составляют функциональную схему и циклограмму ее работы во времени эксплуатации.

Более полному пониманию работы системы способствует принципиальная схема, в которой подробно описывают соединение узлов и элементов, а также их назначение.

Далее на основании функциональной и принципиальной схем работы системы составляют структурную схему надежности с указанием отдельных элементов, узлов и каналов резервирования. Для построенной структурной схемы надежности составляют перечень элементов и узлов с указанием интенсивностей отказов, взятых из справочной литературы или полученных по результатам испытаний или эксплуатации.

Затем на основании исходных данных выполняют расчет проектной надежности системы.

Анализ и прогнозирование надежности на стадии проектирования дают необходимые данные для оценки конструкции. Такой анализ проводят для каждого варианта конструкции, а также после внесения конструктивных изменений. При обнаружении конструктивных недостатков, снижающих уровень надежности системы, проводят конструктивные изменения и корректируют техническую документацию.

Анализ структурной надежности технической системы, как правило, включает ряд операций:

- 1) анализируются устройства и выполняемые системой и ее составными частями функции, а также их взаимосвязь;
- 2) формируется содержание понятия «безотказная работа» для данной конкретной системы;
- 3) определяются возможные отказы составных частей и системы, их причины и возможные последствия;
- 4) оценивается влияние отказов составных частей системы на ее работоспособность;
- 5) система разделяется на элементы, показатели надежности которых известны (интенсивность отказов, наработка и др.);
- 6) составляется структурно-логическая схема надежности технической системы;
- 7) составляются расчетные зависимости для определения показателей надежности системы с учетом ее структурной схемы.

Структурная схема надежности определяет функциональную взаимосвязь между работой подсистем или элементов в определенной последовательности. Эту схему составляют по принципу функционального назначения соответствующих подсистем или элементов при выполнении ими определенной части работы в системе.

Техническая система может быть сконструирована таким образом, что для успешного ее функционирования необходима исправная работа всех ее элементов. В этом случае ее называют последовательной системой.

Есть также системы, в которых при отказе одного элемента другой элемент способен выполнить его функции и отказа всей системы не возникнет. Такую систему называют параллельной.

Очень часто системы обладают свойствами как параллельных, так и последовательных систем, то есть являются системами со смешанным соединением. Рассмотрим особенности расчёта надежности для систем с разной структурой.

Системой с *последовательным соединением элементов* (рис. 4.1) называется система, в которой отказ любого элемента приводит к отказу всей системы. Такое соединение элементов в технике встречается наиболее часто, поэтому его называют основным соединением.

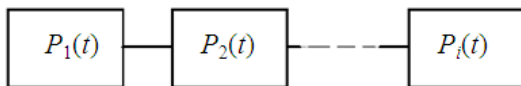


Рис. 4.1. Система с последовательным соединением элементов

Примерами системы с такой структурной схемой являются любые приводные механизмы. Если в приводе оборудования выйдет из строя любая шестерня, подшипник, муфта и прочее, то весь привод перестанет работать.

При условии, что отказы элементов независимы, вероятность одновременной безотказной работы всех элементов и системы в целом определяется по теореме умножения вероятностей по формуле

$$P(t) = p_1(t)p_2(t)\dots p_n(t) = \prod_{i=1}^n p_i(t) = \prod_{i=1}^n (1 - q_i(t)),$$

где $p_i(t)$ – вероятность безотказной работы i -го элемента системы в течение наработки t , ч; $q_i(t)$ – вероятность отказа i -го элемента системы в течение наработки.

Если система состоит из равнонадёжных элементов ($p_i = p$), то после преобразований получим

$$P = p_i^n, \quad Q = 1 - (1 - q)^n.$$

Если все элементы системы работают в периоде нормальной эксплуатации, то имеет место простейший поток отказов. При этом надёжность элементов системы с последовательным соединением подчиняется экспоненциальному распределению. Надёжность каждого элемента в этой системе определяется по формуле

$$p_i = \exp(-\lambda_i \cdot t),$$

а надёжность всей системы вычисляется по формуле

$$P = \prod_{i=1}^n \exp(-\lambda_i t) = \exp\left[-\left(\sum_{i=1}^n \lambda_i\right)t\right] = \exp(-\Lambda t).$$

Интенсивность отказов системы при последовательном соединении элементов и простейшем потоке отказов равна сумме интенсивностей отказов элементов

$$\Lambda = \lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_n = \sum_{i=1}^n \lambda_i = \text{const},$$

где λ_i – интенсивность отказа i -го элемента, час⁻¹.

Из всех рассмотренных выше формул видно, что при последовательном соединении даже при высокой надёжности каждого элемента надёжность всей системы оказывается тем ниже, чем большее число элементов она включает. Кроме того, надёжность системы не может быть выше надёжности самого ненадёжного из ее элементов.

Системой с *параллельным соединением элементов* (рис. 4.2) называется система, отказ которой происходит только в случае отказа всех ее элементов. Такие схемы надёжности характерны для технических систем, в которых элементы дублируются или резервируются. Обычно параллельное соединение используется как метод повышения надёжности, однако такие системы встречаются и самостоятельно.

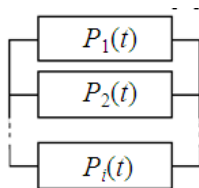


Рис. 4.2. Система с параллельным соединением элементов

В качестве примера параллельно соединенных элементов можно указать параллельное включение диодов, ламп, резисторов и прочего в электрических схемах.

Для отказа системы с параллельным соединением элементов в течение наработки необходимо и достаточно, чтобы все ее элементы отказали в течение этой наработки. Вероятность безотказной работы системы при этом определяется по формуле

$$P = 1 - Q = 1 - \prod_{i=1}^n q_i = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - p_i),$$

где $p_i(t)$ — вероятность безотказной работы i -го элемента системы в течение наработки t , $q_i(t)$ — вероятность отказа i -го элемента системы в течение наработки t .

Если система состоит из равнонадёжных элементов ($p_i = p$), то получим формулу

$$Q = q^n, \quad P = 1 - (1 - p)^n.$$

Более сложные комбинированные случаи соединения элементов в системах будут рассмотрены при выполнении практических работ.

4.5. Конструктивные способы обеспечения надежности

Требования к количественным показателям надежности возрастают тогда, когда отказы технической системы приводят к большим затратам материальных средств либо угрожают безопасности (например, при создании атомных лодок, самолетов или изделий военной техники).

Борьба за создание надежных объектов должна начинаться еще до начала их проектирования. При составлении технических заданий на проектирование необходимо осуществить ряд мероприятий

по обеспечению надежности. К числу таких мероприятий относятся выбор и обоснование принципов технического обслуживания, выбор основного показателя надежности, назначение норм надежности. Также к этим мероприятиям относятся распределение норм надежности системы по элементам и составление программы обеспечения надежности.

Содержание этих взаимосвязанных мероприятий во многом зависит от конечной цели, которую стремятся достичь при проектировании. Например, можно поставить цель спроектировать изделие в соответствии с заданной «полной стоимостью срока службы». При этом необходимо так сбалансировать затраты на разработку и проектирование изделий с затратами на их эксплуатацию, чтобы общая их сумма не превышала заданную при обеспечении наилучших технических характеристик изделий.

Один из разделов технического задания на разработку системы – раздел, определяющий требования к надежности. В этом разделе указывают количественные показатели надежности, которые необходимо подтверждать на каждом этапе создания системы [10].

На этапе разработки конструкторской и эксплуатационной документации выполнение научно-исследовательских расчетов и обеспечение надежности осуществляют способами рационального проектирования и расчетно-экспериментальными методами оценки. Конструкторская документация при этом является комплектом чертежей, технических условий, методик и программ испытаний.

Роль конструкторской службы – основная в создании и апробировании надежных конструкций. При конструировании для обеспечения требуемой надежности необходимо соблюдать некоторые основные положения [10].

1. Конструктор при разработке отвечает за обеспечение всех требуемых характеристик изделия, включая надежность.
2. Конструкция каждого изделия обладает присущей ей потенциальной надежностью.
3. Разработка любого сложного изделия должна обеспечивать его потенциальную надежность для получения изделия с заданной или требуемой фактической надежностью.

4. Потенциальная надежность конструкции может быть реализована только при изготовлении и эксплуатации изделия в полном соответствии с конструктивными требованиями.
5. Персонал службы надежности по отношению к конструктору должен проводить объективный контроль.

Этап конструирования играет важную роль во всех промышленных областях, хотя имеет меньшее значение в фирмах, выпускающих простые изделия или изделия, характеризующиеся апробированной или стандартной конструкцией. Для высокопрогрессивных областей, например при разработке космической техники, радиоэлектронной аппаратуры, существенным является наличие сильной компетентной конструкторской службы. В структуре фирм, работающих в этих направлениях, конструкторская служба обычно считается определяющей. Этап конструирования имеет также большое значение для изготовителей дорогостоящей продукции, например автомобилей, технологического оборудования, станков, и во многих других аналогичных областях производства.

Разработки обычно начинаются с организации работ по исследованию новых конструкторских концепций. В связи с этим целесообразно привести здесь некоторые определения, касающиеся конструирования.

Исследования — это научная или инженерная деятельность, связанная с разработкой нового изделия или новых важных методов конструирования существующих изделий.

Разработка — это инженерная деятельность по внедрению и осуществлению исследовательской идеи.

Конструирование — это инженерная функция, заключающаяся в применении конструкторских методов к решению конкретных проектных задач. В результате выполнения этой функции выпускаются чертежи и технические условия на комплектующие изделия.

Конструкторская служба ставит перед собой задачу создания конструкций с целым спектром характеристик.

Функциональная пригодность означает, что конструкция при воплощении ее в изделие должна обеспечивать удовлетворительное выполнение функций, для которых она предназначена.

Технологичность предполагает, что конструкция должна обеспечивать экономичное изготовление изделия имеющимися производственными средствами и силами организаций-смежников, которых предполагается привлечь к участию в работе.

Своевременность значит, что детализирование чертежей должно быть завершено, а сами чертежи выпущены в установленные графиком сроки.

Конкурентоспособность подразумевает, что конструкция должна находить сбыт. На возможность сбыта, кроме упомянутых выше факторов, оказывают влияние стоимость, внешний вид и другие факторы.

Надежность предполагает, что конструкция изделия должна обеспечивать выполнение заданных функций не только сразу после изготовления и при благоприятных условиях, но также в течение требуемого периода времени в установленных пределах окружающих условий. Если предусмотрена возможность дополнительного ухода и обслуживания, то это должно быть учтено в конструкции.

В связи с тем что часто оказывается невозможным максимально выполнить весь комплекс иногда противоречивых требований, конструктору приходится принимать компромиссные решения.

Задавая необычно жесткие допуски или внося в спецификацию какой-либо специальный материал, он может добиться повышения надежности ценой ухудшения технологичности.

С другой стороны, отказавшись от полного цикла испытаний конструкции при наихудших сочетаниях условий окружающей среды и воздействии старения, конструктор может пойти на риск и сконструировать изделие с пониженной надежностью. При этом он может выпустить чертежи в установленные планом сроки и сократить срок технологической подготовки производства.

При конструировании такие компромиссные решения почти неизбежны.

Для инженера в области надежности важно понимание целесообразной последовательности и объема работ, выполняемых разработчиком после получения им задания.

При выполнении сложного проекта необходимо разбить все общие требования в области надежности, цели и задачи на отдельные

частные цели и задачи, относящиеся к элементам проекта. Такое распределение целей и задач обычно выполняется на уровне комплексного руководства проектом или подготавливается для него службой надежности.

Наименее жесткие возможные требования к надежности должны предъявляться к конструктивным элементам большой сложности или к тем элементам, в которых используются новейшие достижения технического прогресса.

К относительно простым элементам, в которых используются хорошо известные и апробированные конструктивные принципы, должны предъявляться наиболее жесткие требования по надежности.

При конструировании может быть запрещено применение определенных материалов, деталей или методов. Например, нельзя в некоторых случаях использовать материалы с недопустимыми характеристиками по горючести, газовыделению и другими. Нецелесообразно также использовать электронные элементы, характеристики которых считаются неудовлетворительными для проектируемой конструкции. Могут быть и другие ограничения.

Служба надежности может также потребовать от конструктора следовать установившейся практике в области надежности, применять определенные материалы и детали и использовать некоторые конструктивные методы. Например, для электротехнических и электронных изделий лучше применять апробированные полупроводниковые приборы типа транзисторов и диодов вместо электровакуумных приборов. Кроме того, может быть рекомендовано предусматривать резервирование в некоторых частях схемы. При соединении, например, неоднородных металлов для защиты от возможных коррозионных процессов лучше использовать апробированные на практике методы конструирования. В целях уменьшения числа отказов и повышения срока службы элементов рекомендуется облегчать режимы работы элементов проектируемого оборудования.

Существует несколько методов, с помощью которых можно повысить конструктивную надежность сложной технической системы.

Одним из способов повышения надежности, когда это допустимо с точки зрения ограничений в массе, объеме и стоимости, является *создание больших запасов прочности конструкции*. При рас-

чете ответственных силовых конструкций это означает, например, что нужно рассчитать конструкцию на 4000 кг, когда максимальное усилие по техническим условиям составляет 400 кг. При проектировании гидравлических или пневматических систем это означает, например, конструирование насоса, рассчитанного на напор 20 м при установленном максимальном напоре в 10 м.

Для конструктора, стремящегося обеспечить высокую надежность, полезными оказываются два основных подхода – *упрощение* и *стандартизация*. Чем проще конструкция, тем выше присущая ей надежность. Уменьшение количества деталей или числа различных типов используемых деталей представляет собой очевидный метод повышения потенциальной надежности любого устройства. Стандартные элементы и схемы обычно проходят тщательную приработку, и вероятность появления каких-либо неприятных неожиданностей при их использовании очень мала.

Большое значение для повышения надежности имеет обеспечение *возможности проведения производственных и эксплуатационных испытаний и контроля*. Разработчик должен так выбирать принцип действия и схему устройства его узлов, чтобы они могли быть подвергнуты полной неразрушающей функциональной проверке. Например, предохранительный клапан может быть проверен в работе, тогда как такая же проверка разрывной мембраны в гидравлической системе приводит к ее разрушению. Обмотка электромагнита может быть повторно много раз проверена в работе, а электрический предохранитель является устройством одноразового действия. Очень важной характеристикой высоконадежной конструкции является также возможность проконтролировать ее основные размеры, отделку поверхностей и другие нефункциональные особенности.

Если конструкция требует применения специальных технологических процессов или необычных производственных методов, то эти требования должны быть четко указаны в чертежах и технических условиях. Кроме того, в них должны быть приведены предупредительные сведения относительно организации системы контроля производственных процессов и качества изделия. Это необходимо для минимизации неблагоприятного влияния особенностей, характеристик оборудования, способов его установки и степени подготовки персонала на надежность и качество изделия.

Другим способом повышения надежности устройства является *создание облегченных условий эксплуатации*. Этого можно добиться путем контроля, ослабления ударных нагрузок с помощью амортизации, уменьшения влажности при транспортировке, хранении и эксплуатации и прочих мероприятий. Несмотря на то что изменение окружающих условий обходится очень дорого и связано с дополнительными трудностями, тем не менее оно в некоторых случаях необходимо. В частности, когда невозможно найти приемлемое конструктивное решение для обеспечения надежности при работе во всем диапазоне предельных условий. Реализован этот способ может быть, например, путем применения специальных контейнеров, в которых поддерживаются требуемые условия.

Важное место в обеспечении надежности системы занимает подбор материала, из которого конструируют детали и узлы конструкций, так как от этого тоже зависят надежность и долговечность изделия. В зависимости от внешних воздействующих факторов и условий эксплуатации подбирают соответствующие материалы с определенными характеристиками.

Для повышения надежности конструктор может *использовать менее сложную конструкцию*, обладающую более высокой надежностью при всех условиях, кроме наихудших их возможных сочетаний. Вероятность столкнуться с самыми худшими сочетаниями условий окружающей среды статистически весьма мала, поэтому конструктор может ожидать выигрыша в стоимости и надежности.

Кроме того, необходимо проявлять неизменное глубокое внимание ко всем случаям отказов и недостаткам в конструкции. Сведения об этом могут поступать из конструктивного анализа, из отчетов по испытаниям, отчетов о неисправностях при эксплуатации, а также из материалов исследования причин отказов. Оперативные эффективные корректировочные меры могут в значительной степени повысить надежность проектируемого изделия.

Наконец, еще один метод повышения надежности — *резервирование*. Далее мы рассмотрим его более подробно.

Таким образом, существует несколько методов, с помощью которых можно повысить конструктивную надежность. В каждом случае эти методы необходимо всесторонне оценить и выяснить ограничения, влияющие на конкретную разрабатываемую конструкцию.

Следует отметить, что наряду с конструктивными методами, обеспечивающими работоспособность системы, широко применяют вероятностные методы оценки ее надежности на этапах эскизного и рабочего проектирования.

С целью определения количественных показателей надежности составляют функциональную схему и циклограмму работы системы во времени при ее эксплуатации. Более полному пониманию работы системы способствует принципиальная схема, в которой подробно описывают соединение узлов и элементов, а также их назначение. На основании функциональной и принципиальной схем работы системы составляют структурную схему надежности с указанием резервирования отдельных элементов, узлов и каналов. На основании структурной схемы надежности составляют перечень элементов и узлов с указанием интенсивностей отказов, взятых из справочной литературы или полученных по результатам испытаний или эксплуатации. Далее на основании исходных данных выполняют расчет проектной надежности системы.

Анализ надежности на стадии проектирования дает необходимые данные для оценки конструкции. Такой анализ проводят для каждого варианта конструкции, а также после внесения конструктивных изменений. При обнаружении конструктивных недостатков, снижающих уровень надежности системы, проводят конструктивные изменения и корректируют техническую документацию.

4.6. Повышение надежности резервированием элементов системы

Резервирование повышает надежность системы путем введения резервных элементов, являющихся избыточными по отношению к минимальной функциональной структуре системы, необходимой и достаточной для выполнения заданных функций.

Иначе говоря, *резервирование* – это наличие в изделии больше одного средства, необходимого для выполнения требуемой функции.

Резервирование может быть достаточно сложным. На рис. 4.3 приведена классификационная схема, позволяющая наглядно представить связи в методе резервирования [9].



Рис. 4.3. Метод резервирования

Резервирование *по виду* бывает структурное, функциональное, информационное и временное.

Структурное резервирование — это введение в структуру объекта дополнительных элементов, выполняющих функции основных элементов в случае их отказа.

Функциональное резервирование — это использование способности элементов выполнять дополнительные функции, повышая надежность системы за счет перераспределения функций при отказах элементов.

Информационное резервирование предусматривает использование избыточной информации. Его простейшим примером является многократная передача одного и того же сообщения по каналу связи.

Временное резервирование предусматривает использование избыточного времени работы.

Для анализа структурной надежности технических систем интерес представляет структурное резервирование, которое далее и будем называть резервированием.

Существует два метода повышения надежности систем путем структурного резервирования систем с разными способами соединения элементов:

- 1) общее резервирование, при котором резервируется система в целом;
- 2) раздельное (поэлементное) резервирование, при котором резервируются отдельные части (элементы) системы.

Обычно стремятся применять раздельное резервирование, так как при этом выигрыш в надежности часто достигается значительно меньшими затратами, чем при общем резервировании.

Резервирование характерно тем, что оно позволяет повысить надежность системы по сравнению с надежностью составляющих ее элементов. Повышение надежности отдельно взятых элементов требует больших материальных затрат. В этих условиях резервирование, например, за счет введения дополнительных элементов является эффективным средством обеспечения требуемой надежности систем.

Резервирование по способу включения резерва может быть с нагрузением и замещением.

Нагруженное резервирование — это резервирование, при котором все средства, способные выполнять требуемую функцию, работают одновременно (рис. 4.4, а). Этот вид резервирования еще называют постоянным.

Резервирование замещением — это резервирование, при котором часть средств, способных выполнять требуемую функцию, предназначена для работы, а остальная часть средств не работает до момента появления необходимости в ней (рис. 4.4, б). Этот вид резервирования еще называют ненагруженным.

Скользящее резервирование представляет собой разновидность резервирования замещением, при котором основные элементы объекта резервируются элементами, каждый из которых может заменить любой отказавший элемент.

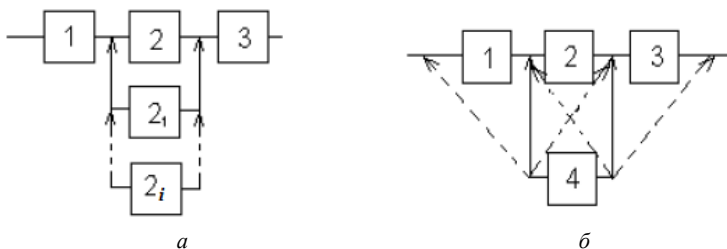


Рис. 4.4. Схемы резервирования:
а — ненагруженное; б — скользящее

Степень избыточности элементов в системе характеризуется кратностью резервирования.

Кратность резерва — это отношение числа резервных элементов объекта к числу резервируемых ими основных элементов.

Резервирование с целой кратностью имеет место, когда один основной элемент резервируется одним или более резервными элементами.

Резервирование с дробной кратностью — это такое резервирование, когда два и более однотипных элемента резервируются одним и более резервными элементами. Наиболее распространенным вариантом резервирования с дробной кратностью является такой, когда число основных элементов превышает число резервных. Резервирование, кратность которого равна единице, называется *дублированием*.

Расчеты надежности систем с параллельно включенными резервными элементами зависят от способа резервирования.

Расчет систем с *нагруженным* или *постоянным резервированием* осуществляется по формулам последовательного и параллельного соединения элементов аналогично расчету комбинированных систем. Подробно эти методы расчета будут рассмотрены при выполнении практических заданий. При этом считается, что резервные элементы работают в режиме основных как до, так и после их отказа. Поэтому надежность резервных элементов не зависит от момента их перехода из резервного состояния в основное и равна надежности основных элементов.

При *ненагруженном резервировании* резервные элементы последовательно включаются в работу при отказе основного, затем первого резервного и так далее, что показано на рис. 4.4, *а*. В этом случае надежность резервных элементов зависит от момента их перехода в основное состояние. Такое резервирование в различных технических системах встречается наиболее часто, так как по сути оно аналогично замене отказавших элементов и узлов на запасные.

Скольльзящее резервирование используется для резервирования нескольких одинаковых элементов системы одним или несколькими одинаковыми резервными. Например, на рис. 4.4, *б*, все элементы идентичны, а элемент 4 — избыточный. Очевидно, отказ системы произойдет, если из общего количества основных идентичных элементов число отказавших превысит число резервных. Расчет вероятности безотказной работы систем со скольльзящим резервированием

аналогичен расчету систем типа « m из n », который будет подробно рассмотрен при выполнении практических работ.

На рис. 4.5 представлена схема *постоянного общего резервирования*.

Вероятность безотказности работы основной и каждой из n резервных цепей схемы будет равна

$$P_j(t) = \prod_{i=1}^n p_{ij}(t),$$

где $p_{ij}(t)$ – вероятность безотказной работы i -го элемента в j -й цепи.

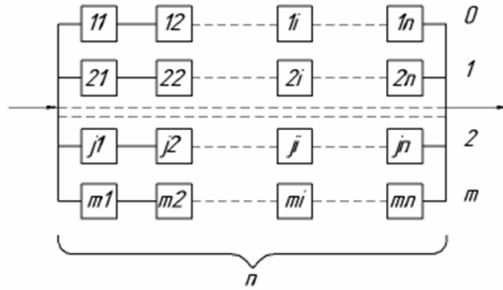


Рис. 4.5. Схема постоянного общего (поканального) резервирования

Вероятность отказа одной цепи определяется

$$Q_j(t) = 1 - \prod_{i=1}^n p_{ij}(t),$$

где $p_{ij}(t)$ – вероятность безотказной работы i -го элемента в j -й цепи.

Вероятность отказа всей системы (основной и параллельных цепей)

$$Q_{\Sigma}(t) = \prod_{j=1}^{m+1} Q_j(t) = \prod_{j=1}^{m+1} \left[1 - \prod_{i=1}^n p_{ij}(t) \right].$$

Наконец, вероятность безотказной работы системы

$$P_{\Sigma}(t) = 1 - Q_{\Sigma}(t) = 1 - \prod_{j=1}^{m+1} \left[1 - \prod_{i=1}^n p_{ij}(t) \right].$$

Полагая, что резервированная система составлена из одинаковых элементов $p_i(t) = p_j(t) = p$, $q_i(t) = q_j(t) = q$, перепишем выражения для определения вероятности безотказной работы

$$P_{\Sigma_{\text{общ}}} = 1 - (1 - p^n)^{m+1},$$

тогда вероятность отказа

$$Q_{\Sigma_{\text{общ}}} = (1 - p^n)^{m+1} = [1 - (1 - q)^n]^{m+1}.$$

Схема замещения при *постоянном раздельном резервировании* представлена на рис. 4.6.

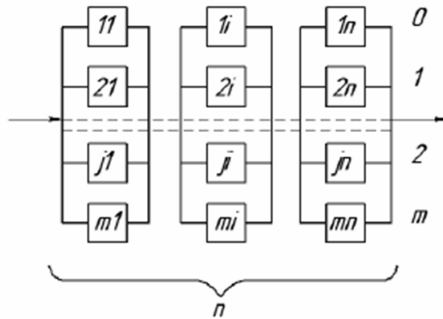


Рис. 4.6. Схема замещения при постоянном раздельном резервировании

Для этой схемы вероятность безотказной работы каждой группы равна

$$P_i(t) = \left\{ 1 - \prod_{j=1}^{m+1} [1 - p_{ij}(t)] \right\},$$

где $p_{ij}(t)$ — вероятность безотказной работы j -го элемента в i -й группе.

Тогда вероятность безотказной работы определится из выражения

$$P_{\Sigma}(t) = \prod_{i=1}^n \left\{ 1 - \prod_{j=1}^{m+1} [1 - p_{ij}(t)] \right\}.$$

Полагая, что резервированная система составлена из одинаковых элементов, вероятность безотказной работы равна

$$P_{\Sigma_{\text{разд}}} = [1 - (1 - p)^{m+1}]^n,$$

тогда вероятность отказа

$$Q_{\Sigma_{\text{общ}}} = 1 - [1 - (1 - p)^{m+1}]^n = 1 - (1 - q^{m+1})^n.$$

Если при последовательном соединении элементов общая надежность системы (т. е. вероятность безотказной работы) ниже надежности самого ненадежного элемента, то при резервировании общая надежность системы может быть выше надежности самого надежного элемента. С другой стороны, избыточные системы, приобретая вы-

сокую надежность, могут приобрести ряд свойств, которые снижают их эффективность, в частности, для избыточных систем характерны большие экономические затраты на сооружение и эксплуатацию.

Структурная схема с поэлементным резервированием имеет более высокую надежность по сравнению с поканальным резервированием.

Анализируя системы с резервированием, можно заранее подсчитать, сколько резервных элементов необходимо для обеспечения заданного уровня надежности системы. Наоборот, исходя из требования к надежности системы, можно предъявить требования к надежности элементов. Также можно рассчитать надежность системы, построенной из резервных элементов с известной надежностью.

4.7. Повышение надежности наиболее ненадежного узла системы

Кроме резервирования, повышение конструктивной надежности конкретных элементов в технической системе (ТС) также представляется наиболее простым приемом повышения надежности системы. Действительно, теоретически всегда можно рассчитать и указать такие характеристики надежности элементов, чтобы вероятность безотказной работы системы удовлетворяла заданным требованиям. Однако практическая реализация такой высокой надежности элементов может оказаться невозможной.

Рассмотрение методов обеспечения надежности элементов ТС является предметом специальных технологических и физико-химических дисциплин и выходит за рамки теории надежности. Однако высоконадежные элементы, как правило, имеют большие габариты, массу и стоимость. Исключение составляет использование более совершенной элементной базы, реализуемой на принципиально новых физических и технологических принципах (например, в РЭС – переход от дискретных элементов на интегральные схемы).

В общем случае при выборе элемента (группы элементов) для повышения надежности необходимо исходить из условия обеспечения при этом максимального эффекта.

Очевидно, максимальное увеличение надежности системы обеспечит элемент, для которого частная производная вероятности безотказной работы системы по вероятности безотказной работы каждого из элементов будет максимальной и положительной.

При этом наибольшее влияние на надежность системы с параллельным соединением оказывают элементы, обладающие высоким значением производной, а при последовательном соединении — наименее надежные.

В более сложных случаях для выбора элементов, подлежащих изменению, используются как аналитические, так и численные методы оптимизации надежности.

4.8. Технологические способы обеспечения надежности в процессе изготовления

Следующим этапом повышения надежности является технологическая подготовка производства. Технологическая подготовка производства — это совокупность взаимосвязанных процессов, обеспечивающих технологическую готовность производства к выпуску изделий заданного уровня качества при установленных сроках, объеме выпуска и затратах.

Разработчик совместно с соисполнителями на основе технологической проработки проектной документации и выполнения научно-исследовательских и опытно-технологических работ формирует технологические и организационные решения по производству. Разрабатываются конструкторско-технологические решения по изделию с учетом их технологичности, реализуемости в производстве и конкурентоспособности.

Работы по технологической подготовке производства предусматривают формирование принципиально новых и наиболее ответственных технологических процессов и средств технологического оснащения в рамках обеспечения качества и надежности изделия. При этом учитываются предложения по отработке технологических процессов и средств технологического оснащения в рамках обеспечения качества и надежности изделия с учетом требований производства.

Проектированию технологических процессов предшествует подробное изучение конструкторской документации, технических условий на изготовление и условий работы изделия. При контроле конструкторской документации выявляют возможность улучшения технологичности конструкции изделия. Обращают внимание на повышение жесткости отдельных деталей, применение высокопроизводительных режимов обработки, унификацию и стандартизацию размеров конструктивных элементов и другие особенности изделия. В результате улучшения технологичности конструкции может быть получен значительный результат как по качеству и надежности изделия, так и по экономическому эффекту.

Технологичность конструкции обеспечивает реализацию в изделии комплекса качеств: наибольшую его функциональную пригодность, надежность, экономичность изготовления и эксплуатации.

Технологичность конструкции достигается при двух основных условиях — технологической рациональности и преемственности конструктивных решений. Реализуются эти условия путем рационализации изготовления элементов и сборки изделия, типизации технологических процессов, их автоматизации и механизации, применения групповых технологий. Также для этого необходимо обеспечение преемственности и быстрой переналаживаемости технических средств производства.

На выбор технологического процесса влияют время подготовки технологической оснастки, наличие соответствующего технологического оборудования и желаемая степень автоматизации процесса. Выбранный процесс должен обеспечивать наилучшую точность изготовления и наименьшую его себестоимость. С повышением точности изготовления прогнозируемо повышается надежность изделия.

Другим основным мероприятием по обеспечению и повышению надежности сложных технических систем является соблюдение точности и стабильности технологических процессов при их производстве.

На современных промышленных предприятиях применяют два метода статистического контроля: текущий контроль технологического процесса и выборочный метод контроля.

Выборочный метод контроля не оказывает непосредственного влияния на производство, так как он служит для контроля готовой продукции, позволяет выявить объем брака, причины его возникновения.

Метод статистического контроля качества позволяет своевременно предупреждать нарушения в процессах.

Основные цели статистического анализа точности и стабильности технологического процесса — получение и обработка систематизированной непрерывной информации о качестве получаемой продукции. Эта информация необходима для дальнейшего совершенствования технологического процесса, а также для определения оптимальных параметров его статистического регулирования.

Под статистическим анализом понимается совокупность действий по установлению статистическими методами значений показателей точности и стабильности технологического процесса и определению закономерностей их изменения во времени.

Под *точностью технологического процесса* понимается его свойство обеспечивать близость действительных значений параметров к нормируемым их значениям.

Под *стабильностью технологического процесса* понимается его свойство обеспечивать постоянство распределения вероятностей его параметров в течение некоторого интервала времени без вмешательства извне.

Состояние технологического процесса характеризуется суммарной погрешностью изготовления, возникающей вследствие действия причин случайного и систематического характера. Оценка погрешности изготовления производится методами математической статистики.

Основными документами при статистическом анализе состояния технологических операций или процесса являются карта измеренных данных и карта статистической обработки результатов измерений.

Набор экспериментальных данных осуществляется путем измерения контролируемых параметров выборки единиц продукции с одновременной регистрацией результатов измерений в карте данных. Контрольная карта — это графическое отражение состояния процесса, его уровня и изменчивости.

Метод контрольных карт представляет собой простой графо-аналитический метод оценки степени состояния технологического процесса путем сравнения значений отдельных статистических данных с контрольными границами. Метод связан с нанесением на диаграмму значений измеряемых параметров и их сравнением с нормативными значениями.

Полученные результаты статистического анализа позволяют дать аргументированную оценку состояния технологических процессов и предложить рекомендации по их усовершенствованию.

Особую значимость при статистическом анализе технологического процесса приобретает взаимодействие служб предприятия, учитывая необходимость достоверности получаемой информации для принятия управленческих решений.

В общем случае контроль стабильности технологических процессов можно проводить и другими методами. Например, расчетно-статистический метод используется для количественной оценки точности и стабильности технологических процессов, а также прогнозирования их надежности на основе количественных характеристик приведенных отклонений.

Стабильность технологического процесса может быть обеспечена за счет его механизации и автоматизации, а также поддержанием требуемой технологической точности станков, оснастки и высокой технологической дисциплины. Кроме того, большую роль играют соблюдение качества исходных материалов и заготовок, использование системы бездефектного изготовления продукции, повышение уровня подготовки производственного персонала и научной организации труда. Также важно обеспечить надежность, эффективность средств и методов контроля. В целом наиболее эффективным для обеспечения стабильности технологического процесса является поддержание единства вышеназванных мер.

4.9. Обеспечение надежности сложных технических систем в условиях эксплуатации

Кроме этапов проектирования и производства, существенное влияние на надежность конструкции и эффективность применения объекта оказывают принципы его эксплуатации и технического обслуживания.

Надежность технических систем в условиях эксплуатации определяется рядом эксплуатационных факторов. К ним можно отнести квалификацию обслуживающего персонала, качество и количество проводимых работ по техническому обслуживанию, наличие запасных частей, использование измерительной и проверочной аппаратуры. Важно также наличие технических описаний и инструкций по эксплуатации.

В процессе эксплуатации отказы системы принято подразделять на две основные категории – внезапные и постепенные.

Внезапные отказы связаны с наличием в изделии скрытых производственных дефектов, причинами конструктивного характера, ошибками обслуживающего персонала.

Постепенные отказы системы обусловлены постепенными изменениями параметров. Такое изменение параметров в основном вызвано старением элементной базы системы.

По мере совершенствования обслуживания значение вероятности безотказной работы приближается к единице.

Замена элементов с возрастающей во времени интенсивностью отказов возможна во всех сложных технических системах. С целью уменьшения во времени интенсивности отказов вводят техническое обслуживание системы, которое позволяет обеспечить поток отказов у сложных систем с конечной интенсивностью в течение заданного срока эксплуатации, т. е. сделать близким к постоянному.

В процессе эксплуатации при техническом обслуживании интенсивность отказов системы, с одной стороны, имеет тенденцию к увеличению, с другой стороны – к уменьшению в зависимости от того, на каком уровне проведено обслуживание. Если техническое обслуживание проведено качественно, то интенсивность отказов уменьшается, а если это обслуживание проведено плохо, то увеличивается.

Используя накопленный опыт, можно всегда выбрать тот или иной объем функционирования, который обеспечит нормальную работу системы до очередного технического обслуживания с заданной вероятностью безотказной работы. Или, наоборот, задаваясь последовательностью объемов функционирования, можно определить приемлемые сроки проведения технического обслуживания, обеспечивающего работу системы на заданном уровне надежности.

Для повышения надежности сложных технических систем в условиях эксплуатации проводят ряд мероприятий, которые можно подразделить на следующие четыре группы:

- 1) разработку научных методов эксплуатации;
- 2) сбор, анализ и обобщение опыта эксплуатации;
- 3) связь проектирования с производством изделий машиностроения;
- 4) повышение квалификации обслуживающего персонала.

Научные методы эксплуатации включают научно обоснованные методы подготовки изделия к работе, проведения технического обслуживания, ремонта и других мероприятий по повышению надежности сложных технических систем в процессе их эксплуатации. Порядок и технологию проведения этих мероприятий описывают в соответствующих руководствах и инструкциях по эксплуатации конкретных изделий.

Более качественное выполнение эксплуатационных мероприятий по обеспечению надежности систем обеспечивается результатами статистического исследования. При эксплуатации систем большую роль играет накопленный опыт. Значительную часть опыта эксплуатации используют для решения частных организационно-технических мероприятий. Однако накопленные данные необходимо использовать не только для решения задач сегодняшнего дня, но и для создания будущих изделий с высокой надежностью.

Большое значение имеет правильная организация сбора сведений об отказах. Содержание мероприятий по сбору таких сведений определяется типом изделий и особенностями эксплуатации этих изделий. Возможными источниками статистической информации могут быть сведения, полученные по результатам различных видов испытаний и эксплуатации, которые оформляются периодически в виде отчетов о техническом состоянии и надежности изделий.

Изучение особенностей их поведения дает возможность использовать накопленные данные для проектирования будущих изделий. Таким образом, сбор и обобщение данных об отказах изделий — одна из важнейших задач, на которую должно быть обращено особое внимание.

Эффективность эксплуатационных мероприятий во многом зависит от квалификации обслуживающего персонала. Однако влияние этого фактора неодинаково. Так, при выполнении в процессе обслуживания довольно простых операций влияние высокой квалификации работника сказывается мало, и, наоборот, квалификация обслуживающего персонала играет большую роль при выполнении сложных операций, связанных с принятием субъективных решений.

Организационно-технические методы по восстановлению и поддержанию надежности систем при эксплуатации. Известно, что в процессе эксплуатации изделие определенное время используют по назначению для выполнения соответствующей работы, некоторое время оно транспортируется и хранится, а часть времени идет на техническое обслуживание и ремонт. При этом для сложных технических систем в нормативно-технической документации устанавливают виды технических обслуживаний (ТО-1, ТО-2, ...) и ремонтов (текущий, средний или капитальный). На стадии эксплуатации изделий проявляются технико-экономические последствия низкой надежности, связанные с простоями и затратами на устранение отказов и приобретение запасных частей.

С целью поддержания надежности изделий на заданном уровне в процессе эксплуатации необходимо проводить комплекс мероприятий, который может быть представлен в виде двух групп:

- 1) мероприятия по соблюдению правил и режимов эксплуатации;
- 2) мероприятия по восстановлению работоспособного состояния.

К первой группе мероприятий относятся обучение обслуживающего персонала, соблюдение требований эксплуатационной документации, последовательности и точности проводимых работ при техническом обслуживании, диагностический контроль параметров и наличие запасных частей, осуществление авторского надзора и т. п.

К основным мероприятиям второй группы относятся корректирование системы технического обслуживания, периодический

контроль за состоянием изделия и определение средствами технического диагностирования остаточного ресурса и предотказного состояния, внедрение современной технологии ремонта, анализ причин отказов и организация обратной связи с разработчиками и изготовителями изделий.

Многие изделия значительную часть времени эксплуатации находятся в состоянии хранения, т. е. не связаны с выполнением основных задач. Для изделий, работающих в таком режиме, преобладающая часть отказов связана с коррозией, а также воздействием пыли, грязи, температуры и влаги. Для изделий, находящихся значительную часть времени в эксплуатации, преобладающая часть отказов связана с износом, усталостью или механическим повреждением деталей и узлов. В состоянии простоя интенсивность отказов элементов существенно меньше, чем в рабочем состоянии. Так, для электромеханического оборудования это соотношение соответствует 1:10, для механических элементов – 1:30, для электронных элементов – 1:80.

Необходимо отметить, что с усложнением техники и расширением областей ее использования возрастает роль этапа эксплуатации техники в суммарных затратах на создание и использование технических систем. Затраты на поддержание в работоспособном состоянии за счет технических обслуживаний и ремонтов превышают стоимость новых изделий в несколько раз.

Техническая политика предприятий должна быть направлена на снижение объемов и сроков проведения работ по техническому обслуживанию и ремонту систем за счет повышения надежности и долговечности основных узлов.

Консервация системы (оборудования) в состоянии поставки помогает сохранить ее работоспособность, как правило, в течение 3...5 лет. Для поддержания надежности системы (оборудования) в процессе эксплуатации на заданном уровне объем производства запасных частей должен составлять 25...30 % от начальной стоимости.

Обоснование технических требований по вопросу повышения надежности устройств состоит в анализе положительных и отрицательных сторон различных систем их технического обслуживания.

Рассмотрим примеры влияния принципов организации технического обслуживания на надежность объектов.

Существуют следующие правила замены и ремонта отдельных блоков или агрегатов технических объектов: по календарным срокам независимо от наработки объекта; по выработке заранее установленных межремонтных ресурсов; по техническому состоянию.

Замена или ремонт блоков по календарным срокам, когда не учитывается, использовался объект или нет, ведет обычно к неоправданным материальным потерям. Применяются они лишь при неумении или нежелании организовать учет наработки объектов, за исключением случаев замены объектов с ограниченным сроком годности.

При замене и ремонте отдельных блоков по выработке ресурса незначительно усложняется конструкция объекта, так как могут устанавливаться измерители наработки. Организация технического обслуживания сохраняется сравнительно простой, но возможности экономии сил и средств используются не полностью.

При замене блоков по техническому состоянию периодически контролируется определяющий параметр блока или агрегата, характеризующий его приближение к отказу или границе допуска.

В этом случае решение о замене, ремонте или более подробной проверке блока или агрегата принимается по результатам контроля. При этом значительно сокращаются трудозатраты на обслуживание, расход дорогостоящих агрегатов и деталей и одновременно повышается надежность. Сказанное о замене и ремонте агрегатов можно распространить на их разборку, проверку и другие работы по техническому обслуживанию.

Замена и ремонт по техническому состоянию возможны лишь для объектов, которые специально конструируются с учетом такой особенности технического обслуживания. Необходимо заранее найти определяющие параметры агрегатов, предусмотреть встроенные датчики для их измерения, места подсоединения передвижных средств контроля и прочее. Кроме того, для полной гарантии безотказной работы объекта целесообразно предусмотреть возможные последствия отказов, с тем чтобы случайный отказ элемента, агрегата, системы по возможности не приводил к чрезвычайному происшествию.

Практическая работа 7

Количественный анализ надежности систем обеспечения безопасности

Цель работы — изучить основные методы анализа надежности сложных технических систем на примере конкретной системы обеспечения безопасности.

Основные теоретические сведения

Анализ структурной надежности технической системы включает следующие операции:

- 1) анализируются устройства и выполняемые системой и ее составными частями функции, а также взаимосвязь составных частей;
- 2) формируется содержание понятия «безотказная работа» для данной конкретной системы;
- 3) определяются возможные отказы составных частей и системы, их причины и возможные последствия;
- 4) оценивается влияние отказов составных частей системы на ее работоспособность;
- 5) система разделяется на элементы, показатели надежности которых известны (интенсивность отказов, наработка до отказа);
- 6) составляется структурно-логическая схема надежности технической системы, которая является моделью ее безотказной работы;
- 7) составляются расчётные зависимости для определения показателей надёжности ТС с использованием данных по надежности её элементов и с учётом структурной схемы.

Интенсивность отказов — показатель надежности невосстанавливаемых объектов, равный отношению среднего числа отказавших в единицу времени (или наработки в других единицах) объектов к общему числу объектов.

Средняя наработка до отказа — математическое ожидание наработки от начала эксплуатации до отказа невосстанавливаемого изделия. Под наработкой понимается продолжительность или объем выполненной работы объектом.

Гамма-процентная наработка до отказа — наработка, в течение которой отказ объекта не возникает с вероятностью γ , выраженной в процентах.

Расчеты показателей безотказности ТС обычно проводятся в предположении, что как вся система, так и любой ее элемент могут находиться только в одном из двух возможных состояний – работоспособном и неработоспособном, а отказы элементов независимы друг от друга.

Состояние системы (работоспособное или неработоспособное) определяется состоянием элементов и их сочетанием. Поэтому теоретически возможно расчет безотказности любой ТС свести к перебору всех возможных комбинаций состояний элементов, определению вероятности каждого из них и сложению вероятностей работоспособных состояний системы.

Системы с последовательным соединением элементов

Системой с последовательным соединением элементов называется система, в которой отказ любого элемента приводит к отказу всей системы. Такое соединение элементов в технике встречается наиболее часто, поэтому его называют основным соединением. Считая отказы элементов независимыми, вероятность одновременной безотказной работы n элементов определяется по теореме умножения вероятностей

$$P(t) = p_1(t)p_2(t)\dots p_n(t) = \prod_{i=1}^n p_i(t) = \prod_{i=1}^n (1 - q_i(t)), \quad (4.1)$$

где $p_i(t)$ – вероятность безотказной работы i -го элемента системы в течение наработки t (ч); $q_i(t)$ – вероятность отказа i -го элемента системы в течение наработки t (ч). Далее аргумент t в скобках, показывающий зависимость показателей надежности от времени, опускаем для сокращения записей формул.

Если система состоит из равнонадёжных элементов ($p_i = p$), то получим

$$P = p_i^n, Q = 1 - (1 - q)^n. \quad (4.2)$$

Системы с параллельным соединением элементов

Системой с параллельным соединением элементов называется система, отказ которой происходит только в случае отказа всех ее элементов. Такие схемы надежности характерны для ТС, в которых элементы дублируются или резервируются, т. е. параллельное сое-

динение используется как метод повышения надежности. Однако такие системы встречаются и самостоятельно.

Для отказа системы с параллельным соединением элементов в течение наработки t необходимо и достаточно, чтобы все ее элементы отказали в течение этой наработки. Так что вероятность безотказной работы системы равна

$$P = 1 - Q = 1 - \prod_{i=1}^n q_i = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - p_i). \quad (4.3)$$

Если система состоит из равнонадёжных элементов ($p_i = p$), то получим

$$Q = q^n, P = 1 - (1 - p)^n. \quad (4.4)$$

Системы типа « m из n »

Систему типа « m из n » можно рассматривать как вариант системы с параллельным соединением элементов, отказ которой произойдет, если из n элементов, соединенных параллельно, работоспособными окажутся менее m элементов ($m < n$) (рис. 4.7).

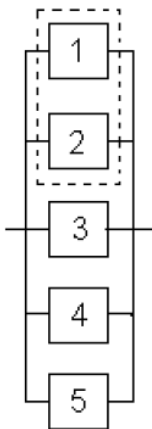


Рис. 4.7. Система «2 из 5»

Для расчета надежности систем типа « m из n » при сравнительно небольшом количестве элементов можно воспользоваться методом прямого перебора. Он заключается в установлении работоспособности каждого из возможных состояний системы, которые опреде-

ляются различными сочетаниями работоспособных и неработоспособных состояний элементов. С учетом всех возможных состояний вероятность безотказной работы системы может быть найдена по теореме сложения вероятностей всех работоспособных сочетаний.

В табл. 4.1 приведены формулы для расчета вероятности безотказной работы систем типа « m из n » с равнонадежными элементами при $m \leq n \leq 5$ ($p_n = p$). Очевидно, при $m = 1$ система превращается в обычную систему с параллельным соединением элементов, а при $m = n$ – с последовательным соединением.

Таблица 4.1

Формулы для расчета вероятности безотказной работы систем типа « m из n » с равнонадежными элементами

m	Общее число элементов, n				
	1	2	3	4	5
1	p	$2p - p^2$	$3p - 3p^2 + p^3$	$4p - 6p^2 + 4p^3 - p^4$	$5p - 10p^2 + 10p^3 - 5p^4 + p^5$
2	–	p^2	$3p^2 - 2p^3$	$6p^2 - 8p^3 + 3p^4$	$10p^2 - 20p^3 + 15p^4 - 4p^5$
3	–	–	p^3	$4p^3 - 3p^4$	$10p^3 - 15p^4 + 6p^5$
4	–	–	–	p^4	$5p^4 - 4p^5$
5	–	–	–	–	p^5

Мостиковые схемы

Мостиковая структура (рис. 4.8) не сводится к параллельному или последовательному типу соединения элементов, а представляет собой соединение последовательных цепочек элементов с диагональными элементами, включенными между узлами различных параллельных ветвей.

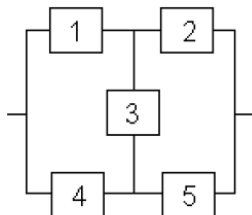


Рис. 4.8. Мостиковая схема

Работоспособность такой системы определяется не только количеством отказавших элементов, но и их положением в структурной схеме. Например, работоспособность ТС, схема которой приведена на рис. 4.8, будет утрачена при одновременном отказе элементов 1 и 4, или 2 и 5, или 1, 3 и 5 и др. В то же время отказ элементов 1 и 5, или 2 и 4, или 1, 3 и 2, или 4, 3 и 5 к отказу системы не приводит.

Вероятность безотказной работы этой системы определяется как сумма вероятностей всех работоспособных состояний (метод прямого перебора):

$$P = p_1 p_2 p_3 p_4 p_5 + p_1 p_2 p_3 p_4 q_5 + p_1 p_2 p_3 q_4 p_5 + p_1 p_2 q_3 p_4 p_5 + p_1 q_2 p_3 p_4 p_5 + q_1 p_2 p_3 p_4 p_5 + p_1 p_2 q_3 p_4 q_5 + p_1 q_2 p_3 p_4 q_5 + p_1 p_2 q_3 q_4 p_5 + p_1 q_2 q_3 q_4 p_5 + q_1 p_2 p_3 q_4 p_5 + q_1 p_2 q_3 p_4 p_5 + q_1 q_2 p_3 q_4 p_5 + q_1 p_2 q_3 p_4 q_5 + p_1 q_2 q_3 p_4 q_5.$$

В случае равнонадёжных элементов для этой же системы получим формулу

$$P = p^5 + 5p^4 q + 8p^3 q^2 + 2p^2 q^3 = 2p^5 - 5p^4 + 2p^3 + 2p^2.$$

Пример количественного анализа надёжности системы воздухоочистки

Система воздухоочистки состоит, например, из некоторых 15 узлов, которые условно можно представить в виде схемы (рис. 4.9).

Из анализа данных статистических справочников или информации от производителя определим входные данные для расчета – интенсивность отказа каждого из узлов:

– гамма-процентная наработка $\gamma = 70 \%$;

– интенсивность отказов, ч⁻¹:

$$\lambda_1 = 0,05 \cdot 10^{-6};$$

$$\lambda_2 = \lambda_3 = \lambda_4 = \lambda_5 = \lambda_6 = 1 \cdot 10^{-6};$$

$$\lambda_7 = \lambda_8 = \lambda_9 = \lambda_{10} = 0,5 \cdot 10^{-6};$$

$$\lambda_{11} = \lambda_{12} = \lambda_{13} = \lambda_{14} = 0,2 \cdot 10^{-6};$$

$$\lambda_{15} = 0,02 \cdot 10^{-6}.$$

Некоторые статистические справочные данные представлены в прил. Б.

Произведем преобразование системы в несколько этапов. Этапы 1...4 представлены на рис. 4.10.

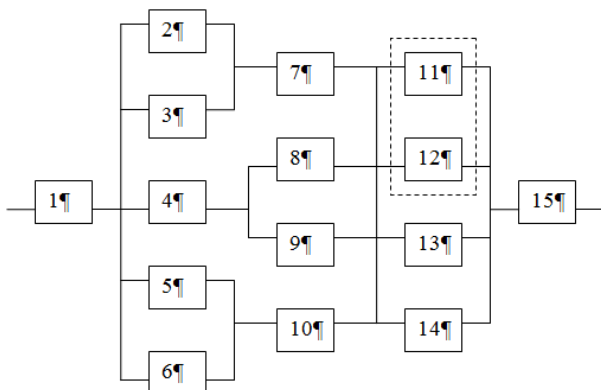


Рис. 4.9. Структурная схема соединения основных элементов системы воздухоочистки

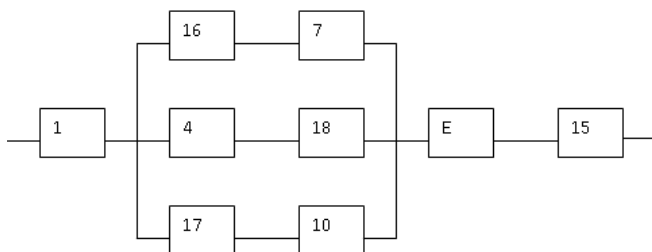


Рис. 4.10. Этапы 1...4 преобразования схемы

1. В исходной схеме (рис. 4.9) элементы 2 и 3 образуют параллельное соединение. Заменяем их квазиэлементом 16 с надежностью:

$$p_{16} = 1 - (1 - p_2)^2.$$

2. Элементы 6 и 5 также образуют параллельное соединение, заменив которое элементом 17 и учитывая, что $p_5 = p_6 = p_2$, получим

$$p_{17} = 1 - (1 - p_2)^2 = p_{16}.$$

3. Элементы 8 и 9 также образуют параллельное соединение, заменив которое элементом 18 и учитывая, что $p_8 = p_9$, получим

$$p_{18} = 1 - (1 - p_8)^2.$$

4. Элементы 11, 12, 13 и 14 образуют соединение «2 из 4» (минимум два элемента должны обязательно быть работоспособными),

которое заменяем элементом E с учетом, что $p_{11} = p_{12} = p_{13} = p_{14}$. Для определения вероятности безотказной работы элемента E можно воспользоваться комбинаторным методом

$$\begin{aligned} p_E &= \sum_{k=2}^4 p_k = \sum_{k=2}^4 c_4^k \cdot p_{11}^k (1 - p_{11})^{4-k} = \\ &= \frac{4!}{2! \cdot 2!} p_{11}^2 (1 - p_{11})^2 + \frac{4!}{3! \cdot 1!} p_{11}^3 (1 - p_{11}) + \frac{4!}{4! \cdot 0!} p_{11}^4 = \\ &= 6 p_{11}^2 (1 - p_{11})^2 + 4 p_{11}^3 (1 - p_{11}) + p_{11}^4 = 6 p_{11}^2 - 8 p_{11}^3 + 3 p_{11}^4 \end{aligned}$$

или табл. 4.1

$$p_E = 6p_{11}^2 - 8p_{11}^3 + 3p_{11}^4.$$

5. Элементы 16 и 7 в полученной схеме соединены последовательно. Заменяем их элементом A , для которого

$$p_A = p_{16} \cdot p_7.$$

6. Элементы 4 и 18 также соединены последовательно. Заменяем их элементом B , для которого

$$p_B = p_{18} \cdot p_4.$$

7. Элементы 10 и 17 также соединены последовательно. Заменяем их элементом C , для которого

$$p_C = p_{10} \cdot p_{17} = p_A.$$

После преобразования на этапах 5...7 полученная схема представлена на рис. 4.11.

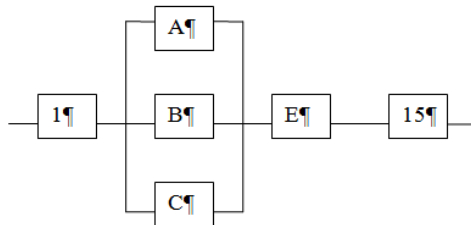


Рис. 4.11. Этапы 5...7 преобразования схемы

В новой схеме элементы A , B , C образуют параллельное соединение, следовательно, заменяем их элементом D , для которого

$$p_D = 1 - (1 - p_A)(1 - p_B)(1 - p_C).$$

Таким образом, после всех преобразований схема выглядит следующим образом (рис. 4.12). В преобразованной схеме элементы 1, D, E и 15 образуют последовательное соединение. Тогда вероятность безотказной работы всей системы

$$P = p_1 \cdot p_D \cdot p_E \cdot p_{15}.$$



Рис. 4.12. Преобразованная схема

Так как по условию все элементы системы работают в периоде нормальной эксплуатации, то вероятность безотказной работы элементов с 1 по 15 подчиняется экспоненциальному закону:

$$p_i = \exp(-\lambda_i \cdot t).$$

Произведем расчет надежности каждого элемента и системы при ее наработке в $0,5 \cdot 10^6$ ч:

$$p_1 = e^{-0,05 \cdot 0,5} = 0,9753;$$

$$p_2 = p_3 = p_4 = p_5 = p_6 = e^{-1 \cdot 0,5} = 0,6065;$$

$$p_7 = p_8 = p_9 = p_{10} = e^{-0,5 \cdot 0,5} = 0,7788;$$

$$p_{11} = p_{12} = p_{13} = p_{14} = e^{-0,2 \cdot 0,5} = 0,9048;$$

$$p_{15} = e^{-0,02 \cdot 0,5} = 0,990;$$

$$p_{16} = p_{17} = 1 - (1 - 0,6065)^2 = 0,8451;$$

$$p_{18} = 1 - (1 - 0,7788)^2 = 0,9510;$$

$$p_A = p_C = 0,8451 \cdot 0,7788 = 0,6581;$$

$$p_B = 0,9510 \cdot 0,6065 = 0,5767;$$

$$p_D = 1 - (1 - 0,6581)(1 - 0,5767)(1 - 0,6581) = 0,9505;$$

$$p_E = 6 \cdot 0,9048^2 - 8 \cdot 0,9048^3 + 3 \cdot 0,9048^4 = 0,9967;$$

$$P = 0,9753 \cdot 0,9505 \cdot 0,9967 \cdot 0,990 = 0,9147.$$

Подобный расчет вероятностей безотказной работы элементов исходной и преобразованной схем делаем также для наработки $1 \cdot 10^6$, $1,5 \cdot 10^6$, $2 \cdot 10^6$, $2,5 \cdot 10^6$ и $3 \cdot 10^6$ ч. Итоговые результаты всех расчетов для наработки в диапазоне до $3 \cdot 10^6$ ч представлены в табл. 4.2.

На рис. 4.13 представлен график зависимости вероятности безотказной работы системы (кривая P) от времени (наработки) t , построенный по результатам табл. 4.2.

Таблица 4.2

Расчет вероятности безотказной работы системы

Элемент	$\lambda_{i,p}$ $\times 10^{-6} \text{ ч}^{-1}$	Наработка $t, \times 10^6 \text{ ч}$					
		0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0
1	0,05	0,9753	0,9512	0,9277	0,9048	0,8824	0,8607
2–6	1	0,6065	0,3678	0,2231	0,1353	0,082	0,0497
7–10	0,5	0,7788	0,6065	0,4723	0,3678	0,2865	0,2231
11–14	0,2	0,9048	0,8187	0,7408	0,6703	0,6065	0,5488
15	0,02	0,990	0,9801	0,9704	0,9607	0,9512	0,9417
16–17	–	0,8451	0,6003	0,3964	0,2519	0,1572	0,0969
18	–	0,9510	0,8451	0,7215	0,6003	0,4909	0,3964
A, C	–	0,6581	0,3640	0,1872	0,0926	0,0450	0,0216
B	–	0,5767	0,3108	0,1609	0,0812	0,0402	0,0197
D	–	0,9505	0,7212	0,4456	0,2434	0,1255	0,0615
E	–	0,9967	0,9794	0,9438	0,8921	0,8282	0,7568
P	–	0,9147	0,6585	0,3786	0,1887	0,0872	0,0377

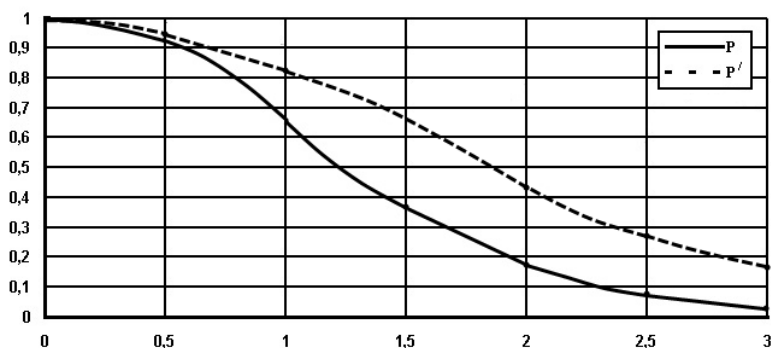


Рис. 4.13. Изменение вероятности безотказной работы исходной системы (P), системы с повышенной надежностью (P')

Алгоритм выполнения практической работы

1. Изучить основные теоретические сведения и пример анализа надежности, представленный в настоящей работе.
2. Выбрать вариант задания к работе (табл. 4.3, структурные схемы).
3. Выполнить количественный анализ надежности выбранной системы в соответствии с изученным теоретическим материалом и приведенным выше примером расчета.
4. Составить отчет о практической работе в соответствии с требованиями (прил. А).
5. Ответить на вопросы для самоконтроля.

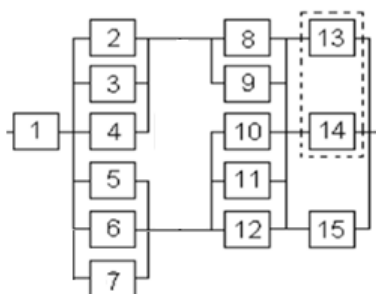
Таблица 4.3

Варианты заданий

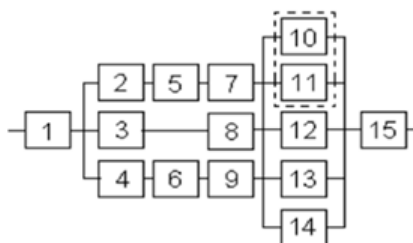
Вариант	Наработка γ , %	Интенсивность отказов элементов $\lambda_i, \times 10^{-6} \text{ ч}^{-1}$														
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14–15	
1	75	1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,3	0,3
2	80	0,5	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,4	0,4
3	85	0,7	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,3	0,3
4	90	0,6	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,7	0,7
5	95	0,6	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,7	0,7
6	75	0,1	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
7	80	0,2	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
8	85	0,2	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
9	90	0,3	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
10	95	0,1	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
11	75	0,7	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,6	0,6	0,6
12	80	0,8	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,5	0,5	0,5
13	85	0,9	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,6	0,6	0,6
14	90	0,9	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,4	0,4	0,4
15	95	0,6	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,4	0,4	0,4
16	75	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,6	0,6	0,6
17	80	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,5	0,5	0,5	0,5
18	85	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,3	0,3	0,3	0,3	0,6	0,6	0,6	0,6
19	90	0,7	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,4	0,4	0,4	0,4
20	95	0,8	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,4	0,4	0,4	0,4
21	75	0,5	0,1	0,1	0,5	0,5	0,5	0,5	0,2	0,2	0,2	0,2	0,6	0,6	0,6	0,6
22	80	0,6	0,2	0,2	0,4	0,4	0,4	0,4	0,5	0,5	0,5	0,5	0,7	0,7	0,7	0,7

Вариант	Наработка γ , %	Интенсивность отказов элементов λ_{γ} , $\times 10^{-6} \text{ ч}^{-1}$													
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14–15
23	85	0,7	0,1	0,1	0,3	0,3	0,3	0,4	0,4	0,4	0,4	0,6	0,6	0,6	0,6
24	90	0,8	0,2	0,2	0,6	0,6	0,6	0,3	0,3	0,3	0,3	0,4	0,4	0,4	0,4
25	95	0,9	0,2	0,2	0,5	0,5	0,5	0,6	0,6	0,6	0,6	0,4	0,4	0,4	0,4
26	75	0,3	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,3
27	80	0,4	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,4
28	85	0,5	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,5
29	90	0,6	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,6
30	95	0,7	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,7
31	75	0,1	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,1	0,1
32	80	0,2	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,2	0,2
33	85	0,3	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,3	0,3
34	90	0,4	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,4	0,4
35	95	0,5	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,5	0,5
36	75	0,2	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,2
37	80	0,3	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,3
38	85	0,4	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,4
39	90	0,5	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,5
40	95	0,6	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,6
41	75	1	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	1
42	80	0,8	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,8
43	85	0,7	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,7
44	90	0,6	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,6
45	95	0,5	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,5
46	75	0,7	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,9	0,7
47	80	0,6	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,5	0,6
48	85	0,5	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,6	0,5
49	90	0,4	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,8	0,4
50	95	0,3	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,6	0,3

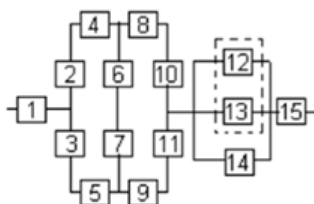
Структурные схемы надежности



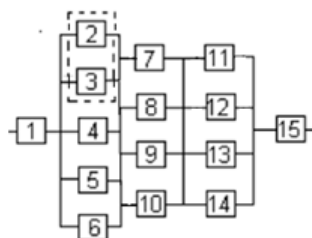
Вариант 1-5



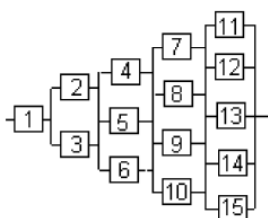
Вариант 6-10



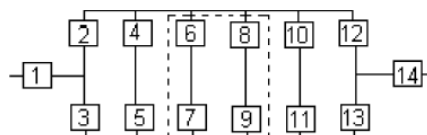
Вариант 11-15



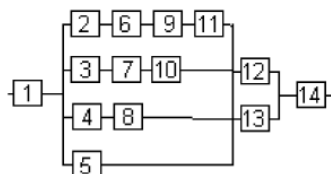
Вариант 16-20



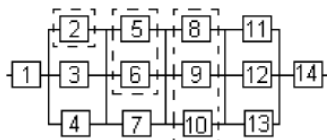
Вариант 21-25



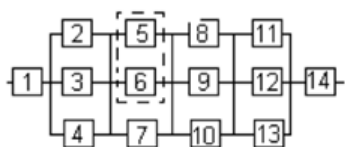
Вариант 26-30



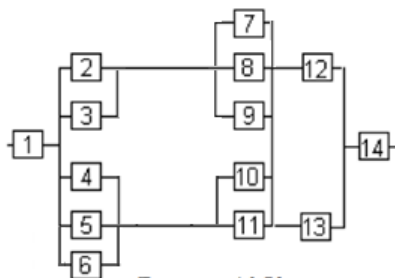
Вариант 31-35



Вариант 36-40



Вариант 41-45



Вариант 46-50

Вопросы для самоконтроля

1. Какие операции включает в себя анализ структурной надежности технической системы (оборудования)?
2. Что такое интенсивность отказов?
3. Что такое средняя наработка до отказа?
4. Что такое гамма-процентная наработка до отказа?
5. Как определяется надежность систем с последовательным соединением элементов?
6. Как определяется надежность систем с параллельным соединением элементов?

Практическая работа 8

Выбор и обоснование методов повышения надежности систем обеспечения безопасности

Цели работы: изучить методы повышения надежности сложных систем и разработать мероприятия повышения надежности заданной (выбранной) системы обеспечения безопасности на основе выявления наиболее ненадежного узла.

Методика и пример расчета повышения наработки и надежности наиболее ненадежного узла

На основе выполненного в практической работе 7 количественного анализа надежности технической системы рассмотрим способ повышения ее надежности путем повышения наработки наиболее ненадежного узла в 1,5 раза (табл. 4.3).

1. По графику (рис. 4.13, кривая Р) находим для $\gamma = 70\%$ ($P_\gamma = 0,7$) – процентную наработку системы $T_\gamma = 0,95 \cdot 10^6$ ч, для которой выполним необходимые расчеты по определению надежности каждого элемента и всей системы (колонка 9 табл. 4.4).

2. Проверочный расчет при $T_\gamma = 0,95 \cdot 10^6$ ч показывает, что $P_\gamma = 0,6883 \approx 0,7$.

Таблица 4.4

Расчет вероятности безотказной работы системы и выявление наиболее ненадежного узла

Элемент	$\lambda_i \times 10^{-6}$ ч ⁻¹	Наработка t , $\times 10^6$ ч							
		0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	0,95	1,425
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0,05	0,9753	0,9512	0,9277	0,9048	0,8824	0,8607	0,9536	0,9312
2–6	1	0,6065	0,3678	0,2231	0,1353	0,082	0,0497	0,3867	0,2405
7–10	0,5	0,7788	0,6065	0,4723	0,3678	0,2865	0,2231	0,6218	0,4904
11–14	0,2	0,9048	0,8187	0,7408	0,6703	0,6065	0,5488	0,8269	0,7520
15	0,02	0,990	0,9801	0,9704	0,9607	0,9512	0,9417	0,9811	0,9719
16–17	–	0,8451	0,6003	0,3964	0,2519	0,1572	0,0969	0,6238	0,4231
18	–	0,9510	0,8451	0,7215	0,6003	0,4909	0,3964	0,8569	0,7403
A, C	–	0,6581	0,3640	0,1872	0,0926	0,0450	0,0216	0,3878	0,2074
B	–	0,5767	0,3108	0,1609	0,0812	0,0402	0,0197	0,3313	0,1781
D	–	0,9505	0,7212	0,4456	0,2434	0,1255	0,0615	0,7494	0,4840
E	–	0,9967	0,9794	0,9438	0,8921	0,8282	0,7568	0,9818	0,9503
P	–	0,9147	0,6585	0,3786	0,1887	0,0872	0,0377	0,6883	0,4162

3. По условиям задания повышенная γ -процентная наработка системы $T_\gamma = 1,5 \cdot 0,95 \cdot 10^6 = 1,425 \cdot 10^6$ ч.

4. Расчет показывает (колонка 10 табл. 4.4), что при $T_\gamma = 1,425 \cdot 10^6$ ч для элементов преобразованной схемы (рис. 4.12) $p_1 = 0,9312$, $p_D = 0,4840$, $p_E = 0,9503$ и $p_{15} = 0,9719$, следовательно, из четырех последовательно соединенных элементов минимальное значение вероятности безотказной работы имеет элемент D и именно увеличение его надежности даст максимальное увеличение надежности системы в целом.

5. Для того чтобы при $T_\gamma = 1,425 \cdot 10^6$ ч система в целом имела вероятность безотказной работы $P_\gamma \approx 0,7$, необходимо, чтобы элемент D имел вероятность безотказной работы:

$$p_D = \frac{p_Y}{p_1 \cdot p_E \cdot p_{15}} = \frac{0,7}{0,9312 \cdot 0,9503 \cdot 0,9719} = 0,8139.$$

При таком значении элемент D останется самым ненадежным в схеме (рис. 4.12), что не будет противоречить исходным рассуждениям в п. 4.

Полученное значение $p_D = 0,8139$ является минимальным для выполнения условия увеличения наработки не менее чем в 1,5 раза, при более высоких значениях p_D увеличение наработки и надежности системы будет еще большим.

Чтобы разобраться, почему элемент D имеет самую маленькую вероятность безотказной работы, обратимся к рис. 4.12 и табл. 4.4. Очевидно, что в элементе D самыми «слабыми» являются идентичные элементы A и C. В элементах A и C наименьшие значения вероятности безотказной работы принадлежат элементам 16 и 17. Элемент 16 включает блоки 2 и 3, их значения p также являются минимальными по отношению к остальным блокам, а элемент 17 включает блоки 5 и 6. Так как блок 4 тоже входит в элемент D и является идентичным с блоками 2–3, 5–6, он тоже будет рассмотрен для определения минимальной необходимой вероятности безотказной работы элемента D.

6. Для определения минимально необходимой вероятности безотказной работы равнонадежных элементов 2–6 целесообразно использовать графоаналитический метод. Для этого по данным табл. 4.4 строим график зависимости $p_D = f(p_2)$ (рис. 4.14). По графику при $p_D = 0,8139$ находим $p_2 \approx 0,52$.

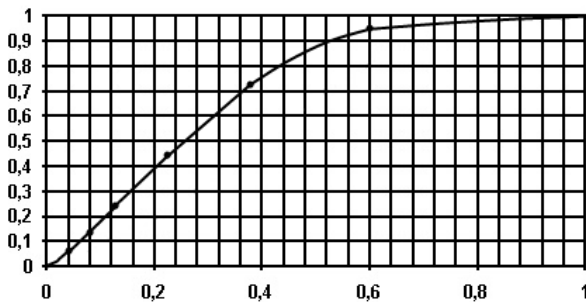


Рис. 4.14. Зависимость вероятности безотказной работы системы D от вероятности безотказной работы ее элементов

7. Так как по условиям задания все элементы работают в периоде нормальной эксплуатации и подчиняются экспоненциальному закону, то для элементов 2–3, 5–6 при $T_\gamma = 1,425 \cdot 10^6$ ч находим

$$\lambda'_2 = \lambda'_3 = \lambda'_4 = \lambda'_5 = \lambda'_6 = \frac{-\ln 0,52}{1,425 \cdot 10^6} = 0,458 \cdot 10^{-6}.$$

8. Таким образом, для увеличения γ -процентной наработки системы необходимо увеличить надежность элементов 2–3, 5–6 и снизить интенсивность их отказов с $1 \cdot 10^{-6}$ до $0,458 \cdot 10^{-6}$ ч⁻¹, т. е. в 1,55 раза.

9. Окончательные результаты расчетов для системы с увеличенной надежностью элементов 2'–6' по методике, описанной в практической работе 7, приведены в табл. 4.5. Там же приведены измененные значения вероятности безотказной работы системы D' и улучшенной системы в целом P' при $T_\gamma = 1,425 \cdot 10^6$ ч, что соответствует условиям задания. График зависимости надежности улучшенной системы приведен на рис. 4.13 (кривая P') в сопоставлении с исходной надежностью системы (кривая P).

Опишем окончательные результаты исследования:

1) на рис. 4.13 представлена зависимость вероятности безотказной работы системы (кривая P). Из графика видно, что 70%-ная наработка исходной системы составляет $0,95 \cdot 10^6$ ч;

2) для повышения надежности и увеличения 70%-ной наработки системы в 1,5 раза (до $1,425 \cdot 10^6$ ч) предложен способ повышения надежности элементов 2–6 и уменьшения интенсивности их отказов с $1 \cdot 10^{-6}$ до $0,458 \cdot 10^{-6}$ ч⁻¹, т. е. в 1,55 раза;

3) для повышения надежности этих элементов рекомендуется использовать более прочные материалы, а также своевременно проводить осмотр данных элементов, их замену или ремонт.

Таблица 4.5

Расчет вероятности безотказной работы системы
после увеличения наработки

Элемент	$\lambda_i \times 10^{-6}$ ч ⁻¹	Наработка $t, \times 10^6$ ч							
		0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	0,95	1,425
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0,05	0,9753	0,9512	0,9277	0,9048	0,8824	0,8607	0,9536	0,9312
2'–6'	0,458	0,7953	0,6325	0,503	0,3921	0,3182	0,2531	0,6471	0,5206
7–10	0,5	0,7788	0,6065	0,4723	0,3678	0,2865	0,2231	0,6218	0,4904

Эле- мент	$\lambda_i \times 10^{-6}$ ч ⁻¹	Наработка t , $\times 10^6$ ч							
		0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	0,95	1,425
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
11–14	0,2	0,9048	0,8187	0,7408	0,6703	0,6065	0,5488	0,8269	0,7520
15	0,02	0,990	0,9801	0,9704	0,9607	0,9512	0,9417	0,9811	0,9719
16'–17'	–	0,9581	0,8649	0,7529	0,6304	0,5351	0,4421	0,8754	0,7701
18	–	0,9510	0,8451	0,7215	0,6003	0,4909	0,3964	0,8569	0,7403
A', C'	–	0,7461	0,5245	0,3555	0,2318	0,1533	0,0986	0,5443	0,3776
B'	–	0,7563	0,5345	0,3629	0,2353	0,1562	0,1003	0,5544	0,3854
D'	–	0,9843	0,8947	0,7354	0,5487	0,395	0,2661	0,9074	0,7612
E	–	0,9967	0,9794	0,9438	0,8921	0,8282	0,7568	0,9818	0,9503
P'	–	0,9472	0,8169	0,6248	0,4254	0,2745	0,1632	0,8334	0,6546

Алгоритм выполнения практической работы

1. Изучить методы повышения надежности сложных систем, представленные в теоретических сведениях по модулю.
2. Изучить пример расчета в настоящей работе.
3. Для технической системы, выбранной в практической работе 7, в соответствии с полученными в той же работе результатами выполнить расчет выявления и повышения надежности наиболее ненадежного узла.
4. Разработать дополнительные мероприятия по повышению надежности заданной (выбранной) системы обеспечения безопасности на этапах проектирования, изготовления и эксплуатации.
5. Составить отчет о практической работе в соответствии с требованиями (прил. А).
6. Ответить на вопросы для самоконтроля.

Вопросы для самоконтроля

1. Какие способы повышения надежности существуют на стадиях проектирования оборудования (систем)?
2. Какие способы повышения надежности существуют на стадиях изготовления оборудования (систем)?
3. Какие способы повышения надежности существуют на стадиях эксплуатации оборудования (систем)?
4. Как классифицируется метод резервирования?
5. Перечислить организационно-технические методы по восстановлению и поддержанию надежности систем.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ветошкин, А.Г. Процессы инженерной защиты окружающей среды (теоретические основы) : учебное пособие / А.Г. Ветошкин. – Пенза : Изд-во Пенз. гос. ун-та, 2004. – 325 с.
2. Вальдберг, А.Ю. Процессы и аппараты защиты окружающей среды. Защита атмосферы / А.Ю. Вальдберг, Н.Е. Николайкина. – М. : Дрофа, 2008. – 239 с.
3. Расчет пылеуловителей. В 3 ч. Ч. 1. Расчет циклонов и рукавных фильтров / сост. А.Е. Замураев, В.Б. Пономарев. – Екатеринбург : УГТУ-УПИ, 2006. – 50 с.
4. Ветошкин, А.Г. Процессы и аппараты пылеочистки : учебное пособие / А.Г. Ветошкин. – Пенза : Изд-во Пенз. гос. ун-та, 2005. – 210 с.
5. Швыдкий, В.С. Очистка газов : справочник / В.С. Швыдкий, М.Г. Ладыгичев. – М. : Теплотехник, 2005. – 640 с.
6. СП 32.13330.2012. Свод правил. Канализация. Наружные сети и сооружения. Актуализированная редакция СНиП 2.04.03-85 [Электронный ресурс]. – URL : <http://www.consultant.ru>
7. Технологии переработки твердых отходов : учеб.-метод. комплекс по дисциплине для студ. напр. бакалавриата 280200 «Защита окружающей среды» и спец. 280201 «Охрана окружающей среды и рациональное использование природных ресурсов» всех форм обучения : самост. учеб. электрон. изд. [Электронный ресурс] / Сыкт. лесн. ин-т ; сост. О.А. Коньк. – Электрон. дан. – Сыктывкар : СЛИ, 2012. – URL : <http://lib.sfi.komi.com>.
8. СП 2.1.7.1038-01. 2.1.7. Почва, очистка населенных мест, отходы производства и потребления, санитарная охрана почвы. Гигиенические требования к устройству и содержанию полигонов для твердых бытовых отходов. Санитарные правила [Электронный ресурс]. – URL : <http://www.consultant.ru>
9. Надежность и безопасность технических систем : учебное пособие / под ред. А.Г. Ветошкина. – Пенза : Изд-во Пенз. гос. ун-та, 2002. – 129 с.
10. Шишмарев, В.Ю. Надежность технических систем : учеб. для студ. вузов / В.Ю. Шишмарев. – М. : Академия, 2010. – 304 с.

Требования к оформлению отчета по практикуму

Отчет по всем практическим работам выполняется одним документом.

Текст отчета печатается на одной стороне листа формата А4 (297×210 мм). Размеры поля страниц слева – 25 мм, сверху и снизу – 15 мм, справа – 10 мм. Абзацы в тексте начинают с отступом 1,25 см.

Текст работы должен быть набран в текстовом редакторе Word шрифтом Times New Roman 14 pt, интервал полуторный, выравнивание по ширине.

Каждый раздел отчета рекомендуется начинать с нового листа (страницы). Нумерация страниц отчета должна быть сквозная.

Рисунки и диаграммы должны иметь прямое отношение к тексту, без лишних изображений и данных, которые нигде не поясняются. На все иллюстрации должны быть ссылки в тексте отчета. Наименования, приводимые в тексте и на иллюстрациях, должны быть одинаковыми. Ссылки на иллюстрации разрешается помещать в скобках в соответствующем месте текста, без указания *см.* (смотри). Ссылки на ранее упомянутые иллюстрации записывают сокращенным словом *смотри*, например: *см. рисунок 3*.

Размещаемые в тексте иллюстрации следует нумеровать арабскими цифрами в пределах всего отчета, например: *Рисунок 1*, *Рисунок 2* и т. д. Надписи, загромождающие рисунок, чертеж или схему, необходимо помещать в тексте или под иллюстрацией.

В формулах и уравнениях условные буквенные обозначения, изображения или знаки должны соответствовать обозначениям, принятым в действующих государственных стандартах. В тексте отчета перед обозначением параметра дают его пояснение, например: *Временное сопротивление разрыву σ_B* .

При необходимости применения условных обозначений, изображений или знаков, не установленных действующими стандартами, их следует пояснять в тексте или в перечне обозначений.

Формулы и уравнения выполняют в редакторе формул и располагают на середине строки, а связывающие их слова (*следовательно, откуда* и т. п.) – в начале строки.

Для основных формул и уравнений, на которые делаются ссылки, вводят сквозную нумерацию арабскими цифрами. После написания формулы или уравнения помещают перечень символов, применяемых в них, с пояснением их значений и размерностей. Символ отделяют от его пояснения знаком тире. Размерность буквенного обозначения отделяют от текста запятой, а в конце пояснения ставят точку с запятой.

Пример:

$$N = S_{\text{пост}} / (\text{Ц} - S_{\text{пер1}}), \quad (1)$$

где N – критический объем выпуска, шт.; $S_{\text{пост}}$ – постоянные затраты в себестоимости продукции, руб.; Ц – цена единицы изделия, руб.; $S_{\text{пер1}}$ – переменные затраты на одно изделие, руб.

Пример оформления титульного листа отчета представлен на рис. А.

<p>ФГБОУ ВО Тольяттинский государственный университет</p> <p>Институт машиностроения</p> <p>Кафедра «Управление промышленной и экологической безопасностью»</p> <p>ОТЧЕТ ПО ПРАКТИЧЕСКИМ РАБОТАМ по дисциплине «Расчет, проектирование и повышение надежности систем обеспечения безопасности»</p> <p>Вариант №</p> <p>Студент: Группа: Преподаватель:</p> <p>Тольятти 20__ г.</p>
--

Рисунок А – Образец оформления титульного листа

Интенсивность отказов различных элементов технологических аппаратов и защитных устройств

Наименование элемента	Интенсивность отказов $\lambda \cdot 10^{-6}$, ч		
	Нижний предел	Среднее значение	Верхний предел
<i>Механические элементы</i>			
Гильзы	0,02	0,045	0,08
Дифференциалы	0,012	1,00	1,58
Зажимы	0,0003	0,0005	0,0009
Кольца переменного сечения	0,045	0,55	3,31
Коробки коленчатого вала	0,1	0,9	1,8
Коробки передач:			
соединительные	0,11	0,2	0,36
секторные	0,051	0,912	1,8
скоростные	0,087	2,175	4,3
Корпуса	0,03	1,1	2,05
Муфты:			
сцепления	0,04	0,06	1,1
скольжения	0,07	0,3	0,94
Ограничители	0,165	0,35	0,783
Ограничительные сменные кольца	—	0,36	—
Противовесы:			
большие	0,13	0,3375	0,545
малые	0,005	0,0125	0,03
Пружины	0,004	0,1125	0,221
Приводы:			
со шкивом	—	0,16	—
дополнительного сервомеханизма	0,86	12,5	36,6
обычных сервомеханизмов	0,86	12,5	36,6
более экономичные	0,6	3,3	18,5
менее	0,17	1,8	9,6
Приводные ремни передач	—	3,6	—
Подшипники:			
шариковые	0,02	0,65	2,22
соединительных муфт	0,008	0,21	0,42
роликовые	0,2	0,5	1,0

Наименование элемента	Интенсивность отказов λ ($\cdot 10^{-6}$), ч		
	Нижний предел	Среднее значение	Верхний предел
Шарикоподшипники:			
мощные	0,072	1,8	3,53
маломощные	0,035	0,875	1,72
Рессоры маломощные	–	0,112	–
Ролики	0,02	0,075	0,1
Соединения:			
механические	0,02	0,02	1,96
вращающиеся	6,89	7,50	9,55
паяные	0,0001	0,004	1,05
Соединительные коробки	0,28	0,4	0,56
Сервомеханизмы	1,1	2,0	3,4
Стержни	0,15	0,35	0,62
Устройства связи:			
направленные	0,065	1,52	3,21
поворотные	0,001	0,025	0,049
гибкие	0,027	0,039	1,348
жесткие	0,001	0,025	0,049
Фильтры механические	0,045	0,3	1,8
Шестерни	0,002	0,12	0,98
Штанги плунжера	–	0,68	–
Штифты:			
с нарезкой	0,006	0,025	0,1
направляющие	0,65	1,625	2,6
Шарниры универсальные	1,12	2,5	12,0
Шасси	–	0,921	–
Эксцентрики	0,001	0,002	0,004
Пружины	0,09	0,22	0,42
Теплообменники	2,21	15,0	18,6
Предохранительные мембраны	–	0,0112	–
Вращающиеся части насосов и смесителей	–	6,85	–
<i>Гидравлические и пневматические элементы</i>			
Вентили	–	30,95	–
Втулки	–	3,99	–
Диафрагмы	0,1	0,6	0,9
Емкости под давлением	–	1,94	–

Наименование элемента	Интенсивность отказов λ ($\cdot 10^{-6}$), ч		
	Нижний предел	Среднее значение	Верхний предел
Источники мощности гидравлические	0,28	6,1	19,3
Задвижки клапанов	0,112	5,1	44,8
Задвижки возбуждения	0,112	0,212	2,29
Камеры расширительные	—	4,57	—
Клапаны:			
шариковые	1,11	4,6	7,7
рычажные	1,87	4,6	7,4
нагруженные	0,112	5,7	18,94
сверхскоростные	1,33	3,4	5,33
обходные	0,16	2,24	8,13
стопорные	0,112	2,3	4,7
контрольные	0,24	1,9	2,2
дренажные	—	0,224	—
наполнительные	0,1	0,112	1,12
поплавковые	5,6	8,0	11,2
горючего	1,24	6,4	37,2
давления	0,112	5,6	32,5
первичные	0,165	6,3	14,8
двигателя	—	37,2	—
регулятора	—	0,56	—
разгрузочные:	0,224	5,7	14,1
давления	0,224	3,92	32,5
термические	5,6	8,4	12,3
резервуарные	2,70	6,88	10,8
селекторные	3,7	16,0	19,7
регулирующие	0,67	1,10	2,14
ручные переключающие	0,112	6,5	10,2
скользящие	0,56	1,12	2,28
ползунковые	—	1,12	—
соленоидные:	2,27	11,0	19,7
трехходовые	1,87	4,6	7,41
четырёхходовые	1,81	4,6	7,22
импульсные	2,89	6,9	9,76
перепускные	0,26	0,5	2,86
разгрузочные	3,41	5,7	15,31

Наименование элемента	Интенсивность отказов λ ($\cdot 10^{-6}$), ч		
	Нижний предел	Среднее значение	Верхний предел
Сервоклапаны	16,8	30,0	56,0
Манометры	0,135	1,3	15,0
Моторы гидравлические	1,45	1,8	2,25
Нагнетатели	0,342	2,4	3,57
Насосы с машинным приводом	1,12	8,74	31,3
Поршни гидравлические	0,08	0,2	0,85
Приводы постоянной скорости пневматические	0,3	2,8	6,2
Прокладки:			
пробковые	0,003	0,04	0,077
пропитанные	0,05	0,137	0,225
из сплава «Монель»	0,0022	0,05	0,908
кольцеобразные	0,01	0,02	0,035
феноловые (пластмассовые)	0,01	0,05	0,07
резиновые	0,011	0,02	0,03
Регуляторы:			
давления	0,89	4,25	15,98
гидравлические	—	3,55	—
пневматические	3,55	7,5	15,98
Резервуары гидравлические	0,083	0,15	0,27
Сильфоны	0,09	2,287	6,1
Соединения:			
гидравлические	0,012	0,03	2,01
пневматические	0,021	0,04	1,15
Соединительные муфты гидравлические	—	0,56	—
Трубопроводы	0,25	1,1	4,85
Арматура трубопроводов	—	39,95	—
Цилиндры	0,005	0,007	0,81
Цилиндры пневматические	0,002	0,004	0,013
Шланги:			
высокого давления	0,157	3,93	5,22
гибкие	—	0,067	—
пневматические	—	3,66	—