

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Вологодский государственный технический университет

А. Г. ГУДКОВ

БИОЛОГИЧЕСКАЯ ОЧИСТКА ГОРОДСКИХ СТОЧНЫХ ВОД

Рекомендовано
редакционно-издательским советом университета
в качестве учебного пособия

Вологда
2002

УДК 628.35
ББК
Г93

Рецензенты: Доктор технических наук, декан санитарно-технического факультета Московского государственного строительного университета **Воронов Ю. В.**
Кандидат технических наук, генеральный директор МУП ЖКХ «Вологдагорводоканал» **Приемышев Ю. Р.**

Гудков А.Г.

Г93 Биологическая очистка городских сточных вод: Учебное пособие.– Вологда: ВоГТУ, 2002. – 127 с.
ISBN 5-87851-174-6

В учебном пособии рассмотрены вопросы проектирования и расчета основных сооружений биологической очистки городских сточных вод. Пособие предназначено для студентов специальности 290800 при подготовке к занятиям по дисциплине “Водоотведение и очистка сточных вод”.

УДК 628.35
ББК

ISBN 5-87851-174-6

© Вологодский государственный
технический университет, 2002
© Гудков А.Г., 2002

ВВЕДЕНИЕ

История применения биологической очистки началась со строительством в XIX веке первых полей фильтрации, на которых сточная вода очищалась путем фильтрования через слой почвы в естественном состоянии. Это позволило, в частности, использовать стоки в сельском хозяйстве.

Более совершенные устройства – биофильтры, разработанные по принципу полей фильтрации, однако лишённые присущих им недостатков (например, огромные занимаемые площади, прекращение работы в зимний период и др.), появились в Англии в 1893 г., а в России спустя 15 лет.

Примерно в 1914 г. появился метод очистки сточных вод с помощью активного ила в аэротенках, который применяется и сейчас как стандартный для глубокой очистки. В нашей стране эра развития биологической очистки сточных вод в искусственно созданных условиях была открыта в 1922 г. после докладов "Очистка сточных вод посредством активного ила" и "Обзор работы лаборатории Управления канализации Москвы за время с 1914 по 1922 г.", сделанных на двенадцатом Всероссийском водопроводном и санитарно-техническом съезде.

Первая в России станция аэрофильтрации (Кожуховская) общей производительностью 37 тысяч м³/сут была введена в эксплуатацию в Москве в 1929-1933 гг. На станции была удачно и оригинально скомбинирована очистка стоков на аэротенках, биофильтрах и биологических прудах.

На сегодняшний день во всем мире биологическая очистка является основным методом удаления из городских сточных вод большей части органических и бактериальных загрязнений. На основе биологического метода разработаны сотни разнообразных устройств и сооружений, в которых этот метод используется как отдельно, так и вкуче с механическими или физико-химическими способами очистки.

Учебное пособие предназначено в помощь студентам, обучающимся по специальности 290800 «Водоснабжение и водоотведение», для изучения методов и сооружений биологической очистки хозяйственно-бытовых и близких к ним производственных стоков с расходами свыше 500 м³/сут.

Не претендуя на всеохватность темы, учебное пособие ставит целью ознакомить читателей с теорией и практикой проектирования тех сооружений, которые составляют основу стадий полной биологической очистки и глубокой очистки: аэротенки, биофильтры, поля орошения и фильтрации, биологические пруды, окситенки, циркуляционные окислительные каналы, нитриденитрификаторы. Для каждого из перечисленных сооружений приведены методики и примеры расчета.

1. ОСНОВЫ БИОЛОГИЧЕСКОЙ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД

Процесс биологической очистки основан на способности микроорганизмов использовать растворенные органические вещества сточных вод для питания в процессе жизнедеятельности. Часть органических веществ превращается в воду, диоксид углерода, нитрит- и сульфат-ионы, часть идет на образование биомассы.

Сооружения биологической очистки можно условно разделить на два вида:

- с очисткой в условиях, близких к естественным;
- с очисткой в искусственно созданных условиях.

К первому виду относятся *поля фильтрации* и *орошения* (земельные участки, в которых очистка происходит за счет фильтрации через слой грунта), а также *биологические пруды* (неглубокие водоемы, в которых происходит очистка, основанная на самоочищении водоемов).

Второй вид составляют такие сооружения, как биофильтры и аэротенки. *Биофильтр* – резервуар с фильтрующим материалом, поверхность которого покрыта *биологической пленкой* (колония микроорганизмов, способных сорбировать и окислять органические вещества из сточных вод). *Аэротенк* – резервуар, в котором очищаемые стоки смешиваются с *активным илом* (биоценоз микроорганизмов, также способных поглощать органику из стоков).

Биологическая очистка является основным методом обработки городских сточных вод. Существуют аэробные и анаэробные методы биологической очистки сточных вод. При аэробной очистке микроорганизмы культивируются в активном иле и биопленке.

1.1. Состав активного ила и биопленки

Активный ил является амфотерной коллоидной системой. Элементный химический состав активных илов достаточно близок и для городских сточных вод имеет формулу – $C_{54}H_{212}O_{82}N_8S_7$. Сухое вещество активного ила содержит 70÷90 % органических и 10÷30 % неорганических веществ. Кроме живых организмов, в иле содержится *субстрат* – различные твердые остатки, к которым крепятся микроорганизмы. По внешнему виду активный ил представляет собой комочки и хлопья размером 3÷150 мкм и высокой удельной поверхностью – около 1200 м² на 1 м³ ила.

Сообщество живых организмов, населяющих активный ил или биопленку, называют *биоценозом*. Биоценоз активного ила представлен в основном 12 видами микроорганизмов и простейших.

Биоценоз активных илов состоит из бактерий, простейших, плесневых грибов, дрожжей, актиномицет, личинок насекомых, рачков, водорослей и др. Основное разрушение органических загрязнений в стоках осуществляется бактериями. В 1 м³ ила содержится $2 \cdot 10^{14}$ бактерий. В активном иле они находятся в виде скоплений, окруженных слизистым слоем (*зооглеи*). Бактерии представлены такими типами, как псевдомонас, бациллулус, нитробактер, нитросомонас и др.

В активных илах встречаются четыре вида простейших: *саркодовые*, *жгутиковые*, *реснитчатые* и *сосущие* инфузории, которые поглощают большое количество бактерий, поддерживая их оптимальное количество (одна инфузория в среднем поглощает от 20 до 40 тысяч бактерий). Они способствуют осаждению ила и осветлению сточных вод во вторичных отстойниках. Находящиеся на следующем трофическом уровне коловратки питаются бактериями и простейшими.

Состав биоценоза ила зависит от наличия и концентрации в сточной воде разнообразных органических веществ. Только основная группа бактерий (80÷90%) участвует в процессе очистки сточных вод, остальное содержание ила составляют сопутствующие группы микробов. При высоком содержании органики в сточной воде преобладают гетеротрофные бактерии, при снижении питательных веществ увеличивается количество хищных простейших.

Качество ила определяется скоростью его осаждения и степенью очистки жидкости. Состояние активного ила характеризует иловый индекс, который зависит от способности ила к осаждению. Крупные хлопья оседают быстрее, чем мелкие.

Биопленка растет на наполнителе биофильтра и имеет вид слизистых образований толщиной 1÷2 мм. Видовой состав биопленки более разнообразен, чем активного ила. Биопленка состоит из бактерий, грибов, дрожжей, личинок насекомых, червей, клещей и других организмов. В 1 м³ биопленки содержится $1 \cdot 10^{12}$ бактерий.

1.2. Закономерности распада органических веществ

Процесс разрушения сложных органических соединений происходит в определенной последовательности и в присутствии катализаторов этих реакций – *ферментов*, которые выделяются клетками бактерий. Ферменты – сложные белковые соединения (молекулярная масса достигает сотен тысяч и миллионов), ускоряющие биохимические реакции. Ферменты бывают одно- и двухкомпонентные. Двухкомпонентные ферменты состоят из белковой (*апофермент*) и небелковой (*кофермент*) части. Каталитической активностью обладает кофермент, а белковый носитель увеличивает его активность.

Различают ферменты, вырабатываемые бактериями для внеклеточного расщепления веществ – *экзоферменты*, и внутренние пищеварительные ферменты – *эндоферменты*.

Особенность ферментов состоит в том, что каждый из них катализирует только одно из многих превращений. Существуют шесть основных ферментных классов: *оксиредуктазы*, *трансферазы*, *гидралазы*, *лазы*, *изомеразы* и *лигазы*. Для разрушений сложной смеси органических веществ необходимо 80÷100 различных ферментов, каждый из них имеет свою оптимальную температуру, выше которой скорость реакции падает.

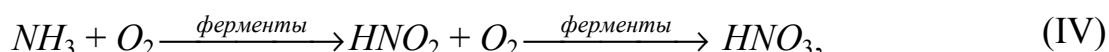
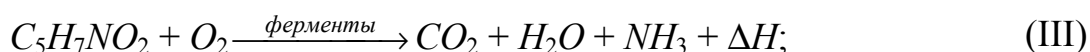
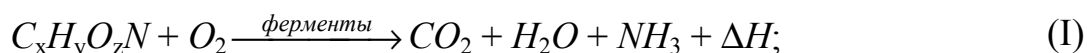
Процесс биологического окисления состоит из множества ступеней и начинается с расщепления органического вещества с выделением активного водорода. В этом процессе особую роль играют ферменты класса оксиредуктазы: *дегидрогена-*

зы (отнимающие водород от субстрата), *каталазы* (расщепляющие перекись водорода) и *пероксидазы* (использующие активированную перекись для окисления других органических соединений).

Существуют вещества, которые повышают активность ферментов – *активаторы* (витамины, катионы Ca^{2+} , Mg^{2+} , Mn^{2+}), и *ингибиторы*, оказывающие противоположное действие (например, соли тяжелых металлов, антибиотики).

Ферменты, которые постоянно присутствуют в клетках, независимо от субстрата, называются *конститутивными*. Ферменты, которые синтезируются клетками в ответ на изменение внешней среды, называются *адаптивными*. Срок адаптации составляет от нескольких часов до сотен дней.

Суммарные реакции биохимического окисления в аэробных условиях можно схематично представить в следующем виде:

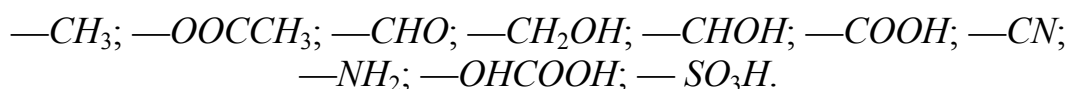


где $C_xH_yO_zN$ – все органические вещества сточных вод; $C_5H_7NO_2$ – условная формула клеточного вещества бактерий; ΔH – энергия.

Реакция (I) показывает характер окисления вещества для удовлетворения энергетических потребностей клетки (*катаболический процесс*), реакция (II) – для синтеза клеточного вещества (*анаболический процесс*). Затраты кислорода на эти реакции составляют БПК_{полн} сточной воды. Реакции (III) и (IV) характеризуют превращение клеточного вещества в условиях недостатка питательных веществ. Общий расход кислорода на все 4 реакции приблизительно вдвое больше, чем на (I) и (II).

Большое количество биохимических реакций происходит с помощью кофермента А (или КоА, КоА–SH, кофермент ацилирования). Кофермент А является производным б-меркаптоэтиламида пантотеновой кислоты и нуклеотида – аденозин-3,5-дифосфата ($C_{21}H_{36}O_{16}P_3S$) с молекулярной массой 767,56. КоА активирует карбоновые кислоты, образуя с ними ацилпроизводные КоА.

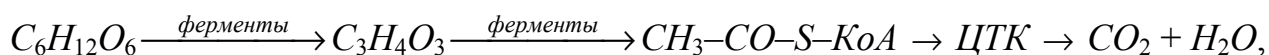
Легко окисляются бензойная кислота, этиловый и амиловый спирты, гликоли, глицерин, анилин, сложные эфиры и др. Плохо окисляются нитросоединения, «жесткие» ПАВ, трехатомные спирты и др. Наличие функциональных групп увеличивает способность к биологическому разрушению соединений в такой последовательности:



1.3. Метаболизм некоторых веществ

Углеводы

Окисление углеводов описывается сложной схемой /7/:



где $CH_3-CO-S-CoA$ – ацетил-КоА; ЦТК – цикл трикарбоновых кислот, состоящий из последовательности реакций, катализируемых 10 ферментами.

Цикл трикарбоновых кислот (цикл Кребса, цикл лимонной кислоты, ЦТК) состоит из следующей последовательности реакций.

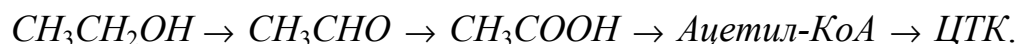
Ацетил-КоА под действием фермента конденсируется с шавелево-уксусной кислотой, образуя лимонную кислоту, которая под действием фермента изомеризуется в *цис*-аконитовую кислоту, а затем в изолимонную кислоту, которая подвергается окислительному декарбоксилированию. Этот процесс протекает в две стадии: сначала происходит дегидрирование изолимонной кислоты с образованием шавелево-янтарной кислоты, которая затем декарбоксилируется, превращаясь в кетоглутаровую кислоту. Далее происходит окислительное декарбоксилирование кетоглутаровой кислоты и образуется сукцинил-КоА, который превращается в свободную янтарную кислоту. Далее идет дегидрирование янтарной кислоты с образованием фумаровой кислоты, которая превращается в яблочную кислоту. После дегидрирования возникает шавелево-уксусная кислота, которая может вновь конденсироваться с ацетил-КоА.

Метан и этанол

Метан окисляется по схеме:

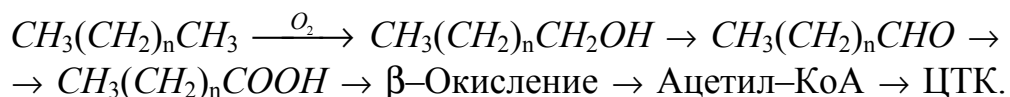


Этиловый спирт микроорганизмы превращают в уксусную кислоту, которая после реакции с ацетил-КоА включается в ЦТК:



Окисление углеводов

Процесс окисления происходит следующим образом:



Различают три типа разрыва ароматического кольца. По первому типу кольцо разрывается между двумя соседними гидроксильными атомами углерода. По этому пути распадаются фенол, бензойная кислота, нафталин, фенантрен, антрацен и др.

Второй путь разрыва – это разрыв связи между гидроксильным и негидроксильным углеродными атомами.

Третий путь характеризуется разрывом кольца между гидроксильным атомом углерода и атомом углерода, к которому присоединена карбоксильная или другая группа.

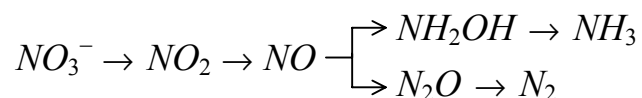
Нитрификация и денитрификация

Нитрифицирующие бактерии окисляют азот аммонийных соединений сначала до нитритов, а потом до нитратов. Этот процесс называется *нитрификацией* и является конечной стадией минерализации азотсодержащих органических веществ

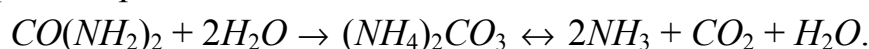
(см. реакцию IV). Присутствие нитрат-ионов в очищенной воде является одним из показателей полноты очистки.

Под действием денитрифицирующих бактерий связанный кислород отщепляется от нитритов и нитратов (*денитрификация*). Условия этого процесса – наличие органических веществ, небольшой доступ кислорода, нейтральная или слабощелочная реакция.

Денитрификация при очистке сточных вод протекает главным образом с образованием молекулярного азота (редко образуется NH_3):



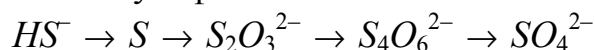
Азотсодержащие соединения разлагаются с выделением азота в виде аммиака. Например, карбамид разлагается по схеме:



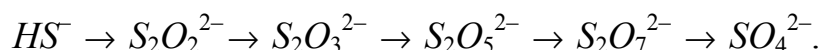
Разложение органических соединений может происходить через образование аминокислот, которые далее выделяют аммиак при протекании различных процессов.

Серосодержащие вещества

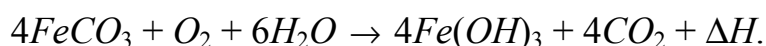
Серные и тионовые бактерии, которые при благоприятных условиях могут развиваться в процессе биологической очистки, окисляют такие вещества, как сера, сероводород, тиосульфаты, полиотионаты и др. Конечной стадией превращений являются серная кислота или сульфаты:



или



Окисление железа и марганца. Железобактерии получают энергию в результате окисления солей двухвалентного железа до соединений трехвалентного железа:



Двухвалентный марганец окисляется в четырехвалентный:



1.4. Зависимость скорости биологической очистки от различных факторов

При заданной степени очистки основными факторами, влияющими на скорость биохимических реакций, являются концентрация потока, содержание кислорода в сточной воде, температура и pH среды, содержание биогенных элементов, а также тяжелых металлов и минеральных солей.

Турбулизация потока сточной воды приводит к увеличению скорости поступления питательных веществ и кислорода к микроорганизмам, что приводит к увеличению скорости очистки. Турбулизация обеспечивается интенсивным пере-

мешиванием подаваемым воздухом или механическими способом.

Повышение температуры сточной воды увеличивает скорость протекания очистки в 2÷3 раза, но только в пределах 20÷30°C. При этом необходимо проводить более интенсивную аэрацию, так как растворимость кислорода с увеличением температуры падает.

При более низких температурах замедляется процесс адаптации бактерий к новым видам загрязнений, ухудшаются процессы нитрификации, флокуляции и осаждения активного ила.

Соли тяжелых металлов сорбируются активным илом, при этом снижается биохимическая активность ила и происходит его вспухание из-за интенсивного развития нитчатых форм бактерий. По степени токсичности тяжелые металлы можно расположить в следующем порядке: $Sb > Ag > Cu > Hg > Co > Ni > Pb > Cr^{3+} > V > Cd > Zn > Fe$.

Абсорбция и потребление кислорода. В процессе аэрации вода насыщается пузырьками воздуха, затем кислород из пузырьков абсорбируется водой и переносится к микроорганизмам.

Перенос кислорода из газовой фазы к клеткам происходит в два этапа. На первом этапе происходит перенос кислорода из воздушных пузырьков в основную массу жидкости, на втором – перенос абсорбированного кислорода из основной массы жидкости к клеткам под действием турбулентных пульсаций. Скорость всего процесса лимитируется диффузионным сопротивлением воды при абсорбции кислорода. Наиболее надежный способ увеличения количества абсорбированного кислорода – повышение объемного коэффициента массоотдачи. Это достигается дроблением газовых пузырьков и увеличением газосодержания потока сточной воды.

Скорость потребления кислорода микроорганизмами не превышает скорость его абсорбции. Скорость потребления кислорода увеличивается с увеличением содержания его в воде, однако, только до определенного предела. Концентрация кислорода в воде, при которой скорость потребления его становится постоянной и не зависит от дальнейшего повышения концентрации, называется *критической*. Критическая концентрация меньше равновесной и зависит от природы микроорганизмов и температуры.

Биогенные элементы и микроэлементы являются необходимыми для успешного протекания биохимических реакций в сточной воде. К ним относятся $N, S, P, K, Mg, Ca, Na, Cl, Fe, Mn, Mo, Ni, Co, Zn, Cu$ и др.

Среди них основными являются N, P и K . Недостаток азота тормозит окисление органических загрязнителей и приводит к образованию труднооседающего ила. Недостаток фосфора приводит к развитию нитчатых бактерий, и, в результате, к вспуханию активного ила.

Содержание биогенных элементов зависит от состава сточных вод и должно устанавливаться экспериментально. Ориентировочное соотношение $BPK_{полн} : N : P$ при продолжительности очистки до 3 суток составляет 100 : 5 : 1. При продолжительности очистки 20 суток это соотношение следует поддерживать на уровне

200 : 5 : 1.

При нехватке азота, фосфора и калия в сточные воды добавляют азотные, фосфорные и калийные удобрения.

2. БИОЛОГИЧЕСКИЕ ФИЛЬТРЫ

2.1. Общие сведения о биологических фильтрах

Биофильтр – это сооружение, в котором сточная вода фильтруется через загрузочный материал, покрытый биологической пленкой (биопленкой), образованной колониями микроорганизмов. Биофильтр состоит из следующих частей (см. рис. 2.1):

- *фильтрующей загрузки*, помещенной в резервуар круглой или прямоугольной формы в плане (тело биофильтра);
- *водораспределительного устройства* для равномерного орошения сточной водой поверхности загрузки;
- *дренажного устройства* для удаления профильтрованной жидкости;
- *воздухораспределительного устройства* для поступления воздуха внутрь биофильтра.

Проходя через загрузку биофильтра, загрязненная вода оставляет в ней нерастворенные примеси, не осевшие в первичных отстойниках, а также коллоидные и органические вещества, сорбируемые биопленкой.

Часть органики микроорганизмы используют на увеличение своей биомассы, поэтому масса активной биопленки все время увеличивается. Отработанная и омертвевшая биопленка смывается сточной водой и выносится из тела биофильтра, после чего отделяется от очищенной воды во вторичных отстойниках. Необходимый кислород может поступать в толщу загрузки естественной и искусственной вентиляцией.

Классификация биофильтров

Биофильтры классифицируются по следующим признакам:

- по степени очистки: на полную и неполную биологическую очистку;
- по способу подачи воздуха: с искусственной аэрацией (*аэрофильтры*) и с естественной подачей воздуха;
- по режиму работы: с *рециркуляцией* сточной воды (то есть с возвратом части очищенной жидкости в биофильтр) и без нее;
- по технологической схеме: одно- и двухступенчатые биофильтры;

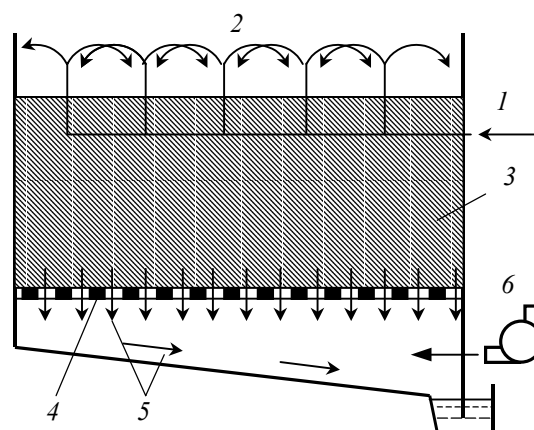


Рис. 2.1. Разрез биофильтра

1 – подача сточных вод; 2 – водораспределительное устройство; 3 – фильтрующая загрузка; 4 – дренажное устройство; 5 – очищенная сточная вода; 6 – воздухораспределительное устройство

- по пропускной способности: малой пропускной способности (*капельные* биофильтры) и большой (*высоконагружаемые*);
- по виду и особенностям загрузочного материала: биофильтры с *объемной* (гравий, шлак, керамзит, щебень и др.) и *плоскостной* (пластмассы, ткани, асбестоцемент, керамика, металл и др.) загрузкой.

Биофильтры с объемной загрузкой различаются по высоте загрузки: капельные имеют высоту 1÷2 м, высоконагружаемые – 2÷4 м и башенные высотой 8÷16 м.

Биофильтры с плоскостной загрузкой подразделяются на следующие:

- с *жесткой засыпной загрузкой* (керамические, пластмассовые или металлические насыпные элементы);
- с *жесткой блочной загрузкой* (гофрированные или плоские листы или пространственные элементы);
- с *мягкой или рулонной загрузкой*, выполненной из металлических или пластмассовых сеток, синтетических тканей, которые крепят на каркасах или укладывают в рулонах;
- *погружные биофильтры*, состоящие из пакета дисков, насаженных на горизонтальную ось вращения.

2.2. Биофильтры с объемной загрузкой

Капельные биофильтры

В капельном биофильтре сточная вода подается в виде капель или струй. Естественная вентиляция воздуха происходит через открытую поверхность биофильтра и дренаж. Эти биофильтры рекомендуется применять для полной биологической очистки сточных вод при их расходе не более 1000 м³/сут. Гидравлическая нагрузка на капельных биофильтрах составляет 1÷3 м³ на 1 м² поверхности загрузки в сутки.

Сточная вода, осветленная в первичных отстойниках, поступает в распределительные устройства, из которых периодически напускается на поверхность биофильтра. Профильтрованная вода попадает в дренажную систему и далее по сплошному днищу биофильтра стекает к отводным лоткам. Затем вода поступает во вторичные отстойники, в которых выносимая пленка отделяется от очищенной воды.

Капельные биофильтры размещают в зданиях в виде отдельных секций, которые могут быть круглыми или прямоугольными в плане. Высота загрузки биофильтра – 1,5÷2 м, материал загрузки – щебень, гравий и галька крупностью 25÷40 мм. Рециркуляцию сточной воды на капельных биофильтрах применяют при значении БПК_{полн} сточной воды свыше 220 мг/л. Очищенная сточная вода может иметь БПК_{полн} до 15 мг/л.

Недостатками капельных биофильтров являются низкая производительность и частые заиливания поверхности загрузочного материала, которые обычно возникают из-за превышения допустимой нагрузки по загрязнению.

Высоконагружаемые биофильтры (аэрофильтры)

Конструктивными отличиями высоконагружаемых биофильтров являются большая высота слоя загрузки, большая крупность ее фракций и особая конструкция днища и дренажа, обеспечивающая возможность искусственной продувки материала загрузки воздухом. В закрытое междудонное пространство вентилятором подается воздух. На отводных трубопроводах предусматриваются гидравлические затворы глубиной 200 мм.

Высоконагружаемые биофильтры применяют для полной и неполной биологической очистки на станциях производительностью до 50000 м³/сут, и размещают на открытом воздухе. Загрузка имеет рабочую высоту 2÷4 м, крупность материала загрузки составляет от 40 до 70 мм. Допустимое значение БПК_{полн} сточных вод без рециркуляции составляет 300 мг/л. Гидравлическая нагрузка составляет 10÷30 м³/(м²·сут).

Аэрофильтры требуют равномерного орошения всей поверхности с возможно малыми перерывами в подаче воды и поддержание повышенной нагрузки по воде.

Башенные биофильтры

Имеют высоту 8÷16 м и применяются для очистных сооружений с производительностью до 50000 м³/сут при благоприятном рельефе местности и при БПК_{полн} очищенных сточных вод до 20÷25 мг/л. Крупность зерен загрузки – 60÷80 мм. Используются за рубежом, в отечественной практике распространения не получили.

2.3. Биофильтры с плоскостной загрузкой

Этот тип биофильтров позволил преодолеть многие недостатки, присущие биофильтрам: неиндустриальность строительства, малую пропускную способность, ненадежность работы при перегрузках, отсутствие загрузочного материала и др. Предпочтение биофильтрам с плоскостной загрузкой следует отдавать в районах с тяжелыми грунтовыми условиями, сейсмичных районах, при наличии дешевых местных материалов и дефиците электроэнергии.

Такие биофильтры компактны, имеют малую энергоемкость, надежны в эксплуатации, не подвержены заилению. Кроме того, они имеют высокую индустриальность строительства, включая заводское изготовление всего комплекса сооружений небольшой мощности. В качестве загрузки используются блочные, засыпные и рулонные материалы из пластических масс, металла, асбестоцемента, керамики, стекла, дерева, тканей и др.

Биофильтры имеют круглую, прямоугольную и восьмигранную форму в плане. Высота загрузочного слоя 3÷8 м, плотность загрузки 10÷250 кг/м³, удельная площадь поверхности 60÷250 м²/м³. Гидравлическая нагрузка на 1 м³ объема биофильтра в сутки составляет 6÷18 м³.

2.4. Погружные биофильтры

Представляют собой комбинированные сооружения для биологической очист-

ки сточных вод, имеющие признаки биофильтров и аэротенков. Основные составляющие части погружных биофильтров:

- резервуар для сточной воды;
- пространственная конструкция загрузки, обладающая развитой поверхностью и закрепленная на вращающемся горизонтальном валу над резервуаром;
- лотки для распределения и сбора воды;
- двигатель для вращения вала.

По виду пространственных конструкций погружные биофильтры подразделяются на *дисковые, шнековые, трубчатые, барабанные*.

Преимущества погружных биофильтров перед биофильтрами и аэротенками: индустриальны в строительстве, компактны, имеют малую энергоемкость, просты и надежны в эксплуатации, не требуют большого перепада высот при движении воды, не требуют рециркуляции сточных вод.

Погружные биофильтры применяются для полной и неполной биологической очистки бытовых и производственных сточных вод с расходами 1 м³/сут до 150 тыс. м³/сут. Оптимальная область применения – комплексы сооружений пропускной способностью 500÷1000 м³/сут по очистке сточных вод от отдельно стоящих зданий, малых населенных пунктов, кемпингов, домов отдыха, санаториев, вахтовых поселков и т.д.

В технологической схеме станции очистки погружные биофильтры занимают место между сооружениями предварительной механической очистки и вторичными отстойниками.

Дисковые погружные биофильтры

Состоят из дисков диаметром 1÷5 м, собираемых в пакеты по 30÷180 штук и закрепляемых на горизонтальном валу (см. рис. 2.2).

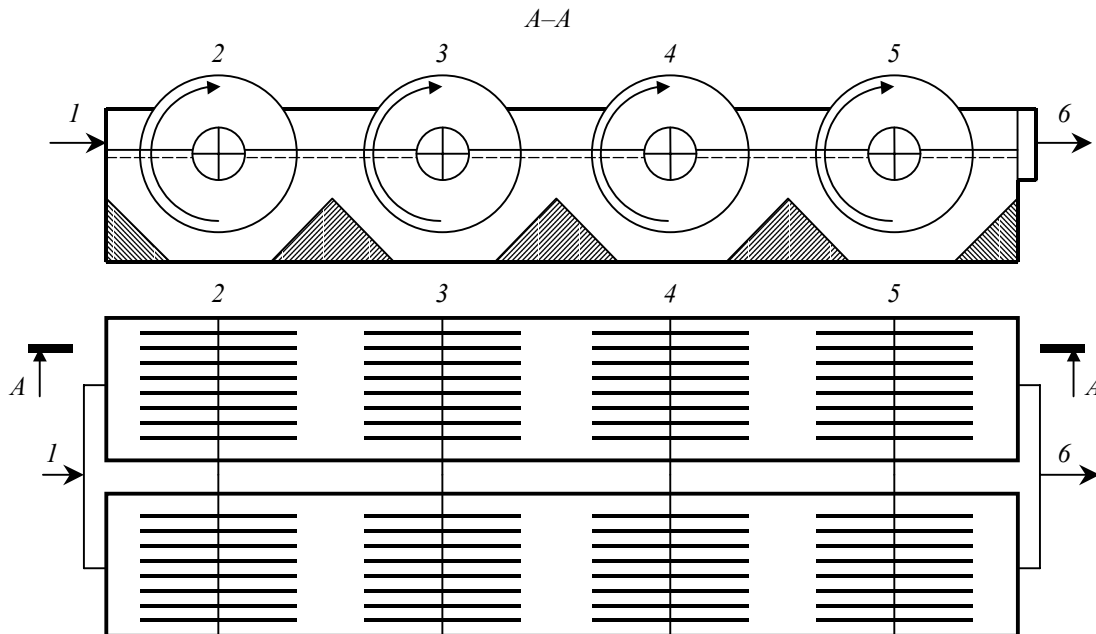


Рис. 2.2. Схема дискового погружного биофильтра

1 – подача сточных вод; 2...5 – первая, вторая, третья и четвертая ступени биофильтра; 6 – выпуск очищенных сточных вод

Диски выполняются из металла, пластмасс, асбестоцемента, тканей; их толщина 1÷10 мм. Частота вращения вала составляет 1÷50 об/мин. На поверхности дисков образуется биопленка, сходная по видовому составу с биопленкой биофильтров. На погруженной в стоки части диска происходит сорбция загрязнений из жидкости, затем при повороте диска эти загрязнения окисляются на воздухе. Часть биопленки отрывается от поверхности и находится в обрабатываемой жидкости во взвешенном состоянии аналогично хлопьям активного ила. Поэтому процессы окисления осуществляются как биопленкой, так и активным илом. Нагрузка по БПК_{полн} на 1 м² поверхности дисков – до 200 г/сут, эффективность очистки – 50÷98%. Время пребывания сточных вод в резервуаре не превышает 3 ч. Производительность – до 1000 м³/сут.

Барабанные погружные биофильтры

Этот вид погружных биофильтров состоит из барабана, закрепленного на вращающемся горизонтальном валу и заполненного загрузочным материалом.

Жесткий корпус барабана обтягивается сеткой. В качестве загрузки используют металлические, пластмассовые и асбестоцементные гофрированные, перфорированные и гладкие листы, мягкие тканевые и пленочные материалы, блочные элементы из пластмасс.

Барабаны имеют длину 2÷3 м и диаметр 2÷2,5 м, частота вращения 0,5÷5 об/мин. Загрузка барабанов может состоять из листовых пластмассовых материалов, тканей или пленок. Процесс очистки сточных вод проводится аналогично процессам в дисковых погружных биофильтрах.

2.5. Распределение сточных вод по биофильтрам

Равномерное орошение водой поверхности биофильтра является важным условием его надежной работы.

Существуют две основные группы распределительных устройств, осуществляющих орошение:

- *неподвижные*: дырчатые желоба, трубы и разбрызгиватели (спринклеры);
- *подвижные*: качающиеся желоба, движущиеся наливные колеса и вращающиеся реактивные оросители.

Наибольшее распространение в нашей стране и за рубежом получили спринклерные и подвижные оросители.

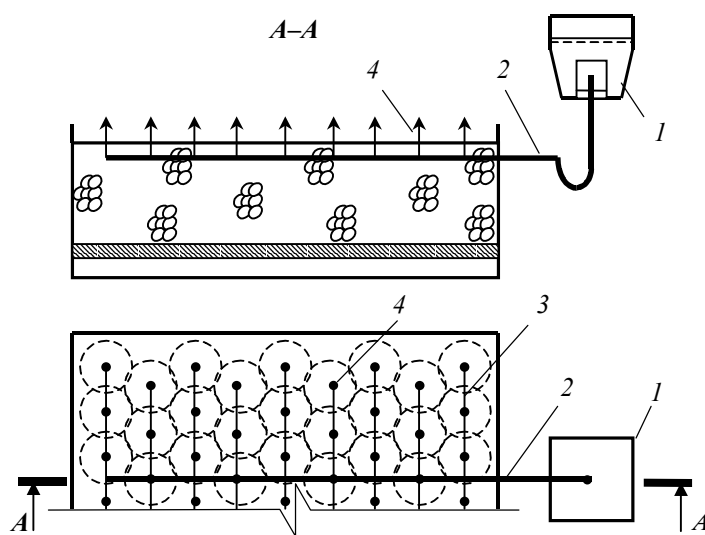


Рис. 2.3. Схема спринклерной водораспределительной сети

1 – дозирующий бак; 2 – магистральная труба; 3 – разводящие трубы; 4 – спринклеры

Спринклерное орошение

Спринклерная система состоит из дозирующего бака, разводящей сети и спринклеров (см. рис. 2.3).

Дозирующий бак автоматически подает воду в спринклерную сеть под постоянным напором. Продолжительность наполнения бака зависит от притока сточной воды, а продолжительность его опорожнения всегда одинакова. Наиболее часто применяется дозирующий бак с сифоном.

Спринклеры – специальные насадки для разбрызгивания воды (см. рис. 2.4).

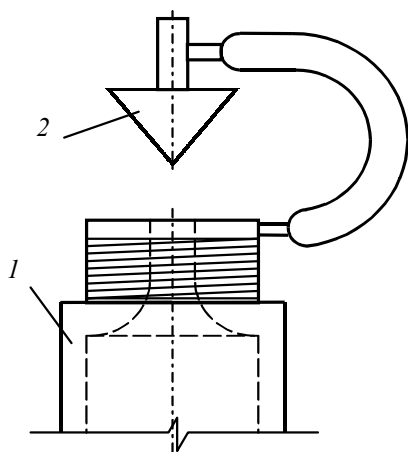


Рис. 2.4. Спринклерная головка

1 – корпус; 2 – отражательный зонтик

Спринклерные головки располагают таким образом, чтобы площадь, орошаемая одним разбрызгивателем, частично перекрывала площади соседних разбрызгивателей. Поэтому расстояние между разбрызгивателями равно $1,73R$, а между их рядами – $1,5R$ (R – радиус орошения).

Водораспределительная сеть укладывается с уклоном, чтобы ее можно было опорожнить. Спринклерные головки устанавливают на $0,15 \div 0,2$ м выше поверхности, диаметр отверстий головки $18 \div 32$ мм. Скорость потока в главной магистральной трубе принимается до 1 м/с, в разводящих трубах – до 0,75 м/с. Начальный напор у разбрызгивателей принимается около 1,5 м, конечный – не менее 0,5 м.

Реактивные вращающиеся оросители

Состоят из двух, четырех или шести дырчатых труб, консольно закрепленных на общем стояке, в который подается вода из распределительной камеры. Стояк может вращаться вокруг своей оси. Вода поступает из стояка в радиальные трубы и через отверстия выливается из них. Под действием реактивной силы истечения воды распределитель вращается (см. рис. 2.5).

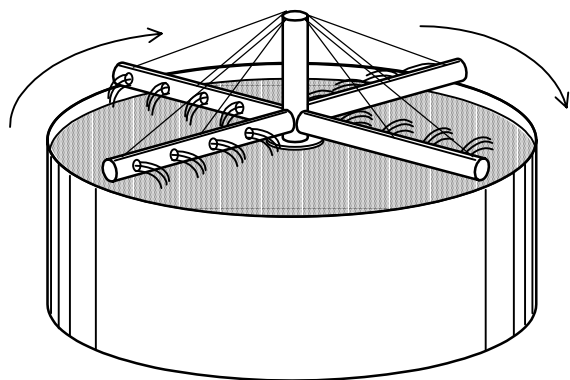


Рис. 2.5. Реактивный вращающийся ороситель

Расчет реактивного оросителя состоит в определении его размеров, числа распределительных труб, количества отверстий, напора воды, частоты вращения стояка. Скорость истечения из отверстий принимается не менее 0,5 м/с, диаметр отверстий – не менее 10 мм, напор воды очень небольшой – не менее $0,5 \div 1$ м.

Водоструйная система орошения

Применяется в основном для биофильтров с плоскостной загрузкой. Состоит

из магистрального трубопровода, разводящей сети, насадок диаметром 15÷32 мм, расположенных на днище разводящих труб и водоотбойных розеток. Последние располагаются над поверхностью загрузочного материала. Сточная вода изливается через насадки на трубах и, ударяясь о водоотбойные розетки внизу, разбивается на капли и орошает поверхность биофильтра.

2.6. Расчет биофильтров

Капельные биофильтры

1. Без рециркуляции.

1. Определяется коэффициент K_{bf} :

$$K_{bf} = L_{en}/L_{ex}, \quad (2.1)$$

где L_{en} и L_{ex} – БПК_{полн} поступающей и очищенной сточной воды, мг/л.

2. Исходя из среднезимней температуры сточной воды T_w и значения K_{bf} по /8/ или табл. 2.1 находится высота биофильтра H_{bf} и гидравлическая нагрузка q_{bf} .

Таблица 2.1

Параметры для расчета капельных биофильтров								
Гидравлическая нагрузка q_{bf} , м ³ /(м ² ·сут)	Коэффициент K_{bf} при температурах T_w , °С и высоте H_{bf} , м							
	$T_w = 8$		$T_w = 10$		$T_w = 12$		$T_w = 14$	
	$H_{bf}=1,5$	$H_{bf}=2$	$H_{bf}=1,5$	$H_{bf}=2$	$H_{bf}=1,5$	$H_{bf}=2$	$H_{bf}=1,5$	$H_{bf}=2$
1	8	11,6	9,8	12,6	10,7	13,8	11,4	15,1
1,5	5,9	10,2	7	10,9	8,2	11,7	10	12,8
2	4,9	8,2	5,7	10	6,6	10,7	8	11,5
2,5	4,3	6,9	4,9	8,3	5,6	10,1	6,7	10,7
3	3,8	6	4,4	7,1	6	8,6	5,9	10,2

Примечание. Если значение K_{bf} превышает табличное, то необходимо предусмотреть рециркуляцию.

3. По суточному расходу сточной воды Q_w , м³/сут, рассчитывается общая площадь биофильтров F_{bf} :

$$F_{bf} = Q_w/q_{bf}, \text{ м}^2. \quad (2.2)$$

4. Подбирается количество секций n_{bf} и размеры типовых биофильтров.

Число и размеры секций зависят от способа распределения сточной воды по поверхности. Обычно количество секций должно быть не менее 2 и не более 6÷8. Все секции рабочие.

В практике проектирования применяют биофильтры прямоугольной формы в плане с размерами сторон 3×3; 3,6×4; 9×12; 12×12; 15×15; 12×18 м и др., с высотой слоя загрузки 2,3; 3 и 4 м, а также круглой формы в плане диаметром 6, 12, 18, 24, 30 м, с высотой слоя загрузки 2, 3, 4 м.

5. Рассчитывается объем загрузки V_{bf} :

$$V_{bf} = n_{bf}F_1H_{bf}, \text{ м}^3, \quad (2.3)$$

где F_1 – площадь одной секции биофильтра, м².

6. Определяется объем избыточной биопленки V_{mud} , выносимой во вторичные отстойники:

$$V_{mud} = \frac{100q_{mud}Q_wL_{en}}{10^6(100 - P_{mud})a}, \text{ м}^3/\text{сут}, \quad (2.4)$$

где q_{mud} – удельное количество избыточной биопленки, равное 8 г/(чел·сут); P_{mud} – влажность биопленки, равная 96 %; a – количество БПК_{полн} в сточной воде на одного жителя в сутки, г/(чел·сут).

II. С рециркуляцией

1. По формуле (2.1) определяется коэффициент K_{bf} , причем вместо значения L_{en} подставляется максимально допустимое значение БПК_{полн} (220 мг/л).

2. По табл. 2.1 определяется гидравлическая нагрузка q_{bf} и высота биофильтра H_{bf} .

3. Рассчитывается среднее значение БПК_{полн} в смеси стоков перед биофильтром L_{mix} :

$$L_{mix} = L_{ex}K_{bf}^{min}, \text{ мг/л}, \quad (2.5)$$

где K_{bf}^{min} – наименьшее ближайшее к K_{bf} значение в табл. 2.1.

4. Определяется коэффициент рециркуляции K_{rec} :

$$K_{rec} = (L_{en} - L_{mix}) / (L_{mix} - L_{ex}). \quad (2.6)$$

5. Определяется общая площадь биофильтров F_{bf} :

$$F_{bf} = Q_w(K_{rec} + 1) / q_{bf}, \text{ м}^2. \quad (2.7)$$

6. Подбираются количество и размеры типовых биофильтров, рассчитывается объем загрузки V_{bf} и количество избыточной биопленки V_{mud} по формулам (2.3) и (2.4).

Высоконагружаемые биофильтры

I. Без рециркуляции.

1. При заданной среднезимней температуре сточной воды T_w и коэффициенте $K_{af} = L_{en}/L_{ex}$, по /8/ или табл. 2.2 находятся высота биофильтра H_{af} , гидравлическая нагрузка q_{af} и удельный расход воздуха q_a .

2. В формулу (2.2) подставляется найденное значение q_{af} и рассчитывается общая площадь F_{af} .

3. Подбирается количество секций n_{af} и размеры типовых биофильтров.

4. По формулам (2.3) и (2.4) определяется объем загрузки V_{af} и количество избыточной выносимой биопленки V_{mud} . При этом удельное количество биопленки q_{mud} принимается равным 28 г/(чел·сут), влажность биопленки P_{mud} равна 96 %.

5. Определяется расход воздуха Q_{air} :

$$Q_{air} = q_a Q_w, \text{ м}^3/\text{сут}, \quad (2.8)$$

затем по табл. 8 Приложений подбирается марка и количество вентиляторов низкого давления.

Таблица 2.2

Параметры для расчета высоконагружаемых биофильтров

q_a , М ³ /М ³	H_{af} , М	Коэффициент K_{af} при T_w , °С, H_{af} , м, и q_{af} , М ³ /(М ² ·сут)											
		$T_w = 8$			$T_w = 10$			$T_w = 12$			$T_w = 14$		
		$q_{af}=10$	$q_{af}=20$	$q_{af}=30$	$q_{af}=10$	$q_{af}=20$	$q_{af}=30$	$q_{af}=10$	$q_{af}=20$	$q_{af}=30$	$q_{af}=10$	$q_{af}=20$	$q_{af}=30$
8	2	3,02	2,32	2,04	3,38	2,5	2,18	3,76	2,74	2,36	4,3	3,02	2,56
	3	5,25	3,53	2,89	6,2	3,96	3,22	7,32	4,64	3,62	8,95	5,25	4,09
	4	9,05	5,37	4,14	10,4	6,25	4,73	11,2	7,54	5,56	12,1	9,05	6,54
10	2	3,69	2,89	2,58	4,08	3,11	2,76	4,5	3,36	2,93	5,09	3,67	3,16
	3	6,1	4,24	3,56	7,08	4,74	3,94	8,23	5,31	4,36	9,9	6,04	4,84
	4	10,1	6,23	4,9	12,3	7,18	5,68	15,1	8,45	6,88	16,4	10	7,42
12	2	4,32	3,88	3,01	4,76	3,72	3,28	5,31	3,98	3,44	5,97	4,31	3,7
	3	7,25	5,01	4,18	8,35	5,55	4,78	9,9	6,35	5,14	11,7	7,2	5,72
	4	12	7,35	5,83	14,8	8,5	6,2	18,4	10,4	7,69	23,1	12	8,83

Примечание. Для промежуточных значений q_a , H_{af} и T_w допускается величину K_{af} определять интерполяцией.

II. С рециркуляцией.

1. По формуле (2.1) определяется коэффициент K_{af} , причем вместо значения L_{en} подставляется максимально допустимое значение БПК_{полн} (300 мг/л).

2. По табл. 2.2 определяется гидравлическая нагрузка q_{af} , высота биофильтра H_{af} и удельный расход воздуха q_a .

3. По формуле (2.5) рассчитывается среднее значение БПК_{полн} в смеси стоков перед биофильтром L_{mix} , при этом в формулу подставляется наименьшее ближайшее к K_{af} значение из табл. 2.2.

4. По формуле (2.6) определяется коэффициент рециркуляции K_{rec} .

5. По формуле (2.7) определяется общая площадь биофильтров F_{af} , подбираются количество и размеры типовых биофильтров, объем загрузки и количество избыточной биопленки.

6. Рассчитывается расход воздуха:

$$Q_{air} = q_a(K_{rec} + 1)Q_w, \text{ м}^3/\text{сут}, \quad (2.9)$$

и подбираются марка и количество вентиляторов.

Биофильтры с плоскостной загрузкой

I. Биофильтры с пластмассовой загрузкой пористостью 93÷96 % и удельной поверхностью 90÷110 м²/м³

В качестве загрузки принимаются блоки из поливинилхлорида, полистирола, полиэтилена, полипропилена, полиамида, гладких или перфорированных пластмассовых труб диаметром 50÷100 мм или засыпные элементы в виде обрезков труб длиной 50÷150 мм, диаметром 30÷75 мм с перфорированными, гофрированными или гладкими стенками.

1. В зависимости от среднезимней температуры сточной воды T_w , требуемого эффекта очистки \mathcal{E} и принятой высоты загрузки биофильтра H_{pf} по данным /8/ или табл. 2.3 находится допустимая гидравлическая нагрузка q_{pf} .

2. Рассчитывается необходимый объем загрузочного материала V_{pf} и площадь биофильтров F_{pf} :

$$\begin{aligned} V_{pf} &= Q_w/q_{pf}, \text{ м}^3; \\ F_{pf} &= V_{pf}/H_{pf}, \text{ м}^2, \end{aligned} \quad (2.10)$$

где Q_w – суточный расход сточной воды, $\text{м}^3/\text{сут}$.

3. Подбираются размер и количество типовых биофильтров. Биофильтры с плоскостной загрузкой имеют круглую, прямоугольную и восьмигранную форму в плане с высотой слоя загрузки 3÷6 м.

Таблица 2.3

**Допустимая гидравлическая нагрузка на биофильтры
с плоскостной пластмассовой загрузкой**

Эффект очистки \mathcal{E} , %	Гидравлическая нагрузка q_{pf} , $\text{м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{сут})$, при высоте загрузки H_{pf} , м							
	$H_{pf} = 3$				$H_{pf} = 4$			
	Температура сточных вод T_w , °C							
	8	10	12	14	8	10	12	14
90	6,3	6,8	7,5	8,2	8,3	9,1	10	10,9
85	8,4	9,2	10	11	11,2	12,3	13,5	14,7
80	10,2	11,2	12,3	13,3	13,7	15	16,4	17,9

II. Биофильтры с любой плоскостной загрузкой

1. В зависимости от требуемого значения БПК₅ очищенной сточной воды L_{ex} по таблице 2.4 находится критериальный комплекс η .

Таблица 2.4

Значения η при различной L_{ex}

L_{ex} , мг/л	10	15	20	25	30	35	40	45	50
η	3,3	2,6	2,25	2	1,75	1,6	1,45	1,3	1,2

2. В зависимости от среднезимней температуры сточной воды T_w рассчитывается температурная константа потребления кислорода K_T :

$$K_T = 0,2 \cdot 1,047^{T_w - 20}. \quad (2.11)$$

3. Выбирается загрузочный материал и его характеристики (пористость P , %, и удельная поверхность $S_{y\partial}$, $\text{м}^2/\text{м}^2$). Принимается высота слоя загрузки H_{pf} .

4. Определяется допустимая нагрузка на поверхность по органическим загрязнениям M_{pf} :

$$M_{pf} = PHK_T/\eta, \text{ г}/(\text{м}^2 \cdot \text{сут}). \quad (2.12)$$

5. Рассчитывается допустимая гидравлическая нагрузка q_{pf} :

$$q_{pf} = M_{pf} S_{y\partial} / L_{en}, \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{сут}), \quad (2.13)$$

где L_{en} – БПК₅ поступающей на биофильтр сточной воды, мг/л.

6. По формулам (2.10) рассчитывается необходимый объем загрузочного материала V_{pf} и площадь биофильтров F_{pf} .

7. Подбираются размер и количество типовых биофильтров.

Дисковые погружные биофильтры

1. В зависимости от БПК₅ поступающей L_{en} и очищенной L_{ex} сточной воды, а также от среднесзимней температуры сточной воды T_w по графикам на рис. 2.6 находится допустимая нагрузка по БПК₅ на 1 м² площади поверхности дисков в сутки M_{df} и температурный коэффициент K_T (при температуре $T_w \geq 20^\circ\text{C}$ коэффициент $K_T = 1$).

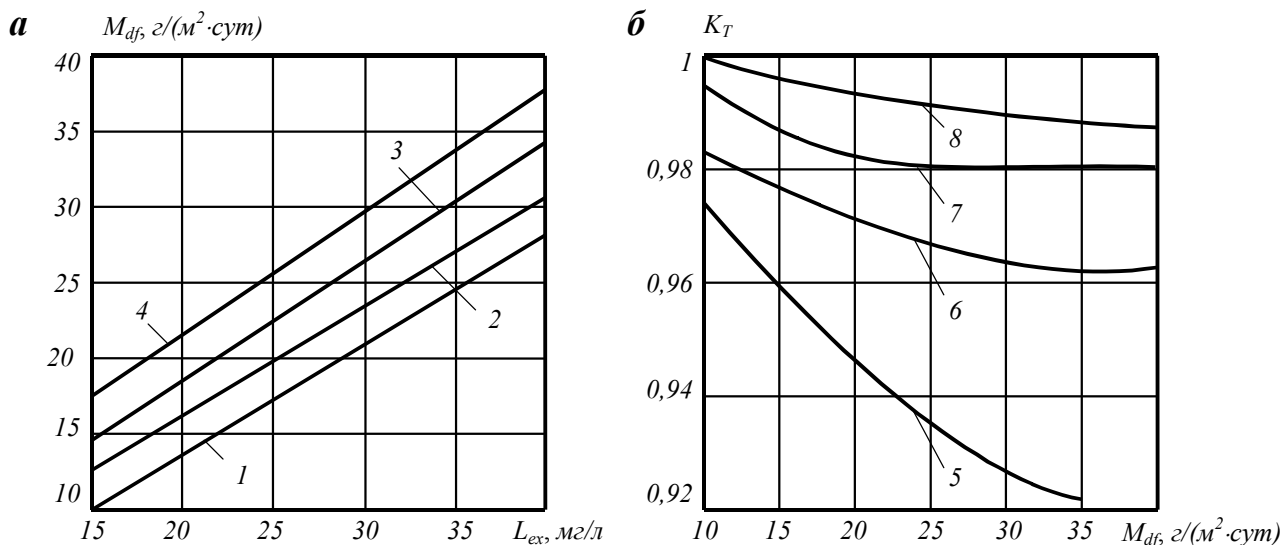


Рис. 2.6. Графики для расчета дисковых погружных биофильтров

а – зависимость допустимой нагрузки по БПК₅ на 1 м² площади поверхности дисков в сутки M_{df} от БПК₅ поступающей L_{en} и очищенной L_{ex} сточной воды;

б – зависимость температурного коэффициента K_T от нагрузки M_{df} и среднесзимней температуры сточной воды T_w ;

1 – при $L_{en} = 100 \div 200$ мг/л; 2 – при $L_{en} = 200 \div 300$ мг/л; 3 – при $L_{en} = 300 \div 400$ мг/л; 4 – при $L_{en} = 400 \div 500$ мг/л; 5 – при $T_w = 7^\circ\text{C}$; 6 – при $T_w = 10^\circ\text{C}$; 7 – при $T_w = 13^\circ\text{C}$; 8 – при $T_w = 16^\circ\text{C}$

2. Определяется общая площадь поверхности дисков $F_{общ}$:

$$F_{общ} = \frac{L_{en} Q_w}{M_{df} K_T}, \text{ м}^2. \quad (2.14)$$

3. Принимается конструктивно диаметр диска D_{df} , м, и рассчитывается его рабочая поверхность с обеих сторон F_{df} :

$$F_{df} = \pi D_{df}^2 / 2, \text{ м}^2. \quad (2.15)$$

4. Определяется необходимое количество дисков биофильтра n_{df} :

$$n_{df} = F_{общ} / F_{df}. \quad (2.16)$$

5. Принимается количество секций n_s , ступеней в каждой секции n_{ss} и определяется число дисков в одной ступени n :

$$n = n_{df} / (n_s n_{ss}). \quad (2.17)$$

6. Рассчитывается ширина секции B :

$$B = 0,1 + \delta_1 n + \delta_2(n - 1), \text{ м}, \quad (2.18)$$

где δ_1 – толщина диска, зависит от материала m ; δ_2 – расстояние между дисками, m , (принимается равным $0,015 \div 0,03$ m).

7. Рассчитывается длина секции L :

$$L = n_{ss}(0,2 + D_{df}), \text{ м}. \quad (2.19)$$

8. Принимается рабочая глубина секции $H = (0,4 \div 0,5)D_{df}$, m , частота вращения вала с дисками n_o , мин^{-1} , и расстояние от нижней части дисков до дна секции $\delta_3 = 0,03 \div 0,05$ m .

Водораспределительная система

I. Спринклерная система

1. Определяется максимальный расход сточных вод на одну секцию био-фильтра q_{max} :

$$q_{max} = q_w/n_{сек}, \text{ л/с}, \quad (2.20)$$

где q_w – расход сточных вод, л/с ; $n_{сек}$ – число секций биофильтра.

2. Принимается статический напор у разбрызгивателей $H_{общ}$, m , диаметр отверстия спринклерной головки $d_{отв}$ (в пределах $18 \div 32$ mm), глубина заложения сети (примерно $0,5$ m), высота расположения головки над поверхностью загрузки ($0,15 \div 0,2$ m) и ориентировочные потери напора в распределительной сети Δh , m .

3. Определяется максимальный свободный напор у головки спринклера $H'_{св}$ (который должен быть не менее $1,5$ m):

$$H'_{св} = H_{общ} - \Delta h, \text{ м}. \quad (2.21)$$

4. По графикам на рис. 2.7 в зависимости от максимального свободного напора $H'_{св}$ определяется диаметр круга орошения $D_{ор}$ и максимальный расход одного спринклера $q'_{с.мах}$.

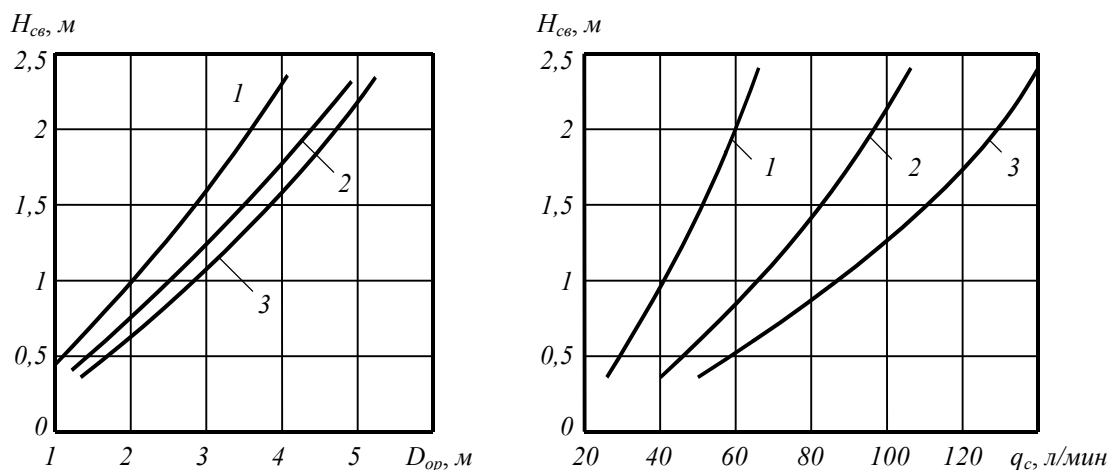


Рис. 2.7. Зависимость диаметра круга орошения $D_{ор}$ и расхода спринклера q_c от свободного напора $H_{св}$

1 – при $d_{отв} = 19$ mm ; 2 – при $d_{отв} = 22$ mm ; 3 – при $d_{отв} = 25$ mm

5. Рассчитывается расстояние между спринклерами в одном ряду l_c и между

рядами l_p , при условии расположения спринклеров в шахматном порядке; затем подсчитывается количество спринклеров в одном ряду n_c и число рядов в одной секции n_p , а также общее число спринклеров в одной секции n :

$$l_c = 1,73D_{op}/2, \text{ м}; l_p = 1,5D_{op}/2, \text{ м}; \quad (2.22)$$

$$n_c = B/l_c; n_p = A/l_p, \quad (2.23)$$

где A и B – длина и ширина секции биофильтра, м;

$$\text{при нечетном } n_p: n = 0,5n_c(n_p + 1) + 0,5(n_c + 1)(n_p - 1); \quad (2.24)$$

$$\text{при четном } n_p: n = 0,5n_p(2n_c + 1).$$

6. Выбирается вид трубопроводов (стальные, чугунные и т.п.) и определяется сумма потерь напора в водораспределительной сети от дозирующего бака до наиболее удаленного разбрызгивателя Σh :

$$\Sigma h = \Delta h_{\text{дл}} + \Delta h_{\text{м}} - \Sigma h_{\text{в}}, \text{ м}, \quad (2.25)$$

где $\Delta h_{\text{дл}}$ – потери напора по длине трубопровода, м; $\Delta h_{\text{м}}$ – потери напора на местных сопротивлениях (повороты, переходы и др.), м; $\Sigma h_{\text{в}}$ – восстановительный напор, м.

Диаметр труб на всех участках водораспределительной сети принимается в зависимости от скорости воды (в главной магистральной трубе – до 1 м/с, в разводящих трубах – до 0,75 м/с) и расхода, который рассчитывается, исходя из максимального расхода одного спринклера $q'_{c.max}$ и количества разбрызгивателей, обслуживаемых каждым участком сети.

Потери напора по длине трубопровода $\Delta h_{\text{дл}}$ рассчитываются как сумма потерь напора на каждом участке трубопровода от дозирующего бака до наиболее удаленного разбрызгивателя h_k :

$$\Delta h_{\text{дл}} = \Sigma h_k = \Sigma i_k l_k, \text{ м}, \quad (2.26)$$

где i_k – единичные потери напора на k -том участке, м/м (принимаются, например, по /9/); l_k – длина k -того участка, м.

Потери напора на местных сопротивлениях $\Delta h_{\text{м}}$ также принимаются как сумма потерь напора в крестовинах, переходах, тройниках, входе в сифон и т.д. на всем пути движения воды от дозирующего бака до наиболее удаленного разбрызгивателя:

$$\Delta h_{\text{м}} = \Sigma \zeta \frac{v_k^2}{2g}, \text{ м}, \quad (2.27)$$

где ζ – коэффициент местного сопротивления /1/; v_k – скорость движения воды на участке до местного сопротивления, м/с.

Восстановительный напор $\Sigma h_{\text{в}}$ определяется по формуле:

$$h_{\text{в}} = \Sigma \frac{v_k^2 - v_{k+1}^2}{2g}, \text{ м}, \quad (2.28)$$

где v_k и v_{k+1} – скорости движения воды в распределительных трубопроводах до и после ответвления, м/с.

Расчет ведется в табличной форме (табл. 2.5).

7. Уточняется свободный напор у головки спринклера $H_{св}$:

$$H_{св} = H_{общ} - \Sigma h, \text{ м.} \quad (2.29)$$

Если значение $H_{св}$ будет значительно отличаться от ранее принятого $H'_{св}$, то необходимо произвести полный перерасчет распределительной сети.

Таблица 2.5

Форма для расчета водораспределительной сети биофилтра

Номера участков и точек	Расход, л/с	Диаметр труб, мм	Скорость, м/с	Длина участка, м	Вид местного сопротивления	i , м/м	$h_{дл}$, м	ζ	Δh_M , м	h_6 , м
...
...
							$\Delta h_{дл}$		Δh_M	Σh_6

8. Принимается минимальный свободный напор у спринклера $H_{св.min}$ (который должен быть не менее 0,5 м) и по графику на рис. 2.7 определяется расход через один спринклер $q'_{св.min}$.

9. Рассчитывается суммарный расход через все спринклеры $q_{св.min}$, который должен быть больше максимального притока q_{max} :

$$q_{св.min} = q'_{св.min} n \geq 1,5 q_{max}, \text{ л/с.} \quad (2.30)$$

10. Определяются потери напора при минимальном расходе Σh_{min} и рабочая глубина дозирующего бака $H_{раб}$:

$$\Sigma h_{min} = \Sigma h (q'_{св.min} / q'_{св.max})^2, \text{ м;} \quad (2.31)$$

$$H_{раб} = H_{общ} - (H_{св.min} + \Sigma h_{min}), \text{ м.} \quad (2.32)$$

11. Определяется средний расход через спринклеры $q_{св.mid}$:

$$q_{св.mid} = 1,1 (q'_{св.min} + q'_{св.max}) n / 2, \text{ л/с} \quad (2.33)$$

и рассчитывается объем дозирующего бака $V_{бак}$:

$$V_{бак} = 0,06 (q_{св.mid} - q_{max}) t_{он}, \text{ м}^3, \quad (2.34)$$

где $t_{он}$ – продолжительность опорожнения бака, мин, (1÷5 мин).

12. Определяется продолжительность наполнения бака $t_{нан}$ и полный цикл его работы t (который должен быть не менее 5÷6 мин):

$$t_{нан} = 16,7 V_{бак} / q_{max}, \text{ мин;} \quad (2.35)$$

$$t = t_{нан} + t_{он}, \text{ мин.} \quad (2.36)$$

II. Реактивные оросители

1. Рассчитывается диаметр реактивного оросителя $D_{ор}$:

$$D_{ор} = D - 0,2, \text{ м,} \quad (2.37)$$

где D – диаметр биофилтра, м.

2. Принимается количество распределительных труб n_{mp} , консольно закрепленных на стояке (2, 4 или 6), и определяется их диаметр D_{mp} :

$$D_{mp} = 1000 \sqrt{\frac{4q}{\pi v n_{mp}}}, \text{ мм}, \quad (2.38)$$

где q – средний расход сточных вод на одну секцию биофильтра, м³/с; v – скорость в начале распределительной трубы, м/с, (принимается в пределах 0,5÷1 м/с).

3. Находится число отверстий на каждой распределительной трубе $n_{омв}$:

$$n_{омв} = \frac{1}{1 - (1 - 0,08 / D_{op})^2}. \quad (2.39)$$

4. Определяются расстояния от оси стояка до каждого отверстия r_i :

$$r_i = 500 D_{op} \sqrt{i / n_{омв}}, \text{ мм}, \quad (2.40)$$

где i – порядковый номер отверстия от оси.

5. Определяется частота вращения реактивного оросителя n_0 :

$$n_0 = 34,8 \cdot 10^6 \frac{q}{n_{омв} d_{омв}^2 D_{op} n_{mp}}, \text{ мин}^{-1}, \quad (2.41)$$

где $d_{омв}$ – диаметр отверстий, мм, (не менее 10 мм).

6. Рассчитывается требуемый напор у реактивного оросителя h_{op} :

$$h_{op} = 1000 \left(\frac{q}{n_{mp}} \right)^2 \left(\frac{256 \cdot 10^6}{d_{омв}^4 n_{омв}^2} - \frac{81 \cdot 10^6}{D_{mp}^4} + \frac{294 D_{op}}{k^2} \right), \text{ м}, \quad (2.42)$$

где k – модуль расхода, л/с, принимаемый в зависимости от диаметра труб по табл. 2.6.

Согласно требованиям /8/, напор у оросителя должен быть не менее 0,5 м, высота труб над поверхностью загрузочного материала – не менее 0,2 м.

Таблица 2.6

Значения модуля расхода k									
D_{mp} , мм	50	63	75	100	125	150	175	200	250
k , л/с	6	11,5	19	43	86,5	134	209	300	560

2.7. Примеры расчетов

ПРИМЕР 2.1

Исходные данные. Суточный расход сточных вод $Q_w = 780$ м³/сут; БПК_{полн} поступающей сточной воды $L_{en} = 185$ мг/л; БПК_{полн} очищенной сточной воды $L_{ex} = 15$ мг/л; среднезимняя температура сточной воды $T_w = 13^\circ\text{C}$; количество БПК_{полн} в сточной воде на одного жителя в сутки $a = 40$ г/(чел·сут).

Задание. Рассчитать капельный биофильтр.

Расчет. Так как значение БПК_{полн} поступающей сточной воды меньше допустимого значения (220 мг/л), принимаем капельные биофильтры без рециркуляции.

По формуле (2.1) рассчитываем коэффициент K_{bf} :

$$K_{bf} = 185/15 = 12,3.$$

По табл. 2.1 в соответствии со среднезимней температурой T_w и рассчитанным значением K_{bf} подбираем высоту загрузки биофильтра $H_{bf} = 2$ м и гидравлическую нагрузку $q_{bf} = 1,5 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{сут})$.

Определяем по формуле (2.2) общую площадь биофильтров:

$$F_{bf} = 780/1,5 = 520 \text{ м}^2.$$

Принимаем биофильтры круглой формы в плане диаметром $D = 12$ м с количеством секций $n_{bf} = 5$ и площадью одной секции $F_1 = 113 \text{ м}^2$.

Объем загрузки по формуле (2.3) составил:

$$V_{bf} = 5 \cdot 113 \cdot 2 = 1130 \text{ м}^3.$$

По формуле (2.4) рассчитываем объем избыточной биопленки:

$$V_{mud} = \frac{100 \cdot 8 \cdot 780 \cdot 185}{10^6 (100 - 96) 40} = 0,72 \text{ м}^3/\text{сут}.$$

ПРИМЕР 2.2

Исходные данные. БПК_{полн} поступающей сточной воды $L_{en} = 255$ мг/л, остальные данные – из примера 2.1.

Задание. Рассчитать капельный биофильтр.

Расчет. Так как значение БПК_{полн} поступающей сточной воды больше допустимого значения (220 мг/л), принимаем капельные биофильтры с рециркуляцией сточной воды. По формуле (2.1) рассчитываем коэффициент K_{bf} :

$$K_{bf} = 220/15 = 14,7.$$

По табл. 2.1 в соответствии со среднезимней температурой T_w и рассчитанным значением K_{bf} подбираем высоту загрузки биофильтра $H_{bf} = 2$ м и гидравлическую нагрузку $q_{bf} = 1 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{сут})$.

Наименьшее ближайшее к K_{bf} значение в табл. 2.1: $K_{bf}^{min} = (13,8 + 15,1)/2 = 14,45$, тогда по формуле (2.5) среднее значение БПК_{полн} в смеси стоков перед биофильтром составит:

$$L_{mix} = 15 \cdot 14,45 = 217 \text{ мг/л}.$$

По формуле (2.6) определим коэффициент рециркуляции:

$$K_{rec} = (255 - 217)/(217 - 15) = 0,19.$$

Находим общую площадь биофильтров по формуле (2.7):

$$F_{bf} = 780(0,19 + 1)/1 = 928 \text{ м}^2.$$

Принимаем биофильтры прямоугольной формы в плане с размерами сторон 12×18 м, количеством секций $n_{bf} = 5$ и площадью одной секции $F_1 = 216 \text{ м}^2$.

Находим объем загрузки по формуле (2.3):

$$V_{bf} = 5 \cdot 216 \cdot 2 = 2160 \text{ м}^3.$$

По формуле (2.4) рассчитываем объем избыточной биопленки:

$$V_{mud} = \frac{100 \cdot 8 \cdot 780 \cdot 255}{10^6 (100 - 96) 40} = 1 \text{ м}^3/\text{сут.}$$

ПРИМЕР 2.3

Исходные данные. Суточный расход сточных вод $Q_w = 13600 \text{ м}^3/\text{сут}$; БПК_{полн} поступающей сточной воды $L_{en} = 203 \text{ мг/л}$; БПК_{полн} очищенной сточной воды $L_{ex} = 21 \text{ мг/л}$; среднезимняя температура сточной воды $T_w = 12^\circ\text{C}$; количество БПК_{полн} в сточной воде на одного жителя в сутки $a = 40 \text{ г}/(\text{чел}\cdot\text{сут})$.

Задание. Рассчитать высоконагружаемый биофильтр.

Расчет. Так как значение БПК_{полн} поступающей сточной воды меньше допустимого значения (300 мг/л), рециркуляция сточной воды не нужна. Находим коэффициент $K_{af} = 203/21 = 9,7$.

По табл. 2.2 подбираем высоту загрузки биофильтра $H_{af} = 4 \text{ м}$ и удельный расход воздуха $q_a = 8 \text{ м}^3/\text{м}^3$ (при температуре воды 12°C). Затем с помощью интерполяции рассчитываем гидравлическую нагрузку при значении $K_{af} = 9,7$:

$$q_{af} = 10 - (10 - 20)(11,2 - 9,7)/(11,2 - 7,54) = 14,1 \text{ м}^3/(\text{м}^2\cdot\text{сут}).$$

Определяем по формуле (2.2) общую площадь биофильтров:

$$F_{af} = 13600/14,1 = 965 \text{ м}^2.$$

Принимаем биофильтры круглой формы в плане диаметром $D = 18 \text{ м}$ с количеством секций $n_{af} = 4$ и площадью одной секции $F_1 = 255 \text{ м}^2$.

Объем загрузки по формуле (2.3) составит:

$$V_{af} = 4 \cdot 255 \cdot 4 = 4080 \text{ м}^3.$$

По формуле (2.4) рассчитываем объем избыточной биопленки:

$$V_{mud} = \frac{100 \cdot 28 \cdot 13600 \cdot 203}{10^6 (100 - 96) 40} = 48,3 \text{ м}^3/\text{сут.}$$

Определяем расход воздуха для биофильтров по формуле (2.8):

$$Q_{air} = 8 \cdot 13600 = 108800 \text{ м}^3/\text{сут.}$$

Для подачи этого количества воздуха принимаем два рабочих и один резервный вентилятор низкого давления марки ЭВР-3 производительностью $2500 \text{ м}^3/\text{ч}$ и напором до 60 мм (табл. 8 Приложений).

ПРИМЕР 2.4

Исходные данные. Те же, что приведены в примере 2.3.

Задание. Рассчитать высоконагружаемый биофильтр с рециркуляцией воды.

Расчет. Рассчитываем коэффициент $K_{af} = 203/21 = 9,7$. По табл. 2.2 подбираем высоту загрузки биофильтра $H_{af} = 3 \text{ м}$ и удельный расход воздуха $q_a = 10 \text{ м}^3/\text{м}^3$. Табличный коэффициент при гидравлической нагрузке $q_{af} = 10 \text{ м}^3/(\text{м}^2\cdot\text{сут})$ составляет $K_{af} = 8,23$. Так как это значение меньше рассчитанного (9,7), необходима рециркуляция.

По формуле (2.5) находим среднее значение БПК_{полн} в смеси стоков перед биофильтром:

$$L_{mix} = 21 \cdot 8,23 = 173 \text{ мг/л.}$$

По формуле (2.6) определяем коэффициент рециркуляции:

$$K_{rec} = (203 - 173)/(173 - 21) = 0,197.$$

Находим общую площадь биофильтров по формуле (2.7):

$$F_{af} = 13600(0,197 + 1)/10 = 1628 \text{ м}^2.$$

Принимаем биофильтры круглой формы в плане диаметром $D = 24$ м с количеством секций $n_{af} = 4$ и площадью одной секции $F_1 = 452 \text{ м}^2$.

Объем загрузки по формуле (2.3) составит:

$$V_{af} = 4 \cdot 452 \cdot 3 = 5424 \text{ м}^3.$$

По формуле (2.4) рассчитываем объем избыточной биопленки:

$$V_{mud} = \frac{100 \cdot 28 \cdot 13600 \cdot 203}{10^6 (100 - 96)40} = 48,3 \text{ м}^3/\text{сут.}$$

Определяем расход воздуха для биофильтров по формуле (2.9):

$$Q_{air} = 10(0,197 + 1)13600 = 162790 \text{ м}^3/\text{сут.}$$

Для подачи воздуха принимаем два рабочих и один резервный вентиляторы низкого давления марки ЦЧ-70 №3 производительностью $3500 \text{ м}^3/\text{ч}$ и напором до 90 мм (табл. 8 Приложений).

ПРИМЕР 2.5

Исходные данные. Суточный расход сточных вод $Q_w = 25500 \text{ м}^3/\text{сут.}$; БПК_{полн} поступающей сточной воды $L_{en} = 130 \text{ мг/л.}$; БПК_{полн} очищенной сточной воды $L_{ex} = 16 \text{ мг/л.}$; среднезимняя температура сточной воды $T_w = 14^\circ\text{C.}$

Задание. Рассчитать биофильтр с плоскостной загрузкой.

Расчет. Выбираем пластмассовую загрузку: блоки из поливинилхлорида. Определяем эффект очистки в биофильтрах по БПК_{полн}:

$$\varepsilon = 100 \cdot (130 - 16)/130 = 88 \text{ \%}.$$

Принимаем высоту загрузки биофильтра $H_{pf} = 3$ м и по табл. 2.3 с помощью интерполяции находим допустимую гидравлическую нагрузку:

$$q_{pf} = 11 - (11 - 8,2)(85 - 88)/(85 - 90) = 9,3 \text{ м}^3/(\text{м}^3 \cdot \text{сут}).$$

По формулам (2.10) находим необходимый объем загрузочного материала:

$$V_{pf} = 25500/9,3 = 2742 \text{ м}^3,$$

и площадь биофильтров:

$$F_{pf} = 2742/3 = 914 \text{ м}^2.$$

Принимаем два биофильтра ($n_{pf} = 2$) круглой формы в плане и рассчитываем их диаметр:

$$D = \sqrt{\frac{4F_{pf}}{n_{pf}\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 914}{2\pi}} = 24,1 \text{ м.}$$

Назначаем диаметр биофильтров $D = 24$ м и размещаем их в отапливаемом

помещении.

ПРИМЕР 2.6

Исходные данные. БПК₅ поступающей и очищенной сточной воды $L_{en} = 130$ мг/л и $L_{ex} = 10$ мг/л, остальные данные – такие же, что и в примере 2.5.

Задание. Рассчитать биофильтр с плоскостной загрузкой.

Расчет. По табл. 2.4. находим критериальный комплекс η , равный 3,3. Определяем температурную константу потребления кислорода при среднезимней температуре сточной воды 14°C:

$$K_T = 0,2 \cdot 1,047^{14-20} = 0,152.$$

В качестве загрузки биофильтра принимаем асбестоцементные листы (пористость $P = 85\%$ и удельная поверхность $S_{уд} = 80$ м²/м²) высотой $H_{pf} = 4$ м. Рассчитываем допустимую нагрузку на поверхность по органическим загрязнениям:

$$M_{pf} = 85 \cdot 4 \cdot 0,152 / 3,3 = 15,7 \text{ г}/(\text{м}^2 \cdot \text{сут}).$$

Затем определяем допустимую гидравлическую нагрузку:

$$q_{pf} = 15,7 \cdot 80 / 130 = 9,64 \text{ м}^3/(\text{м}^3 \cdot \text{сут}).$$

По формулам (2.10) находим необходимый объем загрузочного материала:

$$V_{pf} = 25500 / 9,64 = 2645 \text{ м}^3,$$

и площадь биофильтров:

$$F_{pf} = 2645 / 4 = 661 \text{ м}^2.$$

Принимаем два биофильтра ($n_{pf} = 2$) восьмиугольной формы в плане и рассчитываем их диаметр:

$$D = \sqrt{\frac{F_{pf}}{n_{pf} \cdot 2\sqrt{2}}} = \sqrt{\frac{661}{2 \cdot 2\sqrt{2}}} = 10,8 \text{ м}.$$

Назначаем диаметр $D = 12$ м, тогда длина одной стороны биофильтра составит:

$$a = 0,5D\sqrt{2 - \sqrt{2}} = 0,5 \cdot 12\sqrt{2 - \sqrt{2}} = 4,6 \text{ м}.$$

ПРИМЕР 2.7

Исходные данные. Суточный расход сточных вод $Q_w = 800$ м³/сут; БПК₅ поступающей сточной воды $L_{en} = 210$ мг/л; БПК₅ очищенной сточной воды $L_{ex} = 20$ мг/л; среднезимняя температура сточной воды $T_w = 10^\circ\text{C}$.

Задание. Рассчитать дисковый погружной биофильтр.

Расчет. По графику на рис. 2.6,а находим допустимую нагрузку по БПК_{полн} $M_{df} = 16,5$ г/(м²·сут), затем по графику на рис. 2.6,б находим температурный коэффициент $K_T = 0,975$.

По формуле (2.14) рассчитываем общую площадь поверхности дисков:

$$F_{общ} = \frac{210 \cdot 800}{16,5 \cdot 0,975} = 10442 \text{ м}^2.$$

Принимаем диаметр одного диска биофильтра $D_{df} = 2$ м и определяем его рабочую поверхность по формуле (2.15):

$$F_{df} = 3,1416 \cdot 2^2 / 2 = 6,3 \text{ м}^2.$$

Рассчитываем необходимое количество дисков биофильтра по формуле (2.16):

$$n_{df} = 10442 / 6,3 = 1658,$$

затем принимаем две секции $n_s = 2$ по восемь ступеней в каждой секции $n_{ss} = 8$ и по формуле (2.17) определяем число дисков в одной ступени:

$$n = 1658 / (2 \cdot 8) = 103,6 \approx 104.$$

В качестве материала дисков принимаем полистирол толщиной $\delta_1 = 0,01$ м, расстояние между дисками $\delta_2 = 0,015$ м. Согласно формуле (2.18) находим ширину секции:

$$B = 0,1 + 0,01 \cdot 104 + 0,015(104 - 1) = 2,7 \text{ м}.$$

По формуле (2.19) рассчитываем длину секции биофильтра:

$$L = 8(0,2 + 2) = 17,6 \text{ м}.$$

Рабочая глубина секции составляет $H = 0,5 \cdot 2 = 1$ м, принимаем частоту вращения вала с дисками $n_0 = 2 \text{ мин}^{-1}$ и расстояние от нижней части дисков до dna секции $\delta_3 = 0,05$ м.

ПРИМЕР 2.8

Исходные данные. Станция очистки городских сточных вод с максимальным расходом сточной воды $q_w = 105$ л/с включает пять секций высоконагружаемых биофильтров с высотой слоя загрузки $H_{af} = 4$ м и размерами в плане $A \times B = 18 \times 12$ м.

Задание. Рассчитать спринклерную систему распределения воды по биофильтрам.

Расчет. Определяем максимальный расход сточных вод на одну секцию биофильтра по формуле (2.20):

$$q_{max} = 105 / 5 = 21 \text{ л/с}.$$

Принимаем статический напор у разбрызгивателей $H_{общ} = 2$ м, диаметр отверстия спринклерной головки $d_{ome} = 25$ мм и ориентировочные потери напора в распределительной сети $\Delta h = 0,5$ м. Глубину заложения труб принимаем 0,5 м, высоту расположения головки разбрызгивателя над загрузкой – 0,2 м.

По формуле (2.21) определяем максимальный свободный напор у головки спринклера:

$$H'_{св} = 2 - 0,5 = 1,5 \text{ м}.$$

По графикам на рис. 2.7 находим диаметр круга орошения $D_{op} = 3,8$ м и максимальный расход одного спринклера $q'_{с. max} = 110$ л/мин = 1,83 л/с.

Принимаем расположение спринклеров в шахматном порядке и по формулам (2.22) рассчитываем расстояние между спринклерами в одном ряду l_c и между рядами l_p :

$$l_c = 1,73 \cdot 3,8 / 2 = 3,3 \text{ м}; l_p = 1,5 \cdot 3,8 / 2 = 2,9 \text{ м}.$$

По формулам (2.23) определяем количество спринклеров в одном ряду n_c и число рядов в одной секции n_p :

$$n_c = 12 / 3,3 = 3,63; n_p = 18 / 2,85 = 6,32.$$

Принимаем 7 рядов спринклеров, в нечетных рядах принимаем по 3 спринклера, в четных – по 4. Согласно формулам (2.24) при нечетном количестве рядов общее число спринклеров в одной секции составляет:

$$n = 0,5 \cdot 3(7 + 1) + 0,5(3 + 1)(7 - 1) = 24.$$

Выбираем стальные трубы и составляем схему водораспределительной сети (см. рис. 2.8).

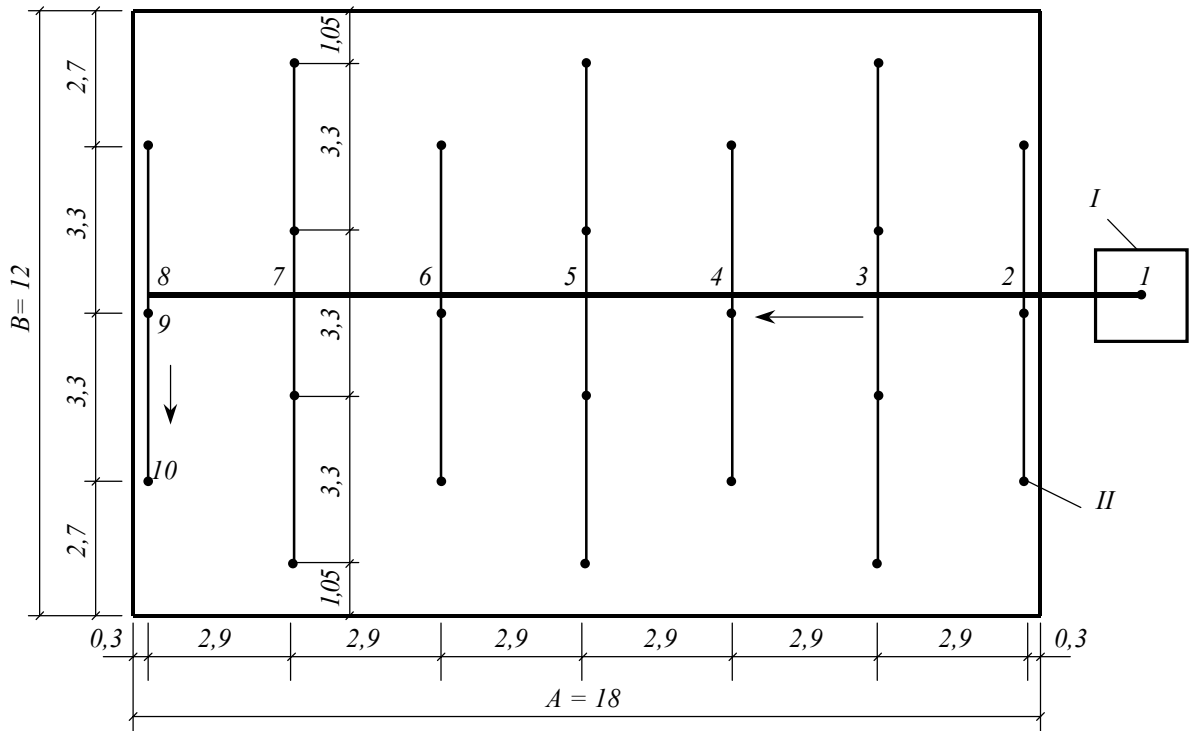


Рис. 2.8. Спринклерная водораспределительная сеть биофильтра

1...10 – расчетные точки; I – дозирующий бак; II – спринклеры

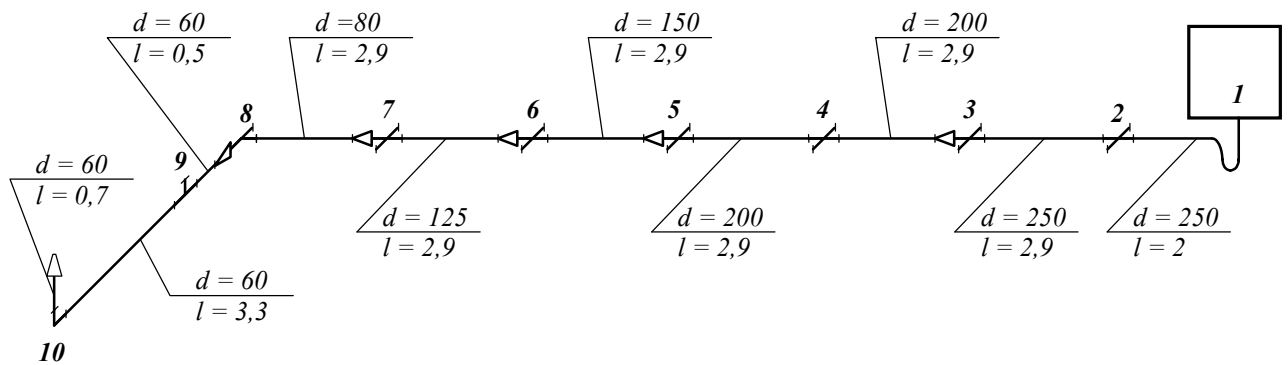


Рис. 2.9. Монтажная схема части водораспределительной сети биофильтра

Выбираем наиболее удаленный от дозирующего бака разбрызгиватель (точка 10 на рис. 2.8), составляем монтажную схему до этого разбрызгивателя (см. рис. 2.9) и определяем потери напора на всех расчетных участках по формулам (2.26–2.28). Расчет сводим в табл. 2.7.

Таблица 2.7

Расчет водораспределительной сети биофильтра

Номера участков и точек	Расход, л/с	Диаметр труб, мм	Скорость, м/с	Длина участка, м	Вид местного сопротивления	i , м/м	$h_{дл}$, м	ζ	Δh_m , м	$h_{б}$, м
1	43,92	250	0,81	—	Вход в сифон	—	—	2,5	0,084	—
1–2	43,92	250	0,81	2	—	0,0045	0,009	—	—	—
2	43,92/38,43	250	0,81/0,73	—	Крестовина	—	—	0,9	0,03	0,006
2–3	38,43	250	0,73	2,9	—	0,0035	0,01	—	—	—
3	38,43/31,11	250	0,73/0,58	—	Крестовина	—	—	0,9	0,024	0,01
3–4	31,11	200	0,9	2,9	Переход 250×200	0,007	0,02	0,2	0,008	—
4	31,11/25,62	200	0,9/0,74	—	Крестовина	—	—	0,9	0,037	0,013
4–5	25,62	200	0,74	2,9	—	0,049	0,014	—	—	—
5	25,62/18,3	200	0,74/0,54	—	Крестовина	—	—	0,9	0,025	0,013
5–6	18,3	150	0,94	2,9	Переход 200×150	0,011	0,032	0,2	0,009	—
6	18,3/12,81	150	0,94/0,65	—	Крестовина	—	—	0,9	0,041	0,024
6–7	12,81	125	0,92	2,9	Переход 150×125	0,013	0,038	0,2	0,009	—
7	12,81/5,49	125	0,92/0,4	—	Крестовина	—	—	0,9	0,039	0,035
7–8	5,49	80	0,78	2,9	Переход 125×80	0,015	0,044	0,3	0,009	—
8	5,49/3,66	80	0,78/0,52	—	Тройник	—	—	1,5	0,047	0,017
8–9	3,66	60	0,96	0,5	Переход 80×60	0,032	0,016	0,2	0,009	—
9	3,66/1,83	60	0,96/0,48	—	Тройник	—	—	0,6	0,028	0,035
9–10	1,83	60	0,48	3,3	—	0,009	0,03	—	—	—
10–спринклер	1,8	60	0,48	0,7	Отвод 90°	0,009	0,006	1,2	0,014	—
							$\Delta h_{дл} = 0,219$ м		$\Delta h_m = 0,413$ м	$\Sigma h_b = 0,153$ м

По формуле (2.25) рассчитываем сумму потерь напора от дозирующего бака до наиболее удаленного разбрызгивателя:

$$\Sigma h = 0,219 + 0,413 - 0,153 = 0,479 \text{ м.}$$

Проверяем свободный напор у головки спринклера:

$$H_{ce} = 2 - 0,479 = 1,521 \text{ м.}$$

Полученное значение мало отличается от ранее принятого (1,5 м), поэтому расчет сети считается законченным.

Принимаем минимальный свободный напор у спринклера, равный $H_{ce.min} = 1 \text{ м}$, затем по рис. 2.7 находим расход через один спринклер $q'_{c.min} = 88 \text{ л/мин} = 1,47 \text{ л/с}$.

Определяем суммарный расход через все спринклеры по формуле (2.30):

$$q_{c.min} = 1,47 \cdot 24 = 35,2 \text{ л/с,}$$

что больше максимального притока, равного $1,5 \cdot 21 = 31,5 \text{ л/с}$.

По формулам (2.31, 2.32) рассчитываем потери напора при минимальном расходе Σh_{min} и рабочую глубину дозирующего бака $H_{раб}$:

$$\Sigma h_{min} = 0,475(1,47/1,83)^2 = 0,31 \text{ м;}$$

$$H_{раб} = 2 - (1 + 0,31) = 0,69 \text{ м.}$$

Принимаем продолжительность опорожнения дозирующего бака $t_{on} = 4 \text{ мин}$, затем определяем средний расход через спринклеры $q_{c.mid}$ и объем дозирующего бака $V_{бак}$ по формулам (2.33) и (2.34):

$$q_{c.mid} = 1,1(1,47 + 1,83)24/2 = 43,56 \text{ л/с;}$$

$$V_{бак} = 0,06(43,56 - 21)4 = 5,41 \text{ м}^3.$$

Наконец, согласно формулам (2.35, 2.36), рассчитываем продолжительность наполнения бака $t_{нан}$ и полный цикл его работы t :

$$t_{нан} = 16,7 \cdot 5,41/21 = 4,31 \text{ мин;}$$

$$t = 4,31 + 3 = 7,31 \text{ мин.}$$

Условие по продолжительности цикла «наполнение–опорожнение» дозирующего бака (не менее 5÷6 мин) выполняется.

ПРИМЕР 2.9

Исходные данные. Станция очистки городских сточных вод с расчетным расходом сточной воды $q_w = 295 \text{ л/с}$ включает две секции биофильтров диаметром $D = 24 \text{ м}$ с плоскостной загрузкой высотой $H_{pf} = 3 \text{ м}$.

Задание. Рассчитать реактивные оросители для биофильтров.

Расчет. По формуле (2.37) находим диаметр реактивного оросителя:

$$D_{op} = 24 - 0,2 = 23,8 \text{ м.}$$

Расход на одну секцию биофильтра составляет: $q = 295/2 = 148 \text{ л/с} = 0,148 \text{ м}^3/\text{с}$. Принимаем четыре распределительные трубы на один ороситель и рассчитываем их диаметр по формуле (2.38) (при скорости в начале распределительной трубы $v = 0,8 \text{ м/с}$):

$$D_{тр} = 1000 \sqrt{\frac{4 \cdot 0,148}{3,1416 \cdot 0,8 \cdot 4}} = 242,7 \approx 250 \text{ мм.}$$

По формуле (2.39) находим число отверстий на каждой распределительной трубе:

$$n_{oms} = \frac{1}{1 - (1 - 0,08/23,8)^2} = 149.$$

Рассчитываем расстояния до каждого отверстия от оси стояка оросителя по формуле (2.40):

$$\begin{aligned} r_1 &= 500 \cdot 23,8 \cdot \sqrt{1/149} = 975 \text{ мм}; & r_2 &= 1379 \text{ мм}; & r_3 &= 1689 \text{ мм}; & \dots; \\ r_{10} &= 3083 \text{ мм}; & r_{20} &= 4360 \text{ мм}; & r_{30} &= 5340 \text{ мм}; & \dots; \\ r_{100} &= 9749 \text{ мм}; & r_{120} &= 10679 \text{ мм}; & r_{149} &= 11900 \text{ мм}. \end{aligned}$$

Принимаем диаметр отверстий в трубах $d_{oms} = 20$ мм, затем, согласно формуле (2.41), определяем частоту вращения оросителя:

$$n_0 = 34,8 \cdot 10^6 \frac{0,148}{149 \cdot 20^2 \cdot 23,8 \cdot 4} = 0,91 \text{ мин}^{-1}.$$

По табл. 2.6 значение модуля расхода для труб диаметром 250 мм составляет $k = 560$ л/с. По формуле (2.42) рассчитываем требуемый напор у реактивного оросителя:

$$h_{op} = 1000 \left(\frac{0,148}{4} \right)^2 \left(\frac{256 \cdot 10^6}{20^4 \cdot 149^2} - \frac{81 \cdot 10^6}{250^4} + \frac{294 \cdot 23,8}{560^2} \right) = 0,101 \text{ м}.$$

Так как величина напора меньше минимальной, назначаем напор у оросителя, равный $h_{op} = 0,5$ м. Распределительные трубы располагаем на 0,2 м выше поверхности загрузки.

3. АЭРОТЕНКИ

3.1. Принципы очистки сточных вод в аэротенках

Очистка сточных вод в аэротенках происходит с помощью активного ила – биоценоза организмов, развивающихся в аэробных условиях на органических загрязнениях, содержащихся в сточной воде.

Механизм изъятия органических веществ из сточной воды и их потребление микроорганизмами схематично может быть представлен тремя этапами:

1 этап – массопередача органического вещества из жидкости к поверхности клетки. Скорость протекания этого процесса определяется законами молекулярной и конвективной диффузии веществ и зависит от гидродинамических условий в аэротенке. Оптимальные условия для подведения загрязнений и кислорода создаются посредством эффективного и постоянного перемешивания содержимого аэротенка. Первый этап протекает быстрее последующего процесса биохимического окисления загрязнений.

2 этап – диффузия через полупроницаемые мембраны в клетку или самого вещества или продуктов распада этого вещества. Большая часть вещества попадает внутрь клеток при помощи специфического белка-переносчика, который обра-

зует комплекс, диффундирующий через мембрану. Затем комплекс распадается и белок-переносчик возвращается в новый цикл переноса.

3 этап – метаболизм органического вещества с выделением энергии и образованием нового клеточного вещества. Превращение органических соединений носит ферментативный характер. Конечными продуктами распада являются такие вещества, как нитраты, сульфаты, двуокись углерода, вода.

Определяющими процессами для технологического оформления очистки воды являются скорости изъятия загрязнений и скорость разложения этих загрязнений. Активный ил в контакте с загрязненной жидкостью в условиях аэрации проходит следующие фазы развития (см. рис. 3.1):

1. *Лаз-фазу I*, или фазу адаптации ила к составу сточной воды. Прироста биомассы практически не происходит.

2. *Фазу экспоненциального роста* (фазу ускоренного роста) *II*, в которой избыток питательных веществ и отсутствие продуктов обмена способствуют максимальной скорости размножения клеток.

3. *Фазу замедленного роста III*, в которой скорость роста биомассы начинает сдерживаться недостатком питания и накоплением продуктов метаболизма.

4. *Фазу нулевого роста IV*, в которой наблюдается практически стационарное состояние в количестве биомассы.

5. *Фазу эндогенного дыхания* (или фазу самоокисления) *V*, в которой из-за недостатка питания начинаются отмирание и распад клеток, ведущие к снижению общего количества биомассы.

В фазах *II* и *III* идет бурный рост биомассы и культура «омолаживается», в ней преобладают новые клетки, в фазе *IV* наблюдается равновесие между ростом живых и распадом отмерших клеток, а в фазе *V* наблюдается преобладание отмирания клеток над их ростом.

3.2. Технологические характеристики работы аэрационных сооружений

1. *Доза активного ила a_i* – количество активного ила в единице объема иловой смеси, г/л. Доза активного ила зависит от нагрузки на ил и составляет в среднем 2÷5 г/л.

2. *Нагрузка на активный ил q_i* – это количество загрязнений, поданных в аэротенк в пересчете на единицу активного ила за час:

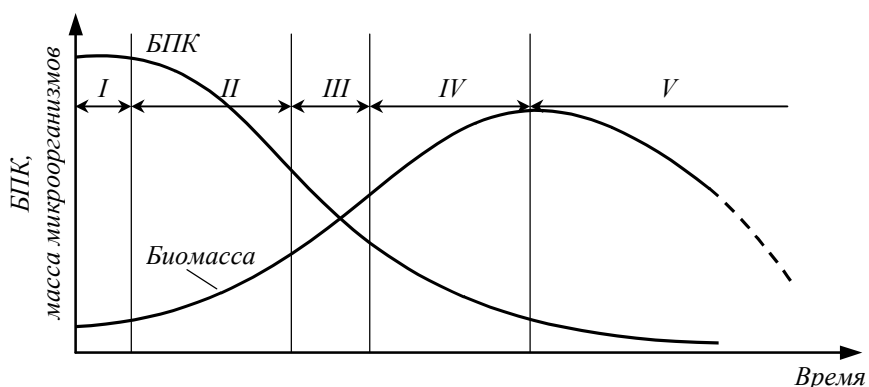


Рис. 3.1. Зависимость прироста биомассы и снижения БПК от продолжительности аэрации

$$q_i = \frac{24L_{en}}{a_i(1-s)t_{at}}, \text{ мг БПК}_{\text{полн}}/(\text{г}\cdot\text{сут}),$$

где L_{en} – БПК_{полн} поступающей в аэротенк сточной воды, мг/л; s – зольность активного ила, доли; t_{at} – длительность аэрации, ч.

3. *Удельная скорость окисления загрязнений* ρ – величина снятой БПК_{полн} (т.е. разница между поступающей в аэротенк и выходящей из него БПК_{полн} сточной воды), отнесенная к массе ила и длительности аэрации:

$$\rho = \frac{L_{en} - L_{ex}}{a_i(1-s)t_{at}}, \text{ мг БПК}_{\text{полн}}/(\text{г}\cdot\text{ч}),$$

где L_{ex} – БПК_{полн} сточной воды на выходе из аэротенка, мг/л. При полной биологической очистке значение L_{ex} составляет 15÷20 мг/л.

Нагрузка на ил и удельная скорость окисления связаны между собой. При высоких нагрузках на активный ил он может с ней не справиться и требуемое качество очистки не будет обеспечено. Если, наоборот, нагрузка на ил мала, то ил будет испытывать недостаток питания, и поэтому может произойти самоокисление активного ила и падение рабочей дозы ила в аэротенке.

Различают аэротенки с высокими нагрузками – свыше 500 мг БПК_{полн}/(г·сут), средними нагрузками в пределах 150÷500 мг БПК_{полн}/(г·сут) и низконагруженные – в пределах 65÷150 мг БПК_{полн}/(г·сут). При нагрузках менее 65 мг БПК_{полн}/(г·сут) имеет место т.н. «продленная аэрация».

4. *Иловый индекс* J_i – объем, который занимает 1 г сухого вещества активного ила после 30-минутного отстаивания иловой смеси, см³/г. Этот показатель характеризует седиментационную способность активного ила. Хорошо оседающий активный ил имеет индекс от 60÷90 до 120÷150 см³/г. Перегрузка или недогрузка активного ила приводит к резкому увеличению илового индекса («вспухший ил») – см. рис. 3.2.

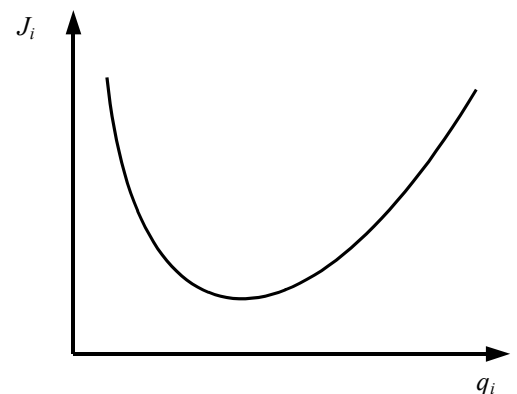


Рис. 3.2. Зависимость илового индекса от нагрузки на активный ил

5. *Возраст активного ила* – продолжительность его пребывания в аэрационной системе, сут.

3.3. Технологические схемы очистки сточных вод в аэротенках

Одноступенчатая схема без регенерации (рис. 3.3)

По этой схеме активный ил подается сосредоточенно вместе со сточной водой на вход в аэротенк. Получаемая иловая смесь в условиях аэрации протекает к выходу из аэротенка и далее на вторичный отстойник, где происходит ее разделение на очищенную воду и активный ил. Активный ил далее разделяется на *избыточный* и *циркуляционный*, последний возвращается в аэротенк.

Особенностью этой схемы является, во-первых, снижение нагрузки на активный ил по длине аэротенка; во-вторых, снижение потребности активного ила в кислороде по длине; в-третьих, по гидравлическому режиму аэротенк является вытеснителем.

Модификацией этой схемы является применение переменной подачи воздуха по длине аэротенка, которая соответствует кривой снижения БПК по длине. Другая модификация заключается в применении продольного секционирования объема аэротенка перегородками.

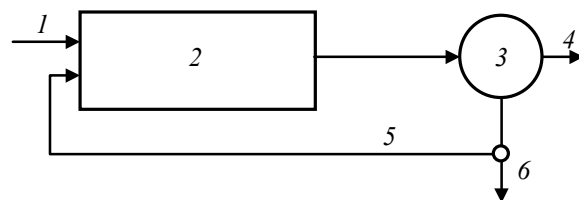


Рис. 3.3. Одноступенчатая схема очистки в аэротенках

1 – сточная вода; 2 – аэротенк; 3 – вторичный отстойник; 4 – очищенная вода; 5 и 6 – циркуляционный и избыточный активный ил

Одноступенчатая схема с регенерацией активного ила (рис. 3.4)

В этой схеме реализовано раздельное протекание двух этапов биологической очистки: поглощение загрязнений активным илом из сточной воды, которое происходит непосредственно в аэротенке, и окисление этих загрязнений, которое протекает в регенераторе. *Регенератор* – это аэрационное сооружение, в котором активный ил аэрируется без сточной жидкости.

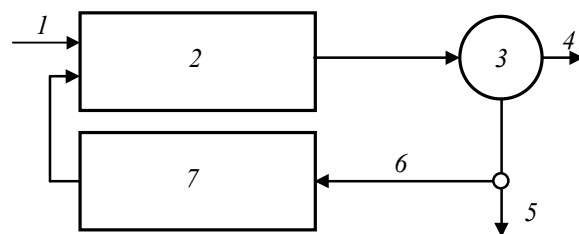


Рис. 3.4. Одноступенчатая схема очистки в аэротенках с регенерацией

7 – регенератор ила

В аэротенке сточная вода аэрируется примерно 1,5÷2,5 ч, в регенераторе – в несколько раз больше.

Двухступенчатая схема без регенерации (рис 3.5)

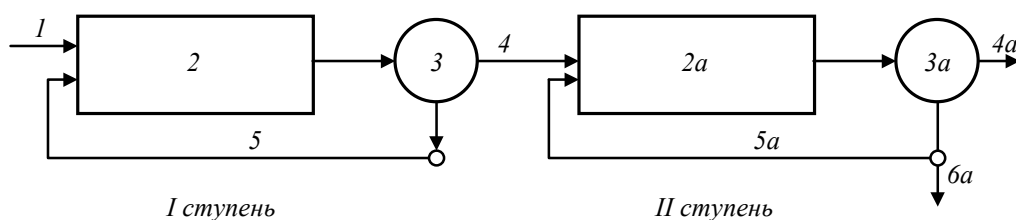


Рис. 3.5. Двухступенчатая схема очистки в аэротенках без регенерации
2 и 2a – аэротенки I и II ступени; 3 и 3a – вторичный отстойник I и II ступени; 4 и 4a – очищенная вода после I и II ступени; 5 и 5a – циркуляционный активный ил I и II ступени; 6a – избыточный активный ил II ступени

Такая схема целесообразна при высокой концентрации органических веществ в сточной воде, а также при наличии в ней веществ, скорость окисления которых резко отличается. В аэротенках каждой ступени развивается активный ил, наиболее адаптированный к данным условиям.

Разновидностями такой схемы является схема с регенераторами на каждой

ступени, а также схема с перекрестной подачей циркуляционного активного ила (ил с I ступени подается на аэротенк II ступени, а ил со II ступени направляется в аэротенк I ступени).

3.4. Классификация аэротенков по гидравлической схеме работы и нагрузке

По гидравлической схеме работы аэротенки делятся на следующие типы (см. рис. 3.6):

- *аэротенки-вытеснители* (схема I) – сооружения с сосредоточенным впуском воды и активного ила в них и со снижающейся нагрузкой на активный ил вдоль сооружения. Такой вид аэротенка позволяет обеспечить высокое качество очистки, однако чувствителен к резким колебаниям расхода и состава стоков;
- *аэротенки-смесители* (схема II) с подводом воды и активного ила равномерно вдоль одной из длинных сторон аэротенка. По всему объему аэротенка наблюдается одинаковая нагрузка на активный ил. Достоинством аэротенка-смесителя является сглаживание залповых нагрузок на активный ил;
- *аэротенки с рассредоточенным вдоль сооружения впуском сточной воды* (схема III). Этот вид занимает промежуточное положение между двумя предыдущими. Нагрузка на активный ил меняется циклически по длине сооружения.

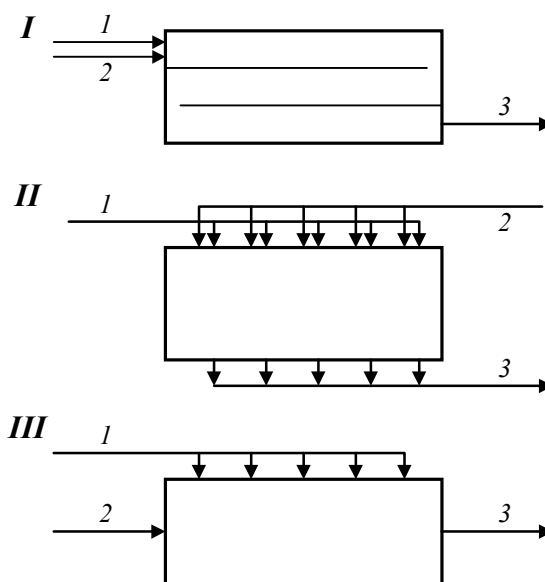


Рис. 3.6. Виды аэротенков

1 – сточная вода; 2 – активный ил; 3 – иловая смесь

Аэротенки-вытеснители без регенераторов рекомендуется применять для очистки городских и близких к ним по составу производственных сточных вод с БПК_{полн} не более 150 мг/л, при БПК_{полн} до 300 мг/л – аэротенки-вытеснители с регенераторами.

Аэротенки-смесители целесообразно применять для очистки производственных сточных вод при относительно небольших колебаниях их состава и присутствии в воде преимущественно органических веществ. При значительных колебаниях состава и расхода производственных стоков необходимо использовать аэротенки-смесители с регенераторами.

Аэротенк с рассредоточенной подачей сточной воды применяют для очистки смесей бытовых и производственных сточных вод.

По нагрузке на активный ил все аэротенки делятся на 3 типа:

- *высоконагружаемые*, в которых нагрузка составляет свыше 500 мг/(г·сут). Биологические процессы в этих аэротенках занимают II и III фазу (см.

рис. 3.1);

- *классической (обычной) аэрации*, в которых нагрузки составляют свыше 150 мг/(г·сут). Аэрация охватывает III фазу;
- *продленной аэрации (полного окисления)*. Нагрузка на активный ил составляет 65÷150 мг/(г·сут). Процесс очистки охватывает III и IV фазы.

В сооружениях, называемых *аэробными стабилизаторами*, которые устроены по типу аэротенков, избыточный активный ил подвергается самоокислению при недостатке питательных веществ (V фаза). Достигаемой в этом случае целью является уменьшение количества ила и подготовка его к дальнейшей обработке.

3.5. Системы аэрации в аэротенках

Различают пневматическую, механическую, комбинированную (смешанную) и струйную (эжекторную) систему аэрации.

Пневматическая система

Аэрация воды осуществляется путем подачи воздуха под поверхность воды. В зависимости от типа применяемого аэратора различают:

- *мелкопузырчатую* аэрацию с крупностью пузырьков воздуха 1÷4 мм. В этом случае используются керамические, тканевые и пластиковые аэраторы;
- *среднепузырчатую* аэрацию, крупность пузырьков составляет 5÷10 мм. Для этого применяют перфорированные трубы, щелевые аэраторы и др;
- *крупнопузырчатую* аэрацию с крупностью пузырьков более 10 мм. Используются открытые снизу трубы и сопла.

В зависимости от давления, создаваемого на выходе, различают аэраторы низкого (до 10 кПа), нормального (10÷50 кПа) и высокого (свыше 50 кПа) давления.

В России наиболее распространенным типом мелкопузырчатого аэратора является фильтросная пластина, изготавливаемая из пористого стекловидного материала. Эти пластины заделывают в железобетонные каналы в днище аэротенка вдоль длинной его стороны. Воздух в каналы подводится по воздуховодам и стоякам (см. рис. 3.7).

Недостатком фильтросных пластин является их засоряемость и зарастаемость биопленкой. Использование пористых труб позволяет избежать этих затруднений. Кроме того, трубы удобно извлекать из воды для ремонта целыми секциями.

Тканевые аэраторы имеют несколько конструкций: 1) *рамный*, состоящий из рамы с натянутой на ней синтетической тканью; 2) *тарельчатый*, который состоит из тарелок, обтянутых сверху тканью; 3) *решетчатый*, состоящий из перфорированных трубок с натянутой на них капроновой тканью.

Дырчатые трубы, относящиеся к среднепузырчатым аэраторам, укладываются горизонтально у дна аэротенка. Трубы имеют отвер-

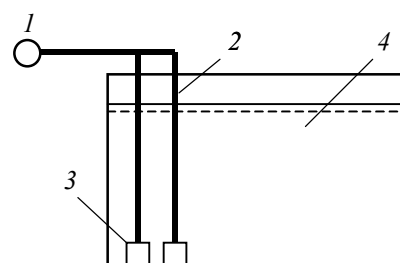


Рис. 3.7. Аэратор фильтросный
1 – воздухопровод; 2 – стояк; 3 – фильтросный канал; 4 – коридор аэротенка

ствия диаметром 3÷4 мм. Недостаток дырчатых труб – засоряемость ржавчиной.

В американской практике широко используется аэратор «Спаржер», представляющий собой крестовину из трубок с открытыми концами. При создании струи воздуха, обладающей большой скоростью, над аэратором создается область высокой турбулентности, в результате чего происходит вторичное дробление воздуха и образование очень мелких пузырьков.

Для крупнопузырчатой аэрации используют трубы диаметром 50 мм с открытыми концами, опущенные вертикально вниз на глубину 0,5 м от дна аэротенка.

В некоторых странах получил распространение низконапорный аэратор системы ИНКА (см. рис. 3.8). Аэратор представляет собой решетку из легких трубок из нержавеющей стали с отверстиями 1÷7 мм. Решетка устанавливается вдоль одной из продольных стен аэротенка на глубине 0,6÷0,9 м от поверхности воды. Для создания поперечной циркуляции в аэротенке устанавливают продольную перегородку из стекловолокна. В зоне выхода воздуха создается зона высокой турбулентности, благодаря которой воздух дробится.

Так как глубина аэратора мала, воздух может быть подан центробежными вентиляторами, а не воздуходувками. Вентиляторы могут быть установлены непосредственно на аэротенках под навесами.

Механическая система

Принцип работы механических аэраторов заключается в вовлечении воздуха непосредственно из атмосферы вращающимися частями аэратора (ротором) и перемешивании его со всем содержимым аэротенка.

Все механические аэраторы классифицируют:

- по принципу действия: *импеллерные* (кавитационные) и *поверхностные*;
- по плоскости расположения оси вращения ротора: с *горизонтальной* и *вертикальной* осью;
- по конструкции ротора: *конические*, *дисковые*, *цилиндрические*, *колесные*, *турбинные* и *винтовые*.

Наиболее широкое распространение получили аэраторы поверхностного типа с незначительным погружением. К ним можно отне-

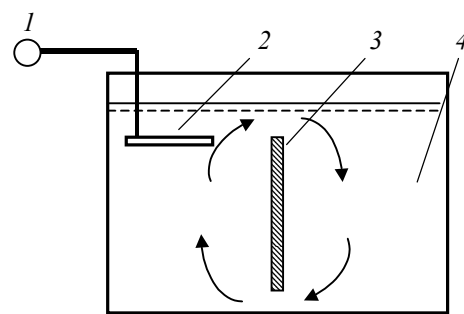


Рис. 3.8. Аэратор системы ИНКА
1 – воздуховод; 2 – решетка; 3 – перегородка; 4 – коридор аэротенка

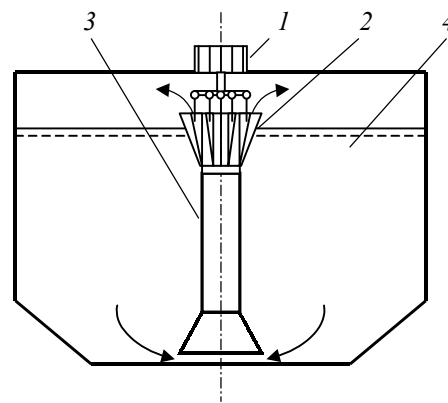


Рис. 3.9. Аэратор «Симплекс»
1 – электродвигатель; 2 – конус с лопастями; 3 – полая труба; 4 – коридор аэротенка

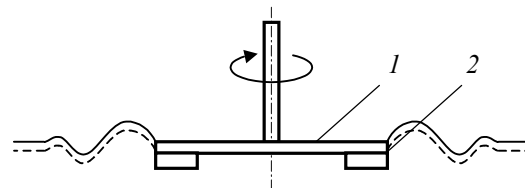


Рис. 3.10. Дисковый аэратор
1 – диск; 2 – лопасти

сти аэраторы типа «Симплекс», дисковые, щетки Кессенера и их модификации.

Аэратор «Симплекс» представляет собой усеченный полый конус, с внутренней стороны которого прикреплено несколько лопастей специальной формы (см. рис. 3.9). Верхняя часть конуса выступает над водой на $5\div 20$ см. Внизу под конусом устанавливается полая труба, через которую вода разбрызгивается наружу и аэрируется.

Дисковый аэратор представляет собой горизонтальный диск, с нижней стороны которого крепят радиально направленные лопасти (см. рис. 3.10). За лопастями в диске делаются прорезы.

Аэратор системы Кессенера представляет собой горизонтальный цилиндр, поверхность которого покрыта ворсом из нержавеющей стальной проволоки длиной около 15 см. Аэратор погружается в воду на глубину $10\div 12$ см. В модификациях вместо ворса применяют стальные пластинки или уголки.

Комбинированная система

Сочетает в себе элементы пневматической и механической аэрации. Вращающийся ротор используется для эффективного дробления пузырьков сжатого воздуха, подводимого под него, а также для перемешивания иловой смеси. Аэраторы комбинированной системы применяются для очистки концентрированных сточных вод и в аэроакселераторах.

Наибольшее распространение из комбинированных аэраторов получили турбинные аэраторы фирм «Дорр-Оливер» и «Пермутит». В нашей стране серийно выпускаются пневмомеханические аэраторы типа ПМ (см. рис. 3.11).

Струйная система

Струйные или эжекторные аэраторы выполнены в различных конструкциях, однако имеют в своем составе сопло для пропуска жидкости, патрубков для вовлечения воздуха из атмосферы и диффузор (см. рис. 3.12). Принцип действия аэратора основан на эжектирующем действии водной струи в сужении, благодаря чему вода насыщается пузырьками воздуха.

3.6. Конструкции аэротенков

Конструктивное оформление аэротенков определяется такими факторами, как производительность очистной станции, состав сточных вод, тип аэрационного оборудования, конструкции других сооружений по очистке и т.д.

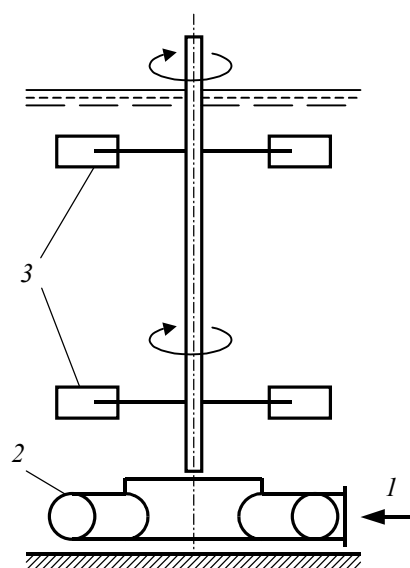


Рис. 3.11. Пневмомеханический аэратор типа ПМ

1 – подача воздуха; 2 – кольцевой воздухораспределитель; 3 – турбины с лопатками

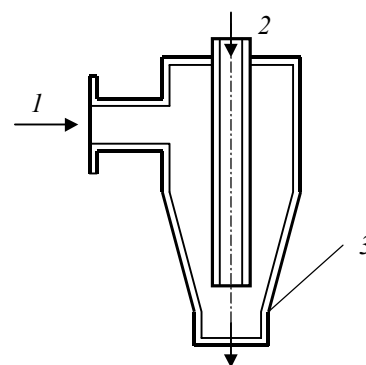


Рис. 3.12. Струйный аэратор
1 – сточная вода; 2 – подача воздуха; 3 – сжатое сечение

Для крупных очистных станций обычно применяют прямоугольные в плане аэротенки с пневматической аэрацией. Для небольших очистных станций применяют как прямоугольные, так и круглые в плане аэротенки с пневматической, механической или комбинированной системой аэрации.

Различают аэротенки с отдельными отстойными сооружениями и аэротенки–отстойники, в которых оба этих сооружения гидравлически связаны и взаимозависимы.

Аэротенки с отдельными отстойниками

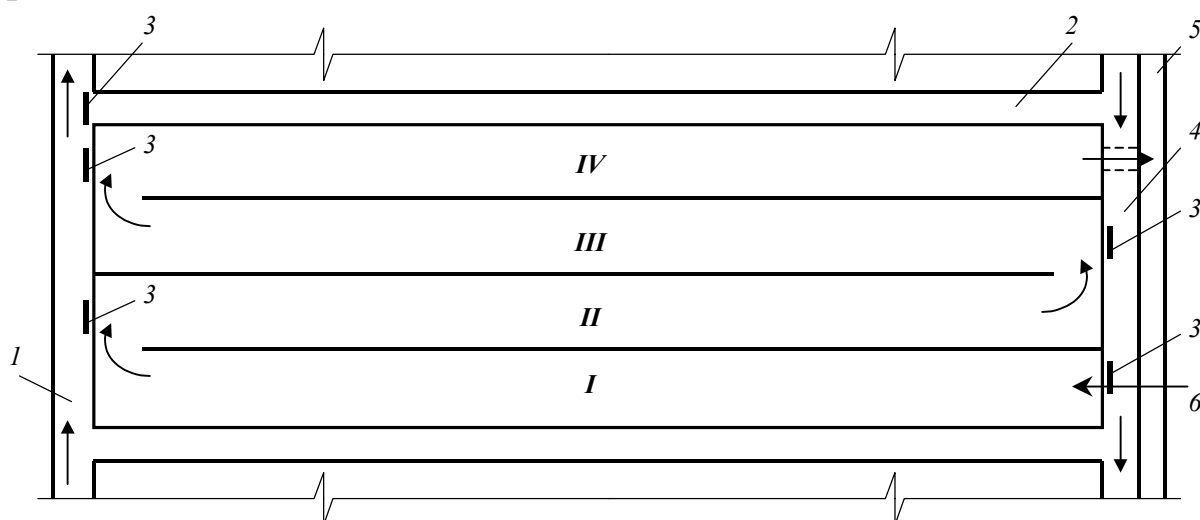


Рис. 3.13. План типового четырехкоридорного аэротенка

1 – верхний распределительный канал; 2 – средний канал; 3 – щитовой затвор (шибер); 4 – нижний распределительный канал; 5 – канал сбора очищенной воды; 6 – циркуляционный активный ил; I...IV – коридоры аэротенка

Иловая смесь из них выводится в отдельные отстойные сооружения, из которых принудительный возврат циркуляционного активного ила осуществляется насосными установками. Аэротенк представляет собой прямоугольный в плане резервуар, разделенный на 2÷4 коридора продольными перегородками. Коридорное устройство позволяет производить регенерацию активного ила с различной степенью: от 25% до 75%. Ширина коридора составляет 4,5÷9 м при глубине до 6 м. Длина аэротенка достигает нескольких десятков метров. Конструкция типового четырехкоридорного аэротенка-вытеснителя показана на рис. 3.13.

При работе без регенерации сточные воды проходят через все четыре коридора, при 25% регенерации активного ила как регенератор работает коридор I, а сточная вода подается из верхнего канала в коридор II. При 50% регенерации под нее отводятся коридоры I и II, при 75% регенерации – коридоры I, II и III.

Аэротенки–отстойники

Часть такого аэротенка, в которой осуществляется аэрация иловой смеси, называется *аэрационная зона*, а другая – *отстойная зона*. Примером может служить широко применяющаяся во Франции установка «Оксиконтакт» фирмы «Дегремон» (см. рис. 3.14). С обеих сторон центральной аэрационной зоны расположены отстойные зоны, отделенные перегородками, которые имеют переливные окна в

верхней части и продольные щели – в нижней части. Через эти отверстия активный ил осаждается и циркулирует в аэротенке.

Для станций небольшой производительности могут быть использованы аэротенки-отстойники круглой формы в плане с концентрическими зонами аэрации и отстаивания. За рубежом такие аэротенки-отстойники называются *аэроокислители*. Достоинствами аэротенков-отстойников являются рециркуляция активного ила без насосных установок и повышение дозы ила в аэротенке.

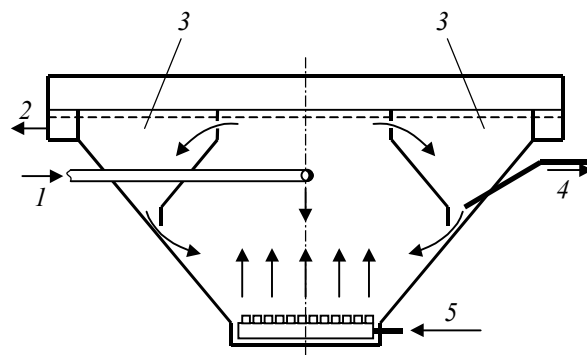


Рис. 3.14. Оксиконтакт

1 – впуск сточной воды; 2 – отвод очищенной воды; 3 – отстойная зона; 4 – удаление избыточного активного ила; 5 – подача воздуха

3.7. Расчет аэротенков

Расчет объема аэротенка

I. Аэротенки-смесители без регенераторов

1. Принимается доза активного ила в аэротенке $a_i = 2 \div 3$ г/л.
2. Рассчитывается удельная скорость окисления ρ :

$$\rho = \rho_{max} \frac{L_{ex} C_O}{L_{ex} C_O + K_l C_O + K_O L_{ex}} \cdot \frac{1}{1 + \phi a_i}, \text{ мг БПК}_{полн}/(\text{г} \cdot \text{ч}), \quad (3.1)$$

где ρ_{max} – максимальная скорость окисления органических загрязнений, мг БПК_{полн}/(г·ч), (принимается по табл. 1 Приложений); L_{ex} – БПК_{полн} очищенной сточной воды, мг/л; C_O – концентрация растворенного кислорода, мг/л, (2 мг/л); K_l – константа, характеризующая свойства загрязнений, мг БПК_{полн}/л, (табл. 1 Приложений); K_O – константа, характеризующая влияние кислорода, мг О₂/л, (табл. 1 Приложений); ϕ – коэффициент ингибирования, л/г, (табл. 1 Приложений).

3. Рассчитывается период аэрации t_{atm} :

$$t_{atm} = \frac{L_{en} - L_{ex}}{a_i (1 - s) \rho}, \text{ ч}, \quad (3.2)$$

где L_{en} – БПК_{полн} поступающей в аэротенк сточной воды, мг/л; s – зольность активного ила, (табл. 1 Приложений).

4. Рассчитывается нагрузка на активный ил q_i :

$$q_i = \frac{24(L_{en} - L_{ex})}{a_i (1 - s) t_{atm}}, \text{ мг БПК}_{полн}/(\text{г} \cdot \text{сут}). \quad (3.3)$$

5. По данным /8/ или табл. 3.1 методом интерполяции принимается иловый индекс J_i , см³/г, соответствующий нагрузке q_i .

6. Рассчитывается степень рециркуляции активного ила R_i :

$$R_i = \frac{a_i}{1000/J_i - a_i} \quad (3.4)$$

Рассчитанное значение R_i должно быть не менее 0,3 для отстойников с илососами, 0,4 – с илоскребами, 0,6 – при самотечном удалении ила. Если значение меньше минимальной величины, то степень рециркуляции принимается равной минимальной величине.

Таблица 3.1

Значения илового индекса

Сточные воды	Иловый индекс J_i , см ³ /г, при нагрузке на ил q_i , мг/(г·сут)					
	100	200	300	400	500	600
Городские	130	100	70	80	95	130
Производственные:						
- нефтеперерабатывающих заводов	—	110	70	80	120	160
- заводов синтетического каучука	—	100	40	70	100	130
- комбинатов искусственного волокна	—	300	200	250	280	400
- целлюлозно-бумажных комбинатов	—	220	150	170	200	220
- химкомбинатов азотной промышленности	—	90	60	75	90	120

7. Определяется объем аэротенков W_{atm} :

$$W_{atm} = q_w t_{atm}, \text{ м}^3, \quad (3.5)$$

где q_w – расчетный расход сточной воды, м³/ч.

8. По табл. 13 Приложений выбирается типовой проект аэротенка, подбирается число секций n_{at} (не менее двух, при суточном расходе до 50 000 м³/сут – 4÷6, при большем расходе – 6÷8). Длина аэротенка l_{at} определяется по формуле:

$$l_{at} = W_{atm} / (n_{at} n_{cor} b_{cor} H_{at}), \text{ м}. \quad (3.6)$$

где n_{cor} – число коридоров в одной секции; b_{cor} – ширина коридора, м; H_{at} – рабочая глубина аэротенка, м.

9. Рассчитывается прирост активного ила P_i :

$$P_i = 0,8 C_{cdp} + K_g L_{en}, \text{ мг/л}, \quad (3.7)$$

где C_{cdp} – концентрация взвешенных веществ в сточной воде, поступающей в аэротенк, мг/л; K_g – коэффициент прироста, принимаемый для городских сточных вод равным 0,3.

II. Аэротенки-смесители с регенераторами

1. Принимается средняя доза активного ила $a_{i \text{ mix}} = (2,5 \div 4,5)$ г/л и степень регенерации (доля объема, занятая регенератором) R_r (например, равная 0,3).

2. Рассчитывается удельная скорость окисления ρ по формуле (3.1) при дозе $a_{i \text{ mix}}$.

3. Рассчитывается период аэрации t_{atm} по формуле (3.2) при дозе $a_{i \text{ mix}}$.

4. Рассчитывается нагрузка на активный ил q_i по формуле (3.3) при дозе $a_{i \text{ mix}}$.

5. По табл. 3.1 принимается иловый индекс J_i , соответствующий нагрузке q_i .

6. Рассчитывается степень рециркуляции активного ила R_i по формуле (3.4) при дозе активного ила $a_{i \text{ mix}}$. Значение R_i проверяется на соответствие вышеука-

занным условиям.

7. Определяется общий объем аэротенка и регенератора ($W_{atm} + W_r$):

$$(W_{atm} + W_r) = q_w t_{atm}, \text{ м}^3. \quad (3.8)$$

8. Определяется объем аэротенка W_{atm} :

$$W_{atm} = \frac{W_{atm} + W_r}{1 + \left(\frac{R_r}{1 - R_r}\right)}, \text{ м}^3, \quad (3.9)$$

и регенератора W_r :

$$W_r = (W_{atm} + W_r) - W_{atm}, \text{ м}^3. \quad (3.10)$$

9. Определяются размеры аэротенка с регенератором, подбираются типовые аэротенки-смесители (табл. 13 Приложений) по общему объему ($W_{atm} + W_r$). Под регенератор отводится либо целиком одна секция аэротенка, либо часть одного коридора в каждой секции.

10. Рассчитывается доза активного ила в аэротенке a_i :

$$a_i = \frac{(W_{atm} + W_r) a_{i \text{ mix}}}{W_{atm} + \left(\frac{1}{2R_i} + 1\right) W_r}, \text{ г/л}. \quad (3.11)$$

11. Рассчитывается прирост активного ила P_i по формуле (3.7).

III. Аэротенки-вытеснители без регенераторов

1. Принимается доза активного ила в аэротенке $a_i = 3 \div 5$ г/л и первоначальное значение илового индекса J_i (например, $100 \text{ см}^3/\text{г}$).

2. Рассчитывается степень рециркуляции активного ила R_i по формуле (3.4). Значение R_i проверяется на соответствие вышеуказанным условиям.

3. Определяется БПК_{полн} поступающей в аэротенк сточной воды с учетом разбавления рециркуляционным расходом L_{mix} :

$$L_{mix} = \frac{L_{en} + L_{ex} R_i}{1 + R_i}, \text{ мг/л}. \quad (3.12)$$

4. Рассчитывается период аэрации t_{atv} :

$$t_{atv} = \frac{1 + \varphi a_i}{\rho_{max} C_O a_i (1 - s)} \left[(C_O + K_O)(L_{mix} - L_{ex}) + K_I C_O \ln \frac{L_{mix}}{L_{ex}} \right] K_p, \text{ ч} \quad (3.13)$$

где K_p – коэффициент, учитывающий влияние продольного перемешивания: $K_p = 1,5$ при очистке до $L_{ex} = 15$ мг/л; $K_p = 1,25$ при $L_{ex} > 30$ мг/л.

5. Рассчитывается нагрузка на активный ил q_i по формуле (3.3) при значениях L_{mix} (вместо L_{en}) и t_{atv} .

6. По табл. 3.1 проверяется соответствие предварительно заданного илового индекса J_i полученной нагрузке q_i . Если иловый индекс отличается от табличного значения более чем на 10 %, расчет повторяется снова с пункта 2, принимая новый иловый индекс, соответствующий нагрузке q_i .

7. Определяется объем аэротенка с учетом рециркуляционного расхода W_{at} :

$$W_{at} = q_w(1 + R_i)t_{atv}, \text{ м}^3. \quad (3.14)$$

8. По табл. 14 Приложений выбирается типовой проект аэротенка-вытеснителя, выписываются все необходимые данные, по формуле (3.6) определяется длина секции аэротенка.

9. Рассчитывается прирост активного ила P_i по формуле (3.7).

IV. Аэротенки-вытеснители с регенераторами

1. Принимается доза активного ила в аэротенке $a_i = 2 \div 4,5$ г/л и первоначальное значение илового индекса J_i (например, $100 \text{ см}^3/\text{г}$).

2. Рассчитывается степень рециркуляции активного ила R_i по формуле (3.4). Значение R_i проверяется на соответствие вышеуказанным условиям.

3. Определяется БПК_{полн} поступающей в аэротенк сточной воды с учетом разбавления L_{mix} по формуле (3.12).

4. Рассчитывается продолжительность обработки воды в аэротенке t_{atv} :

$$t_{atv} = \frac{2,5}{\sqrt{a_i}} \lg \frac{L_{mix}}{L_{ex}}, \text{ ч.} \quad (3.15)$$

5. Рассчитывается доза активного ила в регенераторе a_r :

$$a_r = a_i \left(\frac{1}{2R_i} + 1 \right), \text{ г/л.} \quad (3.16)$$

6. Рассчитывается удельная скорость окисления ρ по формуле (3.1) при дозе активного ила a_r .

7. Определяется общая продолжительность окисления органических загрязнений t_O :

$$t_O = \frac{L_{en} - L_{ex}}{R_i a_r (1 - s) \rho}, \text{ ч.} \quad (3.17)$$

8. Определяется продолжительность регенерации t_r :

$$t_r = t_O - t_{atv}, \text{ ч.} \quad (3.18)$$

9. Определяется продолжительность пребывания в системе аэротенк–регенератор t_{a-r} :

$$t_{a-r} = (1 + R_i)t_{atv} + R_i t_r, \text{ ч.} \quad (3.19)$$

10. Рассчитывается средняя доза активного ила в системе аэротенк–регенератор $a_{i\text{ mix}}$:

$$a_{i\text{ mix}} = \frac{(1 + R_i)t_{atv}a_i + R_i t_r a_r}{t_{a-r}}, \text{ г/л.} \quad (3.20)$$

11. Рассчитывается нагрузка на активный ил q_i :

$$q_i = \frac{24(L_{en} - L_{ex})}{a_{i\text{ mix}}(1 - s)t_{a-r}}, \text{ мг БПК}_{\text{полн}}/(\text{г} \cdot \text{сут}). \quad (3.21)$$

12. Проверяется соответствие илового индекса J_i полученной нагрузке q_i . Если иловый индекс отличается от табличного значения более чем на 10 %, расчет повторяют снова с пункта 2, принимая новый иловый индекс, соответствующий нагрузке.

13. Определяется объем аэротенка W_{at} по формуле (3.14) и объем регенератора W_r :

$$W_r = q_w R_i t_r, \text{ м}^3. \quad (3.22)$$

14. По общему объему аэротенка и регенератора ($W_{at} + W_r$) выбирается типовой проект аэротенка-вытеснителя аналогично предыдущему расчету. Под регенератор отводится один или несколько коридоров каждой секции аэротенка.

15. Рассчитывается приrost активного ила P_i по формуле (3.7).

Системы аэрации коридорных аэротенков

I. Аэротенки-смесители

В аэротенках-смесителях пневматические аэраторы располагаются вдоль одной стены коридора равномерно по всей длине.

1. Определяется растворимость кислорода в воде C_a :

$$C_a = \left(1 + \frac{h_a}{20,6} \right) C_T, \text{ мг/л}, \quad (3.23)$$

где h_a – глубина погружения аэратора, м ($h_a = H_{at} - 0,3$); H_{at} – рабочая глубина аэротенка, м; C_T – растворимость кислорода в воде в зависимости от температуры и давления, мг/л, принимается по /2/ или табл. 3.2.

Таблица 3.2

Растворимость кислорода в чистой воде при давлении 0,1 МПа

Температура, °С	5	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28
C_T , мг/л	12,79	11,27	10,75	10,26	9,82	9,4	9,02	8,67	8,33	8,02	7,72

2. Рассчитывается удельный расход воздуха q_{air} :

$$q_{air} = \frac{q_O (L_{en} - L_{ex})}{K_1 K_2 K_T K_3 (C_a - C_O)}, \text{ м}^3/\text{м}^3, \quad (3.24)$$

где q_O – удельный расход кислорода воздуха, мг/мг снятой БПК_{полн}, принимаемый при очистке до БПК_{полн} до 15÷20 мг/л – 1,1, при очистке до БПК_{полн} свыше 20 мг/л – 0,9; K_1 – коэффициент, учитывающий тип аэратора, для мелкопузырчатой аэрации принимается в зависимости от соотношения площадей аэрируемой зоны и аэротенка f_{az}/f_{at} по /8/ или табл. 3.3 (отношение f_{az}/f_{at} принимается равным, например, 0,1), для среднепузырчатой и низконапорной $K_1 = 0,75$; K_2 – коэффициент, зависящий от глубины погружения аэратора h_a , принимается по /8/ или табл. 3.4; K_T – коэффициент, учитывающий температуру сточных вод, определяется по формуле:

$$K_T = 1 + 0,02(T_w - 20), \quad (3.25)$$

здесь T_w – среднемесячная температура сточной воды за летний период, °С;

K_3 – коэффициент качества воды, принимаемый для городских сточных вод 0,85, а при наличии в них СПАВ – в зависимости от соотношения f_{az}/f_{at} по /8/ или табл. 3.3, для производственных сточных вод, при отсутствии опытных данных, $K_3 = 0,7$; C_O – концентрация растворенного ки-

слорода, мг/л, (2 мг/л).

Таблица 3.3

Параметры для расчета удельного расхода воздуха в зависимости от соотношения f_{az}/f_{at}

f_{az}/f_{at}	0,05	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,75	1
K_1	1,34	1,47	1,68	1,89	1,94	2	2,13	2,3
K_3	0,59	0,59	0,64	0,66	0,72	0,77	0,88	0,99
$J_{a,max}, \text{м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$	5	10	20	30	40	50	75	100

Таблица 3.4

Параметры для расчета удельного расхода воздуха в зависимости от глубины погружения аэратора

$h_{a2}, \text{м}$	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1	3	4	5	6
K_2	0,4	0,46	0,6	0,8	0,9	1	2,08	2,52	2,92	3,3
$J_{a,min}, \text{м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$	48	42	38	32	28	24	4	3,5	3	2,5

3. Определяется интенсивность аэрации J_a :

$$J_a = \frac{q_{air} \cdot H_{at}}{t_{at}}, \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч}), \quad (3.26)$$

где t_{at} – период аэрации, ч.

Если вычисленное значение J_a больше $J_{a,max}$ для принятого K_1 (табл. 3.3), то увеличивается соотношение f_{az}/f_{at} и повторяется расчет q_{air} и J_a . Если значение J_a меньше $J_{a,min}$ для принятого K_2 (табл. 3.4), то принимается $J_a = J_{a,min}$, затем определяется удельный расход воздуха по формуле:

$$q_{air} = \frac{J_a t_{at}}{H_{at}}, \text{ м}^3/\text{м}^3. \quad (3.27)$$

4. Принимается тип пневматических аэраторов (дырчатые трубы, фильтросные трубы или пластины, и т.п.), определяется количество аэраторов в каждом коридоре секции аэротенка n_d :

$$n_d = \frac{J_a b_{cor}}{J_{ad} f_d}, \quad (3.28)$$

здесь J_{ad} – удельный расход воздуха на единицу рабочей поверхности аэраторов, $\text{м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$, принимается по табл. 2, 3, 4 Приложений; f_d – площадь одного ряда аэраторов на 1 м длины аэротенка, $\text{м}^2/\text{м}$, принимается по наружному диаметру или размерам аэратора в табл. 2, 3, 4 Приложений, b_{cor} – ширина коридора аэротенка, м.

5. Определяется общий расход воздуха Q_{air} :

$$Q_{air} = q_{air} q_w, \text{ м}^3/\text{ч}, \quad (3.29)$$

где q_w – расчетный расход сточной воды, $\text{м}^3/\text{ч}$.

II. Аэротенки-вытеснители без регенераторов

В аэротенках-вытеснителях аэраторы располагаются неравномерно в соответ-

ствии со снижением концентрации загрязнений и скоростей биохимического окисления.

1. Строится график изменения БПК_{полн} во времени (см. рис. 3.15). Для этого задаются несколькими (4÷6) промежуточными значениями L_t между L_{mix} и L_{ex} . По формуле (3.13) рассчитывается период аэрации t_{atv} для каждого значения L_t , которое подставляется в эту формулу вместо L_{ex} .

2. Весь интервал времени на полученном графике делится на несколько равных частей n_{ja} , (например, на 6 частей), которые будут соответствовать ячейкам коридора аэротенка. Для этих периодов аэрации по графику определяются значения БПК_{полн} на входе L'_{en} и на выходе L'_{ex} .

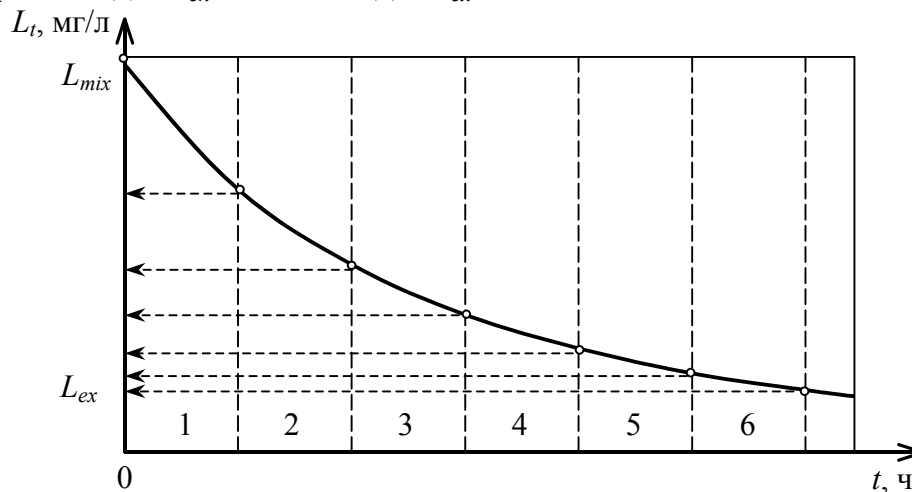


Рис. 3.15. Снижение БПК_{полн} в зависимости от времени аэрации

Таблица 3.5

Форма для расчета ячеек аэротенка

Показатель	Номер ячейки					
	1	2	3	4	5	6
L'_{en} , мг/л						
L'_{ex} , мг/л						
q_O , мг/мг						
q'_{air} , м ³ /м ³						
J'_a , м ³ /(м ² ·ч)						
Q'_{air} , м ³ /ч						
n'_d , ед						

3. Для каждой ячейки определяются:

- удельный расход воздуха q'_{air} по формуле (3.24), в которую подставляются значения БПК_{полн} на входе и выходе ячейки L'_{en} и L'_{ex} ;
- интенсивность аэрации J'_a по формуле:

$$J'_a = \frac{q'_{air} H_{at} n_{ja}}{t_{at}}, \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч}); \quad (3.30)$$

- расход воздуха Q'_{air} :

$$Q'_{air} = q'_{air} q_w / n_{at}, \text{ м}^3/\text{ч}; \quad (3.31)$$

- количество рядов аэраторов n'_d по формуле (3.28), в которую подставляется значение J'_a .
- 4. Расчет ведется в табличной форме (табл. 3.5).
- 5. Определяется общий расход воздуха на аэротенк Q_{air} , $\text{м}^3/\text{ч}$, как сумма всех Q'_{air} по ячейкам и секциям.

III. Аэротенки-вытеснители с регенераторами

Количество аэраторов на первой половине длины аэротенков и регенераторов принимается вдвое больше, чем на остальной длине.

1. Рассчитывается удельный расход воздуха q_{air} по формуле (3.24).
2. Определяется средняя интенсивность аэрации J_a по формуле (3.26), при этом в формулу подставляется продолжительность пребывания сточной воды в системе аэротенк–регенератор t_{a-r} .
3. Рассчитывается интенсивность аэрации на первой половине аэротенка и регенератора $J_{a1} = 1,33J_a$, на второй – $J_{a2} = 0,67J_a$.
4. Принимается тип пневматических аэраторов и определяется количество рядов аэраторов в первой половине аэротенка n_{d1} по формуле (3.28) (при значении J_{a1}) и во второй половине $n_{d2} = n_{d1}/2$.
5. Определяется общий расход воздуха Q_{air} по формуле (3.29).

Воздуховодное хозяйство коридорных аэротенков

1. Рассчитываются потери напора по длине воздуховодов от воздуховодки до наиболее удаленного стояка h_{mp} , как сумма потерь напора на каждом участке воздуховода:

$$h_{mp} = \sum i l_{mp} \alpha_t \alpha_p, \text{ мм}, \quad (3.32)$$

где i – потеря напора на единицу длины воздуховода при температуре 20°C и давлении $0,1 \text{ МПа}$, $\text{мм}/\text{м}$, (принимается по табл. 5 Приложений); l_{mp} – длина участка воздуховода, м ; α_t – поправка на изменение температуры /2/:

Температура, $^\circ\text{C}$	-20	-15	-10	-5	0	+5	+10	+15	+20	+30	+40
α_t	1,13	1,1	1,09	1,08	1,07	1,05	1,03	1,02	1	0,98	0,95

α_p – поправка на изменение давления /2/:

Давление, МПа	0,1	0,12	0,15	0,17	0,2
α_p	1	1,17	1,41	1,57	1,81

Диаметр воздуховодов принимается, исходя из наиболее экономически выгодной скорости движения воздуха (в общем и распределительных воздуховодах – $10 \div 20 \text{ м}/\text{с}$, в воздухоподводящих стояках – $4 \div 10 \text{ м}/\text{с}$) и расхода, который рассчи-

тывается, исходя из необходимого количества воздуха для аэрации одного коридора аэротенка или его ячейки.

Давление воздуха p ориентировочно принимается в пределах $0,12 \div 0,2$ МПа.

2. Потери напора на местных сопротивлениях в воздухопроводах h_m принимаются как сумма потерь напора в крестовинах, переходах, тройниках, задвижках и т.п. на всем пути движения воздуха до наиболее удаленного стояка:

$$h_m = \sum \zeta \frac{v^2}{2g} \rho \alpha_p \alpha_t, \text{ мм}, \quad (3.33)$$

где ζ – коэффициент, зависящий от вида местного сопротивления (см. табл. 6 Приложений); v – скорость движения воздуха на участке, м/с; ρ – плотность воздуха при расчетной температуре, определяется по формуле:

$$\rho = \frac{1,293 p \cdot 273}{0,1(273 + t)}, \text{ кг/м}^3, \quad (3.34)$$

здесь t – температура воздуха, °С; p – давление воздуха, МПа.

Расчет потерь напора ведется в табличной форме (таблица 3.6).

3. Рассчитывается требуемый общий напор воздуходувок $H_{общ}$ и полное давление воздуха p_n :

$$H_{общ} = (h_{mp} + h_m)/1000 + h_\phi + H_{at}, \text{ м}; \quad (3.35)$$

$$p_n = 0,1 + 0,01 H_{общ}, \text{ МПа}, \quad (3.36)$$

где h_ϕ – потери напора в пневматическом аэраторе, м; H_{at} – рабочая глубина аэротенка, м.

4. Если значение p_n будет значительно отличаться от ранее принятого давления p , то необходимо произвести полный пересчет воздухопроводов.

5. Исходя из общего расхода воздуха Q_{air} и полного давления воздуха p_n подбираются воздуходувки по табл. 7 Приложений. Число рабочих агрегатов должно быть не менее 2-х при расходе воздуха больше 5000 м³/ч, при меньшем расходе – 1. Число резервных агрегатов принимается при числе рабочих: до трех – 1, четыре и более – 2.

Таблица 3.6

Форма для расчета воздухопроводов

Номера участков и точек	Длина участка l_{mp} , м	Расход воздуха Q , м ³ /с	Диаметр труб d , мм	Скорость v , м/с	i , мм/м	il_{mp} , мм/м	h_{mp} , мм	Вид местного сопротивления	ζ	h_m , мм
...
...	Σh_{mp}	Σh_m

3.8. Примеры расчетов

ПРИМЕР 3.1

Исходные данные. Расчетный расход городских сточных вод $q_w = 2370 \text{ м}^3/\text{ч}$; суточный расход $Q = 80000 \text{ м}^3/\text{сут}$; БПК_{полн} поступающей сточной воды $L_{en} = 135 \text{ мг/л}$; БПК_{полн} очищенной сточной воды $L_{ex} = 15 \text{ мг/л}$; концентрация взвешенных веществ в поступающей сточной воде $C_{cdp} = 120 \text{ мг/л}$.

Задание. Рассчитать аэротенки-смесители.

Расчет. Так как значение $L_{en} < 150 \text{ мг/л}$, принимаем аэротенки-смесители без регенераторов. Вторичные отстойники принимаем радиальными с илососами.

Принимаем дозу активного ила в аэротенке $a_i = 2 \text{ г/л}$, концентрацию растворенного кислорода $C_O = 2 \text{ мг/л}$. По табл. 1 Приложений назначаем константы, необходимые для расчета:

- максимальную скорость окисления $\rho_{max} = 85 \text{ мг БПК}_{\text{полн}}/(\text{г}\cdot\text{ч})$;
- константу, характеризующую свойства загрязнений $K_l = 33 \text{ мг БПК}_{\text{полн}}/\text{л}$;
- константу, характеризующую влияние кислорода $K_O = 0,625 \text{ мг О}_2/\text{л}$;
- коэффициент ингибирования $\phi = 0,07 \text{ л/г}$;
- зольность активного ила $s = 0,3$.

По формуле (3.1) рассчитываем удельную скорость окисления:

$$\rho = 85 \frac{15 \cdot 2}{15 \cdot 2 + 33 \cdot 2 + 0,625 \cdot 15} \cdot \frac{1}{1 + 0,07 \cdot 2} = 21,2 \text{ мг БПК}_{\text{полн}}/(\text{г}\cdot\text{ч}).$$

По формуле (3.2) определяем период аэрации:

$$t_{atm} = \frac{135 - 15}{2(1 - 0,3)21,2} = 4,04 \text{ ч.}$$

По формуле (3.3) определяем нагрузку на активный ил:

$$q_i = \frac{24(135 - 15)}{2(1 - 0,3)4,04} = 508 \text{ мг БПК}_{\text{полн}}/(\text{г}\cdot\text{сут}).$$

По табл. 3.1 интерполяцией находим иловый индекс, который соответствует рассчитанной нагрузке на активный ил:

$$J_i = 95 + (95 - 130)(508 - 500)/(500 - 600) = 97,8 \text{ см}^3/\text{г}.$$

Рассчитываем степень рециркуляции активного ила по формуле (3.4):

$$R_i = \frac{2}{1000/97,8 - 2} = 0,24.$$

Поскольку рассчитанное значение R_i меньше минимального для принятых отстойников с илососами, то назначаем $R_i = 0,3$.

По формуле (3.5) определяем объем аэротенков-смесителей:

$$W_{atm} = 2370 \cdot 4,04 = 9575 \text{ м}^3.$$

По табл. 13 Приложений подбираем типовой проект аэротенка-смесителя № 902-2-217/218 со следующими характеристиками:

- число секций $n_{at} = 8$;
- число коридоров $n_{cor} = 2$;
- рабочая глубина $H_{at} = 4,5$ м;
- ширина коридора $b_{cor} = 4$ м;
- объем одной секции – 1296 м^3 .

По формуле (3.6) определяем длину секции аэротенка:

$$l_{at} = 9575 / (8 \cdot 2 \cdot 4 \cdot 4,5) = 33,3 \approx 33 \text{ м.}$$

Рассчитываем прирост активного ила по формуле (3.7):

$$P_i = 0,8 \cdot 120 + 0,3 \cdot 135 = 136,5 \text{ мг/л.}$$

ПРИМЕР 3.2

Исходные данные. Расчетный расход городских сточных вод $q_w = 1190 \text{ м}^3/\text{ч}$; суточный расход $Q = 45000 \text{ м}^3/\text{сут}$; БПК_{полн} поступающей сточной воды $L_{en} = 175 \text{ мг/л}$; БПК_{полн} очищенной сточной воды $L_{ex} = 20 \text{ мг/л}$; концентрация взвешенных веществ в поступающей сточной воде $C_{cdp} = 161 \text{ мг/л}$.

Задание. Рассчитать аэротенки-смесители.

Расчет. Так как значение $L_{en} > 150 \text{ мг/л}$, принимаем аэротенки-смесители с регенераторами. Вторичные отстойники принимаем горизонтальными с самотечным удалением ила.

Принимаем среднюю дозу активного ила $a_{i \text{ mix}} = 3,5 \text{ г/л}$, концентрацию растворенного кислорода $C_O = 2 \text{ мг/л}$ и степень регенерации $R_r = 0,3$. Для городских сточных вод по табл. 1 Приложений назначаем константы:

- максимальную скорость окисления $\rho_{max} = 85 \text{ мг БПК}_{\text{полн}}/(\text{г} \cdot \text{ч})$;
- константу, характеризующую свойства загрязнений $K_l = 33 \text{ мг БПК}_{\text{полн}}/\text{л}$;
- константу, характеризующую влияние кислорода $K_O = 0,625 \text{ мг О}_2/\text{л}$;
- коэффициент ингибирования $\varphi = 0,07 \text{ л/г}$;
- зольность активного ила $s = 0,3$.

По формуле (3.1) рассчитываем удельную скорость окисления при дозе активного ила $a_{i \text{ mix}} = 3,5 \text{ г/л}$:

$$\rho = 85 \frac{20 \cdot 2}{20 \cdot 2 + 33 \cdot 2 + 0,625 \cdot 20} \cdot \frac{1}{1 + 0,07 \cdot 3,5} = 23 \text{ мг БПК}_{\text{полн}}/(\text{г} \cdot \text{ч}).$$

По формуле (3.2) определяем период аэрации при дозе ила $a_{i \text{ mix}}$:

$$t_{atm} = \frac{175 - 20}{3,5(1 - 0,3)23} = 2,75 \text{ ч.}$$

По формуле (3.3) определяем нагрузку на активный ил при дозе ила $a_{i \text{ mix}}$:

$$q_i = \frac{24(175 - 20)}{3,5(1 - 0,3)2,75} = 552 \text{ мг БПК}_{\text{полн}}/(\text{г} \cdot \text{сут}).$$

По табл. 3.1 интерполяцией находим иловый индекс, который соответствует рассчитанной нагрузке на активный ил:

$$J_i = 95 + (95 - 130)(552 - 500)/(500 - 600) = 113,2 \text{ см}^3/\text{г.}$$

Рассчитываем степень рециркуляции активного ила по формуле (3.4) при дозе ила $a_{i\text{ mix}}$:

$$R_i = \frac{3,5}{1000/113,2 - 3,5} = 0,656.$$

Значение R_i превышает минимально допустимое для самотечного удаления ила (0,6), следовательно, корректировке не подлежит.

Определяем общий объем аэротенка и регенератора по формуле (3.8):

$$(W_{atm} + W_r) = 1190 \cdot 2,75 = 3273 \text{ м}^3.$$

Находим по формулам (3.9), (3.10) объем аэротенка и регенератора:

$$W_{atm} = \frac{3273}{1 + \left(\frac{0,3}{1 - 0,3} \right)} = 2291 \text{ м}^3;$$

$$W_r = 3273 - 2291 = 982 \text{ м}^3.$$

По табл. 13 Приложений по общему объему $(W_{atm} + W_r) = 3273 \text{ м}^3$ подбираем типовой проект аэротенка-смесителя № 902-2-215/216 со следующими характеристиками:

- число секций $n_{at} = 4$;
- число коридоров $n_{cor} = 2$;
- рабочая глубина $H_{at} = 4,5 \text{ м}$;
- ширина коридора $b_{cor} = 4 \text{ м}$;
- объем одной секции – 864 м^3 .

По формуле (3.6) определяем длину секции аэротенка:

$$l_{at} = 3273 / (4 \cdot 2 \cdot 4 \cdot 4,5) = 22,7 \approx 24 \text{ м}.$$

В каждой секции аэротенка часть коридора длиной $l_r = l_{at} \cdot n_{cor} \cdot R_r = 24 \cdot 2 \cdot 0,3 = 14,4 \text{ м}$ отводим под регенератор.

По формуле (3.11) рассчитываем дозу активного ила в аэротенке:

$$a_i = \frac{3273 \cdot 3,5}{2291 + \left(\frac{1}{2 \cdot 0,656} + 1 \right) 982} = 2,85 \text{ г/л}.$$

Рассчитываем прирост активного ила по формуле (3.7):

$$P_i = 0,8 \cdot 161 + 0,3 \cdot 175 = 181,3 \text{ мг/л}.$$

ПРИМЕР 3.3

Исходные данные. Расчетный расход городских сточных вод $q_w = 3250 \text{ м}^3/\text{ч}$; суточный расход $Q = 110000 \text{ м}^3/\text{сут}$; БПК_{полн} поступающей сточной воды $L_{en} = 143 \text{ мг/л}$; БПК_{полн} очищенной сточной воды $L_{ex} = 15 \text{ мг/л}$; концентрация взвешенных веществ в поступающей сточной воде $C_{cdp} = 130 \text{ мг/л}$.

Задание. Рассчитать аэротенки-вытеснители.

Расчет. Поскольку значение $L_{en} < 150 \text{ мг/л}$, к расчету принимаем аэротенки-

вытеснители без регенераторов. Для вторичного отстаивания предусматриваем радиальные отстойники с илососами.

Для городских сточных вод по табл. 1 Приложений назначаем константы:

- максимальную скорость окисления $\rho_{max} = 85$ мг БПК_{полн}/(г·ч);
- константу, характеризующую свойства загрязнений $K_l = 33$ мг БПК_{полн}/л;
- константу, характеризующую влияние кислорода $K_O = 0,625$ мг O₂/л;
- коэффициент ингибирования $\varphi = 0,07$ л/г;
- зольность активного ила $s = 0,3$.

Дозу активного ила в аэротенке принимаем равной первоначально $a_i = 3$ г/л, значение илового индекса $J_i = 90$ см³/г, концентрацию растворенного кислорода $C_O = 2$ мг/л. По формуле (3.4) рассчитываем степень рециркуляции активного ила:

$$R_i = \frac{3}{1000/90 - 3} = 0,37.$$

Так как полученное значение превышает минимально допустимое для отстойников с илососами, то в исправлении R_i нет необходимости.

По формуле (3.12) рассчитываем БПК_{полн} поступающей в аэротенк сточной воды с учетом разбавления рециркуляционным расходом:

$$L_{mix} = \frac{143 + 15 \cdot 0,37}{1 + 0,37} = 108,4 \text{ мг/л.}$$

Согласно формуле (3.13) определяем период аэрации:

$$t_{av} = \frac{1 + 0,07 \cdot 3}{85 \cdot 2 \cdot 3(1 - 0,3)} \left[(2 + 0,625)(108,4 - 15) + 33 \cdot 2 \cdot \ln \frac{108,4}{15} \right] 1,5 = 1,91 \text{ ч.}$$

По формуле (3.3) рассчитываем нагрузку на активный ил, подставляя в формулу значения $L_{mix} = 108,4$ мг/л и $t_{av} = 1,91$ ч:

$$q_i = \frac{24(108,4 - 15)}{3(1 - 0,3)1,91} = 558,9 \text{ мг БПК}_{полн}/(\text{г} \cdot \text{сут}).$$

По табл. 3.1 с помощью интерполяции находим иловый индекс, который соответствует рассчитанной нагрузке на активный ил:

$$J_i = 95 + (95 - 130)(558,9 - 500)/(500 - 600) = 115,6 \text{ см}^3/\text{г}.$$

Принятое ранее значение илового индекса отличается от табличного на величину $\Delta = 100(115,6 - 90)/90 \approx 28\%$, поэтому расчет повторяем, принимая иловый индекс $J_i = 115$ см³/г:

$$R_i = \frac{3}{1000/115 - 3} = 0,527;$$

$$L_{mix} = \frac{143 + 15 \cdot 0,527}{1 + 0,527} = 98,8 \text{ мг/л;}$$

$$t_{av} = \frac{1 + 0,07 \cdot 3}{85 \cdot 2 \cdot 3(1 - 0,3)} \left[(2 + 0,625)(98,8 - 15) + 33 \cdot 2 \cdot \ln \frac{98,8}{15} \right] 1,5 = 1,75 \text{ ч};$$

$$q_i = \frac{24(98,8 - 15)}{3(1 - 0,3)1,75} = 547 \text{ мг БПК}_{\text{полн}}/(\text{Г} \cdot \text{сут}).$$

По табл. 3.1 находим иловый индекс при новом значении нагрузки q_i :

$$J_i = 95 + (95 - 130)(547 - 500)/(500 - 600) = 111,5 \text{ см}^3/\text{Г}.$$

Проверяем погрешность заданного и табличного илового индекса: $\Delta = 100(115 - 111,5)/111,5 \approx 3\%$, что является вполне допустимым.

По формуле (3.14) определяем объем аэротенка с учетом рециркуляционного расхода:

$$W_{at} = 3250(1 + 0,527)1,75 = 8691 \text{ м}^3.$$

По табл. 14 Приложений подбираем типовой проект аэротенка-вытеснителя № 902-2-195 со следующими характеристиками:

- число секций $n_{at} = 6$;
- число коридоров $n_{cor} = 2$;
- рабочая глубина $H_{at} = 3,2 \text{ м}$;
- ширина коридора $b_{cor} = 4,5 \text{ м}$;
- пределы длины секции – $48 \div 54 \text{ м}$;
- пределы объема одной секции – $1386 \div 1559 \text{ м}^3$.

По формуле (3.6) определяем длину секции аэротенка:

$$l_{at} = 8691/(6 \cdot 2 \cdot 3,2 \cdot 4,5) = 50,3 \approx 51 \text{ м}.$$

Общий размер аэротенков в плане составляет $54 \times 51 \text{ м}$. Так как отношение длины коридора аэротенка к ширине $51 \cdot 2/4,5 \approx 22$ меньше 30-ти, предусматриваем секционирование коридоров легкими перегородками с отверстиями. Расстояние между перегородками при шести ячейках равно: $51 \cdot 2/6 = 17 \text{ м}$. Общую площадь отверстий в каждой перегородке принимаем, исходя из скорости движения в них иловой смеси $v_{см}$ не менее $0,2 \text{ м/с}$:

$$S_{отв} = q_w/(3600n_{at}v_{см}) = 3250/(3600 \cdot 6 \cdot 0,2) = 0,752 \text{ м}^2.$$

Рассчитываем прирост активного ила по формуле (3.7):

$$P_i = 0,8 \cdot 130 + 0,3 \cdot 143 = 146,9 \text{ мг/л}.$$

ПРИМЕР 3.4

Исходные данные. Расчетный расход городских сточных вод $q_w = 2510 \text{ м}^3/\text{ч}$; суточный расход $Q = 80000 \text{ м}^3/\text{сут}$; БПК_{полн} поступающей сточной воды $L_{en} = 240 \text{ мг/л}$; БПК_{полн} очищенной сточной воды $L_{ex} = 20 \text{ мг/л}$; концентрация взвешенных веществ в поступающей сточной воде $C_{cdp} = 160 \text{ мг/л}$.

Задание. Рассчитать аэротенки-вытеснители.

Расчет. Поскольку значение $L_{en} > 150 \text{ мг/л}$, принимаем аэротенки-вытеснители с регенераторами. Для вторичного отстаивания предусматриваем радиальные отстойники с илососами.

Для городских сточных вод по табл. 1 Приложений назначаем константы:

- максимальную скорость окисления $\rho_{max} = 85$ мг БПК_{полн}/(г·ч);
- константу, характеризующую свойства загрязнений $K_l = 33$ мг БПК_{полн}/л;
- константу, характеризующую влияние кислорода $K_O = 0,625$ мг O₂/л;
- коэффициент ингибирования $\varphi = 0,07$ л/г;
- зольность активного ила $s = 0,3$.

Дозу активного ила в аэротенке принимаем равной первоначально $a_i = 3,5$ г/л, значение илового индекса $J_i = 90$ см³/г, концентрацию растворенного кислорода $C_O = 2$ мг/л.

По формуле (3.4) рассчитываем степень рециркуляции активного ила:

$$R_i = \frac{3,5}{1000/90 - 3,5} = 0,46.$$

Полученное значение превышает минимально допустимое для вторичных отстойников с илососами, поэтому в исправлении R_i нет необходимости.

По формуле (3.12) рассчитываем БПК_{полн} поступающей в аэротенк сточной воды с учетом разбавления рециркуляционным расходом:

$$L_{mix} = \frac{240 + 20 \cdot 0,46}{1 + 0,46} = 170,7 \text{ мг/л.}$$

По формуле (3.15) рассчитываем продолжительность обработки воды в аэротенке:

$$t_{av} = \frac{2,5}{\sqrt{3,5}} \lg \frac{170,7}{20} = 1,24 \text{ ч.}$$

По формуле (3.16) рассчитываем дозу активного ила в регенераторе:

$$a_r = 3,5 \left(\frac{1}{2 \cdot 0,46} + 1 \right) = 7,31 \text{ г/л.}$$

По формуле (3.1) определяем удельную скорость окисления при дозе активного ила a_r :

$$\rho = 85 \frac{20 \cdot 2}{20 \cdot 2 + 33 \cdot 2 + 0,625 \cdot 20} \cdot \frac{1}{1 + 0,07 \cdot 7,31} = 19 \text{ мг БПК}_{полн}/(\text{г} \cdot \text{ч}).$$

Определяем общую продолжительность окисления органических загрязнений по формуле (3.17):

$$t_O = \frac{240 - 20}{0,46 \cdot 7,31(1 - 0,3)} = 4,94 \text{ ч.}$$

По формуле (3.18) находим продолжительность регенерации:

$$t_r = 4,94 - 1,24 = 3,7 \text{ ч.}$$

По формуле (3.19) определяем продолжительность пребывания в системе аэротенк–регенератор:

$$t_{a-r} = (1 + 0,46)1,24 + 0,46 \cdot 3,7 = 3,51 \text{ ч.}$$

По формуле (3.20) рассчитываем среднюю дозу активного ила в системе аэротенк–регенератор:

$$a_{i\text{mix}} = \frac{(1 + 0,46)1,24 \cdot 3,5 + 0,46 \cdot 3,7 \cdot 7,31}{3,51} = 5,34 \text{ г/л.}$$

Рассчитываем по формуле (3.21) нагрузку на активный ил:

$$q_i = \frac{24(240 - 20)}{5,34(1 - 0,3)3,51} = 411,2 \text{ мг БПК}_{\text{полн}}/(\text{г} \cdot \text{сут}).$$

По табл. 3.1 посредством интерполяции находим иловый индекс, который соответствует рассчитанной нагрузке:

$$J_i = 80 + (80 - 95)(411,2 - 400)/(400 - 500) = 81,7 \text{ см}^3/\text{г.}$$

Принятое ранее значение илового индекса отличается от табличного на величину $\Delta = 100(90 - 81,7)/81,7 = 10,2 \% > 10 \%$, поэтому расчет повторяем, принимая иловый индекс $J_i = 81 \text{ см}^3/\text{г}$:

$$R_i = \frac{3,5}{1000/81 - 3,5} = 0,396;$$

$$L_{\text{mix}} = \frac{240 + 20 \cdot 0,396}{1 + 0,396} = 177,6 \text{ мг/л};$$

$$t_{\text{avr}} = \frac{2,5}{\sqrt{3,5}} \lg \frac{177,6}{20} = 1,27 \text{ ч};$$

$$a_r = 3,5 \left(\frac{1}{2 \cdot 0,396} + 1 \right) = 7,92 \text{ г/л};$$

$$\rho = 85 \frac{20 \cdot 2}{20 \cdot 2 + 33 \cdot 2 + 0,625 \cdot 20} \cdot \frac{1}{1 + 0,07 \cdot 7,92} = 18,4 \text{ мг БПК}_{\text{полн}}/(\text{г} \cdot \text{ч});$$

$$t_o = \frac{240 - 20}{0,396 \cdot 7,92(1 - 0,3)18,4} = 5,44 \text{ ч};$$

$$t_r = 5,44 - 1,27 = 4,17 \text{ ч};$$

$$t_{a-r} = (1 + 0,396)1,27 + 0,396 \cdot 4,17 = 3,42 \text{ ч};$$

$$a_{i\text{mix}} = \frac{(1 + 0,396)1,27 \cdot 3,5 + 0,396 \cdot 4,17 \cdot 7,92}{3,42} = 5,64 \text{ г/л};$$

$$q_i = \frac{24(240 - 20)}{5,64(1 - 0,3)3,42} = 400,2 \text{ мг БПК}_{\text{полн}}/(\text{г} \cdot \text{сут}).$$

По табл. 3.1 находим иловый индекс при новом значении нагрузки q_i :

$$J_i = 80 + (80 - 95)(400,2 - 400)/(400 - 500) = 80,03 \text{ см}^3/\text{г.}$$

Проверяем погрешность заданного и табличного илового индекса: $\Delta =$

= $100(81 - 80,03)/80,03 \approx 1\%$, что является допустимым.

По формуле (3.14) определяем объем аэротенка:

$$W_{at} = 2510(1 + 0,396)1,27 = 4450 \text{ м}^3,$$

по формуле (3.22) – объем регенератора:

$$W_r = 2510 \cdot 0,396 \cdot 4,17 = 4145 \text{ м}^3.$$

По табл. 14 Приложений в соответствии с общим объемом аэротенка и регенератора $(W_{at} + W_r) = (4450 + 4145) = 8595 \text{ м}^3$ подбираем типовой проект аэротенка-вытеснителя № 902-2-178 со следующими характеристиками:

- число секций $n_{at} = 4$;
- число коридоров $n_{cor} = 4$;
- рабочая глубина $H_{at} = 3,2 \text{ м}$;
- ширина коридора $b_{cor} = 4,5 \text{ м}$;
- пределы длины секции – $36 \div 42 \text{ м}$;
- пределы объема одной секции – $2070 \div 2416 \text{ м}^3$.

По формуле (3.6) определяем длину секции аэротенка:

$$l_{at} = 8595 / (4 \cdot 4 \cdot 3,2 \cdot 4,5) = 37,3 \text{ м}.$$

Принимаем длину секции аэротенка кратной 3 м, т.е. $l_{at} = 39 \text{ м}$. Общий размер аэротенков в плане составляет $72 \times 39 \text{ м}$. Так как отношение длины коридора аэротенка к ширине $39 \cdot 4 / 4,5 \approx 35$ больше 30, секционирование коридоров не требуется.

Рассчитываем прирост активного ила по формуле (3.7):

$$P_i = 0,8 \cdot 160 + 0,3 \cdot 240 = 200 \text{ мг/л}.$$

ПРИМЕР 3.5

Исходные данные. На городскую очистную станцию канализации поступают сточные воды с расчетным расходом $q_w = 2370 \text{ м}^3/\text{ч}$; БПК_{полн} поступающей сточной воды $L_{en} = 135 \text{ мг/л}$; БПК_{полн} очищенной сточной воды $L_{ex} = 15 \text{ мг/л}$; среднемесячная температура сточной воды за летний период $T_w = 22^\circ\text{C}$; в сточной воде присутствуют СПАВ. На очистной станции запроектированы аэротенки-смесители с рабочей глубиной $H_{at} = 4,5 \text{ м}$ и шириной коридора $b_{cor} = 4 \text{ м}$; период аэрации в аэротенке составляет $t_{at} = 4,04 \text{ ч}$.

Задание. Рассчитать систему аэрации аэротенков.

Расчет. Принимаем глубину погружения аэраторов $h_a = H_{at} - 0,3 = 4,5 - 0,3 = 4,2 \text{ м}$. По табл. 3.2 находим растворимость кислорода при температуре воды 22°C : $C_T = 8,67 \text{ мг/л}$.

По формуле (3.23) рассчитываем растворимость кислорода в воде:

$$C_a = \left(1 + \frac{4,2}{20,6} \right) 8,67 = 10,35 \text{ мг/л}.$$

Для аэрации принимаем мелкопузырчатый аэратор из фильтросных керамических пластин, соотношение площадей аэрируемой зоны и аэротенка $f_{az}/f_{at} = 0,2$. По

табл. 3.3 находим значение коэффициента, учитывающего тип аэратора: $K_1 = 1,68$, по той же таблице находим коэффициент качества воды при наличии в ней СПАВ: $K_3 = 0,64$. По табл. 3.4 интерполяцией находим коэффициент, зависящий от глубины погружения аэратора: $K_2 = 2,52 + (2,92 - 2,52) \cdot (4,2 - 4) = 2,6$. По формуле (3.25) определяем коэффициент, учитывающий температуру сточных вод:

$$K_T = 1 + 0,02(22 - 20) = 1,04.$$

Рассчитываем удельный расход воздуха по формуле (3.24):

$$q_{air} = \frac{1,1(135 - 15)}{1,68 \cdot 2,6 \cdot 1,04 \cdot 0,64(10,35 - 2)} = 5,44 \text{ м}^3/\text{м}^3.$$

По формуле (3.26) определяем интенсивность аэрации:

$$J_a = \frac{5,44 \cdot 4,5}{4,04} = 5,38 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч}).$$

Находим по табл. 3.3 максимально допустимую интенсивность аэрации $J_{a,max} = 20 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$, по табл. 3.3 – минимальную интенсивность аэрации $J_{a,min} = 3,5 - (3,5 - 3) \cdot (4,2 - 4) = 3,4 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$. Рассчитанное значение J_a находится между минимальным $J_{a,min}$ и максимальным $J_{a,max}$, следовательно, пересчета интенсивности не требуется.

По табл. 2 Приложений подбираем фильтросные пластины шириной 250 мм ($f_d = 0,25 \text{ м}^2/\text{м}$), глубиной канала 200 мм, находим удельный расход воздуха на единицу рабочей поверхности аэраторов $J_{ad} = 30 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$.

По формуле (3.28) определяем количество рядов каналов с фильтросными пластинами в каждом коридоре секции аэротенка:

$$n_d = \frac{5,38 \cdot 4,5}{30 \cdot 0,25} = 3,23.$$

Принимаем в каждом коридоре аэротенка по четыре канала с фильтросными пластинами. Ширина, занимаемая аэраторами, составляет: $b_{az} = 4 \cdot 0,25 = 1 \text{ м}$, следовательно, соотношение площадей аэрируемой зоны и аэротенка $f_{az}/f_{at} = b_{az}/b_{cor} = 1/4 = 0,25$, что мало отличается от принятой ранее величины (0,2).

По формуле (3.29) определяем общий расход воздуха:

$$Q_{air} = 6,74 \cdot 2370 = 15974 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

ПРИМЕР 3.6

Исходные данные. На городскую очистную станцию канализации поступают сточные воды с расчетным расходом $q_w = 3250 \text{ м}^3/\text{ч}$; БПК_{полн} поступающей сточной воды $L_{en} = 143 \text{ мг/л}$; БПК_{полн} очищенной сточной воды $L_{ex} = 15 \text{ мг/л}$; среднемесячная температура сточной воды за летний период $T_w = 20^\circ\text{C}$; в сточной воде присутствуют СПАВ.

Задание. Рассчитать систему аэрации для запроектированных аэротенков-вытеснителей из примера 3.3.

Расчет. Принимаем глубину погружения аэраторов $h_a = H_{at} - 0,3 = 3,2 - 0,3 = 2,9$ м. По табл. 3.2 находим растворимость кислорода при температуре воды 20°C: $C_T = 9,02$ мг/л.

По формуле (3.23) рассчитываем растворимость кислорода в воде:

$$C_a = \left(1 + \frac{2,9}{20,6}\right) 9,02 = 10,29 \text{ мг/л.}$$

Для аэрации принимаем мелкопузырчатый аэратор из фильтросных керамических труб, соотношение площадей аэрируемой зоны и аэротенка принимаем $f_{az}/f_{at} = 0,1$. По табл. 3.3 находим значение коэффициента, учитывающего тип аэратора: $K_1 = 1,47$, по той же таблице находим коэффициент качества воды при наличии в ней СПАВ: $K_3 = 0,59$. По табл. 3.4 интерполяцией находим коэффициент, зависящий от глубины погружения аэратора: $K_2 = 2,08 - (2,08 - 1) \cdot (3 - 2,9) / (3 - 1) = 2,03$. Согласно формуле (3.25) коэффициент, учитывающий температуру сточных вод, равен: $K_T = 1$.

По табл. 3 Приложений подбираем фильтросные трубы диаметром 260 мм ($f_d = 0,26 \text{ м}^2/\text{м}$), находим максимальный удельный расход воздуха на единицу рабочей поверхности аэраторов $J_{ad} = 115 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$.

Задаемся четырьмя промежуточными значениями L_t , которые находятся между $L_{mix} = 98,8$ мг/л и $L_{ex} = 15$ мг/л: $L_1 = 30$ мг/л, $L_2 = 45$ мг/л, $L_3 = 60$ мг/л, $L_4 = 75$ мг/л. Согласно формуле (3.13) для каждого из них рассчитываем период аэрации t_{atv} , подставляя в эту формулу вместо L_{ex} значения L_t :

L_t , мг/л	15	30	45	60	75	98,8
t_{atv} , ч	1,75	1,32	0,98	0,69	0,41	0

По полученным точкам строим график изменения БПК_{полн} в зависимости от времени аэрации (см. рис. 3.16).

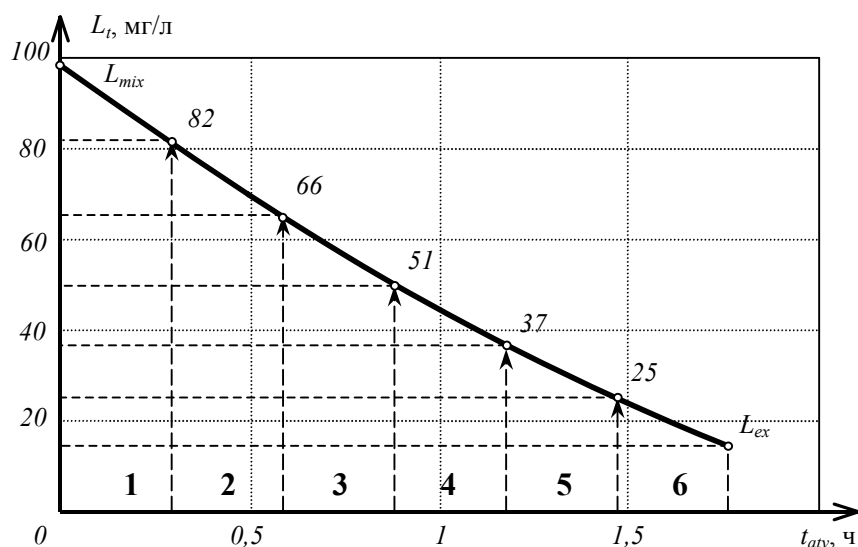


Рис. 3.16. Снижение БПК_{полн} в зависимости от времени аэрации 1...6 – номера ячеек

Делим всю продолжительность аэрации на шесть равных интервалов, которые соответствуют шести ячейкам ($n_{ja} = 6$) коридора аэротенка, запроектированным в примере 3.3. Продолжительность каждого интервала равна: $\Delta t = 1,75/6 = 0,29$ ч.

По графику на рис. 3.16 при заданных границах интервалов находим значения БПК_{полн} на входе L'_{en} и на выходе L'_{ex} каждой ячейки.

Для каждой ячейки аэротенка находим:

- по формуле (3.24) – удельный расход воздуха q'_{air} :

$$q'_{air} = \frac{q_O(L'_{en} - L'_{ex})}{1,47 \cdot 2,03 \cdot 1 \cdot 0,59(10,29 - 2)}, \text{ м}^3/\text{м}^3;$$

- по формуле (3.30) – интенсивность аэрации J'_a :

$$J'_a = \frac{q'_{air} \cdot 3,2 \cdot 6}{1,75}, \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч});$$

- по формуле (3.31) – расход воздуха Q'_{air} :

$$Q'_{air} = q'_{air} \cdot 3250/6, \text{ м}^3/\text{ч};$$

- по формуле (3.28) – количество рядов аэраторов n'_d :

$$n'_d = \frac{J'_a \cdot 4,5}{115 \cdot 0,26}.$$

Результаты расчета сводим в табл. 3.7.

Ширина, занимаемая аэраторами, составляет: $b_{az} = 2 \cdot 0,26 = 0,52$ м, следовательно, соотношение площадей аэрируемой зоны и аэротенка $f_{az}/f_{at} = b_{az}/b_{cor} = 0,52/4,5 = 0,115$, что мало отличается от принятой ранее величины (0,1).

Определяем общий расход воздуха на аэротенк:

$$Q_{air} = n_{at} \Sigma Q'_{air} = 6(563 + 536 + 504 + 466 + 401 + 406) = 17256 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

Таблица 3.7

Результаты расчета ячеек аэротенка-вытеснителя

Показатель	Номер ячейки					
	1	2	3	4	5	6
L'_{en} , мг/л	98,8	82	66	51	37	25
L'_{ex} , мг/л	82	66	51	37	25	15
q_O , мг/мг	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	1,1
q'_{air} , м ³ /м ³	1,04	0,99	0,93	0,86	0,74	0,75
J'_a , м ³ /м ² ·ч	11,37	10,83	10,15	9,47	8,12	8,27
Q'_{air} , м ³ /ч	563	536	504	466	401	406
n'_d , ед	1,71	1,63	1,53	1,43	1,23	1,24
	(2)	(2)	(2)	(2)	(2)	(2)

Примечание. В скобках показано принятое количество рядов аэраторов.

ПРИМЕР 3.7

Исходные данные. На городскую очистную станцию канализации поступают сточные воды с расчетным расходом $q_w = 2510 \text{ м}^3/\text{ч}$; БПК_{полн} поступающей сточной воды $L_{en} = 240 \text{ мг/л}$; БПК_{полн} очищенной сточной воды $L_{ex} = 20 \text{ мг/л}$; средне-месячная температура сточной воды за летний период $T_w = 19^\circ\text{C}$; в сточной воде присутствуют СПАВ. На очистной станции запроектированы аэротенки-вытеснители с регенераторами рабочей глубиной $H_{at} = 3,2 \text{ м}$ и шириной коридора $b_{cor} = 4,5 \text{ м}$; продолжительность пребывания сточной воды в системе аэротенк-регенератор $t_{a-r} = 3,42 \text{ ч}$.

Задание. Рассчитать систему аэрации аэротенков.

Расчет. Принимаем глубину погружения аэраторов $h_a = H_{at} - 0,3 = 3,2 - 0,3 = 2,9 \text{ м}$. По табл. 3.2 находим растворимость кислорода при температуре воды 19°C : $C_T = (9,4 + 9,02)/2 = 9,21 \text{ мг/л}$.

По формуле (3.23) рассчитываем растворимость кислорода в воде:

$$C_a = \left(1 + \frac{2,9}{20,6}\right) 9,21 = 10,51 \text{ мг/л}.$$

Для аэрации принимаем среднепузырчатый аэратор из перфорированных труб, соотношение площадей аэрируемой зоны и аэротенка $f_{az}/f_{at} = 0,1$. По табл. 3.3 находим значение коэффициента, учитывающего тип аэратора: $K_1 = 1,47$, по той же таблице находим коэффициент качества воды при наличии в ней СПАВ: $K_3 = 0,59$. По табл. 3.4 интерполяцией находим коэффициент, зависимый от глубины погружения аэратора: $K_2 = 2,08 - (2,08 - 1) \cdot (3 - 2,9)/(3 - 1) = 2,03$. По формуле (3.25) определяем коэффициент, учитывающий температуру сточных вод:

$$K_T = 1 + 0,02(19 - 20) = 0,98.$$

Рассчитываем удельный расход воздуха по формуле (3.24):

$$q_{air} = \frac{1,1(240 - 20)}{1,47 \cdot 2,03 \cdot 0,98 \cdot 0,59(10,51 - 2)} = 16,49 \text{ м}^3/\text{м}^3.$$

По формуле (3.26) определяем среднюю интенсивность аэрации:

$$J_a = \frac{16,49 \cdot 3,2}{3,42} = 15,43 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч}).$$

Находим по табл. 3.3 максимально допустимую интенсивность аэрации $J_{a,max} = 10 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$, по табл. 3.3 – минимальную интенсивность аэрации $J_{a,min} = 24 - (24 - 4) \cdot (2,9 - 1)/(3 - 1) = 5 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$. Рассчитанное значение J_a находится больше максимального, следовательно, принимаем $J_a = J_{a,max} = 10 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$.

Рассчитываем интенсивность аэрации на первой половине аэротенка и регенератора:

$$J_{a1} = 1,33J_a = 1,33 \cdot 10 = 13,33 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч}),$$

и на второй:

$$J_{a2} = 0,67J_a = 0,67 \cdot 10 = 6,7 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч}).$$

По табл. 4 Приложений подбираем дырчатые трубы диаметром 88 мм ($f_d = 0,09 \text{ м}^2/\text{м}$) с отверстиями диаметром 3 мм, число отверстий на 1 м – 120, находим удельный расход воздуха на единицу рабочей поверхности аэраторов $J_{ad} = 110 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$.

По формуле (3.28) определяем количество рядов труб на первой половине аэротенка и регенератора в каждой секции:

$$n_{d1} = \frac{10 \cdot 4,5}{110 \cdot 0,09} = 4,55,$$

на второй половине:

$$n_{d2} = 4,55/2 = 2,28.$$

Принимаем на первой половине аэротенка и регенератора пять рядов дырчатых труб, на второй – три ряда труб.

По формуле (3.29) определяем общий расход воздуха:

$$Q_{air} = 16,49 \cdot 2510 = 41390 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

ПРИМЕР 3.8

Исходные данные. На очистной станции канализации запроектированы шесть секций двухкоридорных аэротенков длиной $l_{at} = 51 \text{ м}$, шириной коридора $b_{cor} = 4,5 \text{ м}$ и рабочей глубиной $H_{at} = 3,2 \text{ м}$. Коридор аэротенков разделен на шесть ячеек длиной 17 м.

Система аэрации – мелкопузырчатые аэраторы из фильтросных труб диаметром 260 мм в два ряда на каждый коридор аэротенка. Общий расход воздуха для аэрации $Q_{air} = 17256 \text{ м}^3/\text{ч}$. Воздух в ячейки подается неравномерно:

Номера ячеек	1	2	3	4	5	6
Расход воздуха Q'_{air} :						
$\text{м}^3/\text{ч}$	563	536	504	466	401	406
$\text{м}^3/\text{с}$	0,16	0,15	0,14	0,13	0,11	0,11

Расчетная температура воздуха: $+25^\circ\text{C}$.

Задание. Рассчитать воздухоподводящее хозяйство аэротенка.

Расчет. Составляем схему воздухопроводов для аэротенков (см. рис. 3.17). При этом учитываем, что при допустимой неравномерности аэрации 5% на один воздухоподводящий стояк, согласно табл. 3 Приложений, должно приходиться не менее 29 м аэратора. При длине ячейки коридора 17 м, одного стояка на ячейку вполне достаточно.

Выбираем наиболее удаленный стояк (точка 4 на рис. 3.17) от воздухоподводящей станции, составляем монтажную схему до этого стояка (см. рис. 3.18) и определяем потери напора по длине и местных сопротивлений на всех расчетных участках воздухопроводов по формулам (3.32, 3.33).

Для расчетов ориентировочно принимаем давление воздуха $p = 0,15 \text{ МПа}$. Поправочные коэффициенты на изменение температуры и давления принимаем из пояснений к формуле (3.32): $\alpha_t = (0,98 + 1)/2 = 0,99$; $\alpha_p = 1,41$.

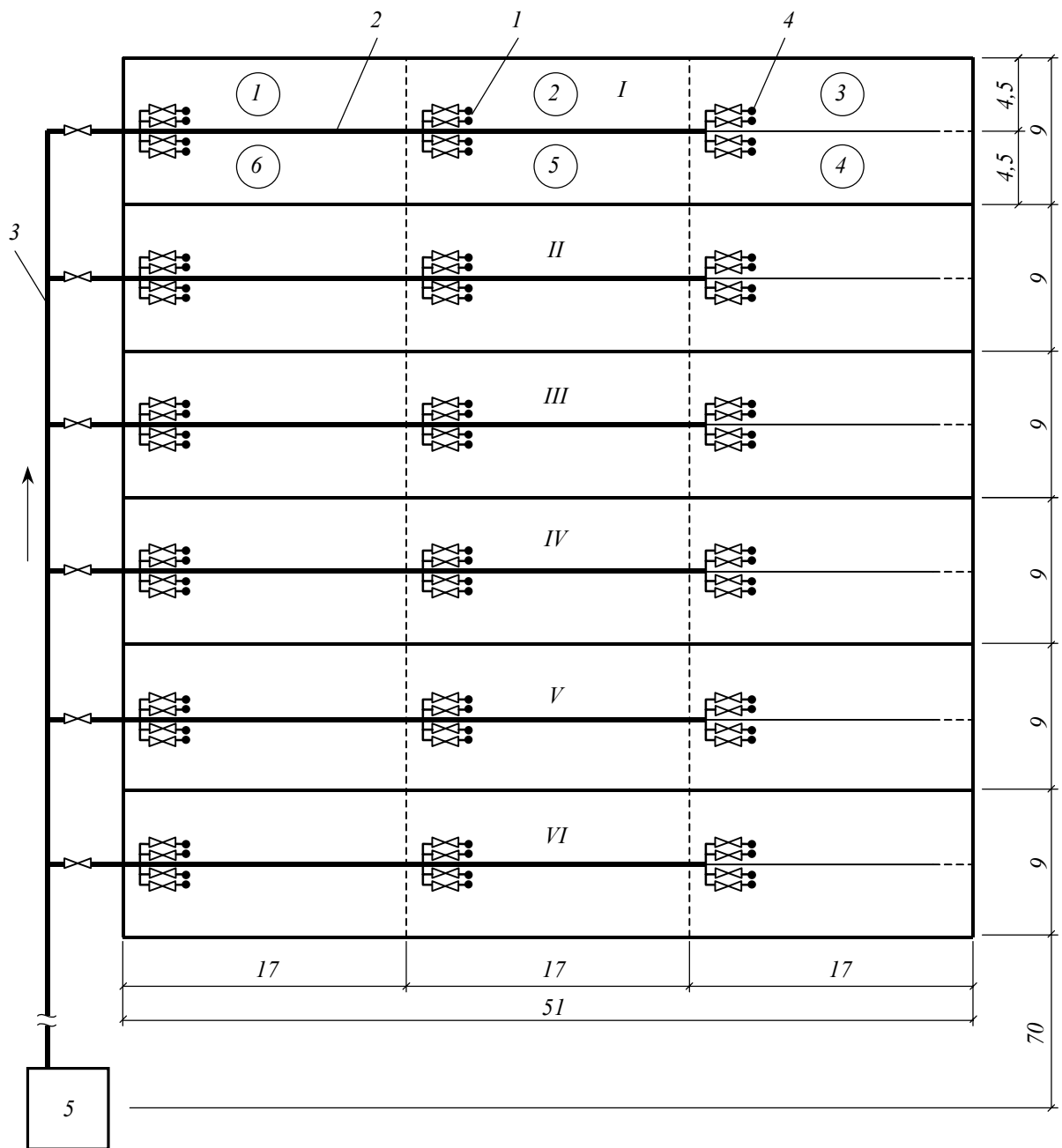


Рис. 3.17. Схема расположения воздуховодов двухкоридорного аэротенка
I...VI – секции аэротенка; *1* – воздухоподводящие стояки; *2* – распределительный воздуховод; *3* – общий воздуховод; *4* – наиболее удаленный стояк; *5* – воздуходувная станция;
 (1) ... (6) – ячейки одной секции аэротенка

Плотность воздуха определяем по формуле (3.34):

$$\rho = \frac{1,293 \cdot 0,15 \cdot 273}{0,1(273 + 25)} = 1,78 \text{ кг/м}^3.$$

Расчет сводим в табл. 3.8.

Таблица 3.8

Результаты расчета воздуховодов аэротенка

Номера участков и точек	Длина участка l_{mp} , м	Расход воздуха Q , м ³ /с	Диаметр труб d , мм	Скорость v , м/с	i , мм/м	il_{mp} , мм/м	h_{mp} , мм	Вид местного сопротивления	ζ	h_m , мм
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1 – 2	70	4,8	600	17,2	0,42	29,4	41,04	Два колена Тройник на проход	0,6 0,1	25,73
2 – 3	9	4,0	600	13,7	0,3	2,7	3,77	Тройник на проход	0,1	2,33
3 – 4	9	3,2	600	10,7	0,2	1,8	2,51	Тройник на проход	0,1	1,42
4 – 5	9	2,4	500	12,6	0,28	2,52	3,52	Переход Тройник на проход	0,08 0,1	3,55
5 – 6	9	1,6	400	12,4	0,41	3,69	5,15	Переход Тройник на проход	0,08 0,1	3,44
6 – 7	10	0,8	300	11,1	0,47	4,7	6,56	Переход Колено Задвижка Тройник на проход	0,08 0,3 0,1 0,1	8,88
7 – 8	17	0,53	200	16	0,54	9,18	12,81	Переход Тройник на проход	0,08 0,1	5,73
8 – 9	17	0,27	200	8,5	0,46	7,82	10,92	Тройник в ответвление	1,5	13,46
9 – 10	0,95	0,14	150	8,2	0,59	0,56	0,78	Переход Тройник на проход	0,08 0,1	1,5
10 – 11	4	0,07	150	3,77	0,15	0,6	0,84	Колено Задвижка Колено Выход из трубы	0,3 0,1 0,3 1	3,0
							$\Sigma h_{mp} = 87,9$			$\Sigma h_m = 69,04$

Затем по формулам (3.35, 3.36) рассчитываем требуемый общий напор воздухоувок (при потерях напора в фильтросных трубах $h_{\phi} = 1$ м):

$$H_{\text{общ}} = (87,9 + 69,04)/1000 + 1 + 3,2 = 4,357 \text{ м,}$$

и полное давление воздуха:

$$p_n = 0,1 + 0,01 \cdot 4,357 = 0,144 \text{ МПа.}$$

Различие между ранее принятым и рассчитанным давлением воздуха составляет: $\Delta = 100(0,15 - 0,144)/0,144 \approx 4\%$ и является незначительным.

По табл. 7 Приложений принимаем три рабочие и одну резервную воздухоувки марки ТВ-80-1,6 производительностью $6000 \text{ м}^3/\text{ч}$ каждая.



4. ЦИРКУЛЯЦИОННЫЕ ОКИСЛИТЕЛЬНЫЕ КАНАЛЫ (ЦОК)

Циркуляционные окислительные каналы используются для биологической очистки сточных вод в районах с расчетной зимней температурой наиболее холодного периода не ниже -25°C .

ЦОК представляет собой замкнутый канал трапецеидального или прямоугольного сечения О-образной формы в плане, по которому циркулирует иловая смесь со скоростью $0,25 \div 0,45 \text{ м/с}$. Движение иловой смеси и ее аэрацию обеспечивает горизонтальный цилиндрический аэратор (см. рис. 4.1).

ЦОК работают по принципу аэротенков продленной аэрации, как правило, без первичного отстаивания, с продолжительностью пребывания ила в нем около 40 сут. ЦОК бывают непрерывного и периодического действия производительностью до $1400 \text{ м}^3/\text{сут}$. В ЦОК периодического действия разделение иловой смеси происходит непосредственно в самом канале при выключенных аэраторах, в каналах непрерывного действия для этого применяются вторичные отстойники.

Средняя скорость окисления по $\text{БПК}_{\text{полн}}$ – $6 \text{ мг}/(\text{г}\cdot\text{ч})$, удельный расход кислорода – $1,25 \text{ мг}/\text{мг}$ снятой $\text{БПК}_{\text{полн}}$. Количество избыточного активного ила – $0,4 \text{ кг}/\text{кг}$ $\text{БПК}_{\text{полн}}$. Доза активного ила – $3 \div 4 \text{ г}/\text{л}$, зольность ила – $0,35$. Расчетная глубина канала – около 1 м.

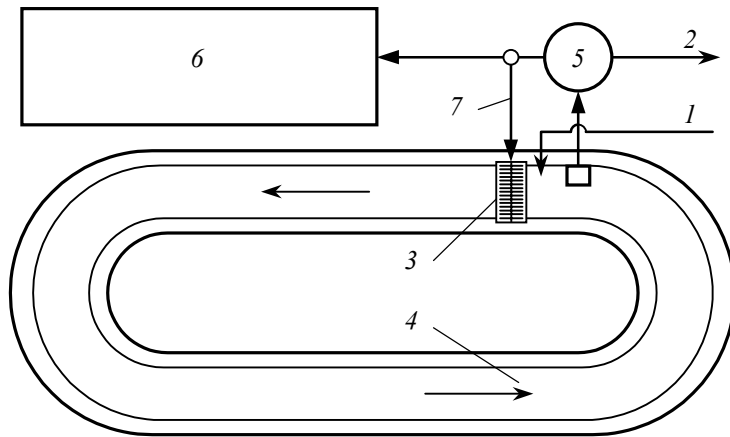


Рис. 4.1. Схема работы циркуляционного окислительного канала непрерывного действия
 1 – поступление сточных вод;
 2 – отвод очищенной воды;
 3 – механический аэратор;
 4 – канал;
 5 – вторичный отстойник;
 6 – иловые площадки;
 7 – циркуляционный активный ил

Чаще всего на очистных сооружениях строят по два ЦОК периодического действия, с поочередным выключением механического аэратора и осаднением активного ила. Перед поступлением в ЦОК сточная вода проходит решетку, из ЦОК иловая смесь направляется в вертикальный отстойник со средней продолжительностью отстаивания 1,5 ч, откуда избыточный активный ил подается на иловые площадки, а циркуляционный ил - снова в ЦОК.

4.1. Расчет ЦОК

1. Определяется продолжительность аэрации t_{at} , ч, при следующих параметрах: средняя скорость окисления $\rho = 6$ мг БПК_{полн}/(г·ч), доза активного ила $a_i = 3 \div 4$ г/л, зольность ила $s = 0,35$.

$$t_{at} = \frac{L_{en} - L_{ex}}{a_i(1-s)\rho}, \text{ ч}, \quad (4.1)$$

где L_{en} и L_{ex} – БПК_{полн} поступающей в ЦОК и очищенной сточной воды, мг/л.

2. Принимается форма ЦОК, схема его работы (непрерывная или периодическая), рабочая глубина $H_{cc} = 1$ м, ширина по низу b_{cc} , м, коэффициент откоса стенок канала m и количество ЦОК.

3. Определяется количество кислорода Q_o , которое необходимо подать в сточную воду:

$$Q_o = q_o(L_{en} - L_{ex})Q_w/1000, \text{ кг/сут}, \quad (4.2)$$

где q_o – удельный расход кислорода воздуха, равный 1,25 мг/мг снятой БПК_{полн}; Q_w – суточный расход воды, м³/сут.

4. Выбирается тип механического аэратора (цилиндрический, вальцовый, Кессенера, клеточный и др). Для аэраторов клеточного типа в табл. 9 Приложений приведены основные параметры работы. По паспортной производительности аэратора по кислороду Q_{air} , г/(ч·м), определяется его расчетная производительность в сутки Q и необходимое количество аэраторов n_{ma} (не менее двух):

$$Q = 24Q_{air}l_{air}/1000, \text{ кг/сут}; \quad (4.3)$$

$$n_{air} = Q_o/Q, \quad (4.4)$$

где l_{air} – длина аэратора, м, принимается не менее ширины канала по дну b_{cc} и не более ширины

канала поверху.

5. Определяется требуемая скорость течения воды в канале v_{mp} :

$$v_{mp} = 0,25\sqrt{a_i H_{cc}}, \text{ м/с.} \quad (4.5)$$

6. Рассчитываются необходимые характеристики канала – его объем V_{cc} , площадь живого сечения ω_{cc} , длину l_{cc} , смоченный периметр χ_{cc} и гидравлический радиус R_{cc} :

$$\begin{aligned} V_{cc} &= t_{at} Q_w / 24, \text{ м}^3; \\ \omega_{cc} &= (b_{cc} + m H_{cc}) H_{cc}, \text{ м}^2; \\ l_{cc} &= V_{cc} / \omega_{cc}, \text{ м}; \\ \chi_{cc} &= b_{cc} + 2 H_{cc} \sqrt{1 + m^2}, \text{ м}; \\ R_{cc} &= \omega_{cc} / \chi_{cc}, \text{ м.} \end{aligned} \quad (4.6)$$

7. Определяется скорость движения воды в канале v_{cc} , создаваемая одним аэратором:

$$v_{cc} = \sqrt{\frac{J_{air} l_{air}}{\omega_{cc} \left(\frac{n_1^2}{R_{cc}^{3/4}} l_{cc} + 0,05 \Sigma \xi \right)}}, \text{ м/с,} \quad (4.7)$$

где J_{air} – импульс давления аэратора, принимаемый по характеристике аэратора; n_1 – коэффициент шероховатости, для бетонных стенок $n_1 = 0,014$; $\Sigma \xi$ – сумма коэффициентов местных сопротивлений, для О-образного канала $\Sigma \xi = 0,5$.

8. Скорость движения воды v_{cc} , создаваемая аэратором, должна быть не меньше требуемой v_{mp} . В противном случае изменяют тип аэратора или размеры самого канала и повторяют расчет.

4.2. Пример расчета

ПРИМЕР 4.1

Исходные данные. Суточный расход городских сточных вод $Q_w = 1360 \text{ м}^3/\text{сут}$; БПК_{полн} поступающей сточной воды $L_{en} = 185 \text{ мг/л}$; БПК_{полн} очищенной сточной воды $L_{ex} = 15 \text{ мг/л}$.

Задание. Рассчитать циркуляционные окислительные каналы.

Расчет. По формуле (4.1) определяем продолжительность аэрации при дозе активного ила $a_i = 3 \text{ г/л}$; средней скорости окисления $\rho = 6 \text{ мг БПК}_{\text{полн}}/(\text{г}\cdot\text{ч})$ и зольности ила $s = 0,35$:

$$t_{at} = \frac{185 - 15}{3(1 - 0,35)6} = 14,53 \text{ ч.}$$

Принимаем один циркуляционный канал непрерывного действия О-образной формы в плане с рабочей глубиной $H_{cc} = 1 \text{ м}$, шириной канала по низу $b_{cc} = 2 \text{ м}$ и коэффициентом откоса стенок $m = 1$.

По формуле (4.2) определяем количество кислорода, которое необходимо подать в воду:

$$Q_O = 1,25 \cdot 1360(185 - 15)/1000 = 289 \text{ кг/сут.}$$

Для аэрации сточной жидкости и приведения ее в движение выбираем механический аэратор клеточного типа шириной $l_{air} = 2$ м. По табл. 9 Приложений выписываем его паспортные характеристики: диаметр – 70 см; частота вращения – 100 мин^{-1} ; глубина погружения гребней – 25 см; требуемая мощность – 3,5 кВт/м; производительность по кислороду $Q_{air} = 3200 \text{ г/(ч·м)}$; импульс давления $J_{air} = 0,035$.

По формулам (4.3) и (4.4) определяем расчетную производительность принятого аэратора в сутки и необходимое количество аэраторов:

$$Q = 24 \cdot 3200 \cdot 2 / 1000 = 153,6 \text{ кг/сут;}$$

$$n_{air} = 289 / 153,6 = 1,88 \approx 2.$$

Принимаем два аэратора. По формуле (4.5) рассчитываем требуемую скорость течения воды в канале:

$$v_{mp} = 0,25 \sqrt{3 \cdot 1} = 0,43 \text{ м/с.}$$

Согласно формулам (4.6) определяем гидравлические и геометрические характеристики канала:

- объем $V_{cc} = 14,53 \cdot 1360 / 24 = 823,37 \text{ м}^3$;
- площадь живого сечения $\omega_{cc} = (2 + 1 \cdot 1) \cdot 1 = 3 \text{ м}^2$;
- длину $l_{cc} = 823,37 / 3 = 274,45 \text{ м}$;
- смоченный периметр $\chi_{cc} = 2 + 2 \cdot 1 \sqrt{1 + 1^2} = 4,83 \text{ м}$;
- гидравлический радиус $R_{cc} = 3 / 4,83 = 0,62 \text{ м}$.

Определяем скорость движения воды в канале v_{cc} , создаваемую одним аэратором, по формуле (4.7):

$$v_{cc} = \sqrt{\frac{0,035 \cdot 2}{3 \left(\frac{0,014^2}{0,62^{3/4}} 274,45 + 0,05 \cdot 0,5 \right)}} = 0,48 \text{ м/с.}$$

Рассчитанная скорость незначительно отличается от требуемой величины ($v_{mp} = 0,43 \text{ м/с}$). При двух работающих аэраторах скорость течения будет равна:

$$v'_{cc} = \sqrt{\frac{0,07 \cdot 2}{3 \left(\frac{0,014^2}{0,62^{3/4}} 274,45 + 0,05 \cdot 0,5 \right)}} = 0,68 \text{ м/с,}$$

что существенно превосходит требуемое значение.

5. ОКСИТЕНКИ

Один из путей увеличения интенсивности биологической очистки сточной воды – повышение скорости окисления загрязнений – достигается подачей в аэротенк технического кислорода вместо атмосферного воздуха.

Преимуществами такого способа являются:

- увеличение концентрации кислорода в воде до $6\div 12$ мг/л (вместо обычной для аэротенков 2 мг/л), что существенно повышает устойчивость при резких колебаниях состава и расходов сточной воды;
- высокая окислительная мощность, в $5\div 6$ раз выше, чем в аэротенках;
- прирост активного ила меньше на $25\div 35\%$, ил значительно лучше отделяется и уплотняется;
- очень интенсивно протекают процессы нитрификации аммонийного азота.

Сооружения, осуществляющие биологическую очистку сточной воды с использованием кислорода вместо воздуха, называются *окситенками*. Окситенки могут использоваться как самостоятельные сооружения биологической очистки или в двухступенчатой схеме совместно с аэротенками. Последняя схема применяется для очистки высококонцентрированных сточных вод ($\text{БПК}_{\text{полн}} > 1000$ мг/л). Окситенки бывают двух конструкций:

- комбинированный окситенк-смеситель, работающий по принципу аэротенка-отстойника;
- секционированный окситенк-вытеснитель с отдельным вторичным отстойником.

Комбинированный окситенк (см. рис. 5.1) представляет собой круглый в плане резервуар с цилиндрической перегородкой, разделяющей его на зону аэрации в центре и илоотделитель по периферии. Зона аэрации оборудована герметическим перекрытием с установленным сверху электроприводом механического аэратора, илоотделитель имеет перемешивающий механизм со скребком снизу. Циркуляционный активный ил поступает в зону аэрации через окна внизу. Очищенная вода дополнительно осветляется, проходя через взвешенный слой активного ила.

Секционированный окситенк (см. рис. 5.2) – это герметически перекрытый прямоугольный резервуар, который поделен на секции поперечными перегородками с отверстиями для пропуска иловой смеси и газа.

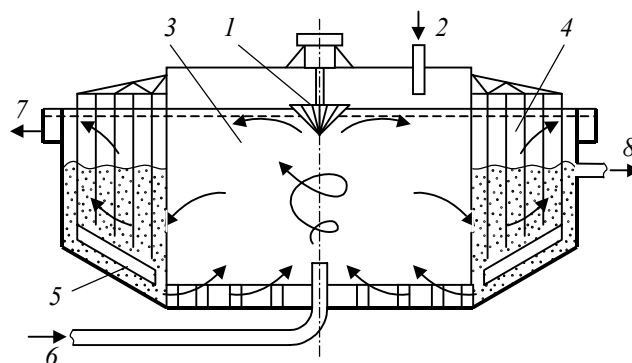


Рис. 5.1. Комбинированный окситенк
1 – аэратор; 2 – подача кислорода; 3 – зона аэрации; 4 – зона отстаивания; 5 – скребок; 6 – подача сточной воды; 7 – отвод очищенной воды; 8 – избыточный активный ил

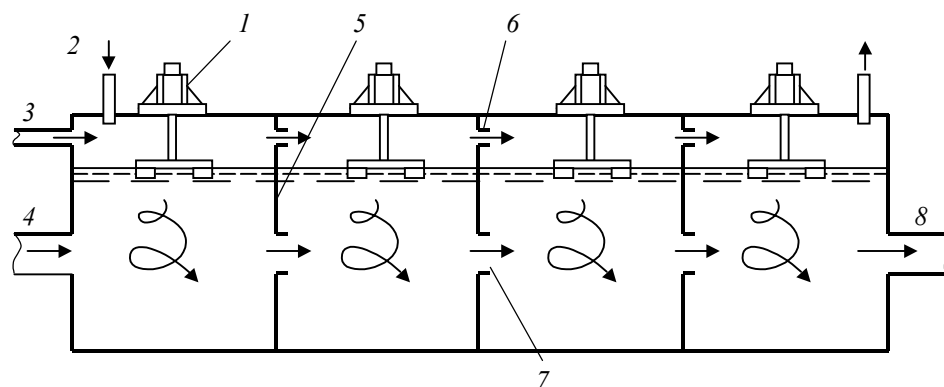


Рис. 5.2. Секционированный окситенк

1 – аэратор; 2 – подача кислорода; 3 – подача циркуляционного ила; 4 – сточная вода на очистку; 5 – перегородка; 6 – отверстие для пропуски газа; 7 – отверстие для пропуски иловой смеси; 8 – отвод иловой смеси

Комбинированный окситенк рекомендуется применять при строительстве новых сооружений, секционированный – при реконструкции существующих станций аэрации.

Доза активного ила в окситенках составляет $6 \div 10$ г/л, период аэрации $2,5 \div 3$ ч, эффективность использования кислорода – до 95%.

Окситенки оборудуются системой автоматизации для подачи кислорода с целью обеспечить заданную его концентрацию в иловой смеси при любых изменениях состава и расхода сточной жидкости.

Окситенки рекомендуется применять при условии подачи технического кислорода от кислородных установок промышленных предприятий (например, химические, коксохимические, нефтехимические производства и др.).

На очистных станциях городских сточных вод окситенки рекомендуется применять при расходах свыше 50 тысяч $\text{м}^3/\text{сут}$.

5.1. Расчет комбинированных окситенков

1. Принимается концентрация кислорода C_O в иловой смеси в пределах $6 \div 12$ мг/л, доза ила a_i – $6 \div 10$ г/л.

2. Рассчитывается удельная скорость окисления ρ , мг БПК_{полн}/(г·ч), по формуле (3.1), и продолжительность пребывания сточной воды в зоне аэрации t_{atm} , ч, по формуле (3.2).

3. Определяется суммарный объем зоны аэрации W_O :

$$W_O = q_w t_{atm}, \text{ м}^3, \quad (5.1)$$

где q_w – расчетный расход воды, $\text{м}^3/\text{ч}$.

4. Принимается диаметр D_O , м, и глубина H_O , м, окситенков (типовые проекты окситенков имеют диаметр 10, 22 и 30 м), и рассчитывается общий объем W_{O1} и объем зоны аэрации W_{a1} одного окситенка:

$$W_{O1} = 0,785 D_O^2 H_O, \text{ м}^3; \quad (5.2)$$

$$W_{a1} = W_{O1}/2, \text{ м}^3. \quad (5.3)$$

5. Рассчитывается диаметр зоны аэрации D_a :

$$D_a = \sqrt{\frac{W_{a1}}{0,785H_o}}, \text{ м.} \quad (5.4)$$

6. Определяется число окисенок n_o :

$$n_o = W_o/W_{a1}. \quad (5.5)$$

7. По формуле (3.3) рассчитывается нагрузка на активный ил q_i , мг БПК_{полн}/(г·сут). По табл. 3.1 методом интерполяции принимается иловый индекс J_i , см³/г, соответствующий нагрузке q_i , причем затем величина J_i снижается в 1,3÷1,5 раза.

8. По /8/ или табл. 5.1 в зависимости от произведения $a_i J_i$ определяется допустимая гидравлическая нагрузка на илоотделитель q_{ms} , м³/(м²·ч).

Таблица 5.1

Гидравлическая нагрузка на илоотделители для окисенок в зависимости от параметра $a_i J_i$

$a_i J_i$	100	200	300	400	500	600
q_{ms} , м ³ /(м ² ·ч)	5,6	3,3	1,8	1,2	0,8	0,7

9. Определяется необходимая площадь илоотделителей F_{ms} :

$$F_{ms} = q_w/q_{ms}, \text{ м}^2. \quad (5.6)$$

Затем значение F_{ms} сравнивается с фактической площадью илоотделителей F_{oi} , которая рассчитывается по формуле:

$$F_{oi} = 0,5n_o W_{o1}/H_o, \text{ м}^2. \quad (5.7)$$

Если величины F_{ms} и F_{oi} различаются более чем на 5÷10%, производится изменение дозы активного ила a_i и расчет повторяется, начиная с пункта 2. Дозу активного ила увеличивают, если $F_{oi} > F_{ms}$, в противном случае ее значение необходимо уменьшить.

10. Принимается тип механического аэратора и рассчитывается скорость потребления кислорода в одном окисенке v_o :

$$v_o = \frac{(L_{en} - L_{ex})q_w}{1000n_o}, \text{ кг/ч.} \quad (5.8)$$

где L_{en} и L_{ex} – БПК_{полн} поступающих и очищенных сточных вод, мг/л.

11. Рассчитывается производительность аэратора по кислороду Q_{ma} , которая при использовании технического 95%-ного кислорода может быть определена по формуле:

$$Q_{ma} = \frac{C_a v_o}{1000 K_T K_3 \left(0,174 \frac{1 - \eta_k}{\eta_k} - \frac{C_o}{1000} \right)}, \text{ кг/ч,} \quad (5.9)$$

где C_a – растворимость кислорода в воде, мг/л, определяемая по формуле (3.23); K_T – коэффициент, учитывающий температуру сточных вод, определяется по формуле (3.25); K_3 – коэффициент качества воды, принимаемый для городских сточных вод 0,85, а при наличии в них

СПАВ – по табл. 3.3, для производственных сточных вод, при отсутствии опытных данных, $K_3 = 0,7$; η_k – коэффициент использования кислорода в окситенке, принимаемый в пределах $0,85 \div 0,95$.

12. Исходя из рассчитанного значения Q_{ma} , по таблицам 10, 11, 12 Приложений подбирается механический (пневмомеханический) аэратор с производительностью по кислороду Q_m , кг/ч, мощностью N_m , кВт, диаметром d_a , м, и частотой вращения турбины n_m , мин⁻¹. Если производительность аэратора Q_m недостаточна, можно пересчитать частоту вращения и необходимую мощность привода.

Необходимая частота вращения n'_m и мощность привода N'_m определяется по формулам:

$$n'_m = n_m \sqrt{Q_{ma}/Q_m}, \text{ мин}^{-1}; \quad (5.10)$$

$$N'_m = \frac{N_m n_m'^2}{\eta_s n_m^2}, \text{ кВт}, \quad (5.11)$$

где η_s – КПД передачи, принимаемый равный 0,7.

13. Интенсивность перемешивания механического аэратора оценивается по величине донной скорости j_0 в наиболее удаленной точке его действия:

$$j_0 = \frac{1,217 d_a^{0,6} n_m^{0,2}}{(H_o/d_a)^{1,1} (D_a/d_a)^{0,45}}, \text{ м/с}. \quad (5.12)$$

Если значение скорости j_0 меньше требуемой (0,2 м/с), для окситенков принимается более мощный аэратор и расчет повторяется, начиная с пункта 12.

14. Определяется объемный расход кислорода Q_o :

$$Q_o = \frac{(L_{en} - L_{ex}) q_w}{1000 \eta_s \gamma_o}, \text{ м}^3/\text{ч}, \quad (5.13)$$

где γ_o – плотность кислорода при нормальном давлении (1,43 кг/м³).

15. Подбирается оборудование для получения и транспортирования кислорода. В табл. 15 Приложений, а также в /6/ приведены технико-экономические характеристики установок разделения воздуха.

5.2. Пример расчета

ПРИМЕР 5.1

Исходные данные. Суточный расход городских сточных вод $Q_w = 25670 \text{ м}^3/\text{сут}$; расчетный расход $q_w = 1490 \text{ м}^3/\text{ч}$; БПК_{полн} поступающей сточной воды $L_{en} = 255 \text{ мг/л}$; БПК_{полн} очищенной сточной воды $L_{ex} = 15 \text{ мг/л}$; среднемесячная температура сточной воды за летний период $T_w = 20^\circ\text{C}$.

Задание. Рассчитать комбинированные окситенки.

Расчет. Принимаем для расчетов концентрацию кислорода в иловой смеси $S_o = 10 \text{ мг/л}$ и дозу ила $a_i = 8 \text{ г/л}$. По табл. 1 Приложений назначаем константы, необходимые для расчета:

- максимальную скорость окисления $\rho_{max} = 85 \text{ мг БПК}_{\text{полн}}/(\text{г} \cdot \text{ч})$;

- константу, характеризующую свойства загрязнений $K_l = 33$ мг БПК_{полн}/л;
- константу, характеризующую влияние кислорода $K_o = 0,625$ мг O₂/л;
- коэффициент ингибирования $\varphi = 0,07$ л/г;
- зольность активного ила $s = 0,3$.

По формуле (3.1) рассчитываем удельную скорость окисления:

$$\rho = 85 \frac{15 \cdot 10}{15 \cdot 10 + 33 \cdot 10 + 0,625 \cdot 15} \cdot \frac{1}{1 + 0,07 \cdot 8} = 16,7 \text{ мг БПК}_{\text{полн}}/(\text{г} \cdot \text{ч}).$$

По формуле (3.2) определяем продолжительность пребывания сточных вод в зоне аэрации:

$$t_{\text{атм}} = \frac{255 - 15}{8(1 - 0,3)16,7} = 2,566 \text{ ч.}$$

Рассчитываем по формуле (5.1) суммарный объем зоны аэрации:

$$W_o = 1490 \cdot 2,566 = 3824 \text{ м}^3.$$

Принимаем окситенки диаметром $D_o = 30$ м и рабочей глубиной $H_o = 4,5$ м. По формулам (5.2) и (5.3) рассчитываем общий объем и объем зоны аэрации одного окситенка:

$$W_{o1} = 0,785 \cdot 30^2 \cdot 4,5 = 3179 \text{ м}^3;$$

$$W_{a1} = 3179/2 = 1589,5 \text{ м}^3.$$

По формуле (5.4) рассчитываем диаметр зоны аэрации:

$$D_a = \sqrt{\frac{1589,5}{0,785 \cdot 4,5}} = 21,2 \text{ м.}$$

По формуле (5.5) число окситенков равно:

$$n_o = 3824/1589,5 = 2,4.$$

Принимаем три окситенка диаметром 30 м.

По формуле (3.3) определяем нагрузку на активный ил:

$$q_i = \frac{24(255 - 15)}{8(1 - 0,3)2,566} = 401 \text{ мг БПК}_{\text{полн}}/(\text{г} \cdot \text{сут}).$$

По табл. 3.1 интерполяцией находим иловый индекс, который соответствует рассчитанной нагрузке на активный ил:

$$J_i = 80 + (80 - 95)(401 - 400)/(400 - 500) = 80,2 \text{ см}^3/\text{г.}$$

Для окситенков величина J_i снижается в 1,3÷1,5 раза: $J_i = 80,2/1,4 = 57,3 \text{ см}^3/\text{г.}$

Интерполяцией находим по табл. 5.1 для произведения $a_i J_i = 8 \cdot 57,3 = 458,4$ допустимую гидравлическую нагрузку на илоотделитель:

$$q_{ms} = 1,2 + (1,2 - 0,8)(458,4 - 400)/(400 - 500) = 0,966 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч}).$$

По формуле (5.6) определяем необходимую площадь илоотделителей:

$$F_{ms} = 1490/0,966 = 1541 \text{ м}^2.$$

По формуле (5.7) рассчитываем фактическую площадь илоотделителей:

$$F_{O_i} = 0,5 \cdot 3 \cdot 3179 / 4,5 = 1060 \text{ м}^2,$$

что значительно отличается от необходимой площади, поэтому расчет повторяем заново, при уменьшенной дозе активного ила $a_i = 6 \text{ г/л}$.

По формуле (3.1) рассчитываем удельную скорость окисления:

$$\rho = 85 \frac{15 \cdot 10}{15 \cdot 10 + 33 \cdot 10 + 0,625 \cdot 15} \cdot \frac{1}{1 + 0,07 \cdot 6} = 18,35 \text{ мг БПК}_{\text{полн}} / (\text{г} \cdot \text{ч}).$$

По формуле (3.2) определяем продолжительность пребывания сточных вод в зоне аэрации:

$$t_{\text{ам}} = \frac{255 - 15}{6(1 - 0,3)16,7} = 3,115 \text{ ч.}$$

Рассчитываем по формуле (5.1) суммарный объем зоны аэрации:

$$W_O = 1490 \cdot 3,115 = 4641 \text{ м}^3.$$

Оставляем первоначальные окситенки диаметром $D_O = 30 \text{ м}$ и рабочей глубиной $H_O = 4,5 \text{ м}$. Общий объем, объем и диаметр зоны аэрации одного окситенка не изменится: $W_{O1} = 3179 \text{ м}^3$, $D_a = 21,2 \text{ м}$, $W_{a1} = 1589,5 \text{ м}^3$.

По формуле (5.5) число окситенков равно

$$n_O = 4641 / 1589,5 = 2,9.$$

Оставляем первоначальное число – три окситенка диаметром 30 м.

По формуле (3.3) определяем нагрузку на активный ил:

$$q_i = \frac{24(255 - 15)}{6(1 - 0,3)3,115} = 440 \text{ мг БПК}_{\text{полн}} / (\text{г} \cdot \text{сут}).$$

По табл. 3.1 интерполяцией находим иловый индекс, который соответствует нагрузке:

$$J_i = 80 + (80 - 95)(440 - 400) / (400 - 500) = 86,1 \text{ см}^3 / \text{г.}$$

Снижаем величину J_i в 1,4 раза: $J_i = 86,1 / 1,4 = 61,5 \text{ см}^3 / \text{г.}$

По табл. 5.1 интерполяцией для произведения $a_i J_i = 6 \cdot 61,5 = 369$ находим допустимую гидравлическую нагрузку на илоотделитель:

$$q_{ms} = 1,8 + (1,8 - 1,2)(369 - 300) / (300 - 400) = 1,387 \text{ м}^3 / (\text{м}^2 \cdot \text{ч}).$$

По формуле (5.6) определяем необходимую площадь илоотделителей:

$$F_{ms} = 1490 / 1,387 = 1074 \text{ м}^2.$$

Погрешность при сравнении этой площади с фактической (которая осталась прежней из первого варианта расчета) составляет: $\Delta = 100(1074 - 1060) / 1060 = 1,3 \%$, что является совершенно допустимым.

Окончательно принимаем три окситенка диаметром $D_O = 30 \text{ м}$, рабочей глубиной $H_O = 4,5 \text{ м}$ и диаметром цилиндрической перегородки (зоны аэрации) $D_a = 21 \text{ м}$.

Для насыщения жидкости кислородом принимаем механический аэратор поверхностного типа и находим по формуле (5.8) скорость потребления кислорода в

одном окситенке:

$$v_o = \frac{(255 - 15)1490}{1000 \cdot 3} = 119,2 \text{ кг/ч.}$$

По табл. 3.2 находим растворимость кислорода при температуре воды 20°C: $C_T = 9,02$ мг/л. По формуле (3.23) рассчитываем растворимость кислорода в воде (при глубине погружения 0,02 м):

$$C_a = \left(1 + \frac{0,02}{20,6}\right) 9,02 = 9,03 \text{ мг/л.}$$

Согласно формуле (3.25) коэффициент, учитывающий температуру сточных вод, равен: $K_T = 1$. Принимаем коэффициент качества воды: $K_3 = 0,85$, коэффициент использования кислорода в окситенке: $\eta_k = 0,85$.

По формуле (5.9) рассчитываем производительность аэратора по кислороду (при использовании технического 95%-ного кислорода):

$$Q_{ma} = \frac{9,03 \cdot 119,2}{1000 \cdot 1 \cdot 0,85 \left(0,174 \frac{1 - 0,85}{0,85} - \frac{10}{1000}\right)} = 61 \text{ кг/ч.}$$

Исходя из конструктивных соображений и рассчитанного значения Q_{ma} , подбираем по табл. 11 Приложений механический дисковый аэратор поверхностного типа с производительностью по кислороду $Q_m = 77,5$ кг/ч, мощностью $N_m = 26,5$ кВт, диаметром $d_a = 3$ м, и частотой вращения турбины $n_m = 27$ мин⁻¹.

По формуле (5.12) рассчитываем донную скорость v_0 в наиболее удаленной точке действия аэратора:

$$j_0 = \frac{1,217 \cdot 3^{0,6} \cdot 27^{0,2}}{(4,5/3)^{1,1} (21/3)^{0,45}} = 1,21 \text{ м/с,}$$

что значительно больше необходимого значения (0,2 м/с).

По формуле (5.13) определяем объемный расход кислорода:

$$Q_o = \frac{(255 - 15)1490}{1000 \cdot 0,7 \cdot 1,43} = 357 \text{ м}^3/\text{ч.}$$

По табл. 15 Приложений подбираем установку разделения воздуха К-0,4 с одним блоком производительностью по кислороду 420 м³/ч.

6. ПОЛЯ ФИЛЬТРАЦИИ И ПОЛЯ ОРОШЕНИЯ

Метод почвенной очистки сточных вод на полях фильтрации и орошения основан на способности самоочищения почвы в условиях, близких к естественным. *Поля орошения* – это спланированные земельные участки, предназначенные для очистки сточных вод и для выращивания на них сельскохозяйственных культур. *Поля фильтрации* предназначены только для очистки сточных вод.

Сущность процесса очистки заключается в поглощении растворенных органи-

ческих веществ сточных вод пленкой микроорганизмов, находящейся на поверхности частичек почвы. Интенсивное окисление и нитрификация происходят в верхнем слое почвы (0,2÷0,3 м), по мере увеличения глубины содержание кислорода падает, и окисление происходит только за счет процесса денитрификации.

Различают два вида полей орошения:

- *коммунальные поля орошения*, главной задачей которых является очистка сточных вод, а использование их в сельскохозяйственных целях носит вспомогательный характер;
- *сельскохозяйственные поля орошения*, на которых использование сточных вод для сельского хозяйства и их очистка представляют единое целое.

Применение почвенных методов очистки рекомендуется при расходах сточных вод до 5000÷10000 м³/сут.

Сточные воды, направляемые на поля фильтрации и орошения, должны предварительно отстаиваться. Это необходимо для снижения содержания в них яиц гельминтов на 50÷60%.

Для орошения, кроме хозяйственно-бытовых сточных вод, могут быть использованы также производственные стоки, которые не содержат веществ, вредно влияющих на растения. К этим сточным водам, направляемым на поля орошения, предъявляется ряд требований. Общее количество солей не должно превышать 3÷4 г/л, в том числе питательных – 1÷1,5 г/л.

Сельскохозяйственные поля орошения проектируют во всех климатических районах, кроме северных. Для их устройства можно ограничиться только выравниванием микрорельефа.

Поля орошения коммунального типа и поля фильтрации состоят из карт, спланированных горизонтально или с незначительным уклоном и разделенных земляными валиками. Сточная вода распределяется по картам оросительной сетью; очищенная вода, профильтровавшаяся через слой почвы, отводится осушительной сетью.

Размеры карт полей фильтрации определяют в зависимости от рельефа местности, общей рабочей площади, способа обработки почвы и количества сточной воды. При обработке почвы тракторами площадь одной карты должна быть не менее 1,5 га. Длина карт принимается в 2÷3 раза больше ширины.

Площадь карт полей орошения принимается 5÷8 га, ширина карт зависит от вида грунта: для песков 50 м, для супесей 80÷100 м, для суглинков 120÷150 м. Длина карт в 4÷5 раза больше ширины.

Поля орошения рекомендуется располагать вниз по течению грунтовых вод от водозаборных сооружений на расстоянии не менее 200÷500 м, в зависимости от типа грунта (200 м – для легких суглинков, 300 м – для супесей и 500 м – для песков). По отношению к населенным пунктам поля рекомендуется располагать с разрывами, размер которых зависит от типа полей и объема сточных вод.

Лучшими для устройства полей являются песчаные и супесчаные грунты, однако можно использовать также суглинистые и черноземные почвы. Уровень

грунтовых вод должен быть на глубине не менее 1,5 м от поверхности, при более высоком уровне необходимо устраивать дренаж. В слабопроницаемых грунтах (суглинках) проектируется закрытая дренажная сеть, в песках и супесях устраиваются открытые осушительные каналы.

При определении требуемой площади полей орошения и полей фильтрации исходят из нормы нагрузки – объема сточной воды, который может быть очищен на 1 га за определенный промежуток времени (например, за вегетационный период). Различают следующие виды нагрузок:

- *среднесуточная норма* – объем стоков, приходящийся на 1 га в среднем за одни сутки обычно в течение года;
- *оросительная норма* – объем воды, требуемый для выращивания культуры за весь вегетационный период;
- *поливная норма* – объем воды за один полив;
- *удобрительная норма* – объем воды, который требуется для выращивания культуры, исходя из удобрительных свойств сточной воды;
- *норма зимнего орошения*.

Нормы нагрузки зависят от многих факторов: характера почвы, ее окислительной мощности, фильтрационной способности, пористости; от типа полей, рода выращиваемых сельскохозяйственных культур; характера и концентрации загрязнений сточной воды; климатических условий и т.д.

Поэтому нагрузка сточных вод на поля фильтрации принимается, исходя из опыта эксплуатации полей фильтрации в аналогичных условиях. При отсутствии такого опыта нагрузку принимают по данным /8/ или табл. 6.1. Для полей орошения нагрузка сточных вод принимается по данным /10/ или табл. 6.2.

Для полей фильтрации межполивной период колеблется от 5 до 10 сут, для полей орошения он устанавливается в соответствии с режимом полива выращиваемых культур.

При подготовке полей к летнему вегетационному периоду, при уборке урожая, а также в период дождей, выпуск стоков на поля орошения не допускается. Поэтому для приема сточной воды в этих случаях предусматривают резервные поля, по своему назначению являющимися полями фильтрации.

Так как в зимнее время фильтрация практически прекращается, необходимо проверить площадь карт на зимнее намораживание. Необходимая площадь определяется, исходя из продолжительности намораживания, коэффициента фильтрации грунтов зимой и высоты слоя намораживания. Продолжительность намораживания принимается равной числу дней со среднесуточной температурой воздуха ниже -10°C (см. изолинии на рис. 6.1).

Сточные воды, прошедшие предварительное отстаивание не менее 30 мин, подаются в распределительный колодец, откуда по сети поступают на карты (см. рис. 6.2). Внутри карт устраивается временная оросительная сеть в виде полос или борозд. Профильтрованная очищенная вода отводится дренажной сетью в отводную канаву.

Таблица 6.1

**Нормы нагрузки бытовых осветленных сточных вод на поля фильтрации
со среднегодовой высотой слоя атмосферных осадков 300÷500 мм**

Грунты	Среднегодовая температура воздуха, °С	Нагрузка сточных вод, м ³ /(га·сут), при залегании грунтовых вод на глубине, м		
		1,5	2	3
Легкие суглинки	До 3,5	—	55	60
	3,5÷6	—	70	75
	6÷11	—	75	85
	Свыше 11	—	85	100
Супеси	До 3,5	80	85	100
	3,5÷6	90	100	120
	6÷11	100	110	130
	Свыше 11	120	130	150
Пески	До 3,5	120	140	180
	3,5÷6	150	175	225
	6÷11	160	190	235
	Свыше 11	180	210	250

Примечание. Для районов со среднегодовой высотой слоя атмосферных осадков 500÷700 мм нормы нагрузки на поля фильтрации следует уменьшать на 15÷20%, а для районов со среднегодовой высотой слоя более 700 мм – на 25÷30 %, при этом больший процент снижения нагрузки принимают при суглинистых грунтах, а меньший – при песчаных.

Таблица 6.2

**Нормы нагрузки бытовых сточных вод на поля орошения для районов
со среднегодовой высотой слоя атмосферных осадков 300÷500 мм**

Среднегодовая температура воздуха, °С	Сельскохозяйственные культуры	Нагрузка сточных вод, м ³ /(га·сут), в зависимости от грунта		
		суглинки	супеси	пески
До 3,5	Огородные	30	40	60
	Полевые	15	20	30
3,5÷6	Огородные	35	50	75
	Полевые	20	25	40
6,1÷9,5	Огородные	45	60	80
	Полевые	25	30	40
9,6÷11	Огородные	60	70	85
	Полевые	30	35	45
Свыше 11	Огородные	70	80	90
	Полевые	35	40	45

Примечание. Для районов со среднегодовой высотой слоя атмосферных осадков 500÷700 мм нормы нагрузки на поля орошения следует уменьшить на 10÷15%, а для районов со среднегодовой высотой слоя более 700 мм – на 15÷25 %, при этом больший процент снижения нагрузки принимают при суглинистых грунтах, а меньший – при песчаных.

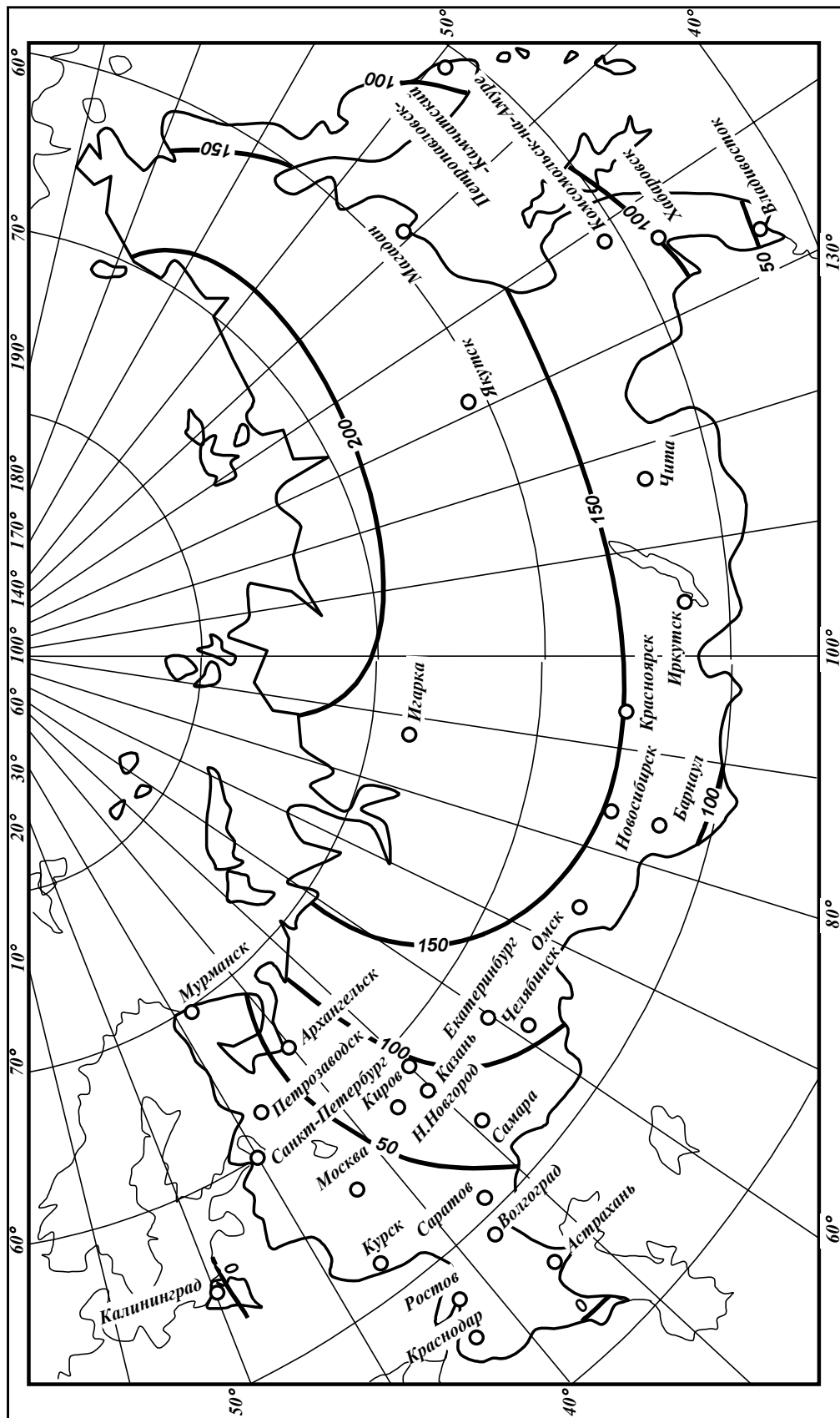


Рис. 6.1. Продолжительность периода зимнего намораживания, дни /8/

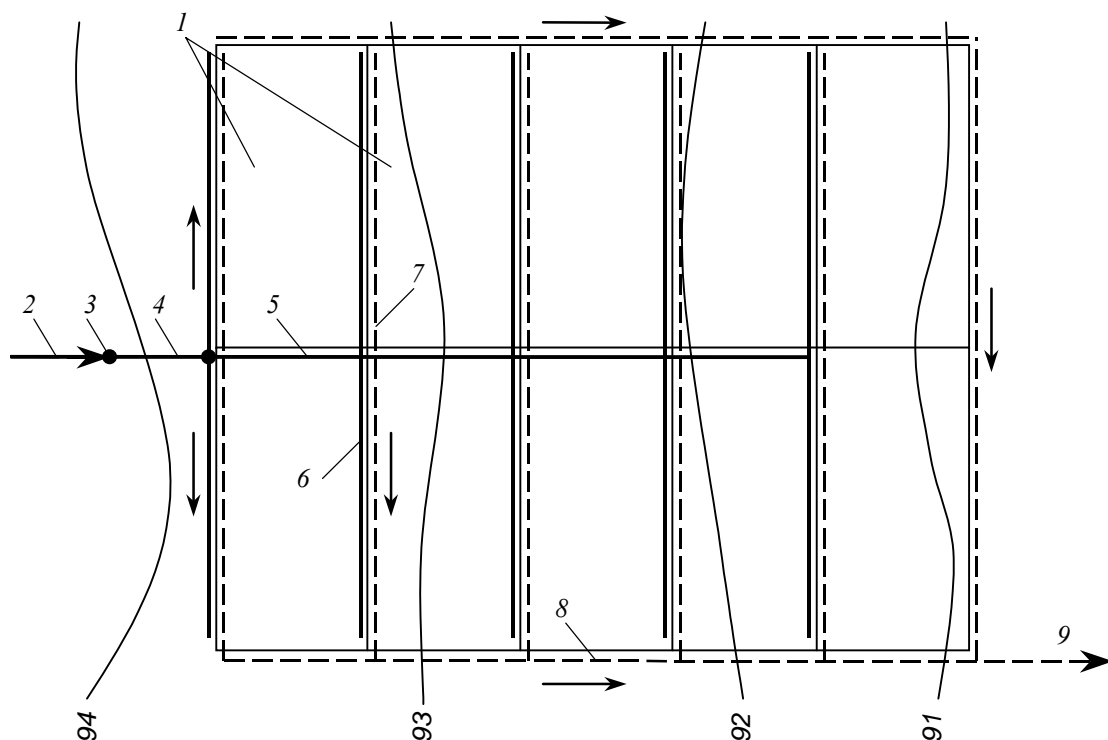


Рис. 6.2. Схема полей орошения

1 – карты; 2 – подача стоков; 3 – распределительный колодец; 4 – магистральный канал; 5 – распределительный канал; 6 – картовый ороситель; 7 – дренажная сеть; 8 – отводная осушительная канава; 9 – выпуск

6.1. Расчет полей фильтрации и орошения

Поля фильтрации

1. В зависимости от вида грунта, среднегодового слоя дождей осадков, глубины залегания грунтовых вод и среднегодовой температуры воздуха по табл. 6.1 принимается нагрузка сточных вод на поля фильтрации q_{ϕ} , м³/(га·сут). Определяется полезная площадь полей фильтрации $F_{\phi,пол}$:

$$F_{\phi,пол} = Q_w / q_{\phi}, \text{ га}, \quad (6.1)$$

где Q_w – суточный расход осветленных сточных вод, м³/сут.

2. Определяется площадь резервных полей фильтрации $F_{\phi,рез}$:

$$F_{\phi,рез} = k_{\phi,рез} Q_w / q_{\phi}, \text{ га}, \quad (6.2)$$

где $k_{\phi,рез}$ – коэффициент, учитывающий часть расхода сточной воды, направляемой на резервные участки (значения $k_{\phi,рез}$ не должно превышать для I климатического района – 0,25; для II климатического района – 0,2; для III и IV климатических районов – 0,1).

3. Рассчитывается полная площадь полей фильтрации F_{ϕ} :

$$F_{\phi} = F_{\phi,пол} + F_{\phi,рез} + k_{\phi,в} (F_{\phi,пол} + F_{\phi,рез}), \text{ га}, \quad (6.3)$$

где $k_{\phi,в}$ – коэффициент, учитывающий увеличение площади в связи с устройством вспомогательных сооружений (значение $k_{\phi,в}$ принимается равным до 0,25 при площади полей фильтрации свыше 1000 га, и до 0,35 при площади 1000 га и менее).

4. Рассчитывается требуемая площадь для зимнего намораживания $F_{нам}$:

$$F_{нам} = \frac{Q_w t_{нам} (1 - \beta)}{10^4 (h_{нам} - h_{ос}) \rho}, \text{ га}, \quad (6.4)$$

где $t_{нам}$ – продолжительность зимнего намораживания, дни, принимается по изолиниям на рис. 6.1; β – коэффициент зимней фильтрации, принимается для легких суглинков – 0,3, супесей – 0,45, песков – 0,55; $h_{нам}$ – высота слоя намораживания, не более 1 м (обычно 0,5÷0,6 м); $h_{ос}$ – высота слоя зимних осадков, м; ρ – плотность льда, равная 0,9 т/м³.

5. Если выполняется неравенство $F_{\phi} \geq F_{нам}$, то площадь полей фильтрации обеспечивает пропуск сточных вод в зимний период. В противном случае принимается $F_{\phi} = F_{нам}$.

6. Назначается число карт N_{ϕ} и размеры одной карты в зависимости от рельефа местности, общей площади полей способа обработки почвы. При обработке тракторами площадь одной карты должна быть не менее 1,5 га. Длина карты принимается в 2÷4 раза больше ширины.

Поля орошения

1. Определяется нагрузка сточных вод на поля орошения q_o , как средневзвешенная величина в зависимости от площади, занимаемой различными видами сельскохозяйственных культур:

$$q_o = (q_{o.o} \cdot a_o + q_{o.n} \cdot a_n) / 100, \text{ м}^3 / (\text{га} \cdot \text{сут}), \quad (6.5)$$

где $q_{o.o}$ и $q_{o.n}$ – нагрузка сточных вод на участки, где выращиваются соответственно огородные и полевые сельскохозяйственные культуры, м³/(га·сут), (табл. 6.2); a_o и a_n – доля в общей площади полей орошения, занимаемая соответственно огородными и полевыми сельскохозяйственными культурами, %.

2. Определяется полезная площадь полей орошения $F_{o.пол}$:

$$F_{o.пол} = Q_w / q_o, \text{ га}. \quad (6.6)$$

3. Назначается число карт для полезной площади $N_{o.пол}$ и размеры одной карты. Площадь карт полей орошения принимается до 5÷8 га. Ширина карт принимается в зависимости от вида грунта: для песков – 50 м, для супесей – 80÷100 м, для суглинков – 120÷150 м. Длина карты принимается в 4÷5 раз больше ширины.

4. Рассчитывается резервная площадь полей орошения $F_{o.рез}$:

$$F_{o.рез} = k'_{\phi.рез} Q_w / q_{\phi}, \text{ га}, \quad (6.7)$$

где $k'_{\phi.рез}$ – коэффициент, учитывающий часть расхода сточной воды, направляемой на резервные участки (значения $k'_{\phi.рез}$ принимаются для района со среднегодовой температурой до 5, 10 и 15°С соответственно 1, 0,75 и 0,5); q_{ϕ} – норма нагрузки сточной вод на резервные участки, м³/(га·сут), принимается по табл. 6.1.

Принимается число карт резервных участков $N_{o.рез}$ и размеры одной карты. Ширина карты принимается 50÷100 м, длина – в 2÷4 раза больше ширины.

5. Рассчитывается полная площадь полей орошения F_o :

$$F_o = F_{o.пол} + F_{o.рез} + k_{o.в} (F_{o.пол} + F_{o.рез}), \text{ га}, \quad (6.8)$$

где $k_{o.в}$ – коэффициент, учитывающий увеличение площади в связи с устройством вспомогательных сооружений (значение $k_{o.в}$ принимается равным до 0,25 при площади полей орошения свыше 1000 га, и до 0,35 при площади 1000 га и менее).

6. По формуле (6.4) определяется площадь $F_{нам}$, га, требуемая для зимнего намораживания стоков.

Оросительная и осушительная сети

I. Оросительная сеть

Магистральный канал оросительной сети рассчитывают по общему максимальному секунднему расходу, поступающему на поля фильтрации или орошения. Распределительные каналы рассчитывают по суммарному расходу сточной воды, поступающей на карты, орошаемые одновременно и примыкающие к данному каналу.

1. Определяется число карт, орошаемых одновременно $N_{од}$:

$$N_{од} = N_{пол} / t_{м.п}, \quad (6.9)$$

где $N_{пол}$ – число карт полезной площади полей; $t_{м.п}$ – продолжительность межполивного периода, принимается в пределах 5÷10 сут в зависимости от фильтрующей способности грунта, уровня подземных вод и др. условий.

2. Вычисляется расход воды, поступающей на одну карту q'_{max} :

$$q'_{max} = q_{max} / N_{од}, \text{ л/с}, \quad (6.10)$$

где q_{max} – максимальный секундный расход сточной воды, л/с.

3. В соответствии с планом полей намечается схема распределения воды по картам. Принимаются длины участков оросительной сети.

4. Производится гидравлический расчет участков оросительной сети, определяются размеры, уклоны, наполнения и скорости движения воды в каналах /1, 4/.

Оросительные каналы, лотки и канавы должны иметь уклоны, соответствующие уклонам карт. Наименьший уклон для картковых оросителей составляет 0,001, для распределительных и магистральных каналов – 0,0005.

Минимальная незаиливающая скорость для картковых оросителей, распределительных и магистральных каналов принимается равной соответственно 0,3, 0,4 и 0,5 м/с.

Земляные канавы имеют трапециевидальное сечение, канавы и лотки – прямоугольное с облицовкой. Наименьшие размеры лотков составляют 0,2×0,2 м, минимальный диаметр труб – 100 мм.

5. Расчет ведется в табличной форме (табл. 6.3).

Таблица 6.3

Форма для гидравлического расчета оросительной сети полей фильтрации и орошения

Участок	Расчетный расход, л/с	Длина канала, м	Ширина канала, мм	Наполнение канала, мм	Уклон	Скорость, м/с
...
...

6. Определяется отметка дна в начальной точке магистрального канала $Z_{м.к}$:

$$Z_{м.к} \geq Z_{к} + h_{нам} + i_{к.ор}l_{к.ор} + i_{р.к}l_{р.к} + i_{м.к}l_{м.к}, \text{ м}, \quad (6.11)$$

где $Z_{к}$ – отметка поверхности карты, наиболее удаленной и высоко расположенной по отношению к начальной точке магистрального канала, м; $i_{к.ор}$, $i_{р.к}$, $i_{м.к}$ – уклоны картового оросителя, распределительного и магистрального каналов; $l_{к.ор}$, $l_{р.к}$, $l_{м.к}$ – длина картового оросителя, распределительного и магистрального каналов, м.

II. Осушительная сеть

1. В зависимости от грунтовых условий и глубины залегания подземных вод выбирается открытый или закрытый вид осушительной сети. Производится трассировка дренажных каналов и труб.

2. Рассчитывается модуль стока $q_{др}$:

$$q_{др} = \frac{k_n q_n t_{м.н} K_{о.с}}{86,4 t_{др}}, \text{ л/(с·га)}, \quad (6.12)$$

где k_n – коэффициент просачивания, в среднем равный 0,5; q_n – суточная нагрузка сточных вод (для полей фильтрации и орошения соответственно $q_{ф}$ и $q_{о}$), м³/(га·сут); $K_{о.с}$ – коэффициент неравномерности поступления воды в осушительную сеть, принимается равным 1,5; $t_{др}$ – продолжительность отведения дренажной воды с карты, обычно равная $(0,4 \div 0,5)t_{м.н}$, сут.

3. Рассчитывается высота слоя воды, отводимой за одни сутки $h_{омв}$:

$$h_{омв} = \frac{k_n q_n t_{м.н} K_{о.с}}{10^4 t_{др}}, \text{ м/сут}. \quad (6.13)$$

4. Определяется расстояние между дренажными трубами или осушительными канавами $l_{др}$:

$$l_{др} = 0,2(H - H_{ос}) \sqrt{\frac{k_{ф}}{h_{омв}}}, \text{ м}, \quad (6.14)$$

где H – заложение дренажной трубы или глубина осушительной канавы, м; $H_{ос}$ – глубина осушаемого слоя, равная $0,6 \div 1$ м в зависимости от вида сельскохозяйственных культур; $k_{ф}$ – коэффициент фильтрации, определяемый по [2] или табл. 6.4.

5. Определяется расчетный расход в конце каждой дренажной трубы или осушительной канавы $Q_{др}$, а также расход дренажной воды в отводной канаве $Q_{омв}$:

$$Q_{др} = q_{др} L l_{др} / 10000, \text{ л/с}; \quad (6.15)$$

$$Q_{омв} = q_{др} F_{пол}, \text{ л/с}, \quad (6.16)$$

где L – длина карты, м; $F_{пол}$ – полезная площадь полей фильтрации или орошения, га.

Таблица 6.4

Коэффициент фильтрации для различных грунтов

Грунт	Эффективный диаметр зерен грунта, мм	Коэффициент фильтрации	
		см/с	м/сут
Песчаный	1,2 ÷ 0,12	1 ÷ 0,01	864 ÷ 8,64
Песчаный с примесью глины	0,12 ÷ 0,076	0,01 ÷ 0,004	8,64 ÷ 3,46
Песчано-глинистый	0,076 ÷ 0,038	0,004 ÷ 0,001	3,46 ÷ 0,86
Проницаемый глинистый	< 0,038	< 0,001	< 0,86

6. В соответствии с расходом Q_{op} и $Q_{отв}$ принимаются размеры поперечного сечения каждой осушительной канавы или дренажной трубы, а также скорость воды и наполнение в них /1, 4/.

Закрытый дренаж укладывают из неглазурированных керамических труб диаметром 75÷100 мм или из асбестоцементных труб диаметром 100 мм с уклоном не менее 0,002. Открытые осушительные канавы имеют трапецеидальную форму поперечного сечения с боковыми стенками под углом естественного откоса грунтов. Уклон канав принимается не менее 0,005.

6.2. Примеры расчетов

ПРИМЕР 6.1

Исходные данные. Суточный расход городских сточных вод $Q_w = 7360 \text{ м}^3/\text{сут}$; среднегодовая температура воздуха $T = 3,9^\circ\text{C}$; среднегодовая высота слоя атмосферных осадков – 610 мм; высота слоя зимних осадков $h_{oc} = 176 \text{ мм}$; грунты на территории – супесь; климатической район – II В (Новгородская обл.); уровень подземных вод – 2,4 м от поверхности земли; уклон территории – в пределах 0,003÷0,004.

Задание. Рассчитать поля фильтрации.

Расчет. По табл. 6.1 находим нагрузку сточных вод на поля фильтрации $q_\phi = 100 \text{ м}^3/(\text{га}\cdot\text{сут})$. Так как среднегодовая высота слоя атмосферных осадков находится в пределах 500÷700 мм, снижаем норму нагрузки на 15%: $q_\phi = 85 \text{ м}^3/(\text{га}\cdot\text{сут})$.

По формуле (6.1) определяем полезную площадь полей фильтрации:

$$F_{\phi.\text{пол}} = 7360/85 = 86,6 \text{ га.}$$

По формуле (6.2) определяем площадь резервных полей фильтрации, при значении коэффициента резерва для II климатического района $k_{\phi.\text{рез}} = 0,2$:

$$F_{\phi.\text{рез}} = 0,2 \cdot 7360/85 = 17,3 \text{ га.}$$

Принимаем коэффициент, учитывающий увеличение площади в связи с устройством вспомогательных сооружений $k_{\phi.\text{в}} = 0,35$, затем по формуле (6.3) рассчитываем полную площадь полей фильтрации:

$$F_\phi = 86,6 + 17,3 + 0,35(86,6 + 17,3) = 140,3 \text{ га.}$$

Для Новгородской области по рис. 6.1 находим продолжительность зимнего намораживания $t_{нам} = 30$ дней; для супесей коэффициент зимней фильтрации составляет $\beta = 0,45$. Принимаем высоту слоя намораживания 0,6 м.

По формуле (6.4) рассчитываем требуемую площадь для зимнего намораживания:

$$F_{нам} = \frac{7360 \cdot 30(1 - 0,45)}{10^4(0,6 - 0,176)0,9} = 31,8 \text{ га.}$$

Неравенство $F_\phi \geq F_{нам}$ выполняется, следовательно, площадь полей фильтрации обеспечивает пропуск сточных вод в зимний период.

Принимаем обработку почву тракторами, число карт $N_{\phi} = 64$. Площадь одной карты составляет: $F_{\phi}/N_{\phi} = 140,3/64 = 2,19$ га. Принимаем размер каждой карты 100×220 м.

ПРИМЕР 6.2

Исходные данные. Суточный расход городских сточных вод $Q_w = 3190$ м³/сут; максимальный секунднй расход $q_{max} = 66,5$ л/с; среднегодовая температура воздуха $T = 6,1$ °С; среднегодовая высота слоя атмосферных осадков – 451 мм; высота слоя зимних осадков $h_{oc} = 159$ мм; грунты на территории – пески крупнозернистые; климатической район – III В (Саратовская обл.); уровень подземных вод – 4,1 м от поверхности земли; уклон территории – в пределах $0,004 \div 0,006$. Доля огородных сельскохозяйственных культур в общей площади полей составляет 45%, полевых – 55%.

Задание. Рассчитать поля орошения.

Расчет. По табл. 6.2 находим нагрузку сточных вод на участки, где выращиваются огородные и полевые сельскохозяйственные культуры: $q_{o.o} = 80$ м³/(га·сут) и $q_{o.n} = 40$ м³/(га·сут).

По формуле (6.5) рассчитываем средневзвешенную нагрузку сточных вод на поля орошения:

$$q_o = (80 \cdot 45 + 40 \cdot 55) / 100 = 58 \text{ м}^3 / (\text{га} \cdot \text{сут}).$$

По формуле (6.6) находим полезную площадь полей орошения:

$$F_{o.пол} = 3190 / 58 = 55 \text{ га.}$$

Принимаем карты полей орошения размером 50×250 м количеством $N_{o.пол} = 10000 \cdot F_{o.пол} / (50 \cdot 250) = 10000 \cdot 55 / (50 \cdot 250) = 44$.

По формуле (6.7) рассчитываем площадь резервных полей орошения при найденной по табл. 6.1 норме нагрузки сточной вод на резервные участки $q_{\phi} = 235$ м³/(га·сут):

$$F_{o.рез} = 0,75 \cdot 3190 / 235 = 10,2 \text{ га.}$$

Принимаем карты резервных участков полей орошения размером 50×150 м количеством $N_{o.рез} = 10000 \cdot F_{o.рез} / (50 \cdot 150) = 10000 \cdot 10,2 / (50 \cdot 150) \approx 14$.

По формуле (6.8) определяем полную площадь полей орошения:

$$F_o = 55 + 10,2 + 0,3(55 + 10,2) = 84,8 \text{ га.}$$

Для Саратовской области по рис. 6.1 находим продолжительность зимнего намораживания $t_{нам} = 45$ дней; для песков коэффициент зимней фильтрации составляет $\beta = 0,55$. Принимаем высоту слоя намораживания $0,5$ м.

По формуле (6.4) рассчитываем требуемую площадь для зимнего намораживания:

$$F_{нам} = \frac{3190 \cdot 45(1 - 0,55)}{10^4(0,5 - 0,159)0,9} = 21,1 \text{ га.}$$

Неравенство $F_o \geq F_{нам}$ выполняется, следовательно, площадь полей орошения

обеспечивает пропуск сточных вод в зимний период.

Высоту валиков принимаем на 0,1 м выше высоты слоя намораживания: $h_g = 0,6$ м.

ПРИМЕР 6.3

Исходные данные. Исходные данные по климатическим, грунтовым условиям и расходу сточной воды взяты из примера 6.2.

Задание. Рассчитать оросительную сеть полей орошения, запроектированных в примере 6.2.

Расчет. Приняв продолжительность межполивного периода $t_{м.п} = 6$ сут, по формуле (6.9) определяем число карт, орошаемых одновременно:

$$N_{од} = 44/6 \approx 8.$$

По формуле (6.10) рассчитываем расход воды, поступающей на одну карту:

$$q'_{max} = 66,5/8 = 8,31 \text{ л/с.}$$

Составляем схему распределения сточной воды по полям орошения на 44-х картах размером каждой 50×250 м – см. рис. 6.3.

Производим гидравлический расчет оросительной сети каналов с использованием таблиц /4/. Картовые оросители проектируем трапецеидального профиля с коэффициентом откоса $m = 2$; распределительные и магистральные каналы – прямоугольного профиля с облицовкой. Результаты расчета приведены в табл. 6.5.

Таблица 6.5

Гидравлический расчет оросительной сети полей орошения

Участок	Расчетный расход, л/с	Длина канала, м	Ширина канала, мм	Наполнение канала, мм	Уклон	Скорость, м/с
Картовый ороситель 1–2	8,31	250	200	77	0,001	0,31
Распределительный канал:						
2–3	16,63	50	200	112	0,0055	0,72
3–4	33,25	50	300	125	0,0055	0,89
4–5	49,88	50	300	170	0,0055	0,98
5–6	66,5	350	400	160	0,0055	1,05
6–7	66,5	250	400	230	0,002	0,72
Магистральный канал 7–8	66,5	40	400	230	0,002	0,72

По формуле (6.11) определяем отметку дна в начальной точке магистрального канала:

$$Z_{м.к} \geq 91 + 0,5 + 0,001 \cdot 250 + 0,0055 \cdot (50 + 50 + 50 + 350) + 0,002 \cdot 250 + 0,002 \cdot 40 = 95,08 \text{ м.}$$

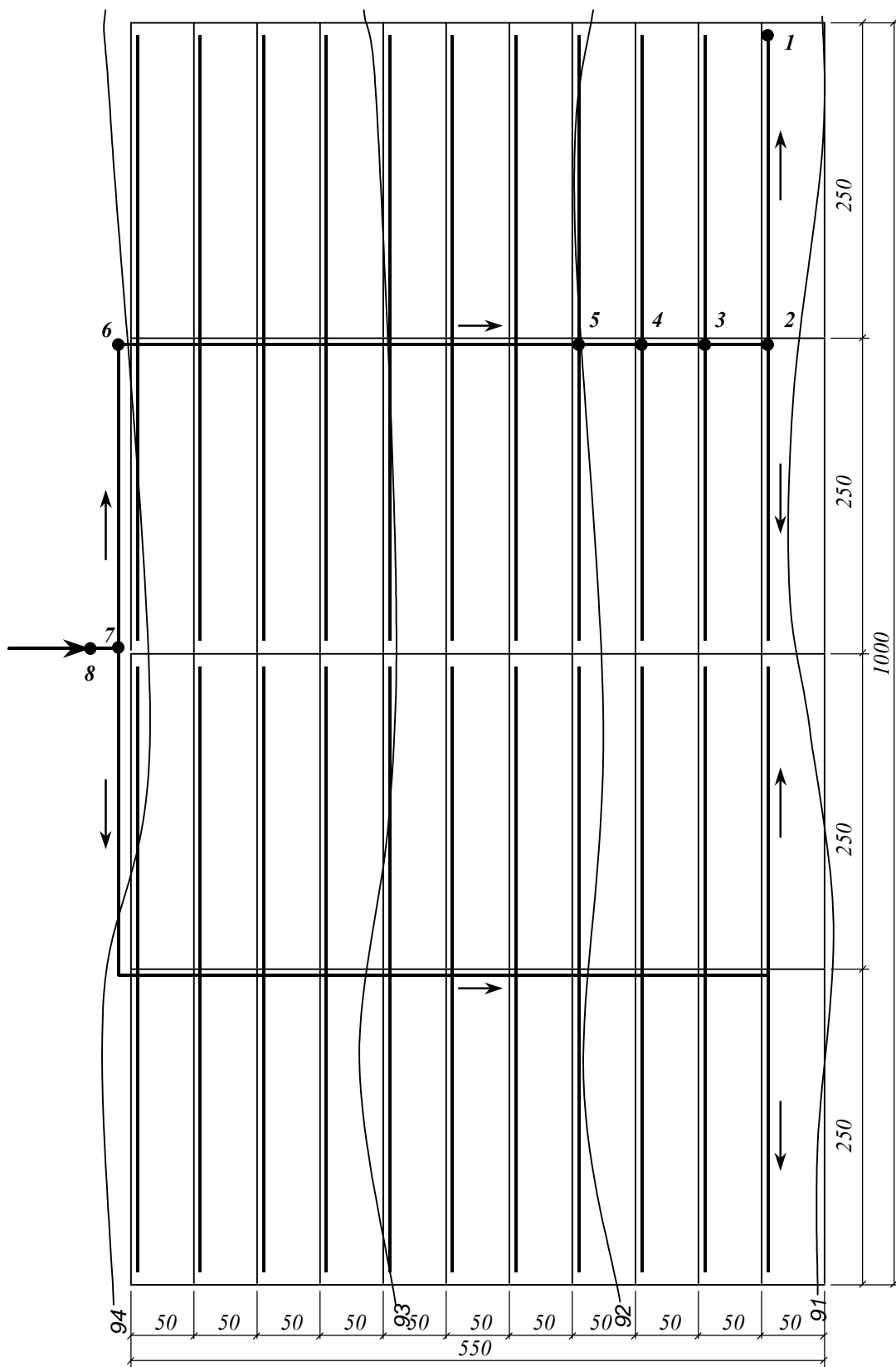


Рис. 6.3. Схема оросительной сети полей орошения
1...8 – расчетные точки

ПРИМЕР 6.4

Исходные данные. Исходные данные по климатическим, грунтовым условиям и расходу сточной воды взяты из примера 6.2. Схема расположения карт полей орошения приведена на рис. 6.3.

Задание. Рассчитать осушительную сеть полей орошения, запроектированных в примере 6.2.

Расчет. Поскольку грунтовые воды залегают на достаточно большой глубине, а грунты – крупнозернистые пески, предусматриваем открытую дренажную сеть. Составляем схему расположения дренажных канав на территории полей орошения – рис. 6.4.

По формуле (6.12) рассчитываем модуль стока:

$$q_{др} = \frac{0,5 \cdot 58 \cdot 6 \cdot 1,5}{86,4 \cdot 3} = 1,01 \text{ л/(с} \cdot \text{га)}.$$

По формуле (6.13) определяем высоту слоя воды, отводимой за одни сутки:

$$h_{отв} = \frac{0,5 \cdot 58 \cdot 6 \cdot 1,5}{10^4 \cdot 3} = 0,0087 \text{ м/сут.}$$

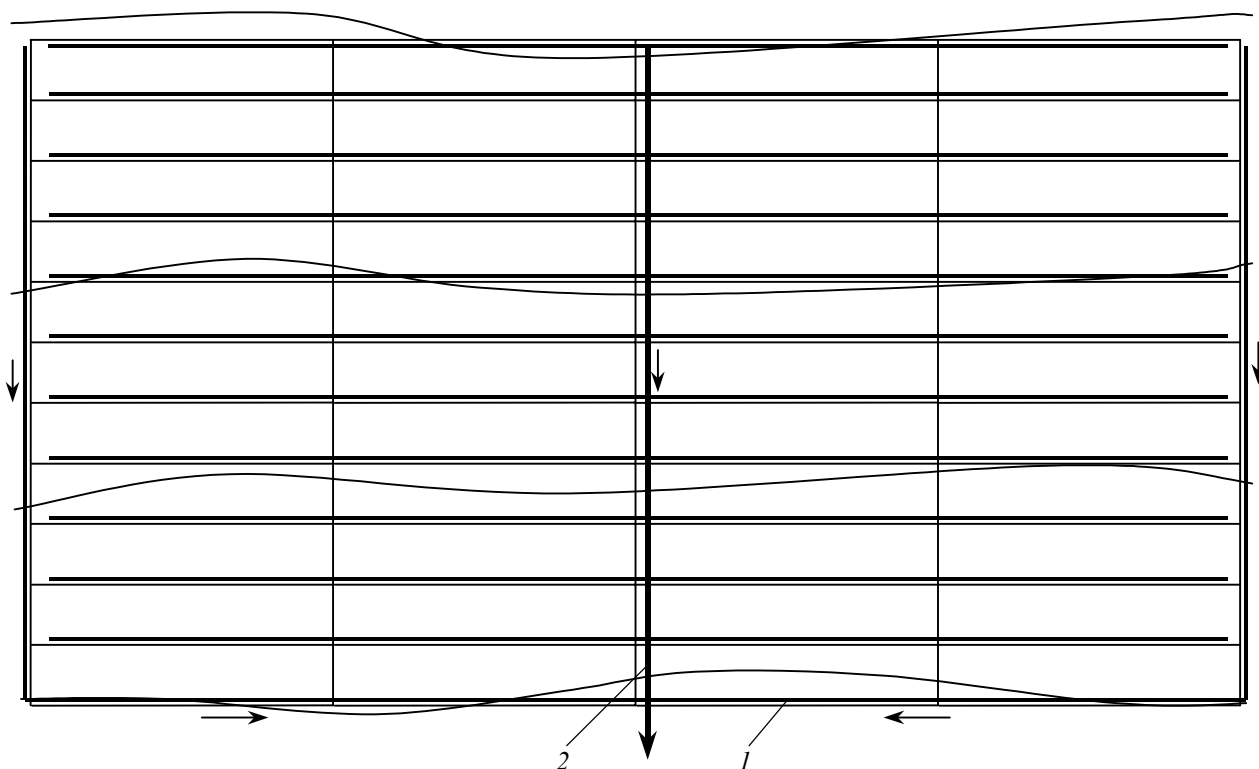


Рис. 6.4. Схема осушительной сети полей орошения

1 – осушительная канава; 2 – отводная канава

Назначаем глубину осушительной канавы $H = 2$ м, по табл. 6.4 находим коэффициент фильтрации $k_{\phi} = 864$ м/сут и определяем расстояние между осушительными канавами по формуле (6.14):

$$l_{op} = 0,2(2-1)\sqrt{\frac{864}{0,0087}} = 63 \text{ м.}$$

Принимаем по одной осушительной канаве на каждую карту полей орошения, следовательно, $l_{op} = 50$ м. Согласно формулам (6.15, 6.16) определяем расчетный расход в конце каждой осушительной канавы, а также расход дренажной воды в отводной канаве:

$$Q_{op} = 1,01 \cdot 250 \cdot 50 / 10000 = 1,26 \text{ л/с};$$

$$Q_{отв} = 1,01 \cdot 55 = 55,6 \text{ л/с.}$$

По таблицам /4/ подбираем каналы трапециевидального профиля с коэффициентом откоса $m = 2$:

- осушительная канава шириной по дну 0,2 м и уклоном 0,002 при расходах до $1,26 \cdot 2 = 2,52$ л/с имеет наполнение до 0,04 м и скорость течения до 0,28 м/с;
- отводная канава шириной по дну 0,4 м и уклоном 0,0055 при расходах до 55,6 л/с имеет наполнение до 0,1 м и скорость течения до 0,9 м/с.

7. БИОЛОГИЧЕСКИЕ ПРУДЫ

Биологические пруды представляют собой каскад прудов, состоящий из 2÷5 последовательных ступеней, через которые с небольшой скоростью протекает осветленная или биологически очищенная вода (см. рис. 7.1). Различают пруды с естественной или искусственной аэрацией, которые могут быть использованы:

- как самостоятельные сооружения биологической очистки. В этом случае производительность очистной станции не должна превышать 15000 м³/сут для прудов с искусственной аэрацией и 5000 м³/сут для прудов с естественной аэрацией. При БПК_{полн} стоков, меньшем 200 мг/л применяется естественная аэрация, при большем значении – искусственная аэрация. Сточная вода предварительно должна быть пропущена через решетки и первичные отстойники;
- как пруды глубокой очистки. Пропускная способность прудов с естественной аэрацией не превышает 10000 м³/сут, при искусственной аэрации пропускная способность неограниченна. Если значение БПК_{полн} сточных вод не превышает 25 мг/л, исполь-

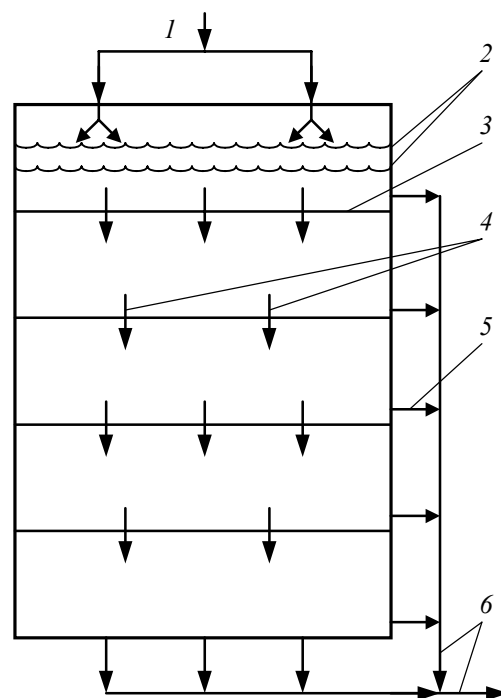


Рис. 7.1. Биологический пруд из пяти ступеней

1 – подача сточной воды; 2 – распределительные перегородки из фашины или плетня; 3 – разделительные валики; 4 – перепускные лотки; 5 – запасные выпуски; 6 – отводные каналы

зуется естественная аэрация, при значении БПК_{полн} до 50 мг/л – искусственная аэрация.

Бактерии используют для окисления загрязнений кислород, выделяемый водорослями в процессе фотосинтеза, а также кислород из воздуха. Водоросли, в свою очередь, потребляют CO₂, фосфаты и аммонийный азот, выделяемые при биохимическом разложении органических веществ. Поэтому биологические пруды обеспечивают более глубокую очистку сточных вод, чем сооружения искусственной биологической очистки.

В теплый период года БПК_{полн} очищенных в биологических прудах стоков уменьшается до 5÷6 мг/л, а содержание взвешенных веществ – до 15÷30 мг/л. В холодное время года БПК_{полн} может снижаться до 3÷4 мг/л, а содержание взвешенных веществ – до 10 мг/л.

При круглогодичной эксплуатации допускается применение биологических прудов с естественной аэрацией для IV климатической зоны, пруды с искусственной аэрацией применимы в III–IV климатических зонах. В остальных климатических зонах биологические пруды работают в основном в теплое время года.

Биологические пруды должны располагаться на нефилтрующих или слабофилтрующих грунтах. По отношению к жилым массивам пруды необходимо располагать с подветренной стороны, направление движения воды в прудах должно быть перпендикулярно направлению ветра.

Искусственная аэрация прудов может быть механической или пневматической. В первом случае на биологических прудах устанавливают механические аэраторы на понтонах, во втором – по дну прокладываются перфорированные полиэтиленовые трубы.

Для повышения глубины очистки воды до значения БПК_{полн}, равного 3 мг/л и снижения содержания биогенных элементов, рекомендуется разведение в последней ступени прудов высшей водной растительности – камыша, тростника и т.д.

Форму биологических прудов в плане принимают в зависимости от типа аэрации: прямоугольной (при пневматической и механической аэрации) и круглой (при планетарных аэраторах). Соотношение между длиной l и шириной b ступеней биологических прудов, принимается при естественной аэрации 20÷30 и более, при искусственной аэрации – не более 1÷3.

Гидравлическая глубина прудов с естественной аэрацией равна 0,5÷1 м, с искусственной аэрацией – 3÷4,5 м в зависимости от типа аэратора.

При расчете прудов определяют их размеры, обеспечивающие необходимую продолжительность пребывания в них сточных вод. В основе расчета лежит определение скорости окисления, которую оценивают по БПК и принимают для вещества, разлагающегося наиболее медленно.

7.1. Расчет биологических прудов

1. Пруды с естественной аэрацией

1. Принимается количество ступеней биологического пруда (от 2-х до 5-ти) таким образом, чтобы эффект очистки по БПК_{полн} на каждой ступени был 50÷60%.

2. Определяется продолжительность пребывания стоков t_{lag} в зимний и летний период в каждой ступени, за исключением последней:

$$t_{lag} = \frac{1}{K_{lag} k} \lg \frac{L_{en}}{L_{ex}}, \text{ сут}, \quad (7.1)$$

где L_{en} – БПК_{полн} воды, поступающей в данную ступень, мг/л; L_{ex} – БПК_{полн} воды, выходящей из данной ступени, мг/л; K_{lag} – коэффициент объемного использования каждой ступени пруда (см. ниже); k – константа скорости потребления кислорода, сут⁻¹ (см. ниже).

Значения коэффициента K_{lag} для искусственных прудов с отношением длины секций к ширине 20:1 и более принимается равным 0,8÷0,9, при отношении 1:1 ÷ 3:1 или для прудов, построенных на основе естественных местных водоемов (озеро, запруда и т.п.) – 0,35, для промежуточных случаев K_{lag} определяется интерполяцией.

Константа k при отсутствии экспериментальных данных для всех промежуточных ступеней биологического пруда может быть принята равной 0,1 сут⁻¹. Для прудов глубокой очистки следует k принимать, сут⁻¹: для 1-й ступени – 0,07; для 2-й ступени – 0,06; для остальных ступеней пруда – 0,05÷0,04; для одноступенчатого пруда $k = 0,06$ сут⁻¹.

При температуре воды T , отличающейся от 20°C, константа k должны быть скорректированы по формулам:

$$\text{для температуры воды } 5\div 30^\circ\text{C}: \quad k_T = k \cdot 1,047^{T-20}, \text{ сут}^{-1}; \quad (7.2)$$

$$\text{для температуры воды } 0\div 5^\circ\text{C}: \quad k_T = k [1,12(T+1)^{-0,022}]^{T-20}, \text{ сут}^{-1}.$$

3. Определяется продолжительность пребывания стоков в последней ступени t_{fin} (в летний и зимний периоды):

$$t_{fin} = \frac{1}{K_{lag} k'} \lg \frac{L'_{en} - L_{fin}}{L'_{ex} - L_{fin}}, \text{ сут}, \quad (7.3)$$

где L'_{en} – БПК_{полн} воды, поступающей в последнюю ступень, мг/л; L'_{ex} – БПК_{полн} воды, выходящей из последней ступени, мг/л; L_{fin} – остаточная БПК_{полн}, обусловленная внутриводоемными процессами и принимаемая летом 2÷3 мг/л (для цветущих прудов – до 5 мг/л), зимой 1÷2 мг/л; k' – константа скорости потребления кислорода, равная 0,07 сут⁻¹ для обычной очистки (при температуре 20°C).

4. За расчетное время t_{lag} пребывания воды на каждой ступени принимается наибольшая продолжительность по летнему и зимнему периоду. Рассчитывается объем W_{lag} каждой ступени пруда:

$$W_{lag} = Q_w t_{lag}, \text{ м}^3, \quad (7.4)$$

где Q_w – суточный расход сточных вод, м³/сут.

5. Определяется площадь F_{lag} каждой ступени, требуемая для естественной аэрации в зимний и летний периоды:

$$F_{lag} = \frac{Q_w C_a (L_{en} - L_{ex})}{K_{lag} (C_a - C_{ex}) r_a}, \text{ м}^2, \quad (7.5)$$

где C_a – растворимость кислорода воздуха в воде, мг/л, рассчитывается по формуле (3.23); C_{ex} – требуемая концентрация кислорода в воде, выходящей из пруда, принимаемая не менее 1÷2 мг/л; r_a – величина атмосферной реаэрации при дефиците кислорода, равном единице, принимаемая 3÷4 г/(м²·сут).

6. За расчетную площадь F_{lag} каждой ступени принимается наибольшее значение площади по летнему и зимнему периоду. Определяется максимальная рабочая глубина каждой ступени пруда с учетом требования кислородного режима H_{lag} :

$$H_{lag} = W_{lag}/F_{lag}, \text{ м.} \quad (7.6)$$

Рассчитанная глубина корректируется в соответствии со значением БПК_{полн} воды, поступающей на данную ступень (L_{en}). При L_{en} больше 100 мг/л рабочая глубина пруда не должна превышать 0,5 м, при L_{en} до 100 мг/л – 1 м; для прудов глубокой очистки с L_{en} от 20 до 40 мг/л – 2 м, с L_{en} до 20 мг/л – 3 м. Если пруд замерзает зимой, глубина увеличивается на 0,5 м.

7. В соответствии с рабочей глубиной H_{lag} корректируется площадь ступеней F_{lag} . Принимается количество параллельно работающих секций прудов (не менее двух) и назначаются размеры каждой секции всех ступеней пруда. Отношение длины к ширине пруда должно быть не менее 20:1.

II. Пруды с искусственной аэрацией

1. Принимается количество ступеней биологического пруда N (от 2-х до 5-ти) таким образом, чтобы эффект очистки по БПК_{полн} на каждой ступени был 50÷60%.

2. Определяется продолжительность пребывания стоков t_{lag} в каждой ступени в летний и зимний периоды:

$$t_{lag} = \frac{N}{2,3k_d} \left(\sqrt[N]{\frac{L_{en}}{L_{en} - L_{fin}}} - 1 \right), \text{ сут,} \quad (7.7)$$

где k_d – динамическая константа скорости потребления кислорода, определяемая по формуле:

$$k_d = \beta_1 k, \quad (7.8)$$

здесь β_1 – коэффициент, который определяется по формуле:

$$\beta_1 = 1 + 120v_{lag}, \quad (7.9)$$

здесь v_{lag} – скорость движения воды в пруде, м/с, которая создается аэраторами или перемещением воды по коридорам лабиринтного типа. Если $v_{lag} > 0,05$ м/с, то $\beta_1 = 7$.

3. За расчетную продолжительность пребывания сточной воды в каждой ступени принимается наибольшее значение t_{lag} из двух периодов. По формуле (7.4) рассчитывается объем W_{lag} каждой ступени пруда.

4. В зависимости от БПК_{полн} поступающей сточной воды принимается глубина пруда H_{lag} :

БПК _{полн} , мг/л	> 100	> 40	> 20	≤ 20
H_{lag} , м	≤ 0,5	≤ 1	≤ 2	≤ 3

5. Рассчитывается площадь каждой ступени F_{lag} :

$$F_{lag} = W_{lag}/H_{lag}, \text{ м}^2. \quad (7.10)$$

6. Принимается тип аэратора (механический или пневматический). В качестве пневматического аэратора применяются перфорированные трубы или трубы-диффузоры. Расчет пневматической системы аэрации проводится по формулам (3.23) – (3.29). В биологических прудах трубы монтируются перпендикулярно по-

току воды на расстоянии 20÷30 см от дна, в прудах доочистки трубы-диффузоры прокладываются по дну.

7. В случае применения механических аэраторов их количество N_{ma} для каждой ступени определяется по формуле:

$$N_{ma} = \frac{q_O(L_{en} - L_{ex})W_{lag}}{24000K_T K_3 \left(\frac{C_a - C_{ex}}{C_a} \right) t_{lag} Q_{ma}}, \quad (7.11)$$

где q_O – удельный расход кислорода воздуха, мг/мг снятой БПК_{полн}, см. пояснения к формуле (3.24); K_T – коэффициент, учитывающий температуру сточных вод, определяется по формуле (3.25); K_3 – коэффициент качества воды, см. пояснения к формуле (3.24); Q_{ma} – производительность аэратора по кислороду, кг/ч, принимаемая по паспортным данным.

Характеристики механических аэраторов приведены в табл. 9, 10, 11 Приложений.

8. Количество аэраторов N_{ma} проверяется на условие обеспечения движения воды в любой точке пруда со скоростью не менее 0,05 м/с. Расчетные формулы зависят от типа механического аэратора.

Для дискового аэратора поверхностного типа определение количества аэраторов N'_{ma} , исходя из условия обеспечения скорости воды, проводится в следующей последовательности.

9. Рассчитывается скорость подъема воды на входе в аэратор v_0 , скорость вращения у периферии аэратора v_p , радиальная v_r и абсолютная v_{abs} скорости выхода жидкости из аэратора:

$$\begin{aligned} v_0 &= \sqrt{2g(h_d + h_a)}, \text{ м/с;} \\ v_p &= \pi d_a n_0, \text{ м/с;} \\ v_r &= \pi n_0 (d_a - l_a), \text{ м/с;} \\ v_{abs} &= \sqrt{v_r^2 + v_p^2}, \text{ м/с,} \end{aligned} \quad (7.12)$$

где h_d – глубина погружения диска аэратора, равная 0,08 ÷ 0,1 м; h_a – высота лопасти аэратора, м; d_a – диаметр аэратора, м; n_0 – частота вращения аэратора, с⁻¹; l_a – длина лопасти аэратора, м. Характеристики дисковых аэраторов приведены в табл. 11 Приложений.

10. Определяется расход жидкости, перекачиваемый одним аэратором Q_a :

$$Q_a = \frac{\pi^2 d_a^2}{2n_a} \left(v_0 - \frac{g}{3n_0 n_a} \right) \left(1 - \frac{l_a}{d_a} \right), \text{ м}^3/\text{с,} \quad (7.13)$$

где n_a – количество лопастей аэратора.

11. Определяется поверхностная скорость движения воды v_x :

$$v_x = v_0 [(H_{lag} - 0,2)/0,2]^{0,14}, \text{ м/с,} \quad (7.14)$$

где v_0 – придонная скорость воды, на глубине 0,2 м от дна, равная не менее 0,05 м/с.

12. Определяется величина площади, обслуживаемой одним аэратором F_a :

$$F_a = \left(\frac{2k_e^2 Q_a v_{abs}}{\pi v_x^2 d_a} \right)^2, \text{ м}^2, \quad (7.15)$$

где k_e – эмпирический коэффициент, равный 1,14.

13. Рассчитывается количество аэраторов на каждой ступени пруда N'_{ma} :

$$N'_{ma} = F_{lag}/F_a. \quad (7.16)$$

За расчетное количество аэраторов из двух значений N_{ma} и N'_{ma} выбирается наибольшее.

14. Принимается количество параллельно работающих секций прудов (не менее двух). Определяются размеры каждой секции всех ступеней пруда в соответствии с габаритами аэраторов.

7.2. Примеры расчетов

ПРИМЕР 7.1

Исходные данные. Суточный расход городских сточных вод $Q_w = 5640 \text{ м}^3/\text{сут}$; БПК_{полн} поступающих сточных вод $L_{en} = 18 \text{ мг/л}$; БПК_{полн} очищенных сточных вод $L_{ex} = 5 \text{ мг/л}$; среднемесячная температура сточной воды за летний период $T_w = 22^\circ\text{C}$; среднемесячная температура сточной воды за зимний период $T_w = 15^\circ\text{C}$.

Задание. Рассчитать биологические пруды глубокой очистки.

Расчет. Принимаем две ступени биологических прудов. Так как БПК_{полн} направляемой на доочистку сточной воды не превышает 25 мг/л, предусматриваем естественную аэрацию прудов. Назначаем эффект очистки по БПК_{полн} на первой ступени 50%, т.е. значение БПК_{полн} после очистки на этой ступени составит 9 мг/л.

По формулам (7.2) определяем константу скорости потребления кислорода в летний и зимний периоды для первой ступени пруда:

$$k_T^{лет} = 0,07 \cdot 1,047^{22-20} = 0,077 \text{ сут}^{-1}; \quad k_T^{зим} = 0,07 \cdot 1,047^{15-20} = 0,056 \text{ сут}^{-1}.$$

Принимаем конструкцию прудов с отношением длины каждой секции к ширине 20:1, следовательно, коэффициент объемного использования равен $K_{lag} = 0,85$.

По формуле (7.1) определяем продолжительность пребывания стоков в зимний и летний период в первой ступени:

$$t_{lag1}^{лет} = \frac{1}{0,85 \cdot 0,077} \lg \frac{18}{9} = 4,62 \text{ сут}; \quad t_{lag1}^{зим} = \frac{1}{0,85 \cdot 0,056} \lg \frac{18}{9} = 6,37 \text{ сут}.$$

Расчетное время пребывания сточной воды на первой ступени равно наибольшему значению: $t_{lag1} = 6,37 \text{ сут}$.

Для второй (последней) ступени биологических прудов определяем по формулам (7.2) константу скорости потребления кислорода, исходя из величины $k = 0,06 \text{ сут}^{-1}$:

$$k_T^{лет} = 0,06 \cdot 1,047^{22-20} = 0,066 \text{ сут}^{-1}; \quad k_T^{зим} = 0,06 \cdot 1,047^{15-20} = 0,048 \text{ сут}^{-1}.$$

По формуле (7.3) определяем продолжительность пребывания стоков в последней ступени, при назначенном значении остаточной БПК_{полн} летом: $L_{fin}^{лет} = 3 \text{ мг/л}$ и зимой: $L_{fin}^{зим} = 2 \text{ мг/л}$:

$$t_{fin}^{лет} = \frac{1}{0,85 \cdot 0,066} \lg \frac{9-3}{5-3} = 8,53 \text{ сут}; \quad t_{fin}^{зим} = \frac{1}{0,85 \cdot 0,048} \lg \frac{9-2}{5-2} = 9,08 \text{ сут}.$$

Расчетное время пребывания сточной воды на последней ступени равно наибольшему значению: $t_{fin} = 9,08$ сут.

По формуле (7.4) рассчитываем объем каждой ступени пруда (первой и второй):

$$W_{lag1} = 5640 \cdot 6,37 = 35927 \text{ м}^3; \quad W_{lag2} = W_{fin} = 5640 \cdot 9,08 = 51211 \text{ м}^3.$$

По табл. 3.2 находим растворимость кислорода при температуре воды 22°C: $C_T = 8,67$ мг/л; при температуре воды 15°C: $C_T = 9,61$ мг/л. Тогда, при глубине погружения аэраторов $h_a = 0$ м согласно формуле (3.23) растворимость кислорода в воде в летний и зимний периоды составила:

$$C_a^{лет} = \left(1 + \frac{0}{20,6}\right) 8,67 = 8,67 \text{ мг/л}; \quad C_a^{зим} = \left(1 + \frac{0}{20,6}\right) 9,61 = 9,61 \text{ мг/л}.$$

Принимаем требуемую концентрацию кислорода в воде, выходящей из пруда, $C_{ex} = 2$ мг/л и величину атмосферной реаэрации $r_a = 3$ г/(м²·сут), затем вычисляем площадь каждой ступени пруда, требуемой для естественной аэрации в зимний и летний периоды, согласно формуле (7.5).

Для первой ступени:

$$F_{lag1}^{лет} = \frac{5640 \cdot 8,67(18-9)}{0,85(8,67-2)\beta} = 25875 \text{ м}^2; \quad F_{lag1}^{зим} = \frac{5640 \cdot 9,61(18-9)}{0,85(9,61-2)\beta} = 25137 \text{ м}^2.$$

Для второй ступени:

$$F_{lag2}^{лет} = \frac{5640 \cdot 8,67(9-5)}{0,85(8,67-2)\beta} = 11500 \text{ м}^2; \quad F_{lag2}^{зим} = \frac{5640 \cdot 9,61(9-5)}{0,85(9,61-2)\beta} = 11172 \text{ м}^2.$$

За расчетную площадь каждой ступени принимаем наибольшее значение за летний и зимний периоды: $F_{lag1} = 25875 \text{ м}^2$, $F_{lag2} = 11500 \text{ м}^2$.

По формуле (7.6) рассчитываем максимальную рабочую глубину каждой ступени пруда с учетом требования кислородного режима:

$$H_{lag1} = 35927/25875 = 1,39 \text{ м}; \quad H_{lag2} = 51211/11500 = 4,45 \text{ м}.$$

Корректируем рассчитанные глубины в пределах 0,5÷1 м: $H_{lag1} = H_{lag2} = 1$ м.

Тогда площадь каждой ступени составит:

$$F_{lag1} = W_{lag1}/H_{lag1} = 35927/1 \approx 36000 \text{ м}^2; \quad F_{lag2} = W_{lag2}/H_{lag2} = 51211/1 \approx 51000 \text{ м}^2.$$

Принимаем три параллельно работающих биологических пруда по две ступени в каждом, всего шесть секций.

Площадь каждой секции первой ступени: $F_{sec1} = F_{lag1}/3 = 36000/3 = 12000 \text{ м}^2$, размеры секции 24×500 м.

Площадь каждой секции второй ступени: $F_{sec2} = F_{lag2}/3 = 51000/3 = 17000 \text{ м}^2$, размеры секции 24×709 м.

ПРИМЕР 7.2

Исходные данные. Суточный расход городских сточных вод $Q_w = 12400 \text{ м}^3/\text{сут}$; БПК_{полн} поступающих сточных вод $L_{en} = 28 \text{ мг/л}$; БПК_{полн} очищенных сточных вод $L_{ex} = 6 \text{ мг/л}$; среднемесячная температура сточной воды за летний период $T_w = 20^\circ\text{C}$; среднемесячная температура сточной воды за зимний период $T_w = 12^\circ\text{C}$.

Задание. Рассчитать биологические пруды глубокой очистки.

Расчет. Так как БПК_{полн} направляемой на доочистку сточной воды превышает 25 мг/л , предусматриваем искусственную аэрацию вод механическими аэраторами, установленными на понтонах. Принимаем две ступени биологических прудов ($N = 2$), на первой ступени БПК_{полн} сточной воды снижается до 14 мг/л .

Принимаем скорость движения воды в пруде, создаваемую аэраторами $v_{lag} = 0,1 \text{ м/с}$, тогда коэффициент равен: $\beta_1 = 7$.

По формулам (7.2) определяем константу скорости потребления кислорода в летний и зимний периоды для первой ступени пруда, исходя из величины $k = 0,07 \text{ сут}^{-1}$:

$$k_T^{лет} = 0,07 \cdot 1,047^{20-20} = 0,07 \text{ сут}^{-1}; \quad k_T^{зим} = 0,07 \cdot 1,047^{12-20} = 0,049 \text{ сут}^{-1}.$$

Рассчитываем динамическую константу скорости потребления кислорода по формуле (7.8):

$$k_d^{лет} = 7 \cdot 0,07 = 0,49 \text{ сут}^{-1}; \quad k_d^{зим} = 7 \cdot 0,049 = 0,34 \text{ сут}^{-1}.$$

По формуле (7.7) определяем продолжительность пребывания стоков в первой ступени в летний и зимний периоды, при принятых значениях остаточной БПК_{полн} летом: $L_{fin}^{лет} = 3 \text{ мг/л}$ и зимой: $L_{fin}^{зим} = 2 \text{ мг/л}$:

$$t_{lag1}^{лет} = \frac{2}{2,3 \cdot 0,49} \left(\sqrt[2]{\frac{28}{28-3}} - 1 \right) = 0,104 \text{ сут}; \quad t_{lag1}^{зим} = \frac{2}{2,3 \cdot 0,34} \left(\sqrt[2]{\frac{28}{28-2}} - 1 \right) = 0,096 \text{ сут}.$$

За расчетную продолжительность пребывания сточной воды в каждой ступени принимаем наибольшее значение: $t_{lag1} = 0,104 \text{ сут}$.

Определяем константу скорости потребления кислорода в летний и зимний периоды для второй ступени пруда, исходя из величины $k = 0,06 \text{ сут}^{-1}$:

$$k_T^{лет} = 0,06 \cdot 1,047^{20-20} = 0,06 \text{ сут}^{-1}; \quad k_T^{зим} = 0,06 \cdot 1,047^{12-20} = 0,042 \text{ сут}^{-1}.$$

Рассчитываем динамическую константу скорости потребления кислорода:

$$k_d^{лет} = 7 \cdot 0,06 = 0,42 \text{ сут}^{-1}; \quad k_d^{зим} = 7 \cdot 0,042 = 0,29 \text{ сут}^{-1}.$$

Определяем продолжительность пребывания стоков во второй ступени в летний и зимний периоды:

$$t_{lag2}^{лет} = \frac{2}{2,3 \cdot 0,42} \left(\sqrt[2]{\frac{14}{14-3}} - 1 \right) = 0,265 \text{ сут}; \quad t_{lag2}^{зим} = \frac{2}{2,3 \cdot 0,29} \left(\sqrt[2]{\frac{14}{14-2}} - 1 \right) = 0,240 \text{ сут}.$$

За расчетную продолжительность пребывания сточной воды во второй ступени принимаем наибольшее значение: $t_{lag2} = 0,265 \text{ сут}$.

По формуле (7.4) рассчитываем объем каждой ступени пруда (первой и второй):

$$W_{lag1} = 12400 \cdot 0,104 = 1290 \text{ м}^3; W_{lag2} = 12400 \cdot 0,265 = 3286 \text{ м}^3.$$

В соответствии с БПК_{полн} поступающей сточной воды назначаем глубину первой ступени пруда $H_{lag1} = 1,5$ м и второй ступени $H_{lag2} = 3$ м.

По формуле (7.10) рассчитываем площадь каждой ступени биологического пруда:

$$F_{lag1} = 1290/1,5 = 860 \text{ м}^2; \quad F_{lag2} = 3286/3 = 1095 \text{ м}^2.$$

В качестве аэрирующего устройства принимаем дисковый механический аэратор поверхностного типа с характеристиками (табл. 11 Приложений):

- диаметр $d_a = 0,5$ м;
- частота вращения $n_0 = 133/60 = 2,22 \text{ с}^{-1}$;
- длина лопасти аэратора $l_a = 0,17$ м;
- высота лопасти аэратора $h_a = 0,14$ м;
- количество лопастей аэратора $n_a = 6$;
- производительность по кислороду $Q_{ma} = 3,33 \text{ кг/ч}$.

Назначаем глубину погружения аэраторов $h_d = 0,1$ м. По табл. 3.2 находим растворимость кислорода при температуре воды 20°C в летний период: $C_T = 9,02 \text{ мг/л}$.

По формуле (3.23) рассчитываем растворимость кислорода в воде:

$$C_a = \left(1 + \frac{0,1}{20,6}\right) 9,02 = 9,06 \text{ мг/л}.$$

Согласно формуле (3.25) коэффициент, учитывающий температуру сточных вод, равен: $K_T = 1$. Значение коэффициента качества для городских сточных вод: $K_3 = 0,85$, удельный расход кислорода воздуха: $q_0 = 1,1 \text{ мг/мг}$ снятой БПК_{полн}. Требуемую концентрацию кислорода в воде, выходящей из пруда, назначаем равной: $C_{ex} = 2 \text{ мг/л}$.

Количество аэраторов N_{ma} для каждой ступени определяем по формуле (7.11):

$$N_{ma1} = \frac{1,1(28 - 14)1290}{24000 \cdot 1 \cdot 0,85 \left(\frac{9,06 - 2}{9,06}\right) 0,104 \cdot 3,33} = 3,63 \approx 4;$$

$$N_{ma2} = \frac{1,1(14 - 6)3286}{24000 \cdot 1 \cdot 0,85 \left(\frac{9,06 - 2}{9,06}\right) 0,265 \cdot 3,33} = 2,06 \approx 2.$$

Затем проверяем принятые аэраторы на условие обеспечения скорости воды не менее $0,05 \text{ м/с}$ в любой точке пруда. Для этого по формулам (7.12) рассчитываем:

- скорость подъема воды на входе в аэратор: $v_0 = \sqrt{2 \cdot 9,81(0,1 + 0,14)} = 2,17 \text{ м/с}$;
- скорость вращения у периферии аэратора: $v_p = 3,1416 \cdot 0,5 \cdot 2,22 = 3,49 \text{ м/с}$;
- радиальную скорость выхода жидкости из аэратора: $v_r = 3,1416 \cdot 2,22(0,5 - 0,17) = 2,30 \text{ м/с}$;

- абсолютную скорость выхода жидкости из аэратора: $v_{abs} = \sqrt{2,30^2 + 3,49^2} = 4,18$ м/с.

По формуле (7.13) рассчитываем расход жидкости, перекачиваемый одним аэратором:

$$Q_a = \frac{3,1416^2 \cdot 0,5^2}{2 \cdot 6} \left(2,17 - \frac{9,81}{3 \cdot 2,22 \cdot 6} \right) \left(1 - \frac{0,17}{0,5} \right) = 0,261 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Затем по формуле (7.14) определяем поверхностную скорость движения воды на первой ступени пруда:

$$v_{x1} = 0,1[(1,5 - 0,2)/0,2]^{0,14} = 0,13 \text{ м/с}.$$

По формуле (7.15) определяем величину площади, обслуживаемой одним аэратором первой ступени пруда:

$$F_{a1} = \left(\frac{2 \cdot 1,14^2 \cdot 0,261 \cdot 4,18}{3,1416 \cdot 0,13^2 \cdot 0,5} \right)^2 = 11429 \text{ м}^2.$$

Находим по формуле (7.16) требуемое количество аэраторов на первой ступени пруда:

$$N'_{ma1} = 860/11429 = 0,075.$$

Аналогично рассчитываем параметры второй ступени пруда:

$$v_{x2} = 0,1[(3 - 0,2)/0,2]^{0,14} = 0,15 \text{ м/с};$$

$$F_{a2} = \left(\frac{2 \cdot 1,14^2 \cdot 0,261 \cdot 4,18}{3,1416 \cdot 0,15^2 \cdot 0,5} \right)^2 = 7437 \text{ м}^2;$$

$$N'_{ma2} = 1095/7437 = 0,147.$$

Итак, окончательно назначаем на первой ступени биологических прудов четыре аэратора, на второй – два аэратора.

Принимаем две параллельно работающих биологических пруда по две ступени в каждом – всего четыре секции. В каждой секции первой ступени проектируем по два аэратора, в каждой секции второй ступени – по одному аэратору.

Площадь каждой секции первой ступени: $F_{sec1} = F_{lag1}/2 = 860/2 = 430 \text{ м}^2$, размеры секции 15×29 м.

Площадь каждой секции второй ступени: $F_{sec2} = F_{lag2}/2 = 1095/2 = 548 \text{ м}^2$, размеры секции 24×24 м.

8. УДАЛЕНИЕ БИОГЕННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ИЗ СТОЧНЫХ ВОД

В процессе биологической очистки из сточной воды извлекается только до 20÷40% солевого аммония и фосфора. При этом в ходе очистки вследствие аммонификации и нитрификации, а также гидролиза соединений фосфора происходит пополнение содержания этих биогенных элементов в очищенной воде.

Для удаления из сточной воды растворенных соединений азота и фосфора, ко-

торые вызывают процесс эвтрофикации водных объектов, применяют ряд методов с использованием биологической очистки.

8.1. Удаление из сточной воды соединений азота

Универсальным методом глубокого удаления азота во всех трех его формах (азот аммонийный, нитриты и нитраты) является биологическая *нитриденитрификация*.

В процессе *нитрификации* происходит окисление аммония кислородом до нитритов и нитратов. Нитрификация может происходить как в присутствии органических веществ, так и в их отсутствии. Ингибируют или сильно тормозят нитрификацию тяжелые металлы и свободный азот, присутствующие в сточной воде. Оптимальными условиями для нитрифицирующих бактерий являются: значение $pH = 8,4$, температура $30^{\circ}C$. Нитрификация наиболее эффективно протекает в аэротенках-смесителях при соблюдении определенного возраста активного ила, который составляет от 5 до 70 и более суток.

В ходе *денитрификации* протекает восстановление нитритов и нитратов до свободного азота, который выделяется в атмосферу. Этот процесс может осуществляться только при наличии в воде определенного количества органического субстрата, окисляемого сапрофитами до CO_2 и H_2O за счет кислорода соединений азота. Наиболее эффективно процесс денитрификации протекает при $pH = 7 \div 7,5$.

Органическим субстратом могут являться такие соединения, как углеводы, спирты, органические кислоты, продукты распада белков, избыточный активный ил и т.д. Для этого можно использовать исходные или механически очищенные городские сточные воды, а также органосодержащие производственные стоки. Необходимое содержание БПК в сточной воде к нитратному азоту ориентировочно равно 4:1.

Основные схемы очистки

Для удаления азота из сточной воды могут использоваться разнообразные схемы очистки, которые классифицируются:

- по количеству стадий: на одно-, двух- и трехстадийные;
- по расположению в схеме процесса денитрификации: в начале, в середине или в конце схемы;
- по условиям проведения денитрификации: в аэробных или анаэробных условиях;
- по виду добавляемого органического субстрата: с искусственной добавкой субстрата или с использованием сточной воды;
- по типу рециркуляции иловой смеси: в начало схемы из ее конца или из вторичного отстойника, а также из одной ступени в другую.

На завершающей ступени всех схем, как правило, устраивается аэрация иловой смеси для отдувки газообразного азота и более глубокого окисления азота аммонийного.

В одном сооружении могут быть совмещены несколько стадий нитриденит-

рификации. Например, для этого могут быть использованы:

- циркуляционные окислительные каналы, в которых создаются аэробные и анаэробные участки за счет рассредоточенного расположения механических аэраторов;
- аэротенки-смесители с попеременным аэрированием и перемешиванием иловой смеси в течение 1÷1,5 ч;
- секционированные аэротенки-вытеснители с последовательно работающими аэробными и анаэробными секциями и подачей в секции денитрификации органического субстрата (могут применяться только при отсутствии в сточной воде токсических примесей).

Одна из возможных схем двухстадийного нитриденитрификатора представлена на рис. 8.1.

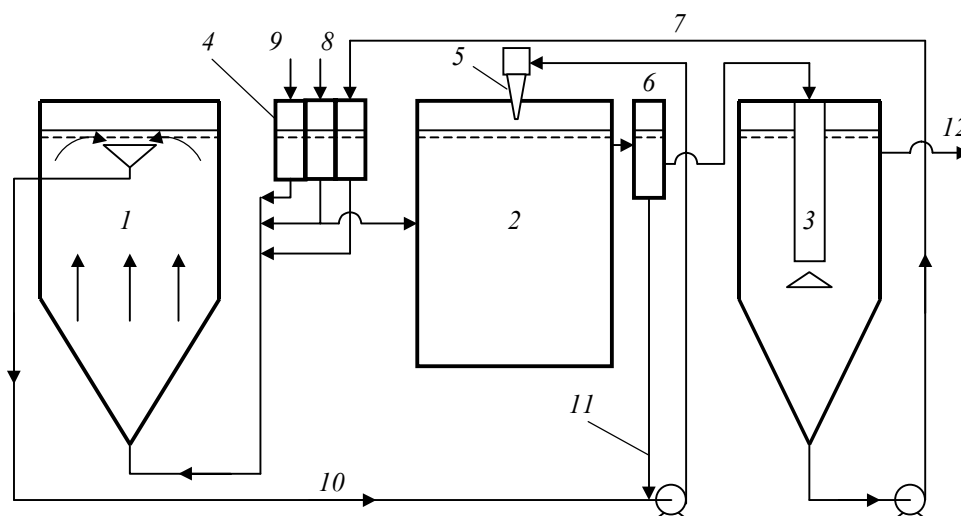


Рис. 8.1. Схема нитриденитрификатора

1 – денитрификатор; 2 – нитрификатор; 3 – вторичный отстойник; 4 – распределительная камера; 5 – струйный аэратор; 6 – газоотделитель; 7 – рециркулирующий активный ил; 8 – сточная вода из метантенка; 9 – подача сточной воды; 10 – циркулирующий ил из денитрификатора; 11 – циркулирующий ил из нитрификатора, 12 – очищенная сточная вода

Исходная сточная вода после механической очистки поступает в денитрификатор 1, туда же подается циркулирующая иловая смесь из нитрификатора 2. В анаэробных условиях денитрификатора азот нитритов и нитратов восстанавливается до газообразного состояния. Затем иловая смесь поступает в нитрификатор, где с помощью струйного аэратора 5 насыщается кислородом воздуха, в результате чего происходит окисление органического азота до нитратов. Разделение иловой смеси осуществляется во вторичном отстойнике 3, осевший ил направляется обратно в денитрификатор.

Трехстадийная обработка предполагает использование системы *трех иловых культур*, при которой каждая стадия нитриденитрификации имеет свой аэротенк, отстойник и систему возврата активного ила.

Последовательность следования нитрификации и денитрификации зависит от

содержания в сточной воде азота в различных формах. При содержании преимущественно нитратов целесообразно вначале предусмотреть зону денитрификации, в которой органический субстрат будет окисляться за счет нитратов, а в конце – аэрацию для окончательного окисления органики.

И, наоборот, в случае содержания в сточной воде нитритного и аммонийного азота при незначительном количестве органических веществ вначале предусматривается зона нитрификации, а затем – зоны денитрификации и аэрации.

Аэротенки-нитрификаторы

Аэротенки-нитрификаторы целесообразно применять при отсутствии в сточных водах посторонних органических примесей. Для стабильной очистки воды требуется поддержание стабильной концентрации $N-NH_4^+$ с суточными колебаниями не более $\pm 5\%$. Нитрификация осуществляется при невысокой степени очистки воды ($2\div 4$ мг $N-NH_4^+$ /л очищенной воды).

Минимальное время обработки в аэротенке-смесителе сточных вод, не содержащих органических веществ, составляет $10\div 12$ ч. Прирост активного ила в аэротенке превышает вынос из вторичных отстойников, который должен быть не более 20 мг/л. Для более эффективного задержания нитрифицирующего ила целесообразно использовать тонкослойные блоки в конце аэротенков.

Существует минимальная допустимая концентрация аммонийного азота в сточной воде $C_{nen\ min}$, ниже которой процесс нитрификации в аэротенке с заданным эффектом становится невозможным. Минимальная концентрация зависит от возраста ила, допустимого выноса ила из вторичных отстойников и концентрации нитрифицирующих микроорганизмов.

Для обеспечения нитрификации аммонийного азота при концентрациях, меньших минимально допустимой, требуется вводить дополнительное количество легкоокисляемых органических веществ (метанол или неочищенная сточная вода).

Денитрификаторы

В качестве денитрификаторов могут применяться:

- проточные реакторы без загрузки, работающие по принципу смесителей или вытеснителей;
- фильтры с фиксированной загрузкой.

В качестве источников углерода в сточные воды необходимо добавлять биологически неконсервативные органические вещества или исходные сточные воды из расчета $3\div 6$ мг БПК на 1 мг $N-NO_3^-$.

В проточных денитрификаторах перемешивание иловой смеси производится механическими лопастными мешалками или гидравлическим способом.

Для фильтра-денитрификатора в качестве загрузки необходимо использовать такие материалы, как кварцевый песок, гравий, рулонную пластмассу, стекловолокно, а также другие материалы, обладающие высокоразвитой поверхностью и стойкостью к биологическим воздействиям.

При концентрации нитратов в поступающей воде менее 50 мг/л рекомендуется

устанавливать каркасно-засыпные денитрификаторы; для диапазона концентраций 50÷100 мг/л – гравийные денитрификаторы; при большей концентрации – пленочные и денитрификаторы с загрузкой из стекловолокна типа «ерш».

Регенерация каркасно-засыпного и гравийного фильтра-денитрификатора производится обратным током исходной или очищенной воды.

8.2. Удаление из сточной воды соединений фосфора

Для удаления соединений фосфора применяются химический и биолого-химический методы. Химический способ заключается в обработке воды реагентом (чаще всего соли железа), в результате чего фосфор переводится в нерастворимую форму и выводится вместе с осадком. Реагент добавляется в отстойники, аэротенки или в сооружения доочистки.

Биолого-химический способ удаления фосфора предполагает дополнение традиционных схем биологической очистки реагентным хозяйством, включающим растворные и расходные баки для коагулянтов и помещение для их хранения.

В процессе коагулирования происходит химическое взаимодействие реагента с ортофосфатами PO_4^{3-} , присутствующими в сточной воде, а также сорбция соединений фосфора хлопьями гидроксидов металлов.

Реагенты

Реагентами могут служить традиционные минеральные коагулянты: сернокислое железо, сернокислый алюминий, железный купорос, известь. Для того, чтобы при коагулировании не происходило угнетения микроорганизмов активного ила, доза сернокислого железа (II) не должна превышать 25 мг/л по Fe_2O_3 ; сернокислого железа (III) – не более 15 мг/л по Fe_2O_3 ; сернокислого алюминия – не более 18 мг/л по Al_2O_3 .

Введение сернокислого железа (II) рекомендуется производить в начало аэротенка или во флотационную емкость, сернокислого железа (III) – перед вторичным отстойником, сернокислого алюминия – в конец аэротенка.

При использовании сернокислого алюминия для уменьшения содержания взвешенных веществ в очищаемой воде следует добавлять полиакриламид (ПАА) ориентировочной дозой 0,2÷1 мг/л. Введение раствора ПАА происходит перед вторичными отстойниками.

Фильтрация

Для более глубокой очистки в схеме биолого-химической обработки возможно использование гравийно-песчаных фильтров повышенной грязеемкости. Расчет фильтров производится:

- в схеме с введением сернокислого железа (II) перед аэротенком – по параметрам безреагентного фильтрования;
- в схеме с введением сернокислого железа (III) перед вторичным отстойником или сернокислого алюминия в конце аэротенка следует принимать скорость фильтрования в рабочем режиме 9÷10 м/ч, при форсированном – 11÷12 м/ч.

Промывка предусматривается 2÷3 раза в сутки.

Осадок

При расчете сооружений по обработке осадка необходимо учитывать увеличение массы сухого вещества активного ила в связи с образованием дополнительного химического осадка, количество которого на 1 мг/л Me_2O_3 составляет 1% прироста активного ила, рассчитанного по формуле (3.7).

Образующийся избыточный активный ил обладает повышенной седиментационной способностью, поэтому его объем сокращается в 1,5 раза.

Введение реагентов на стадии биологической очистки не влияет на протекание процессов сбраживания осадков в метантенках. При механическом обезвоживании активных илов, образовавшихся в ходе биолого-химической очистки сточных вод от фосфора, расход реагентов для кондиционирования можно сократить до 30%.

8.3. Расчет нитриденитрификации

Аэротенки-нитрификаторы

1. Определяется удельная скорость роста нитрифицирующих микроорганизмов μ_n :

$$\mu_n = \frac{K_{pH} K_T K_{oc} K_c C_{nex} \mu_{max}}{K_n + C_{nex}}, \text{сут}^{-1}, \quad (8.1)$$

где K_{pH} – коэффициент, учитывающий влияние pH воды /6/:

pH	6	6,5	7	7,5	8	8,4	9
K_{pH}	0,15	0,31	0,5	0,6	0,84	1,0	1,23

K_T – коэффициент, учитывающий влияние температуры воды /6/:

°C	10	15	20	25	30
K_T	0,32	0,56	1,0	1,79	3,2

K_{oc} – коэффициент, учитывающий влияние концентрации растворенного кислорода, определяется по формуле:

$$K_{oc} = C_O / (K'_O + C_O), \quad (8.2)$$

здесь C_O – концентрация растворенного кислорода в иловой смеси, мг/л; K'_O – константа полунасыщения, равная 2 мг O_2 /л;

K_c – коэффициент, учитывающий влияние токсичных компонентов, определяется по формуле:

$$K_c = J / (J + C_i), \quad (8.3)$$

здесь J – константа полунасыщения ингибитора, мг/л; C_i – концентрация ингибитора, мг/л; μ_{max} – максимальная скорость роста нитрифицирующих микроорганизмов, равная $1,77 \text{сут}^{-1}$ при pH=8,4 и температуре 20°C ;

K_n – константа полунасыщения аммонийного азота, равная 25 мг/л; C_{nex} – концентрация аммонийного азота в очищенной воде, мг/л.

2. Находится минимальный возраст нитрифицирующего ила θ :

$$\theta = 1/\mu_n, \text{сут}. \quad (8.4)$$

3. По /6/ или табл. 8.1 определяется концентрация нитрифицирующего ила a_{is} .

Таблица 8.1

Характеристики нитрифицирующего ила в зависимости от его возраста

Прирост ила, мг/мг N-NH ₄ ⁺ /л	Возраст ила, сут	Концентрация ила, г/л	Удельная скорость окисления, мг/(г·ч)
0,17	5	0,017	49,0
0,17	10	0,034	24,5
0,16	15	0,048	17,4
0,138	20	0,055	15,2
0,09	25	0,048	17,4
0,055	30	0,033	25,2
0,03	35	0,021	39,7
0,02	40	0,016	52,1
0,048	50	0,048	17,4
0,044	60	0,053	15,7
0,18	70	0,025	33,3

4. Определяется минимальная допустимая концентрация аммонийного азота в поступающей сточной воде $C_{nen\ min}$:

$$C_{nen\ min} = 0,02a_t\theta/a_{is}, \text{ мг/л}, \quad (8.5)$$

где a_t – допустимый вынос нитрифицирующего ила из вторичных отстойников, мг/л.

Значение $C_{nen\ min}$ должно быть больше исходной концентрации аммонийного азота в сточной воде C_{nen} . В противном случае осуществление нитрификации с заданным эффектом невозможно.

5. Определяется объем аэротенка-нитрификатора W_n :

$$W_n = Q_w t_{atm} / 24, \text{ м}^3, \quad (8.6)$$

где Q_w – суточный расход воды, м³/сут; t_{atm} – минимальный период аэрации в аэротенке-смесителе, (для сточных вод, не содержащих органических веществ, $t_{atm} = 10 \div 12$ ч).

6. По табл. 13 Приложений выбирается типовой проект аэротенка, подбирается число секций n_{at} (не менее 2-х, при суточном расходе до 50 000 м³/сут – 4÷6, при большем расходе – 6÷8). По формуле (3.6) определяется длина секции аэротенка.

7. Система аэрации аэротенка-нитрификатора рассчитывается по формулам (3.23–3.29).

Аэротенки-нитрификаторы с добавкой биоразлагаемых органических веществ

1. По формуле (8.1) определяется удельная скорость роста нитрифицирующих микроорганизмов μ_n .

2. По формуле (8.4) находится минимальный возраст нитрифицирующего ила θ , сут.

3. Рассчитывается удельная скорость окисления органических веществ ρ :

$$\rho = K_s + 0,0417K_p/\theta, \text{ мг БПК}_{\text{полн}}/(\text{г}\cdot\text{ч}), \quad (8.7)$$

где K_s – энергетический физиологический коэффициент, мг БПК_{полн}/(г·ч); K_p – физиологический

коэффициент роста микроорганизмов активного ила, мг БПК_{полн}/г. Для городских сточных вод $K_9 = 3,7$ мг БПК_{полн}/(г·ч); $K_p = 864$ мг БПК_{полн}/г.

4. Определяется концентрация беззольной части активного ила a_i :

$$a_i = \frac{1}{\varphi} \left(\frac{\rho_{max} L_{ex} C_O}{(L_{ex} C_O + K_l C_O + K_O L_{ex}) \rho} - 1 \right), \text{ г/л}, \quad (8.8)$$

где ρ_{max} – максимальная скорость окисления органических загрязнений, мг БПК_{полн}/(г·ч); K_l – константа, характеризующая свойства загрязнений, мг БПК_{полн}/л; K_O – константа, характеризующая влияние кислорода, мг О₂/л; φ – коэффициент ингибирования, л/г; L_{ex} – БПК_{полн} очищенной сточной воды, мг/л.

При окислении органических веществ, характерных для городских сточных вод и для обеспечения глубокой нитрификации, значения констант можно принимать следующими:

$\rho_{max} = 70$ мг БПК_{полн}/(г·ч); $K_l = 65$ мг БПК_{полн}/л; $K_O = 0,625$ мг О₂/л; $\varphi = 0,14$ л/г.

5. Определяется продолжительность аэрации в аэротенке-нитрификаторе t_{atm} :

$$t_{atm} = \frac{L_{en} - L_{ex}}{a_i \rho}, \text{ ч}. \quad (8.9)$$

где L_{en} – БПК_{полн} поступающей в аэротенк-нитрификатор сточной воды, мг/л.

6. Определяется объем аэротенка-нитрификатора W_n по формуле (8.6).

7. Аналогично предыдущему расчету по табл. 13 Приложений выбирается типовой проект аэротенка-смесителя. По формуле (3.6) определяется длина секции аэротенка.

8. По табл. 8.1 при известном возрасте нитрифицирующего ила θ находится доза ила a_{is} , г/л.

9. Рассчитывается доза нитрифицирующего ила a_{in} :

$$a_{in} = 1,2 a_{is} \frac{C_{nen} - C_{nex}}{t_{atm}}, \text{ г/л}. \quad (8.10)$$

10. Определяется концентрация активного ила по сухому веществу a :

$$a = \frac{a_i + a_{in}}{1 - s}, \text{ г/л}, \quad (8.11)$$

где s – зольность ила (табл. 1 Приложений).

11. Находится удельный прирост активного ила K_g и суточное количество избыточного активного ила G :

$$K_g = 41,7 \frac{a t_{atm}}{(L_{en} - L_{ex}) \theta}, \text{ мг/(мг·БПК}_{полн}\text{)}; \quad (8.12)$$

$$G = K_g (L_{en} - L_{ex}) Q_w / 1000, \text{ кг/сут}. \quad (8.13)$$

12. Система аэрации аэротенка-нитрификатора рассчитывается по формулам (3.23–3.29), причем удельный расход воздуха должен определяться по модифицированной формуле:

$$q_{air} = \frac{q_O (L_{en} - L_{ex}) + 1,1 (C_{nen} - C_{nex}) 4,6}{K_1 K_2 K_T K_3 (C_a - C_O)}, \text{ м}^3/\text{м}^3. \quad (8.14)$$

Денитрификаторы проточного типа

1. Определяется предельная доза денитрифицирующего ила $a_{i\max}^{dn}$:

$$a_{i\max}^{dn} = 1000s/J_i, \text{ г/л}, \quad (8.15)$$

где J_i – иловый индекс, см³/г.

2. Рассчитывается удельная скорость денитрификации ρ^{dn} :

$$\rho^{dn} = \rho_{\max}^{dn} \frac{C_{ex}^{dn}}{(C_{ex}^{dn} + K_{dn}) \left(1 + \varphi_{dn} a_i^{dn}\right)}, \text{ мг N-NO}_3/(\text{г}\cdot\text{ч}), \quad (8.16)$$

где ρ_{\max}^{dn} – максимальная скорость денитрификации, мг N-NO₃/(г·ч), принимается по табл. 8.2; K_{dn} – константа Михаэлиса-Ментен, мг N-NO₃/л, принимается по табл. 8.2; φ_{dn} – коэффициент ингибирования денитрификации продуктами метаболизма активного ила, л/г, принимается по данным /6/ или табл. 8.2; a_i^{dn} – доза денитрифицирующего ила, г/л, которая должна быть не больше предельной дозы $a_{i\max}^{dn}$; C_{ex}^{dn} – концентрация азота в очищенной воде, мг N-NO₃/л.

Таблица 8.2

Значения констант для расчета денитрификатора

Вид субстрата	ρ_{\max}^{dn} , мг N-NO ₃ /(г·ч)	K_{dn} , мг N-NO ₃ /л	φ_{dn} , л/г
Метанол (CH ₃ OH)	58,8	40	0,19
Этанол (C ₂ H ₅ OH)	44,9	25	0,17

3. Продолжительность пребывания сточной воды в денитрификаторе t_{dn} рассчитывается по формулам (8.17, 8.18) в зависимости от типа реактора.

Реактор-смеситель:
$$t_{dnm} = \frac{C_{en}^{dn} - C_{ex}^{dn}}{a_i^{dn} (1 - \alpha) \rho^{dn}}, \text{ ч}; \quad (8.17)$$

Реактор-вытеснитель:
$$t_{dnv} = \left[(C_{en}^{dn} - C_{ex}^{dn}) + 2,3 K_{dn} \lg \frac{C_{en}^{dn}}{C_{ex}^{dn}} \right] \frac{1 + \varphi_{dn} a_i^{dn}}{\rho^{dn} a_i^{dn}}, \text{ ч}, \quad (8.18)$$

где C_{en}^{dn} – концентрация азота на входе в денитрификатор, мг N-NO₃/л.

4. Определяется объем денитрификатора W_{dn} :

$$W_{dn} = Q_w t_{dn} / 24, \text{ м}^3. \quad (8.19)$$

Фильтры-денитрификаторы

1. В зависимости от концентрации нитратов в поступающей воде C_{en}^{dn} принимается вид денитрификатора:

C_{en}^{dn} , мг N-NO ₃ /л	< 50	50÷100	> 100
Денитрификатор	Каркасно-засыпной	Гравийный	Пленочный и с загрузкой из стекловолокна

2. Принимается доза денитрифицирующего ила a_i^{dn} в зависимости от концентрации азота нитратов и необходимой степени очистки (табл. 8.3 или /6/).

Таблица 8.3

Средние дозы денитрифицирующего ила, г/л					
Концентрация азота нитратов в исходной воде, мг/л	Концентрация азота нитратов в очищенной воде, мг/л				
	10	20	30	40	50
50	1,0	2,0	2,5	3,5	—
100	1,5	2,5	3,5	5,0	7,5
200	2,0	3,5	5,5	7,5	10,0
300	2,5	4,0	6,0	9,0	14,0
400	3,0	5,0	7,0	14,0	20,0

3. Рассчитывается время контакта сточной воды с загрузкой денитрификатора t_{dn}^{bf} :

$$t_{dn}^{bf} = \left[(C_{en}^{dn} - C_{ex}^{dn}) + K_d K_{dn} \lg \frac{C_{en}^{dn}}{C_{ex}^{dn}} \right] \frac{1 + \varphi_{dn} a_i^{dn}}{\rho_{max}^{dn} a_i^{dn}}, \text{ ч}, \quad (8.20)$$

где K_d – экспериментальный коэффициент, принимается в зависимости от вида денитрификатора: для каркасно-засыпного – 0,89; для гравийного – 0,83; для пленочного – 0,81.

4. Рассчитывается объем загрузки денитрификатора W_{dn}^{bf} :

$$W_{dn}^{bf} = q_w t_{dn}^{bf}, \text{ м}^3, \quad (8.21)$$

где q_w – расход сточных вод, м³/ч.

5. Принимается количество фильтров-денитрификаторов (не менее 2-х), определяются размеры каждого фильтра, количество промывной воды и т.д., исходя из расчетных параметров, приведенных в табл. 16 Приложений.

8.4. Расчет биолого-химической очистки от фосфора

1. Определяется доза реагента при введении его на ступени биологической очистки $C_{реаг}$:

$$C_{реаг} = K C_{Робщ}, \text{ мг/л}, \quad (8.22)$$

где K – коэффициент увеличения стехиометрического соотношения, принимаемый по /6/ или табл. 8.4; $C_{Робщ}$ – концентрация общего фосфора в поступающей на очистку воде, мг/л. При отсутствии данных о концентрации общего фосфора ориентировочно может быть принято $C_{Робщ} = (2 \div 3) C_{РО4}$, (здесь $C_{РО4}$ – концентрация фосфатов в поступающей сточной воде, мг $PO_4^{3-}/л$).

2. По /6/ или табл. 8.5 в зависимости от БПК_{полн} поступающей сточной воды L_{en} и рассчитанной дозы реагента $C_{реаг}$ принимается доза активного ила в аэротенке a_i .

3. По данным /6/ или табл. 8.6 принимается коэффициент β , характеризующий увеличение зольности ила при введении реагента. Рассчитывается нагрузка по коагулянту $N_{коаг}$:

$$N_{\text{коаг}} = \frac{C_{\text{реаг}}}{a_i(1 - \beta s)}, \text{ мг Me}_2\text{O}_3/\text{г}, \quad (8.23)$$

где s – зольность активного ила.

Таблица 8.4

Коэффициент увеличения стехиометрического соотношения

Эффективность удаления общего фосфора, %	Вид реагента		
	Сернокислое железо (II)	Сернокислое железо (III)	Сернокислый алюминий
60	0,33	0,15	0,35
65	0,5	0,25	0,4
70	0,66	0,33	0,5
75	1	0,5	0,65
80	1,34	0,66	0,74
85	1,67	1	0,9

Таблица 8.5

Рекомендуемая доза активного ила при введении реагента в аэротенк, г/л

Доза реагента по Me ₂ O ₃ , мг/л	БПК _{полн} сточной воды, поступающей в аэротенк, мг/л			
	100	150	200	300
10	3	4	5	5
15	4	5	6	6
20	5	6	6	7
25	6	6	7	7

Примечание: При применении сернокислого алюминия или сернокислого железа (III) дозу ила следует принимать не более 5 г/л.

Таблица 8.6

Поправка к зольности активного ила при введении реагента в аэротенк

Реагент	Доза реагента, мг/л				
	5	10	15	20	25
Сернокислое железо (II)	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5
Другие реагенты	1,07	1,15	1,2	1,22	1,22

4. По формуле (3.1) определяется удельная скорость окисления ρ , при этом концентрацию растворенного кислорода C_O в схеме с введением сернокислого железа (II) можно принять равной 5 мг/л.

5. Рассчитывается период аэрации $t_{\text{атм}}$:

$$t_{\text{атм}} = \frac{L_{\text{ен}} - L_{\text{ex}}}{a_i(1 - \beta s)\rho m}, \text{ ч}, \quad (8.24)$$

где $L_{\text{ен}}$ и L_{ex} – БПК_{полн} соответственно поступающей в аэротенк и очищенной сточной воды, мг/л; m – коэффициент, учитывающий изменение скорости окисления органического вещества

за счет введения реагента, принимается в зависимости от нагрузки по коагулянту $N_{коаг}$ /6/:

$N_{коаг}$, мг Me_2O_3 /г	9	8	7	6	5	4	3	2
m	0,68	0,78	0,84	0,95	1	1,08	1,16	1,24

6. По формуле (3.5) определяется общий объем аэротенков $W_{атм}$, м³.

7. По табл. 13 Приложений выбирается типовой проект аэротенка, подбирается число секций $n_{ат}$ (не менее 2-х, при суточном расходе до 50 000 м³/сут – 4÷6, при большем расходе – 6÷8). По формуле (3.6) определяется длина секции аэротенка.

8. По табл. 8.7 /6/ ориентировочно принимается степень рециркуляции R_i и доза циркуляционного активного ила a_{cir} .

Таблица 8.7

Степень рециркуляции R_i и доза циркуляционного активного ила a_{cir}

Рабочая доза ила в аэротенке, г/л	Схема с введением			
	Сернокислого железа (II)		Сернокислого железа (III) или сернокислого алюминия	
	a_{cir} , г/л	R_i	a_{cir} , г/л	R_i
3	10	45	6,5	85
4	11,5	50	8,5	90
5	11,5	60	10.0	100
6	14,0	75	—	—
7	14,0	100	—	—

9. Рассчитывается прирост активного ила P_i и суточное количество избыточного активного ила G :

$$P_i = (1 + 0,01C_{реаг})(0,8C_{сдп} + K_gL_{ен}), \text{ мг/л}; \quad (8.25)$$

$$G = P_i Q_w / 10^6, \text{ т/сут}, \quad (8.26)$$

где $C_{сдп}$ – концентрация взвешенных веществ в сточной воде, поступающей в аэротенк, мг/л; K_g – коэффициент прироста, принимаемый для городских сточных вод равным 0,3; Q_w – суточный расход воды, м³/сут.

10. Система аэрации аэротенка рассчитывается по формулам (3.23–3.29).

11. Определяется необходимое количество реагента $Q_{реаг}$:

$$Q_{реаг} = \frac{Q_w C_{реаг}}{P_{реаг} 10^6}, \text{ т/сут}, \quad (8.27)$$

где $P_{реаг}$ – содержание реагента в товарном продукте, доли.

12. Реагентное хозяйство (растворные и расходные баки для коагулянтов, помещение для их хранения и пр.) рассчитывается в соответствии с требованиями СНиП 2.04.02-84 «Водоснабжение. Наружные сети и сооружения».

8.5. Примеры расчетов

ПРИМЕР 8.1

Исходные данные. Суточный расход городских сточных вод $Q_w = 25700$ м³/сут;

содержание азота аммонийного в поступающих на нитриденитрификацию сточных водах составляет $C_{nen} = 90$ мг/л; содержание азота аммонийного в очищенных сточных водах должно быть $C_{nex} = 4$ мг/л. Сточные воды имеют значение рН = 8,1, среднемесячная температура сточной воды за летний период $T_w = 23^\circ\text{C}$.

Задание. Рассчитать аэротенки-нитрификаторы.

Расчет. По таблицам к формуле (8.1) интерполяцией находим коэффициент, учитывающий влияние рН воды:

$$K_{pH} = 0,84 + (0,84 - 1,0) \cdot (8,1 - 8) / (8 - 8,4) = 0,88;$$

и коэффициент, учитывающий влияние температуры воды:

$$K_T = 1,0 + (1,0 - 1,79) \cdot (23 - 20) / (20 - 25) = 1,474.$$

По формуле (8.2) рассчитываем коэффициент, учитывающий влияние концентрации растворенного кислорода, при концентрации растворенного кислорода в иловой смеси $C_O = 2$ мг/л:

$$K_{oc} = 2 / (2 + 2) = 0,5.$$

Так как веществ, ингибирующих процесс нитрификации, в сточной воде не имеется, коэффициент, учитывающий влияние токсичных компонентов, равен: $K_c = 1$.

По формуле (8.1) определяем удельную скорость роста нитрифицирующих микроорганизмов:

$$\mu_n = \frac{0,88 \cdot 1,474 \cdot 0,5 \cdot 1 \cdot 4 \cdot 1,77}{25 + 4} = 0,158 \text{ сут}^{-1}.$$

Рассчитываем минимальный возраст нитрифицирующего ила по формуле (8.4):

$$\theta = 1 / 0,158 = 6,32 \text{ сут.}$$

По табл. 8.1 интерполяцией определяем концентрацию нитрифицирующего ила a_{is} и удельную скорость окисления ρ_n :

$$a_{is} = 0,017 + (0,017 - 0,034) \cdot (6,32 - 5) / (5 - 10) = 0,021 \text{ г/л};$$

$$\rho_n = 49 + (49 - 24,5) \cdot (6,32 - 5) / (5 - 10) = 42,5 \text{ мг/(г}\cdot\text{ч)}.$$

По формуле (8.5) определяем минимальную допустимую концентрацию аммонийного азота в поступающей сточной воде, при допустимом выносе нитрифицирующего ила из вторичных отстойников, равном $a_t = 15$ мг/л:

$$C_{nen \min} = 0,02 \cdot 15 \cdot 6,32 / 0,021 = 88,2 \text{ мг/л},$$

что меньше исходного значения (90 мг/л).

Назначаем минимальный период аэрации в аэротенке-смесителе, равный: $t_{atm} = 12$ ч. Согласно формуле (8.6), определяем объем аэротенка-нитрификатора:

$$W_n = 25700 \cdot 12 / 24 = 12850 \text{ м}^3.$$

По табл. 13 Приложений подбираем типовой проект аэротенка-смесителя № 902-2-268 со следующими характеристиками:

- число секций $n_{at} = 4$;

- число коридоров $n_{cor} = 3$;
- рабочая глубина $H_{at} = 5$ м;
- ширина коридора $b_{cor} = 6$ м;
- объем одной секции – 3780 м^3 .

По формуле (3.6) определяем длину секции аэротенка:

$$l_{at} = 12850 / (4 \cdot 3 \cdot 5 \cdot 6) = 35,7 \approx 36 \text{ м.}$$

ПРИМЕР 8.2

Исходные данные. Суточный расход городских сточных вод $Q_w = 33670 \text{ м}^3/\text{сут}$; в поступающих на нитрификацию сточных водах: азот аммонийный $C_{nen} = 35 \text{ мг/л}$, БПК_{полн} $L_{en} = 130 \text{ мг/л}$; в очищенных сточных водах: содержание азота аммонийного $C_{nex} = 2 \text{ мг/л}$, БПК_{полн} $L_{ex} = 10 \text{ мг/л}$. Сточные воды имеют значение рН = 7,9, среднемесячная температура сточной воды за летний период $T_w = 18^\circ\text{C}$.

Задание. Рассчитать аэротенки-нитрификаторы в присутствии биоразлагаемых веществ.

Расчет. По таблицам к формуле (8.1) интерполяцией находим коэффициент, учитывающий влияние рН воды:

$$K_{pH} = 0,6 + (0,6 - 0,84) \cdot (7,9 - 7,5) / (7,5 - 8) = 0,79,$$

и коэффициент, учитывающий влияние температуры воды:

$$K_T = 0,56 + (0,56 - 1) \cdot (18 - 15) / (15 - 20) = 0,82.$$

По формуле (8.2) рассчитываем коэффициент, учитывающий влияние концентрации растворенного кислорода, при концентрации растворенного кислорода в иловой смеси $C_O = 2 \text{ мг/л}$:

$$K_{oc} = 2 / (2 + 2) = 0,5.$$

Так как веществ, ингибирующих процесс нитрификации, в сточной воде не имеется, коэффициент, учитывающий влияние токсичных компонентов, равен: $K_c = 1$.

По формуле (8.1) определяем удельную скорость роста нитрифицирующих микроорганизмов:

$$\mu_n = \frac{0,79 \cdot 0,82 \cdot 0,5 \cdot 1 \cdot 2 \cdot 1,77}{25 + 2} = 0,043 \text{ сут}^{-1}.$$

Рассчитываем минимальный возраст нитрифицирующего ила по формуле (8.4):

$$\theta = 1 / 0,043 = 23,37 \text{ сут.}$$

По формуле (8.7) находим удельную скорость окисления органических веществ:

$$\rho = 3,7 + 0,0417 \cdot 864 / 23,37 = 5,28 \text{ мг БПК}_{\text{полн}} / (\text{г} \cdot \text{ч}).$$

Согласно формуле (8.8), определяем концентрацию беззольной части активного ила при $L_{ex} = 10 \text{ мг/л}$:

$$a_i = \frac{1}{0,14} \left(\frac{70 \cdot 10 \cdot 2}{(10 \cdot 2 + 65 \cdot 2 + 0,625 \cdot 10)5,28} - 1 \right) = 4,98 \text{ г/л.}$$

Рассчитываем продолжительность аэрации в аэротенке-нитрификаторе по формуле (8.9):

$$t_{atm} = \frac{130 - 10}{4,98 \cdot 5,28} = 4,56 \text{ ч.}$$

Согласно формуле (8.6), определяем объем аэротенка-нитрификатора:

$$W_n = 33670 \cdot 4,56 / 24 = 6397 \text{ м}^3.$$

По табл. 13 Приложений подбираем типовой проект аэротенка-смесителя № 902-2-217/218 со следующими характеристиками:

- число секций $n_{at} = 5$;
- число коридоров $n_{cor} = 2$;
- рабочая глубина $H_{at} = 4,5 \text{ м}$;
- ширина коридора $b_{cor} = 4 \text{ м}$;
- объем одной секции – 1296 м^3 .

По формуле (3.6) определяем длину секции аэротенка:

$$l_{at} = 6397 / (5 \cdot 2 \cdot 4,5 \cdot 4) = 35,5 \approx 36 \text{ м.}$$

По табл. 8.1 в зависимости от возраста нитрифицирующего ила $\theta = 23,37$ сут интерполяцией находим дозу ила:

$$a_{is} = 0,055 + (0,055 - 0,048) \cdot (23,37 - 20) / (20 - 25) = 0,05 \text{ г/л.}$$

По формуле (8.10) рассчитываем дозу нитрифицирующего ила:

$$a_{in} = 1,2 \cdot 0,05 \frac{35 - 2}{4,56} = 0,44 \text{ г/л.}$$

Определяем концентрацию активного ила по сухому веществу по формуле (8.11), при зольности ила $s = 0,3$:

$$a = \frac{4,98 + 0,44}{1 - 0,3} = 7,74 \text{ г/л.}$$

По формулам (8.12) и (8.13) находим удельный прирост активного ила K_g и суточное количество избыточного активного ила G :

$$K_g = 41,7 \frac{7,74 \cdot 4,56}{(130 - 10)23,37} = 0,53 \text{ мг/(мг} \cdot \text{БПК}_{\text{полн}});$$

$$G = 0,53(130 - 10) \cdot 33670 / 1000 = 2122 \text{ кг/сут.}$$

ПРИМЕР 8.3

Исходные данные. Суточный расход городских сточных вод $Q_w = 66120 \text{ м}^3/\text{сут}$; концентрация азота нитратного в поступающих на денитрификацию сточных водах: $C_{en}^{dn} = 31 \text{ мг N-NO}_3/\text{л}$, в очищенных сточных водах концентрация азота нитратного составляет $C_{ex}^{dn} = 6 \text{ мг N-NO}_3/\text{л}$. Применяемый углеродный субстрат –

этанол.

Задание. Рассчитать денитрификаторы проточного типа.

Расчет. Принимаем иловый индекс, равный $J_i = 100 \text{ см}^3/\text{г}$, и зольность ила $s = 0,3$. По формуле (8.15) рассчитываем предельную дозу денитрифицирующего ила:

$$a_{i \max}^{dn} = 1000 \cdot 0,3 / 100 = 3 \text{ г/л.}$$

Для этанола по табл. 8.2 находим необходимые константы: максимальную скорость денитрификации $\rho_{\max}^{dn} = 44,9 \text{ мг N-NO}_3/(\text{г} \cdot \text{ч})$; константу Михаэлиса-Ментен $K_{dn} = 25 \text{ мг N-NO}_3/\text{л}$; коэффициент ингибирования $\varphi_{dn} = 0,17 \text{ л/г}$.

Определяем удельную скорость денитрификации по формуле (8.16):

$$\rho^{dn} = 44,9 \frac{6}{(6 + 25)(1 + 0,17 \cdot 3)} = 5,76 \text{ мг N-NO}_3/(\text{г} \cdot \text{ч}).$$

Для проведения денитрификации выбираем реактор-денитрификатор, работающий в режиме вытеснения, и по формуле (8.18) определяем продолжительность пребывания сточной воды в денитрификаторе:

$$t_{dnv} = \left[(31 - 6) + 2,3 \cdot 25 \cdot \lg \frac{31}{6} \right] \frac{1 + 0,17 \cdot 3}{5,76 \cdot 3} = 5,77 \text{ ч.}$$

По формуле (8.19) находим объем денитрификатора:

$$W_{dn} = 66120 \cdot 5,77 / 24 = 15900 \text{ м}^3.$$

ПРИМЕР 8.4

Исходные данные. Расчетный расход городских сточных вод $q_w = 1230 \text{ м}^3/\text{ч}$; концентрация азота нитратного в поступающих на денитрификацию сточных водах: $C_{en}^{dn} = 59 \text{ мг N-NO}_3/\text{л}$, в очищенных сточных водах концентрация азота нитратного составляет $C_{ex}^{dn} = 15 \text{ мг N-NO}_3/\text{л}$. Применяемый углеродный субстрат – метанол.

Задание. Рассчитать фильтры-денитрификаторы.

Расчет. В зависимости от концентрации нитратов в поступающей воде, которая находится в пределах 50÷100 мг/л, принимаем фильтр с гравийной засыпкой. По табл. 8.3 принимаем дозу денитрифицирующего ила, равную: $a_i^{dn} = (1,0 + 2,0) / 2 = 1,5 \text{ г/л}$.

Для метанола по табл. 8.2 находим необходимые константы: максимальную скорость денитрификации $\rho_{\max}^{dn} = 58,8 \text{ мг N-NO}_3/(\text{г} \cdot \text{ч})$; константу Михаэлиса-Ментен $K_{dn} = 40 \text{ мг N-NO}_3/\text{л}$; коэффициент ингибирования $\varphi_{dn} = 0,19 \text{ л/г}$.

Согласно формуле (8.20) рассчитываем время контакта сточной воды с нагрузкой денитрификатора:

$$t_{dn}^{bf} = \left[(59 - 15) + 0,83 \cdot 40 \cdot \lg \frac{59}{15} \right] \frac{1 + 0,19 \cdot 1,5}{58,8 \cdot 1,5} = 0,929 \text{ ч.}$$

Вычисляем по формуле (8.21) объем загрузки денитрификатора:

$$W_{dn}^{bf} = 1230 \cdot 0,929 = 1143 \text{ м}^3.$$

Принимаем два фильтра-денитрификатора с высотой слоя загрузки $H = 4$ м, необходимой площадью одной секции $F_1 = 1143/(2 \cdot 4) = 143 \text{ м}^2$ и размерами в плане 12×12 м.

Интенсивность промывки фильтра, согласно табл. 16 Приложений, составляет $13 \text{ л}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ продолжительностью 10 мин.

ПРИМЕР 8.5

Исходные данные. Расчетный расход городских сточных вод $q_w = 5630 \text{ м}^3/\text{ч}$, суточный расход сточных вод $Q_w = 189000 \text{ м}^3/\text{сут}$; в поступающих сточных водах: БПК_{полн} $L_{en} = 185 \text{ мг/л}$, концентрация взвешенных веществ $C_{cdp} = 155 \text{ мг/л}$; БПК_{полн} в очищенных сточных водах $L_{ex} = 15 \text{ мг/л}$. Содержание фосфатов: в поступающей сточной воде $C_{PO4en} = 16 \text{ мг PO}_4^3/\text{л}$, в очищенной сточной воде – $C_{PO4ex} = 5,5 \text{ мг PO}_4^3/\text{л}$.

Задание. Рассчитать аэротенки для биолого-химической очистки от фосфора.

Расчет. Ориентировочно принимаем концентрацию общего фосфора в поступающей на очистку воде: $C_{Робщ} = (2 \div 3)C_{PO4en} = 3 \cdot 16 = 48 \text{ мг/л}$. Рассчитываем необходимый эффект удаления общего фосфора:

$$\varepsilon_p = 100(C_{PO4en} - C_{PO4ex})/C_{PO4en} = 100(16 - 5,5)/16 \approx 65\%.$$

Выбираем реагент для обработки – сернокислое железо (II). По табл. 8.4 находим коэффициент увеличения стехиометрического соотношения: $K = 0,5$. По формуле (8.22) определяем дозу реагента при введении его на ступени биологической очистки:

$$C_{реаг} = 0,5 \cdot 48 = 24 \text{ мг/л}.$$

По табл. 8.5 интерполяцией находим дозу активного ила в аэротенке:

$$a_i = 6 + (6 - 7)(185 - 150)/(150 - 200) = 6,7 \text{ г/л}.$$

Принимаем зольность активного ила, равную $s = 0,3$. По табл. 8.6 находим коэффициент, характеризующий увеличение зольности ила при введении реагента:

$$\beta = 1,4 + (1,4 - 1,5)(24 - 20)/(20 - 25) = 1,48.$$

Определяем нагрузку по коагулянту по формуле (8.23):

$$N_{коаг} = \frac{24}{6,7(1 - 1,48 \cdot 0,3)} = 6,44 \text{ мг Me}_2\text{O}_3/\text{г}.$$

Принимаем концентрацию растворенного кислорода, равную для сернокислого железа (II): $C_O = 2 \text{ мг/л}$. По табл. 1 Приложений назначаем константы, необходимые для расчета:

- максимальную скорость окисления $\rho_{max} = 85 \text{ мг БПК}_{полн}/(\text{г} \cdot \text{ч})$;
- константу, характеризующую свойства загрязнений $K_l = 33 \text{ мг БПК}_{полн}/\text{л}$;
- константу, характеризующую влияние кислорода $K_O = 0,625 \text{ мг O}_2/\text{л}$;
- коэффициент ингибирования $\phi = 0,07 \text{ л/г}$.

По формуле (3.1) рассчитываем удельную скорость окисления:

$$\rho = 85 \frac{15 \cdot 5}{15 \cdot 5 + 33 \cdot 5 + 0,625 \cdot 15} \cdot \frac{1}{1 + 0,07 \cdot 6,7} = 17,4 \text{ мг БПК}_{\text{полн}}/(\text{г} \cdot \text{ч}).$$

По таблице к формуле (8.24) находим коэффициент, учитывающий изменение скорости окисления органического вещества за счет введения реагента (при нагрузке по коагулянту $N_{\text{коаг}} = 6,44$ мг $\text{Me}_2\text{O}_3/\text{г}$):

$$m = 0,84 + (0,84 - 0,95)(6,44 - 7)/(7 - 6) = 0,902.$$

По формуле (8.24) определяем период аэрации:

$$t_{\text{атм}} = \frac{185 - 15}{6,7(1 - 1,48 \cdot 0,3)17,4 \cdot 0,902} = 2,91 \text{ ч.}$$

По формуле (3.5) определяем объем аэротенков-смесителей:

$$W_{\text{атм}} = 5630 \cdot 2,91 = 16383 \text{ м}^3.$$

По табл. 13 Приложений подбираем типовой проект аэротенка-смесителя № 902-2-268 со следующими характеристиками:

- число секций $n_{\text{ат}} = 6$;
- число коридоров $n_{\text{кор}} = 3$;
- рабочая глубина $H_{\text{ат}} = 5$ м;
- ширина коридора $b_{\text{кор}} = 6$ м;
- объем одной секции – 3780 м^3 .

По формуле (3.6) определяем длину секции аэротенка:

$$l_{\text{ат}} = 16383/(6 \cdot 3 \cdot 5 \cdot 6) = 30,3 \approx 30 \text{ м.}$$

По табл. 87 принимаем степень рециркуляции активного ила $R_i = 100$ и дозу циркуляционного активного ила $a_{\text{cir}} = 14,0$ г/л.

По формулам (8.25) и (8.26) рассчитываем прирост активного ила P_i и суточное количество избыточного активного ила G :

$$P_i = (1 + 0,01 \cdot 24)(0,8 \cdot 155 + 0,3 \cdot 185) = 222,58 \text{ мг/л};$$

$$G = 222,58 \cdot 189000/10^6 = 42,07 \text{ т/сут.}$$

По формуле (8.27) рассчитываем необходимое количество сернокислого железа (II) (при содержании реагента в товарном продукте $P_{\text{реаг}} = 0,6$):

$$Q_{\text{реаг}} = \frac{189000 \cdot 24}{0,6 \cdot 10^6} = 0,756 \text{ т/сут.}$$

ПРИЛОЖЕНИЯ

Таблица 1

Расчетные характеристики отдельных видов сточных вод /8/

Сточные воды	ρ_{max} , МГ	K_l , МГ	K_o , МГ	Φ , л/г	s
	БПК _{полн} /(Г·ч)	БПК _{полн} /л	О ₂ /л		
Городские	85	33	0,625	0,07	0,3
Производственные:					
а. нефтеперерабатывающих заводов:					
I система	33	3	1,81	0,17	—
II система	59	24	1,66	0,158	—
б. азотной промышленности	140	6	2,4	1,11	—
в. заводов синтетического каучука	80	30	0,6	0,06	0,15
г. целлюлозно-бумажной промышленности:					
сульфатно-целлюлозное производство	650	100	1,5	2	0,16
сульфитно-целлюлозное производство	700	90	1,6	2	0,17
д. заводов искусственного волокна (вискозы)	90	35	0,7	0,27	—
е. фабрик первичной обработки шерсти:					
I ступень	32	156	—	0,23	—
II ступень	6	33	—	0,2	—
ж. дрожжевых заводов	232	90	1,66	0,16	0,35
з. заводов органического синтеза	83	200	1,7	0,27	—
и. микробиологической промышленности:					
производство лизина	280	28	1,67	0,17	0,15
производство биовита и витаминина	1720	167	1,5	0,98	0,12
к. свинооткормочных комплексов:					
I ступень	454	55	1,65	0,176	0,25
II ступень	15	72	1,68	0,171	0,3

Таблица 2

Параметры аэраторов из фильтросных пластин при потерях напора 0,2÷1 м /2/

Размеры каналов, мм		Длина участков аэраторов, м, на один стояк, при допустимой неравномерности аэрации			Удельная производительность, м ³ /(м·ч)	Перепад давления, кПа
		5%	10%	15%		
ширина	глубина					
250	100	64	78	88	30	2÷10
250	200	120	146	150		

Таблица 3

Параметры аэраторов из фильтросных труб при потерях напора 0,3÷1 м /2/

Диаметр, мм		Длина участков аэраторов, м, на один стояк, при допустимой неравномерности аэрации			Удельная производительность, м ³ /(м·ч)	Перепад давления, кПа
наружный	внутренний	5%	10%	15%		
242	184	25	43	53	30÷112	3÷10
260	200	29	51	60	35÷115	
288	228	33	56	72	40÷126	

Таблица 4

Параметры аэраторов из дырчатых труб с отверстиями диаметром 3 мм при потерях напора 0,15 м /2/

Диаметр, мм		Отверстия		Длина участков аэраторов, м, на один стояк, при допустимой неравномерности аэрации			Удельная производительность, м ³ /(м·ч)
условный проход	наружный	Диаметр, мм	Число на 1 м аэратора	5%	10%	15%	
50	60	3	20	13	15,5	17,2	18
			40	5,7	9,6	13,6	36,5
			80	2,6	4	5	73
80	88,5	3	40	20	24	26,5	36,5
			80	7	10,7	14	73
			120	4,5	6,7	8,5	110
100	114	3	40	27,3	34,2	37,9	36,5
			80	11,3	17,4	23,4	73
			120	7,1	10,7	13,6	110

Таблица 5

Параметры для расчета вентиляционных трубопроводов /2/

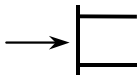
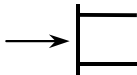



Диаметр воздухо-вода, мм	Расход воздуха, м ³ /с (над чертой) и скорость, м/с (под чертой) при потерях напора, мм/м							
	0,056	0,1	0,17	0,25	0,37	0,55	1	1,7
<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>	<i>7</i>	<i>8</i>	<i>9</i>
50	<u>0,002</u> 1,2	<u>0,003</u> 1,6	<u>0,004</u> 2	<u>0,005</u> 2,5	<u>0,006</u> 3	<u>0,007</u> 3,5	<u>0,01</u> 5	<u>0,013</u> 7
	<u>0,014</u> 1,8	<u>0,019</u> 2,5	<u>0,025</u> 3	<u>0,031</u> 4	<u>0,038</u> 4,5	<u>0,046</u> 6	<u>0,063</u> 8	<u>0,084</u> 10
100	<u>0,042</u> 2,25	<u>0,057</u> 3	<u>0,074</u> 4	<u>0,092</u> 5	<u>0,112</u> 6	<u>0,136</u> 8	<u>0,188</u> 10	<u>0,248</u> 14

Продолжение табл. 5

<i>l</i>	2	3	4	5	6	7	8	9
200	$\frac{0,09}{2,75}$	$\frac{0,122}{4}$	$\frac{0,16}{5}$	$\frac{0,198}{6}$	$\frac{0,242}{8}$	$\frac{0,296}{9}$	$\frac{0,404}{12}$	$\frac{0,54}{16}$
250	$\frac{0,156}{3}$	$\frac{0,22}{4,5}$	$\frac{0,285}{6}$	$\frac{0,35}{7}$	$\frac{0,435}{9}$	$\frac{0,525}{10}$	$\frac{0,73}{14}$	$\frac{0,835}{20}$
300	$\frac{0,264}{3,5}$	$\frac{0,357}{5}$	$\frac{0,474}{7}$	$\frac{0,582}{8}$	$\frac{0,71}{10}$	$\frac{0,878}{12}$	$\frac{1,2}{16}$	—
350	$\frac{0,395}{4}$	$\frac{0,542}{6}$	$\frac{0,703}{7}$	$\frac{0,875}{9}$	$\frac{1,08}{12}$	$\frac{1,31}{14}$	$\frac{1,8}{18}$	—
400	$\frac{0,57}{4,5}$	$\frac{0,775}{6}$	$\frac{1,03}{8}$	$\frac{1,25}{10}$	$\frac{1,53}{12}$	$\frac{1,89}{14}$	$\frac{2,57}{20}$	—
450	$\frac{0,78}{5}$	$\frac{1,07}{7}$	$\frac{1,39}{9}$	$\frac{1,72}{10}$	$\frac{2,12}{14}$	$\frac{2,58}{16}$	—	—
500	$\frac{1,02}{5}$	$\frac{1,38}{7}$	$\frac{1,84}{9}$	$\frac{2,26}{12}$	$\frac{2,76}{14}$	$\frac{3,34}{18}$	—	—
600	$\frac{1,67}{6}$	$\frac{2,29}{8}$	$\frac{2,98}{10}$	$\frac{3,63}{12}$	$\frac{4,5}{16}$	$\frac{5,53}{20}$	—	—
700	$\frac{2,5}{7}$	$\frac{3,37}{9}$	$\frac{4,5}{12}$	$\frac{5,52}{14}$	$\frac{6,7}{18}$	—	—	—
800	$\frac{3,62}{7}$	$\frac{4,89}{10}$	$\frac{6,4}{12}$	$\frac{7,85}{16}$	$\frac{9,7}{20}$	—	—	—
900	$\frac{4,87}{8}$	$\frac{6,6}{10}$	$\frac{8,75}{14}$	$\frac{10,8}{16}$	—	—	—	—
1000	$\frac{6,5}{8}$	$\frac{8,9}{12}$	$\frac{11,7}{14}$	$\frac{14,3}{18}$	—	—	—	—

Таблица 6

Коэффициенты местных сопротивлений воздуховодов /2/

Местное сопротивление	Условное обозначение	ζ
<i>l</i>	2	3
Вход в трубу		0,5
Выход из трубы		1
Колено, 90°:		
– закругленное		0,3
– прямое		1,1
Переход		0,08

Продолжение табл. 6

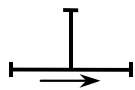
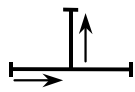
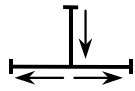
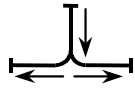
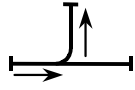
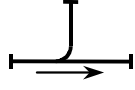

1	2	3
Тройник:		
– на проход		0,1
– в ответвление		1,5
– в противоток		3
– закругленный		1,5
– с плавным ответвлением		0,7
– с плавным ответвлением на проход		0,18
Задвижка		0,1

Таблица 7

Технические характеристики воздуходувок /3/

Тип	Производительность, тыс. м ³ /ч	Давление, МПа	Мощность двигателя, кВт
ТВ-42-1,4	2,5	0,14	46
ТВ-50-1,6	3,6	0,16	71
ТВ-50-1,9	3,6	0,195	130
ТВ-80-1,4	6	0,142	89
ТВ-80-1,6	6	0,163	135
ТВ-80-1,8	6	0,177	155
ТВ-175-1,6	10	0,163	210
ТВ-200-1,4	12	0,14	172
ТВ-300-1,6	18	0,16	350

Таблица 8

Характеристики вентиляторов низкого давления /2/

Марка вентилятора	Производительность, м ³ /ч	Напор, мм	Мощность электро- двигателя, кВт
1	2	3	4
ЭВР-2	200÷2000	15÷70	0,25÷1
ЭВР-3	400÷4000	15÷60	1÷1,7
ЭВР-4	700÷8500	10÷100	1,7÷7
ЭВР-5	1500÷10000	15÷80	2,8÷7

Продолжение табл. 8

1	2	3	4
ЦЧ-70 № 2,5	300÷2000	10÷55	0,27÷0,6
ЦЧ-70 № 3	400÷3800	10÷90	0,6÷1
ЦЧ-70 № 4	600÷4500	8÷55	0,6÷1
ЦЧ-70 № 5	1000÷8500	8÷80	1÷1,7
ЦЧ-70 № 6	1500÷14000	8÷110	1,7÷4,5
ЦЧ-70 № 7	2000÷20000	8÷120	2,8÷10

Таблица 9

Параметры работы механических клеточных аэраторов /2/

Диаметр, см	Частота вращения, мин ⁻¹	Глубина погружения гребней, см	Производительность по кислороду, г/(ч·м)	Требуемая мощность, кВт/м	Импульс давления
1	2	3	4	5	6
50	60	8	230	0,21	0,0035
		15	380	0,49	0,0055
		20	490	0,6	0,0054
	90	8	470	0,42	0,0066
		15	950	0,9	0,012
		20	1170	1,2	0,011
	120	8	850	0,62	0,016
		15	1800	1,42	0,017
		20	2300	1,92	0,016
70	60	8	300	0,36	0,006
		15	570	0,9	0,013
		25	940	1,35	0,1
	80	8	570	0,57	0,01
		15	1130	1,5	0,01
		25	1900	2,27	0,09
	100	8	830	0,85	0,014
		15	1930	2,24	0,024
		25	3200	3,5	0,035
90	60	8	530	0,68	0,0086
		20	1200	2,21	0,021
		30	1430	4	0,022
	80	8	910	1,14	0,013
		20	2400	3,5	0,03

Продолжение табл. 9

1	2	3	4	5	6
90	80	30	3400	6,25	0,034
	100	8	1350	1,8	0,016
		20	3900	5	0,04
		30	5600	9	0,049

Таблица 10

Характеристики механических поверхностных аэраторов /5/

Тип аэратора	Производительность по кислороду, кг/ч	Установленная мощность, кВт	Частота вращения, мин ⁻¹	Основные размеры	
				Общая высота, мм	Диаметр рабочего органа, мм
МП 7,5-1,25	11	7,5	59	2800	1250
МП 15-1,5	15	15	49	3000	1500
МП 37-2	50	37	49	3360	2000

Таблица 11

Характеристики дисковых механических аэраторов поверхностного типа /2/

Диаметр аэратора, м	Производительность по кислороду, кг/ч	Количество лопастей	Мощность (нетто), кВт	Частота вращения, мин ⁻¹	Размеры лопасти, см	
					Высота	Длина
0,5	3,33	6	1,2	133	14	17
0,7	7,03	8	2,4	95	14	20
1	9,58	12	3,4	67	13	21
1,5	22,91	16	7,5	48	14	25
2	33,33	18	11,8	38	15	30
2,5	52,08	18	18,1	32	18	37
3	77,5	24	26,5	27	17	35
3,5	108,33	24	38,5	24	18	40
4	145,83	24	52,2	22	20	47
4,5	204,16	24	75	21	22	52

Таблица 12

Характеристики пневмомеханических аэраторов /5/

Тип аэратора	Производительность по кислороду, кг/ч	Расход сжатого воздуха, м ³ /ч	Установленная мощность, кВт	Частота вращения, мин ⁻¹	Основные размеры	
					Общая высота, мм	Диаметр турбинки, мм
ПМ 22-09	54	900	22	130	7600	900
ПМ 55-1,03	130	1300	55	130	8000	1030
ПМ 75-1,12	190	1900	75	130	8100	1120

Таблица 13

Основные параметры типовых аэротенков-смесителей /3/

Ширина коридора, м	Рабочая глубина аэротенка, м	Число коридоров	Рабочий объем секции, м ³	Длина секции, м	Тип аэрации	Номер типового проекта
3	1,2	2	170	24	Механическая	902-2-94 902-2-95/96
			260	36		
4	4,5	2	864	24	Низконапорная	902-2-215/216 902-2-217/218
			1296	36		
6	5	3	3780	42	Пневматическая данная	902-2-268 902-2-269 902-2-211
			5400	60		
			7560	83		
9	5,2	4	21680	120	Пневматическая данная	902-2-120/72 902-2-264
			28080	150		

Таблица 14

Основные параметры типовых аэротенков-вытеснителей /3/

Ширина коридора, м	Рабочая глубина аэротенка, м	Число коридоров	Рабочий объем одной секции, м ³ , при длине, м							Типовой проект № 902-2-...
			36-42	48-54	60-66	72-78	84-90	96-102	108-114	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
4,5	3,2	2	1040-1213	1386-1559	1732	—	—	—	—	-195
		3	1560-1820	2080-2340	2600	—	—	—	—	-192

Продолжение табл. 14

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
4,5	3,2	4	2070– –2416	2762– –3108	3494– –3800	—	—	—	—	-178
	4,4	2	1420– –1658	1896– –2134	2372	—	—	—	—	-195
		3	2140– –2496	2852– –3208	3564	—	—	—	—	-193
		4	2850– –3325	3800– –4275	4750– –5225	—	—	—	—	-178
6	4,4	2	—	2530– 2847	3154– –3471	3788	—	—	—	-196
		3	—	3800– 4275	4750– –5225	5700	—	—	—	-192
6	4,4	4	—	5700	5334– –6968	7602– –8230	6870	—	—	-179
	5	2	—	2880– –3240	3600– –3960	4320	—	—	—	-196
		3	—	4320– –4860	5400– –5940	6480	—	—	—	-193
		4	—	6500	7220– –7940	8666– –9380	10100	—	—	-179
9	4,4	2	—	—	—	6180	6655– –7130	7505– –7980	8455	-197
		3	—	—	—	9270	9983– –10696	11409– –12122	12835	-194
		4	—	—	—	—	13300– –14250	15200– –16150	17100– –18050	-180
	5	2	—	—	—	7020	7560– –8100	8640– –9180	9720	-197
		3	—	—	—	10530	11340– –12150	12960– –13770	14580	-194
			4	—	—	—	—	15120– –16200	17280– –18360	19440– –20520

Таблица 15

Технико-экономические характеристики установок разделения воздуха /6/

Марка установки	Количество блоков в установке	Производительность по кислороду, м ³ /ч	Стоимость цеха, тыс. руб	Расход электроэнергии, тыс. кВт·ч	Годовые эксплуатационные затраты, тыс. руб	Себестоимость 1 м ³ кислорода, коп
К-0,15	1	165	134,2	1918	73,88	5,5
К-0,4	1	420	275	4631	462,23	4,79
К-0,4	2	840	505,2	956,2	308,26	4,5
К-1,4	1	1400	632,18	7268	306,33	2,85
К-1,4	2	2800	1164,45	14535,4	554	2,53
К-5	1	4850	1604,2	24823,5	848,18	2

Примечания: 1. Производительность и себестоимость даны при нормальном давлении кислорода при температуре 20°С. 2. Содержание кислорода не ниже 99,5%. 3. Экономические показатели даны по состоянию на 1990 г.

Таблица 16

Расчетные параметры денитрификаторов с фиксированной загрузкой /6/

Денитрификатор	Параметры фиксированной загрузки		Высота слоя, м	Расстояние между рядами, мм	Интенсивность промывки, л/(м ² ·с)	Продолжительность промывки, мин
	Материал	Гранулометрическая характеристика, d, мм				
Каркасно-засыпной	Кварцевый песок	0,8÷1	0,8÷1	—	Нарастание интенсивности до 8	10
	Гравий	16÷32	1,5÷2	—	—	—
Гравийный	Гравий	40÷60	≥ 4	—	13	10
Пленочный	Рулонные пластмассовые материалы	—	То же	Вертикальные ряды через 40÷60 мм	—	—
С загрузкой из стекловолокна	Стекловолокно	—	То же	Вертикальные ряды через 50÷70 мм	—	—

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Курганов, А.М.* Справочник по гидравлическим расчетам систем водоснабжения и канализации/ А.М.Курганов, Н.Ф.Федоров.– Л.:Стройиздат, 1973.– 407 с.
2. *Ласков, Ю.М.* Примеры расчетов канализационных сооружений: Учеб. пособие для вузов/ Ю.М. Ласков, Ю.В. Воронов, В.И. Калицун.– 2-е изд., перераб. и доп.– М.:Стройиздат, 1987.– 255 с.
3. *Лихачев, Н.И.* Канализация населенных мест и промышленных предприятий/ Н.И.Лихачев, И.И.Ларин, С.А.Хаскин; Под ред. В.Н.Самохина.– 2-е изд., перераб. и доп.– М.:Стройиздат, 1981.– 639 с.
4. *Лукиных, А.А.* Таблицы для гидравлического расчета канализационных сетей и дюкеров по формуле акад. Н.Н.Павловского/ А.А.Лукиных, Н.А.Лукиных.– 5-е изд., доп.– М.:Стройиздат, 1987.– 152 с.
5. *Пааль, Л.Л.* Справочник по очистке природных и сточных вод/ Л.Л.Пааль, Я.Я.Кару, Х.А.Мельдер.– М.:Высш. шк., 1994.– 336 с.
6. *Проектирование* сооружений для очистки сточных вод/ Всесоюз. комплекс. н.-и. и конструктор.-технолог. ин-т водоснабжения, канализации и инж. гидрогеологии.– М.: Стройиздат, 1990.– 192 с.
7. *Родионов, А.И.* Технологические процессы экологической безопасности. (Основы энвайронменталистики): Учебник для вузов/ А.И.Родионов, В.Н.Клушин, В.Г.Систер.– 3-е изд., перераб. и доп.– Калуга:Издательство Н.Бочкаревой, 2000.– 800 с.
8. *Строительные нормы и правила:* СНиП 2.04.03-85. Канализация. Наружные сети и сооружения.– Введ. 01.01.1986.– М.:ЦИТП Госстроя СССР, 1986.– 72 с.
9. *Шевелев, Ф.А.* Таблицы для гидравлического расчета водопроводных труб: Справ. пособие/ Ф.А.Шевелев, А.Ф.Шевелев.– 7-е изд., перераб. и доп.– М.:Стройиздат, 1995.– 176 с.
10. *Яковлев, С.В.* Водоотведение и очистка сточных вод: Учебник для вузов/ С.В.Яковлев, Я.А.Карелин, Ю.М.Ласков.– М.:Стройиздат, 1996.– 592 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
1. ОСНОВЫ БИОЛОГИЧЕСКОЙ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД	4
1.1. СОСТАВ АКТИВНОГО ИЛА И БИОПЛЕНКИ	4
1.2. ЗАКОНОМЕРНОСТИ РАСПАДА ОРГАНИЧЕСКИХ ВЕЩЕСТВ.....	5
1.3. МЕТАБОЛИЗМ НЕКОТОРЫХ ВЕЩЕСТВ.....	6
1.4. ЗАВИСИМОСТЬ СКОРОСТИ БИОЛОГИЧЕСКОЙ ОЧИСТКИ ОТ РАЗЛИЧНЫХ ФАКТОРОВ	8
2. БИОЛОГИЧЕСКИЕ ФИЛЬТРЫ	10
2.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О БИОЛОГИЧЕСКИХ ФИЛЬТРАХ	10
2.2. БИОФИЛЬТРЫ С ОБЪЕМНОЙ ЗАГРУЗКОЙ	11
2.3. БИОФИЛЬТРЫ С ПЛОСКОСТНОЙ ЗАГРУЗКОЙ.....	12
2.4. ПОГРУЖНЫЕ БИОФИЛЬТРЫ	12
2.5. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ СТОЧНЫХ ВОД ПО БИОФИЛЬТРАМ.....	14
2.6. РАСЧЕТ БИОФИЛЬТРОВ.....	16
2.7. ПРИМЕРЫ РАСЧЕТОВ	24
3. АЭРОТЕНКИ	33
3.1. ПРИНЦИПЫ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД В АЭРОТЕНКАХ	33
3.2. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ РАБОТЫ АЭРАЦИОННЫХ СООРУЖЕНИЙ.....	34
3.3. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СХЕМЫ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД В АЭРОТЕНКАХ.....	35
3.4. КЛАССИФИКАЦИЯ АЭРОТЕНКОВ ПО ГИДРАВЛИЧЕСКОЙ СХЕМЕ РАБОТЫ И НАГРУЗКЕ.....	37
3.5. СИСТЕМЫ АЭРАЦИИ В АЭРОТЕНКАХ	38
3.6. КОНСТРУКЦИИ АЭРОТЕНКОВ	40
3.7. РАСЧЕТ АЭРОТЕНКОВ	42
3.8. ПРИМЕРЫ РАСЧЕТОВ	51
4. ЦИРКУЛЯЦИОННЫЕ ОКИСЛИТЕЛЬНЫЕ КАНАЛЫ (ЦОК)	66
4.1. РАСЧЕТ ЦОК	67
4.2. ПРИМЕР РАСЧЕТА	68
5. ОКСИТЕНКИ	70
5.1. РАСЧЕТ КОМБИНИРОВАННЫХ ОКСИТЕНКОВ	71
5.2. ПРИМЕР РАСЧЕТА	73
6. ПОЛЯ ФИЛЬТРАЦИИ И ПОЛЯ ОРОШЕНИЯ	76
6.1. РАСЧЕТ ПОЛЕЙ ФИЛЬТРАЦИИ И ОРОШЕНИЯ.....	81
6.2. ПРИМЕРЫ РАСЧЕТОВ	85
7. БИОЛОГИЧЕСКИЕ ПРУДЫ	90
7.1. РАСЧЕТ БИОЛОГИЧЕСКИХ ПРУДОВ	91
7.2. ПРИМЕРЫ РАСЧЕТОВ	95
8. УДАЛЕНИЕ БИОГЕННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ИЗ СТОЧНЫХ ВОД	99
8.1. УДАЛЕНИЕ ИЗ СТОЧНОЙ ВОДЫ СОЕДИНЕНИЙ АЗОТА.....	100
8.2. УДАЛЕНИЕ ИЗ СТОЧНОЙ ВОДЫ СОЕДИНЕНИЙ ФОСФОРА	103
8.3. РАСЧЕТ НИТРИДЕНИТРИФИКАЦИИ	104
8.4. РАСЧЕТ БИОЛОГО-ХИМИЧЕСКОЙ ОЧИСТКИ ОТ ФОСФОРА	108
8.5. ПРИМЕРЫ РАСЧЕТОВ	110
ПРИЛОЖЕНИЯ	117
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	126