

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Юго-Западный государственный университет»
(ЮЗГУ)
Кафедра охраны труда и окружающей среды

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по учебной работе



« 16 » 01



**ИССЛЕДОВАНИЕ И ОЦЕНКА ЗАГРЯЗНЕНИЯ
ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ ПРОИЗВОДСТВЕННЫМИ
СТОЧНЫМИ ВОДАМИ**

Методические указания к лабораторным и практическим занятиям для
студентов всех специальностей и направлений подготовки

Курск 2025

УДК 502.36

Составители: М. В. Томаков.

Рецензент

Кандидат технических наук, доцент *А. В. Беседин*

Исследование и оценка загрязнения водных объектов производственными сточными водами : методические указания к лабораторным и практическим занятиям для студентов всех специальностей и направлений подготовки / Юго-Зап. гос. ун-т; сост. М. В. Томаков. – Курск : ЮЗГУ, 2025. – 26 с.

Изучается методика и решаются задачи определения необходимой степени очистки производственных сточных вод, сбрасываемых в открытые водные объекты.

Предназначены студентам всех специальностей и направлений подготовки при изучении дисциплин Производственная и экологическая безопасность, Инженерная экология в строительстве, Экологическая безопасность, Экологическая безопасность в теплоэнергетике, Горнопромышленная экология, Безопасность жизнедеятельности.

Текст печатается в авторской редакции

Подписано в печать 16.01.2025 г. Формат 60x84 1/16.

Усл. печ. л. 1,51. Уч. изд. л. 1,3. Тираж 100 экз. Заказ 42. Бесплатно.

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

ВВЕДЕНИЕ

Производственные технологии промышленных предприятий связаны с потреблением воды. При этом образуются сточные воды, которые подлежат сбросу в близлежащие водные объекты.

Сброс урегулирован природоохранным законодательством, в частности Водным кодексом РФ¹.

Промышленные предприятия, сбрасывающие сточные воды, должны их очищать. Очистка сточных вод предназначена для доведения всех параметров, характеризующих их качество, до нормативных показателей.

Промышленные предприятия, сбрасывающие сточные воды, обязаны осуществлять регулярные наблюдения за водными объектами и их водоохранными зонами.

Все организации, претендующие на право пользования водным объектом, в обязательном порядке должны разработать *программу регулярных водных наблюдений*. Такая программа представляет собой комплекс мероприятий, которые должен выполнять водопользователь для оценки негативного влияния стоков на водоем.

В точках, которые были предварительно согласованы, по установленному графику осуществляется забор проб. Результаты такого контроля фиксируются в журнале.

Результатом действия этой программы становится оценка качества сбрасываемых стоков, а также постоянное наблюдение за используемым водоемом.

¹ Водный кодекс Российской Федерации от 03.06.2006 №74-ФЗ (ред. от 08.08.2024) (с изм. и доп., вступ. в силу с 01.09.2024)

1 ОБЩАЯ ЧАСТЬ

1.1. Тема занятия

Исследование и оценка загрязнения водных объектов производственными сточными водами.

1.2. Цель занятия

Изучить методику и расчетным методом определить необходимую степень очистки производственных сточных вод, сбрасываемых в открытые водные объекты.

1.3. Планируемые результаты обучения

По результатам выполненной работы студент будет:

- *знать* классификацию сточных вод промышленных предприятий; расчетные методы определения необходимой степени очистки производственных сточных вод; профессиональные термины и определения;
- *уметь* применять методики определения необходимой степени очистки производственных сточных вод;
- *владеть* навыками расчета необходимой степени очистки производственных сточных вод.

2 МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

2.1. Задание

1. Изучить учебно-методические материалы.
2. Рассмотреть конкретные примеры и выполнить расчеты в соответствии с вариантом задания.
3. Составить отчет.
4. Ответить на контрольные вопросы.
5. Защитить отчет.
6. В процессе выполнения задания следует использовать интернет-ресурсы.

2.2. Отчет

Каждый студент составляет индивидуальный отчет, который должен быть выполненным в соответствии с индивидуальным заданием. Отчет должен содержать наименование темы и цель занятия, основные

термины и определения, теоретические положения, выполненные расчеты, выводы, ответы на контрольные вопросы.

2.3. Материально-техническое оборудование

Для выхода в интернет – мобильные гаджеты (планшет, ноутбук, телефон).

3 УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ

3.1. Основные термины и определения

Водный объект – природный или искусственный водоем, водоток либо иной объект, постоянное или временное сосредоточение вод в котором имеет характерные формы и признаки водного режима.

Водоем – это водный объект в углублении суши, характеризующийся замедленным движением воды или полным его отсутствием.

Водоотведение – любой сброс вод, в том числе сточных вод и (или) дренажных вод, в водные объекты.

Водоток – это водный объект, характеризующийся движением воды в направлении уклона в углублении земной поверхности.

Загрязнение сточных вод – это наличие в них различных примесей, которые приводят к качественным изменениям воды.

Зарегулированный водоток – водоток, естественный режим стока которого изменён при помощи технических мероприятий.

Зона начального разбавления – это относительное расстояние между оголовками рассеивающего выпуска.

Консервативное вещество – это вещество, не претерпевающее изменений в воде за счет химических и гидрологических процессов. Уменьшение концентрации консервативных веществ происходит в результате разбавления.

Контрольный створ – это поперечное сечение потока, в котором контролируется качество воды.

Кратность разбавления – это количественная характеристика интенсивности процесса снижения концентрации загрязняющих веществ в водоемах или водотоках, вызванного перемешиванием и разбавлением сточных вод в окружающей водной среде.

Лимитирующий показатель вредности (ЛПВ) – признак, характеризующийся наименьшей безвредной концентрацией вещества в воде.

Незарегулированные водотоки – это территории, не тронутые человеком. Вода, ил и другие натуральные материалы могут беспрепятственно перемещаться по таким водотокам.

Неконсервативное вещество – это вещество, концентрация которого в воде уменьшается как за счет разбавления, так и за счет химических и гидробиологических процессов.

Общесанитарный показатель вредности вод определяет влияние вещества на процессы естественного самоочищения вод за счет биохимических и химических реакций с участием естественной микрофлоры.

Органолептический показатель вредности воды характеризует способность вещества изменять органолептические свойства воды, определяется с помощью органов чувств – обоняния, вкуса, зрения.

Очистка сточных вод – это комплекс мероприятий по удалению загрязнений, содержащихся в промышленных сточных водах перед выпуском их в водотоки или водоёмы.

Предельно допустимая концентрация в воде водоема хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования (ПДКВ, мг/л) – это концентрация вредного вещества в воде, которая не должна оказывать прямого или косвенного влияния на организм человека в течение всей его жизни и на здоровье последующих поколений, она не должна ухудшать гигиенические условия водопользования. ПДКВ устанавливается с учетом трех показателей вредности: органолептического, общесанитарного, санитарно-токсикологического.

Предельно допустимая концентрация вредного вещества в воде водоема, используемого для рыбохозяйственных целей (ПДКВР, мг/л), – это концентрация, которая не должна оказывать вредного влияния на популяции рыб, в первую очередь промысловых. ПДКВР устанавливается с учетом пяти показателей вредности: органолептического, санитарного, санитарно-токсикологического, токсикологического, рыбохозяйственного.

Производственные сточные воды – это воды, образующиеся в технологических процессах при производстве продукции или добыче полезных ископаемых.

Разбавление – это процесс уменьшения концентрации примесей в водоёмах, вызванный перемешиванием сточных вод с водной средой, в которую они выпускаются.

Рыбохозяйственный показатель вредности определяет порчу качеств промысловых рыб.

Санитарно-токсикологический показатель вредности характеризует вредное воздействие на организм человека.

Створ начального разбавления – это поперечное сечение потока, от стоящее от оголовка рассеивающего выпуска на величину длины зоны начального разбавления.

Сточные воды промышленных предприятий – воды, сброс которых в водные объекты осуществляется после их использования в технологических процессах, а также атмосферные воды и осадки, отводимые в водоёмы с территорий предприятий через систему канализации или самотёком.

Токсикологический показатель вредности показывает токсичность вещества для живых организмов, населяющих водный объект.

3.2. Классификация сточных вод промышленных предприятий и основные методы очистки сточных вод

Отработанная вода промышленного предприятия, удаляемая с территории предприятия или направляемая на очистку, называется сточной.

Сточные воды промышленных предприятий условно разделяют на три вида:

– *производственные* – использованные в технологическом процессе производства или получающиеся при добыче полезных ископаемых;

– *бытовые* – от санитарных узлов производственных и непромышленных корпусов, зданий и душевых установок, имеющих на предприятии;

– *атмосферные* – дождевые и талые воды, отводимые с территории предприятия.

Производственные сточные воды делятся на *загрязненные* и *незагрязненные* (условно чистые).

Загрязненные производственные сточные воды по характеру содержащихся в них примесей подразделяются на группы:

- загрязненные преимущественно минеральными примесями;
- загрязненные преимущественно органическими примесями;
- загрязненные минеральными и органическими примесями.

В зависимости от концентрации загрязняющих веществ производственные сточные воды делятся на четыре группы:

- менее 500 мг/л;
- от 500 до 5000 мг/л;
- от 5000 до 30000 мг/л;
- свыше 30000 мг/л,

По степени агрессивности делятся на три группы в зависимости от значения рН:

- неагрессивные ($6,5 \leq \text{pH} \leq 8$);
- слабоагрессивные ($6 \leq \text{pH} < 6,5$ и $8 < \text{pH} \leq 9$);
- сильноагрессивные ($\text{pH} < 6$ и $\text{pH} > 9$).

Схема приведенной классификации показана на рис. 1.

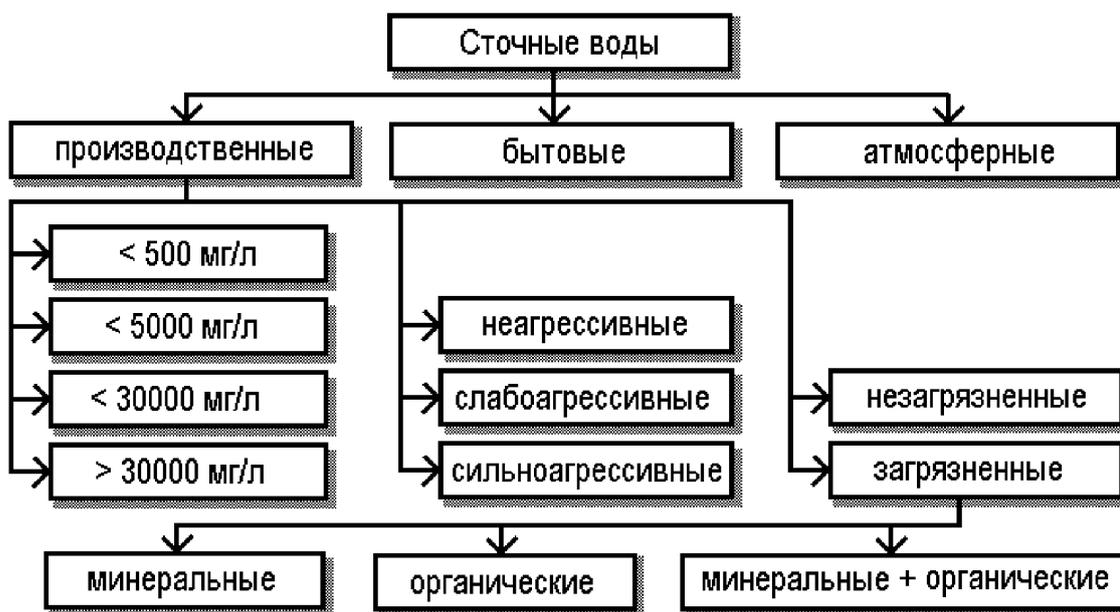


Рис. 1. Классификация сточных вод промышленных предприятий

Воду в системах производственного водообеспечения в зависимости от назначения разделяют на четыре категории:

I категория – вода для охлаждения жидких и конденсации газообразных продуктов в теплообменных аппаратах, в которых она не контактирует с продуктом, лишь нагревается и практически не загрязняется;

II категория – вода служит в качестве среды, поглощающей различные нерастворимые и растворимые примеси; вода не нагревается, но загрязняется взвешенными и растворенными веществами;

III категория – вода используется так же, как вода II категории, но при этом нагревается (например, очистка горячих газов в скрубберах);

IV категория – вода служит в качестве экстрагента или растворителя химических веществ, например при поглощении оксидов азота в производстве азотной кислоты.

Выделяют два основных метода очистки сточных вод.

1) *Разбавление.* Это процесс уменьшения концентрации примесей в водоёмах, вызванный перемешиванием сточных вод с водной средой, в которую они выпускаются. Интенсивность процесса разбавления количественно характеризуется кратностью разбавления. Разбавление не ликвидирует воздействия сточных вод, а лишь ослабляет его на участке водоёма.

2) *Очистка от загрязнений.* Для этого используют следующие методы:

Механические. Для отделения загрязнителей используют гравитационный и центробежный эффекты. Например, для выделения из сточных вод грубодисперсных минеральных и органических загрязнителей применяют процеживание, отстаивание и разделение в поле центробежных сил на гидроциклонах, а для отделения мелкодисперсных загрязняющих частиц – фильтрование.

Физико-химические. К ним относятся флотация, коагуляция (для интенсификации отделения загрязнителей), экстракция, сорбция (для извлечения из стоков необходимых компонентов).

Химические. В сточные воды вводятся специальные реагенты, которые вступают с загрязнителями в химические реакции и обезвреживают их или создают необходимые условия для их удаления (озонирование, хлорирование и др.).

Для очистки используют три основных типа очистных сооружений: локальные (цеховые), общие (заводские) и районные (или городские).

3.3. Общие положения об условиях сброса сточных вод промышленных предприятий в водные объекты

Сточные воды можно сбрасывать в водные объекты, при условии соблюдения гигиенических требований применительно к воде водного объекта в зависимости от вида водопользования.

Все водные объекты подразделяются на виды водопользования:

I вид – хозяйственно-питьевое и культурно-бытовое водопользование;

II вид – рыбохозяйственное водопользование.

Каждый вид водопользования разделен еще и на категории.

Хозяйственно-питьевое и культурно-бытовое водопользование.

I категория – водные объекты, используемые в качестве источников хозяйственно-питьевого водоснабжения, а также для водоснабжения предприятий пищевой промышленности.

II категория – водные объекты, используемые для купания, занятия спортом и отдыха населения.

Рыбохозяйственное водопользование.

Высшая категория – места расположения нерестилищ, массового нагула и зимовальных ям особо ценных и ценных видов рыб и других промысловых водных организмов;

I категория – водные объекты, используемые для сохранения и воспроизводства ценных видов рыб, обладающих высокой чувствительностью к содержанию кислорода;

II категория – водные объекты, используемые для других рыбохозяйственных целей.

При сбросе сточных вод в водные объекты нормы качества воды водного объекта в расчетном створе, расположенном ниже выпуска сточных вод, должны соответствовать санитарным требованиям в зависимости от вида водопользования².

Нормы качества воды водных объектов включают:

– общие требования к составу и свойствам воды, водных объектов в зависимости от вида водопользования;

– перечень предельно допустимых концентраций (ПДК) нормированных веществ в воде водных для различных видов водопользования;

– перечень ПДК нормированных веществ в воде водных объектов, используемых в рыбохозяйственных целях. *ПДК – концентрация индивидуального вещества в воде, выше которой вода не пригодна для установленного вида водопользования. При концентрации вещества меньше ПДК вода остается такой же безвредной для всего живого, как и вода, в которой полностью отсутствует данное вещество.* В перечнях ПДК указываются: полное наименование вещества и его синонимы (если есть), лимитирующий показатель вредности (ЛПВ), класс опасности, нормативное числовое значение с указанием единицы измерения.

² СанПиН 2.1.5.980-00. 2.1.5. «Водоотведение населенных мест, санитарная охрана водных объектов. Гигиенические требования к охране поверхностных вод. Санитарные правила и нормы».

Лимитирующий показатель вредности – признак, характеризующийся наименьшей безвредной концентрацией вещества в воде.

В расчетном створе вода должна удовлетворять нормативным требованиям. В качестве норматива используется предельно допустимая концентрация – ПДК.

Для водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования отвечают три ЛПВ: санитарно-токсикологический, обще-санитарный и органолептический.

Для рыбохозяйственных: обще-санитарный, токсикологический, санитарно-токсикологический, рыбохозяйственный, органолептический.

Вещества, концентрация которых изменяется в воде водного объекта только путем разбавления, называются *консервативными*; вещества, концентрация которых изменяется как под действием разбавления, так и вследствие протекания различных химических, физико-химических и биологических процессов – *неконсервативными*.

Процессы, изменяющие характер веществ, поступающих в водные объекты, называют процессами самоочищения. Совокупность разбавления и самоочищения составляют обезвреживающую способность водного объекта.

Представим ситуацию, когда промышленное предприятие сбрасывает сточные воды после технологического процесса (рис. 2).

При сбросе сточных вод в водные объекты хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования расчетный створ должен устанавливаться на водотоках в одном километре выше ближайшего по течению пункта водопользования (водозабор для хозяйственно питьевого водоснабжения, места купания, организованного отдыха, территории населенного пункта и т. п.), а на непроточных водоемах и водохранилищах – в одном километре в обе стороны от пункта водопользования.

При сбросе сточных вод в водные объекты рыбохозяйственного водопользования расчетный створ определяется в каждом конкретном случае республиканской (областной) администрацией по представлению органов Госкомприроды, но не далее, чем в 500 м от места сброса сточных вод.

Определение контрольного пункта («расчетного» створа) осуществляется в поперечном сечении водного потока в максимально загрязненной струе с массой воды с наиболее высоким содержанием вредных веществ, занимающую определенную часть поперечного сечения водного потока, в которой контролируется качество воды, в

соответствии с требованиями к размещению пунктов контроля за составом сточных вод и качеством воды водных объектов, установленными СанПиН 2.1.5.980-00. 2.1.5.

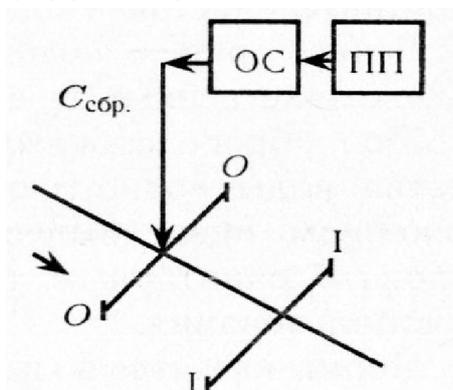


Рис. 2. Ситуационная схема для расчета условий сброса сточных вод: ПП – промышленное предприятие; ОС – очистные сооружения; О-О – «нулевой» створ, где производится сброс сточных вод; I-I – «расчетный» створ, начиная с которого воды водного объекта должны отвечать санитарным требованиям для данного вида водопользования; $C_{сбр}$ – концентрация загрязняющих веществ в сточной воде, подлежащей сбросу

Таким образом, для разных видов водопользования качество воды водного объекта, при сбросе в него сточных вод, должно соответствовать в расчетном створе (рис. 3а, 3б).

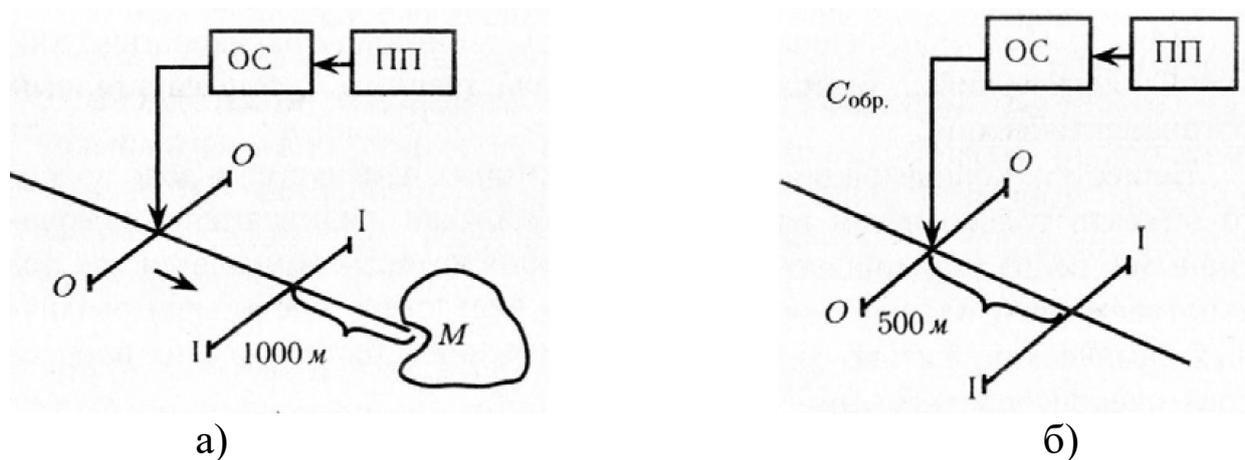


Рис. 3. Ситуационная схема для водотока: а) культурно-бытового (М – населённый пункт, использующий водоток для купания и отдыха населения); б) рыбохозяйственного водопользования.

При сбросе сточных вод в водные объекты санитарное состояние

водного объекта в расчетном створе считается удовлетворительным, если соблюдается следующее условие:

$$\sum_1^Z \frac{C_{рс}^Z}{C_{ПДК}^Z} \leq 1, \quad (1)$$

где $C_{рс}^Z$ – концентрация i -го вещества в расчетном створе при условии одновременного присутствия Z веществ, относящихся к одному и тому же ЛПВ; $i = 1, 2, \dots, Z$; Z – количество веществ с одинаковым ЛПВ; $C_{ПДК}^Z$ – предельно допустимая концентрация Z вещества.

3.4. Теоретическая часть

3.4.1. Расчет разбавления в водотоках

Основной механизм снижения концентрации загрязняющего вещества при сбросе сточных вод в водные объекты – разбавление.

В практике расчетов используют понятие – кратность разбавления. Кратность разбавления в водотоке у расчетного створа выражается зависимостью:

$$n = (\gamma \cdot Q + q) / q, \quad (2)$$

где γ – коэффициент смешения, показывающий, какая часть воды водотока участвует в разбавлении; q – максимальный расход сточных вод, м³/с; Q – расчетный минимальный расход воды водотока в контрольном створе, м³/с.

Кратность разбавления сточных вод – это количественная характеристика интенсивности процесса снижения концентрации загрязняющих веществ в водоёмах или водотоках, вызванного перемешиванием и разбавлением сточных вод в окружающей водной среде.

При определении кратности разбавления сбрасываемых сточных вод водой водотока расчетный расход Q принимается при следующих условиях:

- для незарегулированных водотоков – расчетный минимальный среднемесячный расход воды года 95%-й обеспеченности;
- для зарегулированных водотоков – установленный гарантированный расход ниже плотины (санитарный пропуск) с учетом исключения возможных обратных течений в нижнем бьефе;
- расчетный расход может быть получен в установленном порядке в органах Роскомгидромета.

Незарегулированные водотоки – это территории, не тронутые человеком. Вода, ил и другие натуральные материалы могут беспрепятственно перемещаться по таким водотокам.

Зарегулированный водоток – водоток, естественный режим стока которого изменён при помощи технических мероприятий.

Бьеф – часть водотока или другого водного объекта, примыкающая к водоподпорному сооружению.

Для расчета разбавления сточных вод в средних и больших водотоках наибольшее распространение получил метод Фролова-Родзиллера. В соответствии с этим методом определяется коэффициент смешения, который находят:

$$\gamma = \frac{1 - e^{-\alpha \sqrt[3]{L}}}{1 + \frac{Q}{q} e^{-\alpha \sqrt[3]{L}}}, \quad (3)$$

где Q – среднемесячный расход воды водотока 95%-й обеспеченности, м³/с; q – максимальный расход сточных вод, подлежащих сбросу в водоток, м³/с; L – расстояние по фарватеру водотока от места выпуска до расчетного створа, м; α – коэффициент, зависящий от гидравлических условий смешения:

$$\alpha = \xi \varphi \sqrt[3]{\frac{D}{q}}, \quad (4)$$

где ξ – коэффициент, зависящий от расположения выпуска сточных вод в водоток: при выпуске у берега $\xi = 1$; при выпуске в фарватер $\xi = 1,5$; φ – коэффициент извилистости водотока, т. е. отношение расстояния между рассматриваемыми створами водотока по фарватеру к расстоянию по прямой; D – коэффициент турбулентной диффузии.

Для равнинных рек и упрощенных расчетов коэффициент турбулентной диффузии находят по формуле М.В. Потапова:

$$D = \frac{v_{\text{cp}} \cdot H_{\text{cp}}}{200}, \quad (5)$$

где v_{cp} – средняя скорость течения водотока на интересующем нас участке между нулевыми расчетными створами, м/с; H_{cp} – средняя глубина на этом участке, м.

Для детальных расчетов D определяется по уравнению:

$$D = \frac{g \cdot v_{cp} \cdot H_{cp}}{M \cdot C}, \quad (6)$$

где g – ускорение свободного падения, м/с²; C – коэффициент Шези, м^{1/2}/с; M – функция коэффициента Шези от C .

При условии $10 < C < 60$ $M = 0,7C + 6$, при $C > 60$ $M = 48 = \text{const}$.

Произведение $M \cdot C$ имеет размерность м/с².

При сбросе сточных вод в водоемы расчет разбавления сточных вод производят по методу Н.Н. Лапшева. Этот метод применим для рассеивающих и сосредоточенных выпусков при следующих допущениях:

- скорость истечения сточных вод в водоем должна быть более 2 м/ч;
- выпуск сточных вод находится на некотором удалении от берега, и относительная глубина в месте установки выпуска H/d_0 должна быть более 30; H – глубина водоема в месте установки выпуска, м; d_0 – диаметр выпуска, м.

Наименьшее разбавление, наблюдающееся на расстоянии L от места выпуска, определяется по выражению:

$$n = A \left(\frac{0,2L}{d_0} \right)^{P \cdot S}, \quad (7)$$

где A – параметр, определяющий изменение разбавления при применении различных конструкций выпуска, при сосредоточенном выпуске $A = 1$; P – параметр, зависящий от скорости проточности водоема и нагрузки на него сточных вод; S – параметр, зависящий от относительной глубины водоема.

При этом предлагаются два случая:

1. Когда движение воды в водоеме определяется стоком, параметр P рассчитывают по формуле:

$$P = \frac{L_B \omega_0}{0,000015 \beta_B W_0 + L_B \omega_0}, \quad (8)$$

где L_B – длина водоема от места выпуска сточных вод в направлении стокового течения, м; ω_0 – суммарная площадь выпускных отвер-

стей, м^2 ; β_0 – период обмена воды в водоеме, год; W_0 – объем сбрасываемых сточных вод в течение года, $\text{м}^3/\text{год}$.

2. Если течение в водоеме определяется нагонными ветрами и скорость этого течения известна, то параметр P рассчитывают по формуле:

$$P = \frac{V_n}{0,000015V_0 + V_n}, \quad (9)$$

где V_n – скорость течения в водоеме, $\text{м}/\text{с}$; V_0 – скорость истечения сточных вод из выпуска, $\text{м}/\text{с}$.

Параметр S , рассчитывают по формуле:

$$S = 0,875 + \frac{0,325H}{360 + \left(\frac{V_n}{V_0}\right)10^5}, \quad (10)$$

где H – глубина водоема в месте выпуска, м . Параметр $S < 1$.

3.4.2. Расчет необходимой степени очистки сточных вод по вредным веществам

Все вредные вещества, для которых определены значения ПДК, подразделены на лимитирующие показатели вредности ЛПВ в зависимости от вида водопользования.

Санитарное состояние водного объекта в результате сброса сточных вод считается удовлетворительным, если вещества, входящие в определенный ЛПВ, будут содержаться в концентрациях, удовлетворяющих условию (1). Из неравенства (1) следует, что каждое вредное вещество, входящее в ЛПВ, при условии одновременного присутствия i -веществ, может присутствовать в расчетном створе в концентрациях не более чем

$$C'_{\text{pc}} \leq C_{\text{ПДК}}^z \left(1 - \sum \frac{C_{\text{pc}}^z}{C_{\text{ПДК}}^i} \right), \quad (11)$$

где C'_{pc} – значение концентрации вредного вещества в расчетном створе при условии одновременного присутствия Z веществ с одинаковым ЛПВ; $C_{\text{ПДК}}^z$ – предельно допустимая концентрация z -го вещества;

C_{pc}^z – фактическая или расчетная концентрация z -го вещества в расчетном створе.

Концентрацию каждого из z -го вещества в очищенных сточных водах, при условии соблюдения неравенства (1), можно определить из выражения

$$C_{оч}^z \leq n(C_{pc}^z - C_B^z) - C_B^z, \quad (12)$$

где $C_{оч}^z$ – концентрация z -го вещества в очищенной воде перед сбросом в водный объект, при условии одновременного присутствия веществ с одинаковым ЛПВ; C_{pc}^z – фактическая или расчетная концентрация z -го вещества в водном объекте до места сброса сточных вод. C_B^z – концентрация z -го вещества в водном объекте до места сброса сточных вод.

Используя уравнение эффективности очистки, значение $C_{оч}^z$ для каждого из веществ, относящихся к этой группе ЛПВ, можно определить из выражения:

$$C_{оч}^z = \left(1 - \frac{\mathcal{E}_z}{100}\right) C_{ст}^z, \quad (13)$$

где $C_{ст}^z$ – концентрация z -го вещества в сточной воде, поступающего на очистку; \mathcal{E}_z – эффективность очистки z -го вещества.

Приравнявая правые части уравнений (12), (13), определяем максимально допустимую концентрацию z -го вещества в расчетном створе:

$$C_{pc}^z = \frac{1}{n} \left(1 - \frac{\mathcal{E}_z}{100}\right) C_{ст}^z + \frac{n-1}{n} C_B^z. \quad (14)$$

Вычислив значение C_{pc}^z для каждого из веществ, входящего в определенный ЛПВ, и подставив в выражение (1), получим расчетную формулу для определения степени очистки:

$$\frac{1}{n} \sum_1^z \left(1 - \frac{\mathcal{E}_z}{100}\right) \frac{C_{ст}^z}{C_{ПДК}^z} + \frac{n-1}{n} \sum_1^z \frac{C_B^z}{C_{ПДК}^z} \leq 1. \quad (15)$$

Практика работы очистных сооружений показывает, что вещества, входящие в определенный ЛПВ, очищаются неодинаково. Поэтому определение эффективности очистки должно быть выполнено для вещества, наиболее трудно выводимого из сточных вод. Остальные

вещества, как более легко выводимые, будут заведомо иметь больший эффект очистки.

Эффективность очистки трудно удаляемого вещества определяется из выражения

$$\Theta_z = \left(1 - \frac{1 - \frac{n-1}{n} \sum_1^z \frac{C_B^z}{C_{\text{ПДК}}^z}}{\frac{1}{n} \sum_1^z \frac{C_{\text{ст}}^z}{C_{\text{ПДК}}^z}} \right) 100. \quad (16)$$

3.5. Практическая часть.

Примеры выполнения задач и индивидуальные задания

3.5.1. Расчет кратности разбавления сточных вод при сбросах в водотоки

Пример 1. Планируется сбрасывать в водоток сточные воды промышленного предприятия с максимальным расходом $q = 1,7 \text{ м}^3/\text{с}$. Ниже по течению от планируемого берегового выпуска сточных вод, на расстоянии 3,0 км находится поселок М, использующий воду водотока для купания и отдыха. Водоток, по данным Росгидромета, характеризуется на этом участке следующими показателями:

– среднемесячный расход водотока 95%-й обеспеченности $Q = 37 \text{ м}^3/\text{с}$;

– средняя глубина $H_{\text{ср}} = 1,3 \text{ м}$;

– средняя скорость течения $v_{\text{ср}} = 1,2 \text{ м/с}$;

– коэффициент Шези $C = 29 \text{ м}^{1/2}/\text{с}$;

– извилистость русла слабо выражена.

– выпуск сточных вод – береговой;

– ускорение свободного падения g принимаем 10 м/с^2 ;

Определите кратность разбавления сточных вод в расчетном створе.

Решение. По условию задачи водоток используется как водный объект второй категории, предназначенный для культурно-бытового водопользования. Поэтому расчетный створ устанавливается за 1000

м до границы поселка, где вода должна отвечать санитарным требованиям применительно для данного вида водопользования.

В этом случае расстояние, принимаемое для расчета длины участка разбавления, равно

$$L = 3000 - 1000 = 2000 \text{ м.}$$

Определим коэффициент турбулентной диффузии по выражению (6)

$$D = \frac{g \cdot v_{\text{cp}} \cdot H_{\text{cp}}}{M \cdot C} = \frac{10 \cdot 1,2 \cdot 1,3}{26,3 \cdot 29} = 0,02,$$

так как $10 < C < 60$, то $M = 0,7 \cdot 29 + 6 = 26,3$.

Поскольку выпуск береговой, а извилистость русла слабо выражена, то по выражению (4) определим:

$$\alpha = \xi \varphi \sqrt[3]{\frac{D}{q}} = 1 \cdot \sqrt[3]{\frac{0,02}{1,7}} = 0,23.$$

Для упрощения вычисления коэффициента смешения по выражению (3) предварительно вычислим:

$$\beta = e^{-\alpha \cdot \sqrt[3]{L}} = e^{-0,23 \sqrt[3]{2000}} = 0,056, \text{ тогда}$$

$$\gamma = \frac{1 - \beta}{1 + \frac{Q}{q} \cdot \beta} = \frac{1 - 0,056}{1 + \frac{37}{1,7} \cdot 0,056} = 0,429.$$

Кратность разбавления сточных вод промышленного предприятия в расчетном створе, согласно выражению (2), составит:

$$n = \frac{\gamma Q + q}{q} = \frac{0,429 \cdot 37 + 1,7}{1,7} = 10,3.$$

Индивидуальное задание (задача) №1.

Определите кратность разбавления сточных вод в расчетном створе по условиям *примера 1*. Численные значения параметров для разных вариантов указаны в табл. 1. Для всех вариантов принять: выпуск сточных вод – береговой, водоток (река) – средний. Привести в отчете ситуационную схему для расчета.

Варианты к заданию (задаче) №1 приведены в таблице 1.

Варианты к заданию (задаче) №1

Вариант	$q, \text{ м}^3/\text{с}$	$Q, \text{ м}^3/\text{с}$	$H_{\text{ср}}, \text{ м}$	$v_{\text{ср}}, \text{ м/с}$	C	Категория водопользования
1	1,3	37	1,2	1,4	30	Хозяйственно питьевые нужды населения
2	1,3	40	1,2	1,4	30	
3	1,3	43	1,2	1,4	30	
4	1,5	35	1,2	2,4	30	
5	1,5	40	1,2	2,4	32	
6	1,7	43	1,2	2,4	32	Рыбохозяйственная
7	1,9	37	1,3	1,2	32	
8	2,1	40	1,3	1,2	32	
9	2,1	45	1,3	1,2	38	
10	2,0	35	1,3	2,1	38	
11	2,0	40	1,3	2,1	38	Культурно-бытовые нужды населения
12	2,3	43	1,3	2,1	38	
13	2,3	37	1,4	1,4	38	
14	1,7	40	1,4	1,4	40	
15	1,8	43	1,2	1,4	40	
16	1,6	35	1,2	2,4	48	Рыбохозяйственная
17	1,6	40	1,2	2,4	48	
18	1,5	45	1,2	2,4	49	
19	1,4	35	1,2	2,1	52	
20	1,4	35	1,2	1,4	52	

Пример 2. Найдите кратность разбавления сточных вод для глубинного сосредоточенного выпуска в проточный водоем, если: скорость течения в водоеме $V_{\text{п}} = 0,021 \text{ м/с}$; средняя глубина в месте установленного выпуска сточных вод $H = 30 \text{ м}$; расчетный расход сточных вод $Q_0 = 0,33 \text{ м}^3/\text{с}$; скорость истечения сточной воды $V_0 = 2,5 \text{ м/с}$.

Водоем относится к водным объектам рыбохозяйственного водопользования второй категории.

Решение. Поскольку водоем относится к водным объектам рыбохозяйственного водопользования второй категории, то расчетный створ расположен не далее 500 м от места выпуска сточных вод.

Так как выпуск сточных вод осуществляется через сосредоточенный выпуск, то $A = 1$.

Определим диаметр выпускного отверстия (d_0 – диаметр выпуска, м), принимая, что скорость истечения сточной воды $V_0 = 2,5 \text{ м/с}$.

$$d_0 = \sqrt{\frac{4Q_0}{\pi V_0}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,33}{3,14 \cdot 2,5}} = 0,405 \text{ м.}$$

Определим параметр P по формуле (9):

$$P = 0,021 / (0,000015 \times 2,5 + 0,021) = 0,996.$$

Определим параметр S по формуле (10):

$$S = 0,0875 + \frac{0,325 \times 30}{360 + (0,021/2,5) \times 10^5} = 0,882.$$

Наименьшее разбавление, наблюдающееся на расстоянии $L=500$ м – на границе от места выпуска сточных вод, рассчитанное по формуле (7), составляет:

$$n = 1 \cdot \left(\frac{0,2 \cdot 500}{0,4} \right)^{0,995 \cdot 0,882} = 125.$$

Индивидуальное задание (задача) №2.

Определите разбавление сточных вод для глубинного сосредоточенного выпуска в проточный водоем аналогично примеру 2. Параметры сброса сточных вод и водоема указаны по вариантам в табл. 2.

Таблица 2

Варианты к заданию (задаче) №2

Вариант	$V_n, \text{ м/с}$	$H, \text{ м}$	$Q_0, \text{ м}^3/\text{с}$	Категория водопользования	Вариант	$V_{II}, \text{ м/с}$	$H, \text{ м}$	$Q_0, \text{ м}^3/\text{с}$	Категория водопользования
1	0,01	30	0,4	Хозяйственно-питьевые нужды населения	11	0,02	40	0,8	Культурно-бытовые нужды населения
2	0,01	37	0,5		12	0,02	35	0,45	
3	0,01	40	0,80		13	0,02	30	0,4	
4	0,01	35	0,45		14	0,02	37	0,5	
5	0,01	30	0,4		15	0,02	40	0,80	
6	0,015	37	0,5	Рыбохозяйственная	16	0,025	35	0,45	Рыбохозяйственная
7	0,015	40	0,80		17	0,025	30	0,4	
8	0,015	35	0,45		18	0,025	37	0,5	
9	0,015	30	0,4		19	0,025	40	0,80	
10	0,015	37	0,5		20	0,025	35	0,45	

3.5.2. Расчет необходимой степени очистки сточных вод по нормативному показателю содержания вредных примесей

Необходимую степень очистки сточных вод устанавливают:

- 1) по нормативному показателю содержания вредных примесей;
- 2) по содержанию взвешенных веществ;
- 3) по величине биохимического потребления кислорода (БПК) в смеси сточных вод и воды водоема;
- 4) по потреблению сточными водами растворенного кислорода;
- 5) по изменению кислотности воды водоема (рН);
- 6) по изменению температуры воды водоема;
- 7) по окраске, запаху и солевому составу.

В этой работе будет определяться степень очистки производственных сточных вод от вредных веществ по нормативному показателю содержания вредных примесей.

Пример 3. Определите необходимую степень очистки производственных сточных вод от вредных веществ на очистных сооружениях предприятия, если в сточных водах содержатся *никель, молибден, мышьяк* в следующих концентрациях соответственно:

$$C_{\text{ст}}^{\text{Ni}} = 1,15 \text{ мг/л}; \quad C_{\text{ст}}^{\text{Mo}} = 1,1 \text{ мг/л}; \quad C_{\text{ст}}^{\text{As}} = 0,6 \text{ мг/л}$$

Сточные воды подлежат сбросу в водоток, который относится к источникам хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования. Кратность разбавления сточных вод $n = 65$.

Природная вода до места сброса сточных вод характеризуется следующими показателями:

$$C_{\text{в}}^{\text{Ni}} = 0,003 \text{ мг/л}; \quad C_{\text{в}}^{\text{Mo}} = 0,15 \text{ мг/л}; \quad C_{\text{в}}^{\text{As}} = 0,002 \text{ мг/л}$$

Предельно допустимые концентрации указанных веществ составляют (см. приложение 2):

$$C_{\text{ПДК}}^{\text{Ni}} = 0,02 \text{ мг/л}; \quad C_{\text{ПДК}}^{\text{Mo}} = 0,25 \text{ мг/л}; \quad C_{\text{ПДК}}^{\text{As}} = 0,01 \text{ мг/л}$$

Решение.

Все вещества, которые были отмечены в сточной воде, относятся к определенным лимитирующим показателям вредности ЛПВ. К группе санитарно-токсикологического ЛПВ относятся никель, молибден, мышьяк.

Необходимую эффективность очистки по санитарно-токсикологическому показателю вредности определяем по выражению (16):

$$\sum_1^z \frac{C_B^z}{C_{ПДК}^z} = \sum_1^3 \frac{C_B^{Ni}}{C_{ПДК}^{Ni}} + \frac{C_B^{Mo}}{C_{ПДК}^{Mo}} + \frac{C_B^{As}}{C_{ПДК}^{As}} = \frac{0,003}{0,02} + \frac{0,15}{0,25} + \frac{0,002}{0,01} = 0,95;$$

$$\sum_1^z \frac{C_{ст}^z}{C_{ПДК}^z} = \sum_1^3 \frac{C_{ст}^{Ni}}{C_{ПДК}^{Ni}} + \frac{C_{ст}^{Mo}}{C_{ПДК}^{Mo}} + \frac{C_{ст}^{As}}{C_{ПДК}^{As}} = \frac{1,15}{0,02} + \frac{1,1}{0,25} + \frac{0,6}{0,01} = 121,9;$$

$$\Xi = \left(1 - \frac{1 - \frac{65-1}{65} \cdot 0,95}{\frac{121,9}{65}} \right) \cdot 100 = 96,5 \%$$

Таким образом, для соблюдения санитарных условий сброса сточных вод указанного состава необходимо удалить на очистных сооружениях не менее 96,5 % вредных веществ, относящихся к санитарно-токсикологическому ЛПВ.

Индивидуальное задание (задача) №3.

Определить необходимую степень очистки производственных сточных вод на очистных сооружениях предприятия от вредных веществ. Исходные данные приведены в табл. 3.

4. Список литературы

1. Методика разработки нормативов допустимых сбросов загрязняющих веществ в водные объекты для водопользователей (Утверждена приказом Министерства природных ресурсов и экологии РФ от 29 декабря 2020 г. №1118).

2. Инженерная защита окружающей среды : в примерах и задачах: учебное пособие / под ред. О. Г. Воробьева. – Санкт-Петербург : «Лань», 2002. – 288 с.

Таблица 3

Варианты к заданию (задаче) №3

Вариант	Содержание веществ, мг/л														Кратность разбавления	Категория водопользования
	в сточной воде							в природной воде								
	Ni	Mo	As	V	W	Sb	Cu	Ni	Mo	As	V	W	Sb	Cu		
1	1,05	0,9	0,3	1,0			2,9	0,001	0,1	0,001	0,002			0,95	59	Хозяйственно-питьевые нужды населения
2	1,1	0,95	0,6	1,1			2,8	0,002	0,15	0,002	0,003			0,9		
3	1,15	1,0			1,0	0,5	2,7	0,003	0,2			0,001	0,0015	0,85		
4	1,2	1,05			1,1	0,6	2,6	0,004	0,25			0,002	0,0017	0,85		
5	1,25	1,1			1,2	0,7	2,5	0,003	0,3			0,003	0,0018	0,75		
6	1,3	1,15			1,3	0,8	2,4	0,002	0,25			0,0015	0,002	0,8	61	Коммунально-бытовые нужды населения
7	1,35	1,1	0,7	0,9			2,3	0,001	0,2	0,002	0,002			0,83		
8	1,4	1,0	0,6	1,0			2,2	0,001	0,15	0,0018	0,0025			0,85		
9	1,45	0,9	0,5	1,1			2,25	0,002	0,12	0,0015	0,0028			0,87		
10	1,5	0,95	0,4	1,2			2,15	0,003	0,1	0,0017	0,0021			0,92		
11	1,45	1,15			1,2	0,3	2,1	0,004	0,12			0,001	0,002	0,93	68	Рыбохозяйственная первой категории
12	1,4	1,2			1,1	0,4	2,0	0,005	0,15			0,0015	0,0019	9,95		
13	1,35	1,25			1,0	0,5	2,4	0,004	0,17			0,0017	0,0017	0,97		
14	1,3	1,3			0,9	0,6	2,3	0,003	0,2			0,002	0,0015	0,94		
15	1,25	1,25			0,8	0,7	2,2	0,002	0,21			0,003	0,0015	0,92		
16	1,2	1,2			0,9	0,8	2,1	0,001	0,23			0,004	0,002	0,9	72	Рыбохозяйственная первой категории
17	1,15	1,15			1,1	0,9	2,0	0,0015	0,25			0,002	0,0021	0,8		
18	1,12	1,12	0,9				2,15	0,002	0,2	0,0017	0,002			0,85		
19	1,1	1,15	1,0				2,19	0,003	0,17	0,0018	0,0018			0,87		
20	1,05	1,1	1,1				2,2	0,001	0,15	0,0019	0,0019			0,88		

5. Контрольные вопросы для защиты отчета

1. На какие виды подразделяются сточные воды промышленных предприятий?
2. Что такое ПДК вредных веществ в водном объекте?
3. Какие виды и категории водопользования вы знаете?
4. На каком принципе основано нормирование загрязняющих веществ в водных объектах?
5. На каком расстоянии устанавливается контрольный створ на водотоках и водоемах для разных видов водопользования?
6. В чем заключается цель раздельного нормирования качества воды?
7. Что отражает лимитирующий показатель вредности?
8. Какие факторы учитывают при определении кратности разбавления загрязняющих веществ в водоеме?
9. Что понимают под эффективностью очистки и как ее определяют?
10. Что значит «водоотведение» от промышленных предприятий?
11. Что значит термин «Очистка сточных вод»?
12. Какие основные методы очистки сточных вод используются на промышленных предприятиях?
13. В каких аспектах проявляется загрязнение сточных вод?
14. В чем заключается процесс разбавления?
15. В чем заключается основной механизм снижения концентрации загрязняющего вещества при сбросе сточных вод в водные объекты?
16. Что означает показатель «кратность разбавления сточных вод»?

Приложение 1

Классификация водных объектов по типам и видам в Российской Федерации (определена статьёй 5 Водного кодекса РФ от 03.06.2006 №74-ФЗ)

Тип	Вид
Водоток	Река, канал, ручей
Водоем	Озёра, пруды, обводнённые карьеры, водохранилища
Море или его отдельные части	Проливы, заливы, бухты, лиманы и др

Приложение 2

Предельно-допустимые концентрации химических веществ в воде водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования (извлечение из ГН 2.1.5.1315-05)

Наименование вещества	Величина ПДК, мг/л	Лимитирующий показатель вредности*	Класс опасности
Ванадий V	0,1	с.-т.	3
Вольфрам W	0,05	с.-т.	2
Мышьяк As	0,01	с.-т.	1
Никель Ni	0,02	с.-т.	2
Сурьма Sb	0,005	с.-т.	2
Медь Cu	1,0	с.-т.	2
Молибден Mo	0,07	с.-т.	2

* с.-т. - санитарно-токсикологический.

Приложение 3

Предельно-допустимые концентрации вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения (извлечение из Приказа № 552 от 13.12.16 г.)

Наименование вещества	Величина ПДК, мг/л	Лимитирующий показатель вредности*	Класс опасности
Ванадий V	0,001	токс.	3
Вольфрам W	0,0008	токс.	3
Медь Cu	0,001	токс.	3
Молибден Mo	0,001	токс.	2
Мышьяк As	0,05	токс.	3
Никель Ni	0,01	токс.	3
Сурьма Sb	1,0	токс.	3

* токс. - токсикологический.