



**РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
ТРАНСПОРТА (МИИТ)**

Одобрено кафедрой
«ТЕХНОСФЕРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ»

Протокол № 2 от 8 сентября 2019 г.

Автор(ы): Аксенов В.А., д.тех.н, проф.; Матешева А.В., к.тех.н, -; Зубрев
Н.И., к.т.н., доц.; Силина Е.К., к.физ.-мат.н., доц.

Курсовая работа

**ПО ДИСЦИПЛИНЕ
Системы защиты среды обитания**

Уровень ВО: Бакалавриат

Форма обучения: Заочная

Курс: 4

Специальность/Направление: 20.03.01 Техносферная безопасность (ТБб)

Специализация/Профиль/Магистерская программа: Безопасность
жизнедеятельности в техносфере (ББ)

Москва

Рецензент – к-т.техн.наук, доц. Т.Ф. Климова

©Московский государственный университет путей сообщения, 2015

ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Одним из направлений при решении задач снижения загрязнения природной среды является создание принципиально новых технологий очистки сточных вод. Успешное их применение требует знания их научных основ, базирующихся на законах и закономерностях теоретической химии, физики, биологии и т.д. Эти знания необходимы как для обеспечения нормальных условий труда и защиты окружающей среды от загрязнения на существующих производствах, так и для разработки прогрессивных малоотходных и безотходных технологий, позволяющих не только наиболее полно и эффективно использовать природные ресурсы, но и максимально снижать последствия техногенной нагрузки на природную среду.

Целью курсовой работы является:

1. Приобретение практических навыков расчета проектов очистных сооружений применяемых на промышленных предприятиях, в том числе и предприятиях железнодорожного транспорта.
2. Изучение принципов работы и примеров техногенных решений устройств очистки сточных вод и отходящих газов предприятий.

Расчетная часть курсовой работы состоит из 2 заданий.

ПОРЯДОК ОФОРМЛЕНИЯ КУРСОВОЙ РАБОТЫ

1. Работа выполняется на листах бумаги формата А4 в электронном варианте согласно единым требованиям к выполнению курсовых работ и проектов, а также дипломных проектов. Графики и чертежи выполняются либо в электронном варианте, либо на бумаге формата А4 или А3 (миллиметровой бумаге), в зависимости от выбранного масштаба, с применением чертежных инструментов и должны быть включены в курсовой проект согласно нумерации страниц.
2. Выбор варианта заданий определяется по сумме последней и предпоследней цифр учебного шифра. Например, шифр 1065- пСТс- 1231, сумма последней и предпоследней цифр шифра определяется как: $3+1=4$. Номер варианта - 4. Или - шифр 1065-пСТс- 1238, сумма последней и предпоследней цифр шифра определяется как: $3+8=11$. Номер варианта – 11.
3. На второй странице, после титульного листа, записывается полное задание на курсовую работу.
4. На третьей странице записываются столбиком исходные данные к каждому заданию согласно варианту и привлекаемые справочные данные поочередно согласно заданиям.
5. Далее оформляется пояснительная записка, содержащая все расчетные формулы поочередно согласно заданиям.
6. Каждое последующее задание должно начинаться с новой страницы.
7. Оформление задания должно сопровождаться краткими, но исчерпывающими пояснениями, а именно: необходимо дать описание

очистного сооружения, принципа его работы и способа утилизации уловленного загрязняющего вещества; описать негативное влияние данных загрязняющих веществ на состояние окружающей среды и здоровья человека.

8. Все математические расчеты производятся с точностью до тысячных.
9. В конце выполнения каждого задания должна быть представлена схема очистного устройства (согласно выбранному масштабу).
10. В конце курсовой работы необходимо указать учебные пособия, учебники и справочники, использованные при выполнении данной работы.
11. На защите курсовой работы студент должен быть готов дать пояснения по выполнению всех заданий.

ВВЕДЕНИЕ

Большинство людей не осознает, что выбросы в водоемы существенно более опасны, чем прочие выбросы. Континентальные воды очень важны для человека, поскольку они являются единственно надежным источником питьевой воды. Химический состав рек, озер и грунтовых вод сильно варьирует и контролируется преимущественно тремя факторами: химией элементов, режимами выветривания и биологическими процессами. В наше время появился мощный четвертый фактор – антропогенное воздействие.

Под загрязнением водоемов понимают снижение их биосферных функций в результате попадания в них вредных веществ. Источниками загрязнения гидросферы являются:

- Сточные воды промышленных предприятий объемом несколько миллиардов кубических метров в год;
- Городские сточные воды объемом около 100 км³ в год;
- Канализационные воды животноводческих хозяйств;
- Дождевые и талые воды с растворенными химическими веществами, образующимися в городах и на полях;
- Водный транспорт;
- Естественные осадки из атмосферы;
- Утечка нефти и нефтепродуктов.

Загрязнение вод проявляется в изменении физических и органических свойств (нарушение прозрачности, окраски, запахов, вкуса), увеличение содержания сульфатов. Хлоридов, нитратов, токсичных элементов, сокращение количества растворенного в воде кислорода, появление радиоактивных элементов, болезнетворных бактерий и т.д.

Установлено, что загрязнение воды могут вызвать более 400 видов веществ. Различают химические, биологические и физические загрязнители.

Химическое загрязнение – наиболее распространенное, стойкое и далеко распространяющееся. Оно может быть органическим (фенолы,

нафтенные кислоты, пестициды и т.д.) и неорганическим (соли, кислоты, щелочи).

При осаждении на дно водоемов или при фильтрации в пласте вредные химические вещества сорбируются частицами породы, окисляются или восстанавливаются, выпадают в осадок и т.д. очаг химического загрязнения подземных вод в сильнопроницаемых грунтах может распространяться на десятки километров и более.

Биологическое загрязнение – выражается в появлении в воде патогенных бактерий. Вирусов (до 700 видов), простейших грибов. Этот вид загрязнений носит временный характер.

Физическое загрязнение – представлено. Прежде всего, радиоактивными элементами. Наиболее опасны долгоживущие радиоактивные элементы (стронций – 90, уран, радий – 226, цезий и др.). Эти вещества попадают в сточные воды при сбрасывании в них радиоактивных отходов, захоронении отходов на дне и т.д. Механическое загрязнение отличается попаданием в воду различных примесей (песок, шламы, ил), а также засорением воды твердыми бытовыми отходами, остатками лесосплава и др. Тепловое загрязнение проявляется в повышении температуры воды в результате ее смешивания с более нагретыми поверхностными или технологическими стоками. При повышении температуры происходит изменение состава и свойств воды, что может привести к размножению анаэробных бактерий, «цветению» воды и т.д.

При оценке степени загрязненности воды и обосновании концентрации вредных веществ в водоемах необходимо учитывать весь комплекс влияния данных веществ на качества воды, используемой для различных целей.

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ЗАДАНИЮ № 1

Замкнутые системы водопользования на предприятиях железнодорожного транспорта

Внедрение технологических систем оборотного водопользования на предприятиях железнодорожного транспорта является основным направлением как при решении вопросов рационального использования водных ресурсов, так и защиты окружающей среды и водоемов от загрязнения.

На отдельных предприятиях в сутки образуется 200-4000 м³ сточных вод. Эти воды характеризуются высоким содержанием нефтепродуктов, щелочей, кислот, ПАВ, фенолов, солей тяжелых металлов и других вредных веществ, включая ядохимикаты. Внедрение технологических схем повторного и оборотного водопользования воды является перспективным направлением, позволяющим сократить расход свежей воды не менее, чем на 20%. Кроме того, качество воды в оборотных системах может быть значительно ниже, чем при ее сбросе в водоемы. Воду после флотационной

очистки с содержанием нефтепродуктов до 20 мг/л можно использовать почти во всех технологических процессах, а при сбросе в водоемы требуется очистка до сотых долей мг/л по нефтепродуктам, что, не говоря уже об усложнении состава очистных сооружений, резко увеличивает стоимость очистных сооружений и расходы на их эксплуатацию в 3-5 раз.

Целесообразность устройства бессточных систем в каждом конкретном случае должна подтверждаться технико-экономическим обоснованием. Установлено, что бессточные системы водопользования или системы с минимальным сбросом целесообразно предусматривать для предприятий с расходом воды на производственные нужды свыше 500-1000 м³ /сут. (депо, ремонтные заводы, пропарочные станции и др.) в случаях невозможности выпуска сточных вод на городские очистные сооружения. В зависимости от местных условий бессточные системы могут быть построены для отдельных цехов или наиболее водоемких технологических процессов, а также для куста предприятий.

Всероссийским институтом железнодорожного транспорта разработаны требования к качеству оборотной воды с учетом особенностей технологических процессов транспортных предприятий:

- сточная вода после промежуточной очистки может быть использована в том же технологическом процессе;
- качество воды в пределах установленного уровня должно обеспечиваться известными методами очистки воды применительно к каждому технологическому процессу.
- качество очищенной воды не должно ухудшать параметры технологического процесса;
- качество очищенной воды должно обеспечивать создание бессточных систем, по возможности без дополнительного применения чистой водопроводной воды, за исключением пополнения естественной убыли и периодической смены воды в системе.

Перевод на бессточную систему водопользования позволит предприятиям железнодорожного транспорта упразднить производственную канализацию, исключить загрязнение водоемов и значительно снизить водопотребление.

Как показал опыт работы, внедрение замкнутой системы в локомотивном депо сокращает затраты водопользования не менее, чем в 10 раз.

В целом применение замкнутых систем водопользования на промывочно-пропарочных станциях сети железных дорог позволяет экономить 2 млн. м³ воды в год. Стоимость обработки цистерн по замкнутой технологии по сравнению со стоимостью сброса воды на очистные сооружения нефтеперерабатывающего завода снижается до 25%, а по сравнению со стоимостью сброса в открытые водоемы при учете предотвращенного ущерба - на 30% и более. На шпалопропиточном заводе внедрение бессточной системы водопользования обеспечивает экономию воды около 50 тыс. м³/год, а внедрение аналогичной системы при обмывке пассажирских вагонов - до 100 тыс. м³/год на один пункт.

Промывочно-пропарочные станции предназначены для очистки и мойки нефтебензиновых цистерн. ППС размещены в зонах массовой погрузки и выгрузки нефтепродуктов на специально отведенных территориях, имеющих соответствующее путевое развитие и оборудование для мойки. В ряде случаев ППС располагаются на одной территории с вагонным депо, специализирующимся на ремонте цистерн. Цистерны под нефтепродукты взаимозаменяемые для различных, но близких по составу продуктов. Но с точки зрения экономичности мойку емкости желательно максимально специализировать для одного груза. Это и учитывается в технологии расчета.

ППС загрязняют сточные воды. Очистку стоков от механических примесей производят в песколовках, отстойниках, гидроциклонах. Нефтяные примеси выделяют в нефтеловушках и флотационных установках, кислоты и щелочи подвергают нейтрализации.

Отстойники (нефтеловушки) применяют в качестве первой ступени очистных сооружений для удаления из сточных вод примесей с плотностью, меньше чем плотность воды, то есть всплывающих примесей (нефть, смолы, масло, жиры и другие). По направлению движения воды они разделяются на горизонтальные, вертикальные и радиальные. Эффективность нефтеловушек составляет 60%. Количество нефти в осадке обычно составляет 20%. Удаление нефтепродуктов и осадка из таких нефтеловушек полностью механизировано. Сточная вода подается по трубопроводу, расположенному под днищем нефтеловушки. Внутри нефтеловушки трубопровод заканчивается раструбом. Вода в нем движется от центра к периферии. Нефтепродукты удаляются через нефтесборные трубы.

Горизонтальный отстойник (рис. 1.а) представляет собой прямоугольный резервуар, разделенный вертикальными стенками на ярусы, имеющий два или более одновременно работающих отделения. Вода движется от одного конца отстойника к другому, поступая поочередно в каждую секцию. Равномерное распределение сточной воды достигается с помощью поперечного лотка. Горизонтальные отстойники обычно применяются при расходах сточных вод свыше 15000 м³/сут. Эффективность отстаивания достигает 60%. Горизонтальная скорость движения воды в отстойнике не превышает 0,01 м/с. Продолжительность отстаивания составляет 1-3 часа.

Принцип действия горизонтальных нефтеловушек основан на разной плотности нефтепродуктов и механических примесей. Всплывающую нефть собирают щелевыми поворотными трубами, а осадок удаляют через донный клапан или гидроэжектором. Для обогрева всплывающего слоя нефтепродуктов в зимнее время предусмотрен паровой подогреватель. Полнота очистки сточных вод от нефтепродуктов в горизонтальных нефтеловушках составляет 60-70%, а в многополочных достигает 98%.

Вертикальный отстойник (рис. 1.б) представляет собой цилиндрический или кубический резервуар диаметром 4 – 9 м с коническим днищем и применяется на станциях производительностью до 20 тыс м³/сут.

Различают отстойники нескольких конструкций: с нисходяще – восходящим потоком (НИКТИ ГХ), с периферийным впуском жидкости (ВНИИ ВОДГЕО) и с центральной трубой. В последних, сточная вода подводится по центральной трубе и движется снизу вверх к желобу со скоростью не более 30 мм/с. Расстояние между щитом и раструбом выбирается таким образом, чтобы скорость поступления воды в отстойную зону была не более 20 мм/с. Осаждение происходит в восходящем потоке, скорость которого равна 0,5-0,6 мм/с. Высота зоны осаждения составляет 4-5 м. Эффективность осаждения в вертикальных отстойниках меньше, чем в горизонтальных на 10-20%.

Они различаются лишь конструкцией впускных и выпускных устройств. Однако имеют в 1,3 – 1,5 раза большую производительность, чем отстойники с центральной трубой. Первые имеют впускное устройство в виде кольцевого распределительного лотка переменного сечения с зубчатым водосливом. Осветленная вода удаляется через лоток, расположенный по периметру отстойника.

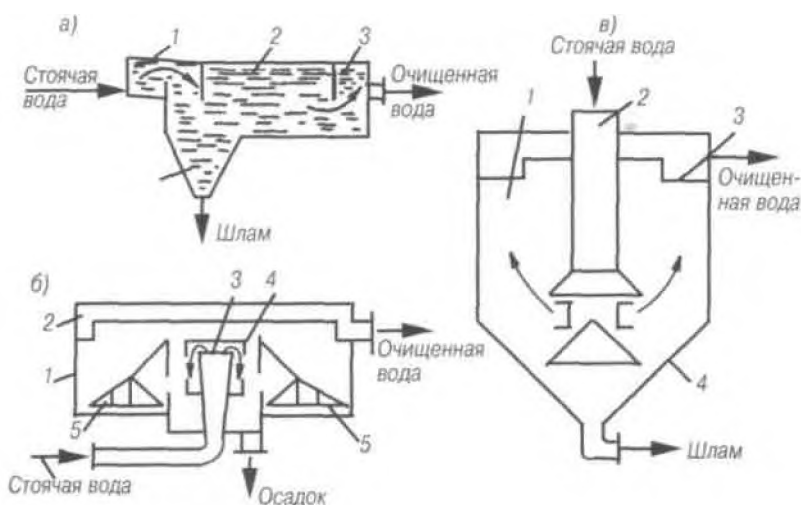


Рисунок 1. Отстойники:

а) горизонтальные: 1- входной лоток; 2- отстойная камера; 3-выходной лоток; 4- приямок.

б) вертикальный: 1- цилиндрическая часть; 2- центральная труба; 3- желоб; 4- коническая часть.

в) радикальный: 1- корпус; 2- желоб; 3- распределительное устройство; 4- успокоительная камера; 5- скребковый механизм.

Радиальный отстойник (рис. 1.в) представляет собой круглый в плане резервуар. Типовые нефтеловушки имеют диаметр 24 и 30 м. Материал – сборный железобетон. Такой отстойник применяется при

расходе сточных вод свыше 20 тыс м³/сут. он имеет некоторые преимущества перед горизонтальными: простота и надежность эксплуатации, экономичность. Возможность строительства сооружений большой производительностью. Недостаток – наличие подвижной фермы со скребками.

Расчет водоочистных сооружений промывочно-пропарочной станции (ППС) (варианты 1-10)

Цель задания: определение основных характеристик нефтеловушки, используемой в оборотной системе водоснабжения ППС.

В данном задании необходимо определить основные размеры и эффективность горизонтальной нефтеловушки, которая, как правило, имеет не менее двух отделений, используемой в обороте системы водоснабжения ППС для очистки сточных вод от нефтепродуктов и взвешенных веществ. Работа нефтеловушки основана на принципе отстаивания.

Расчет водоочистных сооружений проводится по следующей схеме:

1. Средней суточный расход сточных вод определяется с учетом количества цистерн N, обрабатываемых на ППС в течении суток (м³/сут):

$$Q = (P_{\text{пр}} + P_{\text{м}}) * N \quad (2.1) \quad \text{где}$$

$P_{\text{пр}}$ – расход воды на пропарку одной цистерны, ($P_{\text{пр}} = 0,2 \text{ м}^3$);

$P_{\text{м}}$ – расход воды на промывку одной цистерне, ($P_{\text{м}} = 8 \text{ м}^3$);

N – количество цистерн, обрабатываемых на ППС.

2. Длина проточной части нефтеловушки определяется по формуле (м):

$$L_{\text{н}} = (v_{\text{н}} * H_{\text{н}}) / (k_0 * (u_{\text{н}} - \omega_{\text{н}}^1)) \quad (2.2) \quad \text{где}$$

$v_{\text{н}}$ – скорость движения воды в нефтеловушке, м/с;

$H_{\text{н}}$ – глубина проточной части нефтеловушки, $H_{\text{н}} = 2 \text{ м}$;

k_0 – поправочный коэффициент, учитывающий вихревые и струйные преобразования в следствии конструктивных особенностей;

- для горизонтальных нефтеловушек $k_0 = 0,5$;

- для радиальных нефтеловушек $k_0 = 0,45$;

- для вертикальных нефтеловушек $k_0 = 0,35$;

$u_{\text{н}}$ – условная гидравлическая крупность частиц нефтепродуктов, принимается равной $0,005 \text{ м/с}$;

$\omega_{\text{н}}^1$ – вертикальная турбулентная составляющая, равная $0,05$ скорости движения воды в нефтеловушке (м/с):

$$\omega_n = \omega_n^1 * v_n \quad (2.3) \quad \text{где}$$

v_n – скорость движения воды в нефтеловушки, м/с.

3. Ширина отделения нефтеловушки (м):

$$b_n = (Q * k_n) / (H_n * v_n * n_n * 86400) \quad (2.4) \quad \text{где}$$

Q – расход сточных вод, м³/сут;

k_n – коэффициент часовой неравномерности сброса сточных вод, $k_n = 1,5$;

n_n – количество отделений нефтеловушки;

v_n – скорость движения воды в нефтеловушки, м/с;

H_n – глубина проточной части нефтеловушки, $H_n = 2$ м.

4. Требуемый эффект очистки сточных вод от нефтепродуктов определяется по формуле (%):

$$\mathcal{E}_n = ((C_{n1} - C_{n2}) / C_{n1}) * 100 \quad (2.5) \quad \text{где}$$

C_{n1} – концентрация нефтепродуктов в воде до нефтеловушки, мг/л;

C_{n2} – концентрация нефтепродуктов в оборотной воде, мг/л.

5. Количество улавливаемых нефтепродуктов, определяется по формуле (т/сут):

$$W_n = (C_{n1} * \mathcal{E}_n * Q * 10^{-6}) / ((100 - B_n) * \gamma_n) \quad (2.6) \quad \text{где}$$

B_n – процент содержания нефти в воде, %;

γ_n – объемная масса обводненных нефтепродуктов;

C_{n1} – концентрация нефтепродуктов в воде до нефтеловушки, мг/л;

$\mathcal{E}_n$ – требуемый эффект очистки сточных вод от нефтепродуктов, %;

Q – расход сточных вод, м³/сут.

6. Требуемый эффект очистки сточных вод от взвешенных веществ определяют по формуле (%):

$$\mathcal{E}_n = ((C_{n1} - C_{n2}) / C_{n1}) * 100 \quad (2.7) \quad \text{где}$$

C_{n1} – концентрация взвешенных веществ в воде до нефтеловушки, (мг/л);

C_{n2} – концентрация взвешенных веществ в оборотной системе, (мг/л).

7. Объем задерживаемых в виде осадка взвешенных веществ определяется по формуле (м³/сут):

$$W_n = (C_{n1} * \mathcal{E}_n * Q * 10^{-6}) / ((100 - \rho) * \gamma_n) \quad (2.8) \quad \text{где}$$

$C_{\text{пл}}$ – концентрация взвешенных веществ в воде до нефтеловушки, (мг/л);
 $\mathcal{E}_{\text{п}}$ – требуемый эффект очистки сточных вод от взвешенных веществ, %;
 Q – расход сточных вод, м³/сут;
 ρ – влажность осадка, $\rho = 0,95$ %;
 $\gamma_{\text{п}}$ – объемная масса осадка.

8. Выпавший на песколовках и нефтеловушках осадок удаляется гидроэлеваторами либо на песковые площадки, либо в песковые бункера, где обезвреживаются. Площадь песковой площадки определяют по формуле м²:

$$f = (365 * W_{\text{п}}) / (h_{\text{год}} * n) \quad (2.10) \quad \text{где}$$

$h_{\text{год}}$ – годовая нагрузка песка на песковые площадки, согласно СНиП $h_{\text{год}} = 3 \text{ м}^3/\text{м}^2$ в год;

n – число песковых площадок;

$W_{\text{п}}$ – объем задерживаемых в виде осадка взвешенных веществ.

Классификация и принцип действия отстойников.

Как правило, сточные воды содержат взвешенные частицы различной формы и размера. Такие воды представляют собой полидисперсные, гетерогенные, агрегативно – неустойчивые системы. В процессе осаждения размер, плотность и форма частиц, а так же их физические свойства изменяются. Кроме того. При смешивании различных по химическому составу сточных вод могут образовываться твердые вещества, которые оказывают влияние на форму и размер частиц.

Примеси по степени дисперсности (крупности) подразделяются на:

- молекулярно-дисперсные, находятся в воде в виде отдельных ионов и молекул.

- грубодисперсные частицы порядка 10^{-2} см. Такие частицы различимы в воде визуально и способны постепенно оседать или всплывать. В воде к такого вида частицам относятся взвешенные вещества. Длительно оставаясь во взвешенном состоянии эти частицы обуславливают мутность воды.

- микрогетерогенные частицы видны только в микроскоп, обладают способностью всплывать и оседать в воде, хотя с меньшей скоростью, чем грубодисперсные. Имеют размер от 10^{-2} до 10^{-4} см.

- коллоидные частицы имеют размер 10^{-5} до 10^{-7} и уже не видны в обычный микроскоп, так как они меньше длины волны видимого света. Коллоидные частицы не оседают под действием силы тяжести, не задерживаются обычными фильтрующими материалами (песок, фильтровальная бумага) и различимы в рассеянном свете.

По характеру поступающие в воду примеси можно разделить на минеральные, органические, бактериальные и биологические. К минеральным примесям относят азот, кислород, углекислый газ, аммиак,

метан и сероводород, образующиеся в результате окислительных и биохимических процессов, а так же вносимые со сточными водами различные соли, кислоты и основания, находящиеся в воде в диссоциированной форме. К органическим примесям относят гумусовые вещества. По физическому состоянию – на нерастворимые, растворимые и коллоидные. Такое деление загрязняющих воду примесей необходимо для выбора метода контроля качества и методов обработки сточных вод.

Отстойник является основным сооружением механической очистки сточных вод, он используется для удаления оседающих или всплывающих грубодисперсных веществ. Различают первичные отстойники, которые устанавливают перед сооружениями биологической или физико-химической очистки, и вторичные отстойники – для выделения активного ила или биопленки.

К отстойникам относят и осветлители, в которых одновременно с отстаиванием сточная вода фильтруется через слой взвешенного осадка, а так же осветлители – перегниватели и двухъярусные отстойники, где одновременно с осветлением воды происходит уплотнение выпавшего осадка.

В большинстве случаев эффективность отстойников составляет 40-60 % при продолжительности отстаивания 1 – 1,5 часа. А эффективность работы осветлителя достигает 70%.

Для повышения эффективности осаждения в сточную воду вводят коагулянты и флокулянты, способствующие увеличению скорости осаждения взвешенных частиц. Последнюю можно вычислить по формулам, но так как взвешенные частицы в сточной воде в процессе осаждения в большинстве случаев изменяют форму, плотность, размеры и представляют собой агрегативно – неустойчивую полидисперсную систему, действительную скорость осаждения частиц в сточных водах определяют экспериментально.

Расчет отстойников выполняют с учетом обеспечения необходимой эффективности осветления в соответствии со СНиП.

Тонкослойные отстойники используют для увеличения эффективности отстаивания. Они могут быть вертикальными, радикальными или горизонтальными; состоят из водораспределительной, водосборной и отстойной зон. В таких отстойниках отстойная зона делится трубчатыми или пластинчатыми элементами на ряд слоев небольшой глубины (до 150 мм). При малой глубине отстаивание протекает быстро, что позволяет уменьшить размеры отстойников.

Тонкослойные отстойники классифицируются по следующим признакам (рис. 2):

- по конструкции наклонных блоков – на трубчатые и полочные;
- по режиму работы – периодического (циклического) и непрерывного действия;
- по взаимному движению осветленной воды и вытесняемого осадка – с прямоточным, противоточным и смешанным (комбинированным) движением.

Поперечное сечение трубчатых секций может быть прямоугольным, квадратным, шестиугольным или круглым. Полочные секции монтируются из плоских или гофрированных листов и имеют прямоугольное сечение. Элементы отстойника изготавливают из стали, алюминия и пластмассы (полипропилена, полиэтилена, стеклопластиков).

Наклон блоков в отстойниках периодического (циклического) действия небольшой. Накопившийся осадок удаляется промывкой обратным потоком осветленной воды. Наклон элементов в отстойниках непрерывно действия составляет $45 - 60^\circ$ С. Эффективность трубчатых и полочных отстойников практически одинакова.

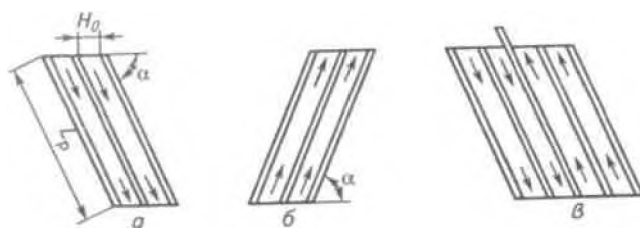


Рисунок 2. расположение полочных и трубчатых элементов в тонкослойных отстойниках.

а – прямоточное движение сточной воды и осадка; б – противоточное; в – смешанное; α – угол наклона элементов; H_0 – расстояние между полками и трубами; L_p – рабочая длина элемента.

Расчет тонкослойных отстойников сводится к определению его геометрических размеров (длины, ширины и высоты каналов) при заданных расходе сточной воды Q ($\text{м}^3/\text{с}$), концентрации взвешенных частиц в воде до и после очистки и физико-химических параметрах примесей.

Расчет тонкослойного отстойника, работающего по противоточной схеме удаления осадка (варианты 11-20)

На рисунке 3 приведена схема отстойника, работающего по противоточной схеме удаления осадка.

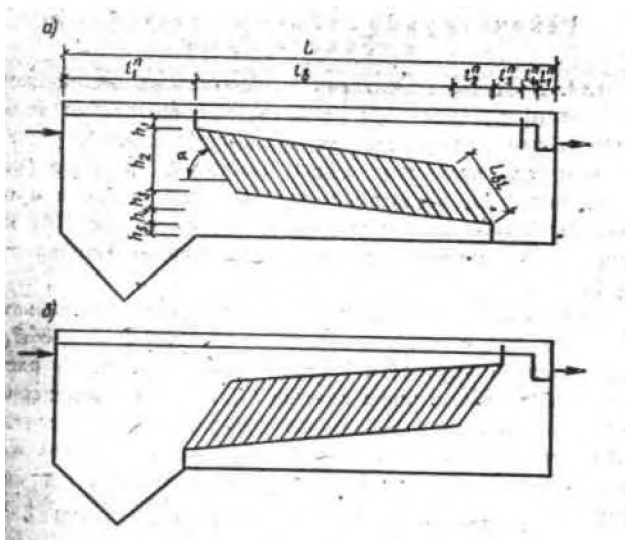


Рисунок 3. Схема отстойника, оборудованного тонкослойными блоками, работающего по противоточной схеме удаления примесей.

а – тяжелых примесей; б – легких примесей (масла, нефтепродукты и т.д).

Расчет тонкослойного отстойника, работающего по противоточной схеме удаления осадка производится по следующей схеме:

Согласно СНиП 2.04.03 – 85 угол наклона пластин $\alpha = 45^\circ$, коэффициент использования объема $K_{\text{set}} = 0,55$.

1. Определяется длина пластины в ярусе (м):

$$L_{\text{bl}} = v_w h / U_0 \quad (2.11) \quad \text{где}$$

h – высота слоя воды для отстаивания (м);

v_w – скорость рабочего потока (мм);

U_0 – гидравлическая крупность гранул нефти.

2. Определяется расстояние между пластинами (м):

$$b_n = h \cos \alpha \quad (2.12) \quad \text{где}$$

h – высота слоя воды для отстаивания;

3. Определяется высота блока (м):

$$H_{\text{bl}} = n_{\text{ti}} b_n \quad (2.13) \quad \text{где}$$

n_{ti} – число ярусов;

b_n – расстояние между пластинами.

4. Ширина блока B_{bl} определяется из условия ширины материала листа и условий монтажа (м):

$$B_{\text{set}} = B_{\text{bl}}$$

Определяется производительность одной секции по формуле ($\text{м}^3/\text{с}$)

$$q_{\text{set}} = 3,6 H_{\text{bl}} B_{\text{bl}} K_{\text{set}} v_w \quad (2.14) \quad \text{где}$$

H_{bl} – высота блока;
 B_{bl} – ширина блока;
 K_{set} – коэффициент использования объема;
 v_w – скорость рабочего потока.

5. Исходя из расхода сточных вод, определяется количество секций отстойника (шт):

$$N = q_w / q_{set} \quad (2.15) \quad \text{где}$$

q_w – расход воды;
 q_{set} – производительность одной секции.

6. Далее из конструктивных соображений и с учетом обеспечения гидравлического режима потоков воды, близкого к ламинарному, назначают другие размеры секции отстойника.

Определим общую глубину отстойника (м).

$$H_{об} = h_1 + h_3 + h_2 \quad (2.16) \quad \text{где}$$

h_1 и h_3 – высота первой и третьей зоны.

Определим h_2 (м)

$$h_2 = H_{bl} \cos \alpha + L_{bl} \sin \alpha, \text{ где}$$

L_{bl} – длина пластин в ярусе;

H_{bl} – высота блока.

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ЗАДАНИЮ № 2

Адсорбция

Адсорберы, используемые в системах очистки отходящих газов, должны удовлетворять следующим требованиям:

- Иметь большую адсорбционную способность при поглощении компонентов при небольших концентрациях их в газовых смесях;
- Обладать высокой селективностью;
- Иметь высокую механическую прочность;
- Обладать способностью к регенерации;
- Иметь низкую стоимость.

На практике нашли применение следующие адсорбенты: активные угли, силикагели, алюмогели и цеолиты.

Силикагели используют для осушки и поглощения паров полярных органических веществ. Промышленность выпускает кусковые и

гранулированные силикагели с зернами размерами 0,2 – 7 мм, насыпной плотностью 400 – 900 кг/м³.

По сравнению с углями, силикагели негорючи, имеют низкую температуру регенерации (100 – 200 °С), относительно высокую механическую плотность к истиранию и низкую стоимость.

Алюмогели (активный оксид алюминия) используют для осушки газов и поглощения полярных органических веществ из газовых смесей. Промышленность выпускает гранулированные алюмогели в виде гранул цилиндрической а так же шарообразной формы.

Цеолиты – алюмосиликаты, содержащие оксиды щелочных и щелочноземельных металлов. Они подразделяются на природные и синтетические. Из природных цеолитов практически используются клиноптилолит, морденит, шабазит и эрионит. Синтетические цеолиты выпускают в виде гранул шарообразной и цилиндрической формы.

Для очистки газов от вредных веществ используют адсорберы периодического и непрерывного действия.

Адсорберы периодического действия могут быть с неподвижным слоем и с кипящим слоем адсорбента. Первые представляют собой цилиндрические вертикальные или горизонтальные емкости, заполненные слоем адсорбента. В таких аппаратах адсорбцию проводят по стадиям:

- Адсорбция;
- Десорбция;
- Сушка адсорбента;
- Охлаждение адсорбента.

Новые конструкции адсорберов периодического действия позволяют более эффективно провести процесс.

Однако более интенсивны аппараты непрерывного действия с движущимся слоем адсорбента и псевдоожиженным слоем адсорбента.

Регенерация адсорбентов проводят термическим методом или десорбцией насыщенным, а так же перегретым водяным паром или инертным газом. При термической регенерации теряется 5 – 10 % адсорбента и происходит деструкция адсорбируемого вещества. Процесс проводят при температуре 700-800° С в печах различной конструкции: барботажных, многоходовых и с кипящим слоем.

Расчет адсорбера (вариант 1 – 10)

Цель задания: определить размеры, энергозатраты и время защитного действия адсорбера для улавливания паров этилового спирта, удаляемых местным отсосом от установки обезвреживания при условии непрерывной работы в течении 8 часов.

1. По изотерме адсорбции и заданной величины C_0 (г/м³) определяется статическая емкость сорбента, равная $a_0 = 175$ г/кг, $C_x = 2,5$ г/м³. В качестве сорбента используется активированный уголь.

2. Определяется весовое количество очищаемого газа (кг/с):

$$G = (L_m * \rho_g) / 3600 \quad (3.1) \quad \text{где}$$

L_m – производительность местного отсоса;

ρ_g – плотность паровоздушной смеси;

3600 – перевод в секунды.

3. Переводится весовая статическая емкость сорбента a_0 в объемную α_0 (кг/м³):

$$\alpha_0 = (a_0 * \rho_n) / 1000 \quad (3.2) \quad \text{где}$$

a_0 – статическая емкость сорбента;

ρ_n – насыпная плотность;

1000 – перевод в килограммы.

4. Определяется масса сорбента (кг):

$$M_c = (K * G * C_0 * 10^{-3} * \tau) / \alpha_0 \quad (3.3) \quad \text{где}$$

K – коэффициент запаса;

C_0 – начальная концентрация спирта;

10^{-3} – перевод C_0 в килограммы;

G – весовое количество очищаемого газа;

τ – продолжительность процесса сорбции (с).

5. Определяются геометрические размеры адсорбера. Для цилиндрического аппарата:

Диаметр адсорбера (м)

$$D_a = \sqrt{\frac{4 * G}{\pi * \rho_g * W}} \quad (3.4) \quad \text{где}$$

W – скорость потока газа в адсорбере;

ρ_g – плотность паровоздушной смеси;

G – весовое количество очищаемого газа.

Длина (высота) слоя адсорбента (м)

$$L_a = (M_c * W) / G \quad (3.5) \quad \text{где}$$

M_c – масса сорбента;
 W – скорость потока газа в адсорбере;
 G – весовое количество очищаемого газа.

6. Находится пористость сорбента.

$$\Pi = (\rho_k - \rho_n) / \rho_k \quad (3.6) \quad \text{где}$$

ρ_k – кажущаяся плотность;
 ρ_n – насыпная плотность.

7. Рассчитывается эквивалентный диаметр зерна сорбента (м):

$$d_3 = (\Pi * d * i) / \{(1 - \Pi) * ((d / 2) + i)\} \quad (3/7)$$

Π – пористость сорбента;
 d – диаметр гранул поглотителя (м);
 i – длина гранул (м).

8. Коэффициент трения находится в зависимости от характера движения по критерию Рейнольдса:

$$\begin{aligned} \text{При } Re < 50 \quad l_1 &= 220 / Re \\ \text{При } Re > 50 \quad l_1 &= 11,6 / Re^{0,25} \end{aligned}$$

$$Re = (W * d_3) / (n * \Pi) \quad (3.8)$$

l_1 – коэффициент трения;
 W – скорость потока газа в адсорбере;
 n – вязкость паровоздушной смеси;
 Π – пористость сорбента;
 d_3 – эквивалентный диаметр зерна сорбента.

9. Определяется гидравлическое сопротивление, оказываемое слоем зернистого поглотителя при прохождении через него потока очищаемого газа (Па):

$$\Delta P_1 = (3 / 4) * l_1 * (L_a * \rho_r * (1 - \Pi) * W^2) \quad (3.9)$$

$$\Delta P = \Delta P_1 / (\Phi * d_3 * \Pi^3) \quad (3.10)$$

Φ – коэффициент формы равный 0,9;
 l_1 – коэффициент трения;
 L_a – длина (высота) слоя адсорбента (м);
 ρ_r – плотность паровоздушной смеси;
 Π – пористость сорбента;

W – скорость потока газа в адсорбере.
 d_s – эквивалентный диаметр зерна сорбента.

10. Определяется коэффициент молекулярной диффузии паров этилового спирта в воздухе при заданных условиях т.е. $T_0 = 273$ К, $D_0 = 0,101 \cdot 10^{-4}$, $P_0 = 9,8 \cdot 10^4$ Па.

$$D = D_0 \cdot (T / T_0)^{3/2} \cdot (P_0 / P) \quad (3.11) \quad \text{где}$$

T – температура в адсорбере в Кельвинах
 $T = t + 273$ (К)

11. Находится диффузионный критерий Прандтля:

$$P_z = \eta / D \quad (3.12) \quad \text{где}$$

η – вязкость паровоздушной смеси;
 D – коэффициент молекулярной диффузии.

12. Для заданного режима течения газа (определяется значением Рейнольдса) вычисляем величину коэффициента массопередачи для единичной удельной поверхности (м/с):

$$\text{При } Re < 30 \quad \beta = (0,833 \cdot Re^{0,47} \cdot P_z^{0,35} \cdot D) / d_s \quad (3.13)$$

$$\text{При } Re > 30 \quad \beta = (0,53 \cdot Re^{0,64} \cdot P_z^{0,33} \cdot D) / d_s \quad (3.14)$$

d_s – эквивалентный диаметр зерна сорбента.
 D – коэффициент молекулярной диффузии.

13. Рассчитается удельная поверхность адсорбента (m^2 / m^3) :

$$f = \{4 \cdot (1 - P) / (d \cdot i)\} \cdot \{(d/2) + i\} \quad , \quad (3.15) \quad \text{где}$$

d – диаметр гранул поглотителя (м);
 i – длина гранул (м);
 P – пористость сорбента.

14. Определяется концентрация паров этилового спирта на выходе из аппарата ($г/м^3$):

$$C_k = C_0 \cdot (1 - \eta) \quad (3.16) \quad \text{где}$$

η – эффективность очистки в долях $\eta = h / 100$;
 C_0 – начальная концентрация спирта.

15. Находится продолжительность защитного действия адсорбера (с):

$$J = (a_0 / W * C_0) * \{L_a - S\} \quad (3.17) \quad \text{где}$$

$$S = (W/\beta * f) * [(C_x / C_0) * A + B] \quad (3.18) \quad \text{где}$$

$$B = A = \ln \{(C_0/C_k) - 1\} \quad (3.19)$$

C_0 – начальная концентрация спирта (кг/м³);

L_a – длина (высота) слоя адсорбента (м);

W – скорость потока газа в адсорбере;

β – коэффициент массопередачи для единичной удельной поверхности;

f – удельная поверхность адсорбента;

C_k – концентрация паров этилового спирта на выходе из аппарата (кг/м³);

a_0 – объемная емкость сорбента;

C_x – величина концентрации поглощаемого вещества на входе в адсорбер (кг/м³).

Расчет адсорбера (вариант 11 – 20)

Цель задания: определить размеры, энергозатраты и время защитного действия адсорбера для улавливания паров этилового спирта, удаляемых местным отсосом от установки обезвреживания при условии непрерывной работы в течении 8 часов.

1. В качестве сорбента используется силикагель. Необходимо дать его описание и характеристики.

2. Определяется весовое количество очищаемого газа (кг/с):

$$G = (L_m * \rho_r) / 3600 \quad (3.20) \quad \text{где}$$

L_m – производительность местного отсоса;

ρ_r – плотность паровоздушной смеси;

3600 – перевод в секунды.

3. Переводится весовая статическая емкость сорбента a_0 в объемную α_0 (кг/м³):

$$\alpha_0 = (a_0 * \rho_n) / 1000 \quad (3.21) \quad \text{где}$$

a_0 – статистическая емкость сорбента;

ρ_n – насыпная плотность;

1000 – перевод в килограммы.

4. Определяется масса сорбента (кг):

$$M_c = (K * G * C_0 * 10^{-3} * \tau) / \alpha_0 \quad (3.22) \quad \text{где}$$

K – коэффициент запаса;

C_0 – начальная концентрация спирта;

10^{-3} – перевод C_0 в килограммы;

G – весовое количество очищаемого газа;

τ – продолжительность процесса сорбции (с).

5. Определяются геометрические размеры адсорбера. Для цилиндрического аппарата:

Диаметр адсорбера (м)

$$D_a = \sqrt{\frac{4 * G}{\pi * \rho_g * W}} \quad (3.23) \quad \text{где}$$

W – скорость потока газа в адсорбере;

ρ_g – плотность паровоздушной смеси;

G – весовое количество очищаемого газа.

Длина (высота) слоя адсорбента (м)

$$L_a = (M_c * W) / G \quad (3.24) \quad \text{где}$$

M_c – масса сорбента;

W – скорость потока газа в адсорбере;

G – весовое количество очищаемого газа.

6. Рассчитывается эквивалентный диаметр зерна сорбента (м):

$$d_3 = (\Pi * d * i) / \{(1 - \Pi) * ((d / 2) + i)\} \quad (3.25)$$

Π – пористость сорбента;

d – диаметр гранул поглотителя (м);

i – длина гранул (м).

7. Коэффициент трения находится в зависимости от характера движения по критерию Рейнольдса:

$$\begin{aligned} \text{При } Re < 50 \quad l_l &= 220 / Re \\ \text{При } Re > 50 \quad l_l &= 11,6 / Re^{0,25} \end{aligned}$$

$$Re = (W * d_3) / (n * \Pi) \quad (3.26)$$

l_1 – коэффициент трения;
 W – скорость потока газа в адсорбере;
 N – вязкость паровоздушной смеси;
 Π – пористость сорбента;
 d_3 – эквивалентный диаметр зерна сорбента.

8. Определяется гидравлическое сопротивление, оказываемое слоем зернистого поглотителя при прохождении через него потока очищаемого газа (Па):

$$\Delta P_1 = (3 / 4) * l_1 * (L_a * \rho_r * (1 - \Pi) * W^2) \quad (3.27)$$

$$\Delta P = \Delta P_1 / (\Phi * d_3 * \Pi^3) \quad (3.28)$$

Φ – коэффициент формы равный 0,9;
 l_1 – коэффициент трения;
 L_a – длина (высота) слоя адсорбента (м);
 ρ_r – плотность паровоздушной смеси;
 Π – пористость сорбента;
 W – скорость потока газа в адсорбере.
 d_3 – эквивалентный диаметр зерна сорбента.

9. Определяется коэффициент молекулярной диффузии паров этилового спирта в воздухе при заданных условиях т.е. $T_0 = 273 \text{ К}$, $D_0 = 0,101 * 10^{-4}$, $P_0 = 9,8 * 10^4 \text{ Па}$.

$$D = D_0 * (T / T_0)^{3/2} * (P_0 / P) \quad (3.29) \quad \text{где}$$

T – температура в адсорбере в Кельвинах
 $T = t + 273 \text{ (К)}$

10. Находится диффузионный критерий Прантля:

$$P_z = n / D \quad (3.30) \quad \text{где}$$

n – вязкость паровоздушной смеси;
 D – коэффициент молекулярной диффузии.

11. Для заданного режима течения газа (определяется значением Рейнольдса) вычисляем величину коэффициента массопередачи для единичной удельной поверхности (м/с):

$$\text{При } Re < 30 \quad \beta = (0,833 * Re^{0,47} * P_z^{0,35} * D) / d_3$$

$$\text{При } Re > 30 \quad \beta = (0,53 * Re^{0,64} * P_z^{0,33} * D) / d_3$$

d_3 – эквивалентный диаметр зерна сорбента.
 D – коэффициент молекулярной диффузии. (3.31)

12. Рассчитывается удельная поверхность адсорбента ($\text{м}^2 / \text{м}^3$) :

$$f = \{4 * (1 - \Pi) / (d * i)\} * \{(d/2) + i\} \quad , \quad (3.32)$$

d – диаметр гранул поглотителя (м);

i – длина гранул (м);

Π – пористость сорбента.

13. Определяется концентрация паров этилового спирта на выходе из аппарата ($\text{г}/\text{м}^3$):

$$C_k = C_0 * (1 - \eta) \quad (3.33)$$

η – эффективность очистки в долях $\eta = h / 100$;

C_0 – начальная концентрация спирта.

14. Находится продолжительность защитного действия адсорбера (с):

$$J = (a_0 / W * C_0) * \{L_a - S\} \quad (3.34)$$

$$S = (W/\beta * f) * [(C_x / C_0) * A + B] \quad (3.35)$$

$$B = A = \ln \{(C_0/C_k) - 1\} \quad (3.36)$$

C_0 – начальная концентрация спирта ($\text{кг}/\text{м}^3$);

L_a – длина (высота) слоя адсорбента (м);

W – скорость потока газа в адсорбере;

β – коэффициент массопередачи для единичной удельной поверхности;

f – удельная поверхность адсорбента;

C_k – концентрация паров этилового спирта на выходе из аппарата ($\text{кг}/\text{м}^3$);

a_0 – объемная емкость сорбента;

C_x – величина концентрации поглощаемого вещества на входе в адсорбер ($\text{кг}/\text{м}^3$).

ПРИЛОЖЕНИЕ 1 ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Задание № 1

Расчет водоочистных сооружений промывочно-пропарочной станции

Таблица №1

№варианта	N	n _н	C _{н1} (мг/л)	C _{н2} (мг/л)	C _{п1} (мг/л)	C _{п2} (мг/л)	n
1	180	2	1280	160	40	20	2
2	184	2	1360	170	42	21	2
3	188	2	1440	180	44	22	3
4	192	2	1520	190	46	23	3
5	196	2	1600	200	48	24	3
6	200	2	1680	210	50	25	3
7	204	3	1760	220	52	26	3
8	208	3	1840	230	54	27	4
9	212	3	1920	240	56	28	4
10	220	3	2000	250	58	29	4

Таблица № 2

№ варианта	V _н (м/с)	γ _н , т/м ³	γ _п , т/м ³	Число песковых площадок	В _н , %
1	0,007	0,95	2,25	2	70
2	0,008	0,93	2,35	3	80
3	0,009	0,94	2,45	4	60
4	0,01	0,9	2,55	2	75
5	0,007	0,92	2,65	3	70

6	0,008	0,91	2,25	4	80
7	0,009	0,95	2,35	2	60
8	0,01	0,93	2,45	3	75
9	0,007	0,94	2,55	4	70
10	0,008	0,9	2,65	2	80

Расчет тонкослойного отстойника, работающего по противоточной схеме удаления осадка

Расчет производится для очистки нефтесодержащих сточных вод НПЗ до снижения концентрации нефтепродуктов до 50-70 мг/л, при постоянном расходе воды.

Таблица 3

№ Варианта	Гидравлическая крупность гранул нефти, U_0^H , мм	h , м	h_1 (м)	h_3 (м)	v_w , мм/с	B_{bl} (м)	n_{ti} (шт)	q_w , м ³ /ч	t , °C
11	0,3	0,2	0,7	0,6	9	7	11	700	60
12	0,25	0,15	0,5	0,6	5	6	15	400	20
13	0,1	0,35	0,6	0,4	6	6	13	500	10
14	0,25	0,25	0,6	0,5	7	6	17	800	30
15	0,4	0,45	0,4	0,7	8	5	19	600	40
16	0,55	0,1	0,6	0,5	9	5	13	500	50
17	0,1	0,35	0,6	0,6	7	6	15	700	10
18	0,25	0,2	0,7	0,6	5	7	17	600	20
19	0,35	0,45	0,4	0,7	6	4	16	500	30
20	0,4	0,15	0,5	0,6	7	5	17	700	40

Задание № 2**Расчет адсорбера**

Начальная концентрация спирта $C_0 = 11 \text{ г/м}^3$.

Таблица № 4

№ вар	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
L_M ($\text{м}^3/\text{ч}$)	250	220	230	210	250	250	220	230	210	250
t_p ($^{\circ}\text{C}$)	20	25	30	20	20	25	30	20	20	25
P (Н/м^2)	$9,8 \cdot 10^4$	$9,5 \cdot 10^4$	$9,0 \cdot 10^4$	$9,9 \cdot 10^4$	$9,8 \cdot 10^4$	$9,5 \cdot 10^4$	$9,0 \cdot 10^4$	$9,9 \cdot 10^4$	$9,8 \cdot 10^4$	$9,5 \cdot 10^4$
ρ_r (кг/м^3)	1,2	1,5	1,8	1,4	1,2	1,5	1,8	1,4	1,2	1,5
n ($\text{м}^2/\text{с}$)	$0,15 \cdot 10^{-4}$	$0,15 \cdot 10^{-4}$	$0,15 \cdot 10^{-4}$	$0,15 \cdot 10^{-4}$	$0,15 \cdot 10^{-4}$	$0,15 \cdot 10^{-4}$	$0,15 \cdot 10^{-4}$	$0,15 \cdot 10^{-4}$	$0,15 \cdot 10^{-4}$	$0,15 \cdot 10^{-4}$
d (мм)	3	2	5	4	3	2	5	4	3	2
i (мм)	5	6	7	3	5	6	7	3	5	6
ρ_n (кг/м^3)	500	550	600	450	500	550	600	450	500	550
ρ_k (кг/м^3)	800	850	750	600	800	850	750	600	800	850
h (%)	99	95	90	99	95	90	99	95	90	99
K	1,1	1,5	1,2	1,1	1,5	1,2	1,1	1,5	1,2	1,1
τ (ч)	7	5	6	7	5	6	7	5	6	7
W (м/с)	0,1	0,2	0,15	0,25	0,1	0,2	0,15	0,25	0,1	0,2

Таблица № 5

Начальная концентрация спирта $C_0 = 11 \text{ г/м}^3$, $C_x = 2,5 \text{ г/м}^3$.

№ вар	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
L_M ($\text{м}^3/\text{ч}$)	230	210	220	250	230	240	220	250	200	250
t_p ($^{\circ}\text{C}$)	25	23	30	26	25	23	30	26	25	23
P (Н/м^2)	$9,8 \cdot 10^4$	$9,5 \cdot 10^4$	$9,0 \cdot 10^4$	$9,9 \cdot 10^4$	$9,8 \cdot 10^4$	$9,5 \cdot 10^4$	$9,0 \cdot 10^4$	$9,9 \cdot 10^4$	$9,8 \cdot 10^4$	$9,5 \cdot 10^4$
ρ_r (кг/м^3)	1,2	1,5	1,8	1,4	1,2	1,5	1,8	1,4	1,2	1,5
n ($\text{м}^2/\text{с}$)	$0,15 \cdot 10^{-4}$	$0,15 \cdot 10^{-4}$	$0,15 \cdot 10^{-4}$	$0,15 \cdot 10^{-4}$	$0,15 \cdot 10^{-4}$	$0,15 \cdot 10^{-4}$	$0,15 \cdot 10^{-4}$	$0,15 \cdot 10^{-4}$	$0,15 \cdot 10^{-4}$	$0,15 \cdot 10^{-4}$
d (м)	$7 \cdot 10^{-9}$	$6 \cdot 10^{-9}$	$1 \cdot 10^{-9}$	$3 \cdot 10^{-9}$	$5,5 \cdot 10^{-9}$	$4 \cdot 10^{-9}$	$3,5 \cdot 10^{-9}$	$1,3 \cdot 10^{-9}$	$4,5 \cdot 10^{-9}$	$3 \cdot 10^{-9}$
i (мм)	5	6	7	3	5	6	7	3	5	6
a_0 (г,кг)	80	90	85	95	100	110	120	80	90	85
ρ_H (кг/м^3)	400	450	390	410	420	400	450	390	410	400
ρ_K (кг/м^3)	800	850	750	600	800	850	750	600	800	850
h (%)	99	95	90	99	95	90	99	95	90	99
K	1,1	1,5	1,2	1,1	1,5	1,2	1,1	1,5	1,2	1,1
τ (ч)	5	6	7	5	6	7	5	6	7	5
W (м/с)	0,15	0,2	0,1	0,25	0,1	0,25	0,15	0,2	0,1	0,2
Π (м/кг)	$0,9 \cdot 10^{-3}$	$1,1 \cdot 10^{-3}$	$0,93 \cdot 10^{-3}$	$0,97 \cdot 10^{-3}$	$0,25 \cdot 10^{-3}$	$0,29 \cdot 10^{-3}$	$0,39 \cdot 10^{-3}$	$0,49 \cdot 10^{-3}$	$0,6 \cdot 10^{-3}$	$0,34 \cdot 10^{-3}$

РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА И ИСТОЧНИКИ

1. Системы защиты среды обитания / Д.А. Кривошеин, В.П. Дмитренко, Н.В. Федотова (учебное пособие в 2-х томах, 2014, Москва, Академия)
2. Техника и технология защиты воздушной среды / В.В. Юшин, В.Л. Лапин и др. (2005, Москва, Высшая школа)
3. Процессы и аппараты защиты окружающей среды / Ю.П. Сидоров, Е.В. Тимошенкова (МИИТ)
4. Практическая экология при эксплуатации ВСНТ / Ю.П. Сидоров, Т.В. Гаранина (МИИТ)
5. Защита атмосферы от выбросов пыли на предприятиях железнодорожного транспорта / Ю.П. Сидоров, Е.В. Тимошенкова, Т.В. Гаранина (МИИТ)