

МИНИСТЕРСТВО ТРАНСПОРТА И КОММУНИКАЦИЙ РЕСПУБЛИКИ  
БЕЛАРУСЬ

УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ  
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ТРАНСПОРТА»

Кафедра экологии и энергоэффективности в техносфере

В. С. ДЕЦУК

# ОЦЕНКА ЗАГРЯЗНЕНИЯ ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ

*Одобрено учебно-методической комиссией строительного факультета  
в качестве учебно-методического пособия*



Гомель 2019

УДК 628.1/2 (075.8)  
ББК 20.1  
Д39

**Р е ц е н з е н т** – нач. отдела экологической безопасности и энергосбережения на транспорте ИЦЖТ «СЕКО» канд. техн. наук  
В. В. Макеев

**Децук, В. С.**

Д39 Оценка загрязнения водных объектов : учеб.-метод. пособие / В. С. Децук; м-во трансп. и коммуникаций Респ. Беларусь, Белорус. Гос. Ун-т трансп. – Гомель : БелГУТ, 2019. – 43 с.  
ISBN 978-985-554

Содержит теоретический материал, который отражает современные методики по оценке загрязнения водных ресурсов, а также подробные методики и примеры расчета, основанные на нормативных документах, формулы и пояснения к ним, снабжено необходимым для расчетов приложением. Представленный материал позволяет выполнять реальные расчеты в курсовом и дипломном проектировании.

Предназначено для студентов технических специальностей.

**УДК 628.1/2 (075.8)**  
**ББК 20.1**

**ISBN 978-985-554**

© Децук В. С., 2019

© Оформление. БелГУТ, 2019

## **ВВЕДЕНИЕ**

Опасное для здоровья людей снижение качества питьевой воды, вследствие интенсивного загрязнения источников водоснабжения и санитарно-эпидемиологического состояния водных объектов рекреационного назначения, является важнейшим фактором изменения среды обитания человека и играет важную роль при определении степени экологического неблагополучия территорий. Успешное решение проблем охраны водных ресурсов от загрязнения сточными водами в значительной степени определяется степенью достоверности информации об источниках, количестве и составе стоков, включая организованные выпуски городских, производственных и ливневых сточных вод, а также рассредоточенные поступления стоков с территорий.

Особую актуальность приобрели задачи прогнозирования качества поверхностных вод с учетом поступления стоков в связи с реализацией Водной стратегии Республики Беларусь на период до 2020 года и Государственной программы «Охрана окружающей среды и устойчивое использование природных ресурсов» на 2016–2020 годы.

При проектировании и реконструкции предприятий, расположенных вблизи рек, в первую очередь крайне важно оценить возможность сброса производственных сточных вод в реку. Высокая стоимость строительства и эксплуатации очистных сооружений вынуждают проектировщиков искать возможности учета разбавления сточных вод водой водотоков.

Данные о распределении загрязняющих веществ в водных объектах могут быть получены путем расчета разбавления на любом расстоянии от пункта выпуска сточных вод.

Задачей расчетных методов является определение максимальных концентраций на различных расстояниях от выпуска. Сопоставление расчетных концентраций с ПДК нормируемого ингредиента позволяет сделать выводы о возможности или невозможности сброса сточных вод в рассматриваемый водный объект, дать рекомендации о необходимости изменения объема и состава сточных вод. Методы расчета разбавления сточных вод в водных объектах лежат в основе установления нормативов ПДС (предельно допустимых сбросов).

Сейчас разработан целый ряд методов расчета разбавления, позволяющих определять показатели качества воды рек и водоемов после сброса в них сточных вод на любом расстоянии от пункта выпуска. Выбор конкретной мето-

дики определяется режимом поступления сточных вод (установившийся, неравномерный, залповый), типом сбросного сооружения (сосредоточенный или рассеивающий выпуск) и его расположением в водоеме (береговой или русловый), гидрологическим режимом водного объекта и требуемой точностью расчета.

## **1 ОБЩИЕ ТРЕБОВАНИЯ К НОРМИРОВАНИЮ СБРОСОВ СТОЧНЫХ ВОД В ПОВЕРХНОСТНЫЕ ВОДНЫЕ ОБЪЕКТЫ**

В зависимости от целей использования водного объекта для каждого проектируемого и действующего выпусков сточных вод, в том числе коммунально-бытовых, промышленных, сельскохозяйственных, дождевых, дренажных, карьерных и шахтно-рудничных вод, с учетом допустимых концентраций определяются нормативы допустимых сбросов, соблюдение которых должно обеспечить нормативы качества воды в контрольном створе водного объекта.

### **1.1 Виды водопользования и нормирования**

**Хозяйственно-питьевое и культурно-бытовое водопользование** подразделяется на 2 категории:

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

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

#### **Рыбохозяйственное водопользование**

К водным объектам рыбохозяйственного значения относятся водные объекты, которые используются или могут быть использованы для добычи (вылова) водных биоресурсов. Подразделяется на 3 категории:

*Высшая категория* – места расположения нерестилищ, массового нагула и зимовальных ям особо 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 в расчетном створе, расположенном ниже выпуска сточных вод, должны соответствовать санитарным требованиям в зависимости от вида.

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 объектов для различных видов водопользования.

В расчетном створе концентрация загрязняющих веществ должна быть не выше ПДК.

Все вредные вещества, для которых определены ПДК, подразделены по лимитирующим показателям вредности (ЛПВ), под которым понимают наиболее отрицательное влияние, оказываемое данными веществами.

Принадлежность веществ к одному и тому же ЛПВ предполагает суммацию действия этих веществ на водный объект.

*Для водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования* применяют три вида ЛПВ: санитарно-токсикологический, общесанитарный и органолептический.

*Для рыбохозяйственных водоемов используют:* санитарно-токсикологический, органолептический, токсикологический и рыбохозяйственный ЛПВ.

Нормативы допустимых сбросов устанавливаются для каждого нормируемого загрязняющего вещества с учетом фоновой концентрации, целей использования водного объекта, нормативов качества воды нормируемого загрязняющего вещества, с учетом фоновой концентрации, водного объекта, его ассимилирующей способности.

*При сбросе сточных вод в водные объекты, используемые для питьевых и хозяйственно-бытовых целей,* нормативы качества воды водных объектов должны выдерживаться в контрольном створе, расположенном на расстоянии одного километра выше ближайшего по течению водозабора для хозяйственно-питьевого водоснабжения, мест купания, организованного отдыха или территории населенного пункта (рисунок 1).

*При сбросе сточных вод в объекты, используемые для рыбохозяйственных целей,* нормативы качества воды в водных объектах должны соблюдаться на протяжении всего водного объекта или его участка. Начиная с контрольного створа, расположенного на расстоянии 500 метров ниже сброса сточных вод. При использовании водного объекта одновременно для различных целей применяются нормативы качества воды для рыбохозяйственного водного объекта (рисунок 1).

*Сброс нормативно-чистых и ливневых сточных вод в водные объекты в черте населенного пункта,* а также сброс сточных вод в водоемы допускается в исключительных случаях по согласованию с городскими или районными инспекциями природных ресурсов и охраны окружающей среды и территориальными центрами гигиены и эпидемиологии. В этих случаях нормативы качества воды водного объекта должны относиться к самим сбрасываемым сточным водам. Место сброса городских сточных вод должно быть

расположено ниже границы населенного пункта по течению водотока на расстоянии, исключающем влияние сгонно-нагонных явлений.

При сбросе в водные объекты сточных вод после охлаждения оборудования допустимая концентрация устанавливается на уровне концентрации веществ в воде водного объекта в месте забора воды для охлаждения оборудования при условии пользования одним и тем же водным объектом.

Температура сбрасываемых сточных вод не должна приводить к повышению температуры воды водного объекта выше допустимой нормы.

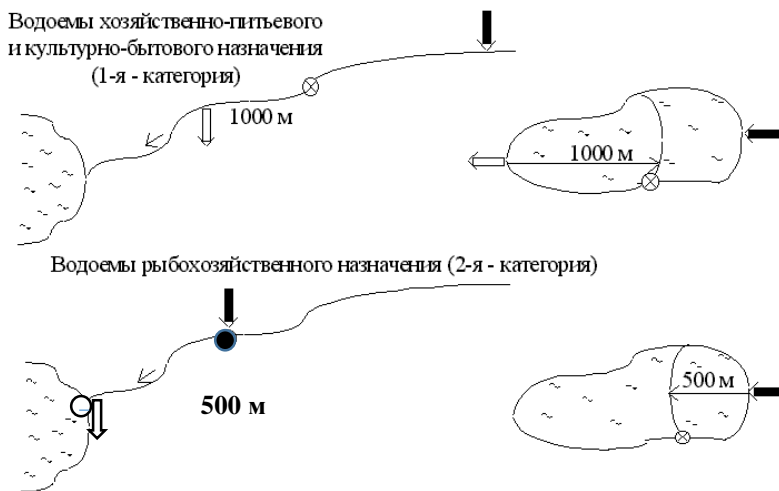


Рисунок 1 – Контрольные створы в зависимости от назначения и категории водного объекта:

⊗ створы водных объектов, в которых вода должна соответствовать нормам, ➔ – сброс сточных вод, ⇨ – водозабор

При сбросе сточных вод в водный объект через выпуски с рассеивающими оголовками нормативные требования к составу и свойствам воды водного объекта должны обеспечиваться в створе начального разбавления выпуска сточных вод.

Если фактическая масса сброса загрязняющих веществ со сточными водами меньше расчетных нормативов допустимого сброса, то в качестве нормативов допустимого сброса принимается фактическая масса сброса.

Если показатели состава и свойств воды водного объекта в фоновом створе превышают нормативы качества воды для данного вида водопользования, то нормативы допустимого сброса по этим показателям устанавливаются исходя из нормативов качества воды принимающего водного объекта.

Для загрязняющих веществ, концентрации которых нормируются по приращению к фоновым концентрациям, нормативы допустимого сброса устанавливаются с учетом допустимых приращений к фоновым концентрациям.

При сбросе нескольких веществ с одинаковыми лимитирующими показателями вредности ПДС устанавливается так, чтобы с учетом примесей, поступающих в водоем или водоток от вышерасположенных выпусков, сумма отношений концентраций каждого вещества в водном объекте к соответствующим ПДК не превышала единицы.

$$\frac{c_1}{\text{ПДК}_1} + \frac{c_2}{\text{ПДК}_2} + \dots + \frac{c_n}{\text{ПДК}_n} \leq 1 \quad (1)$$

где  $c_1, c_2, c_n$  – фактические (расчетные или измеренные концентрации) вредных веществ в сточных водах и реке соответственно, мг/м<sup>3</sup>;

ПДК<sub>1</sub>, ПДК<sub>2</sub>, ПДК<sub>n</sub> – соответствующие предельно-допустимые концентрации вредных веществ в воде.

Нормативы допустимых сбросов устанавливаются Министерством природных ресурсов и охраны окружающей среды, областными и Минским городским комитетами природных ресурсов и охраны окружающей среды в разрешениях на специальное водопользование в соответствии с пунктом 3 Инструкции по оформлению разрешений на специальное водопользование, утвержденной постановлением Министерства природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Беларусь «О некоторых вопросах оформления разрешений на специальное водопользование и представляемых для их получения документов».

Если установленные, согласно расчету, нормативы допустимого сброса по техническим причинам не могут быть достигнуты, Минприроды или областными комитетами природных ресурсов и охраны окружающей среды в разрешениях на специальное водопользование могут быть установлены временные нормативы допустимого сброса исходя из необходимости поэтапного достижения расчетных нормативов допустимого сброса. Временные нормативы допустимого сброса устанавливаются по наилучшим результатам, которые могут быть достигнуты водопользователями, исходя из наличия и эффективной работы существующих сооружений для очистки сточных вод и других водоохраных сооружений. Проведение расчетов по определению нормативов допустимых сбросов и временных нормативов допустимых сбросов обеспечивается водопользователями. Обоснованием для установления норм качества воды служат данные специальных гидрологических, гидрохимических, геохимических, гидробиологических и других наблюдений, проводимых организациями, имеющими лицензию на право проведения таких работ.

Величины нормативов ПДС определяются в соответствии с водным законодательством Республики Беларусь и действующими нормативно-методическими документами.

## **1.2 Условия сброса сточных вод в поверхностные водные объекты**

Условия сброса сточных вод заключаются в определении местоположения выпуска, необходимости его обустройства (гидроизоляция, организация принудительного смешения), установлении режима сброса, в том числе обеспечения его равномерности, в выборе периодов сброса, а также включают в себя организацию контроля объемов водоотведения и качества сточных вод, наличие противоаварийного оборудования.

При установлении условий сброса сточных вод учитываются общие ограничения и требования:

- запрет сброса сточных вод в соответствии с СанПиНом;
- использование естественных понижений рельефа (ручьи, овраги, балки) в качестве коллекторов для сброса сточных вод без надлежащей гидроизоляции должно быть исключено в целях защиты подземных вод;
- в целях ликвидации или сокращения зон загрязнения, в особенности в условиях замедленного водообмена в водных объектах, используемых для сброса сточных вод, должно быть организовано принудительное смешение сточных вод с природными.
- сброс сточных вод должен осуществляться равномерно, не превышая установленного проектом коэффициента неравномерности; для обеспечения указанного режима и предотвращения залповых сбросов в состав водоохранного комплекса должны входить резервные емкости, усреднители или другие сооружения для регулирования сброса; в необходимых случаях должны быть предусмотрены резервные аварийные емкости.

## **1.3 Установление лимитов сброса загрязняющих веществ**

*Лимит сброса загрязняющих веществ* – это масса вещества в сточных водах, максимально допустимая к отведению с определенным режимом в данном пункте водного объекта в единицу времени, установленная на ограниченный срок в соответствии с планами поэтапного достижения норматива ПДС.

Сроки действия и пересмотра лимита сброса загрязняющих веществ от каждого источника загрязнения определяются на основании анализа водохозяйственной обстановки экологического санитарно-эпидемиологического состояния водного объекта с учетом доли воздействия конкретного источника загрязнения на качество воды в контрольном пункте.



При установлении лимитов сброса загрязняющих веществ определяются условия сброса сточных вод и показатели их состава и свойств, которые не должны быть нарушены или превышены в течение всего срока действия лимитов. Лимиты сброса загрязняющих веществ должны быть технологически достижимыми и экономически приемлемыми. Лимиты сброса загрязняющих веществ устанавливаются на текущий момент и ближайшую перспективу (не более трех лет), на определенные про-межутки времени с учетом нормативных сроков реализации плана мероприятий по снижению сброса загрязняющих веществ.

Водоохранные мероприятия, включаемые в планы, должны отвечать уровню наилучших имеющихся технологий.

При этом в каждом конкретном случае:

- сравниваются процессы, установки и методы, успешно апробированные в последнее время;

- рассматриваются новейшие достижения, реализованные в опытных или опытно-промышленных установках и т. п.;

- оценивается возможность применения технологии с экономической точки зрения;

- определяются временные рамки для установки соответствующего оборудования на производстве или введения новых приемов ведения хозяйства.

Лимиты сброса загрязняющих веществ для действующих предприятий на текущий момент устанавливаются на уровне реализованных технологий и производства и очистки сточных вод. Лимиты сброса загрязняющих веществ на ближайшую перспективу устанавливаются на основании прогнозируемой эффективности планируемых водоохранных мероприятий и является основанием для последующего установления лимитов очередного этапа.

Лимиты сброса загрязняющих веществ устанавливаются при соблюдении условий:

- недопустимости дальнейшего ухудшения качества воды водоприемника и увеличения вредного воздействия на водный объект;

- соблюдения технологических нормативов и объема производства;

- отсутствия превышений нормативов технологических потерь веществ и норм водоотведения;

- соблюдения стабильности работы действующего оборудования и систем по очистке и обеззараживанию сточных вод;

- соблюдения правил обращения с химическими и биологическими веществами и смесями, их содержащими, в т. ч. с отходами;

- отсутствия аварий и нарушений технологической дисциплины;

- наличия плана водоохранных мероприятий.

Предельные величины показателей загрязнения и концентраций загрязняющих веществ, регламентируемых лимитами сброса загрязняющих веществ со сточными водами, не могут быть:

- более мягкими, чем фактически достигаемые с применением реализованной на момент установления лимитов технологии производства;
- более жесткими, чем достигаемые с применением наилучшей существующей технологии производства;
- более жесткими, чем нормативы ПДС;
- более жесткими, чем аналогичные величины, свойственные воде, поступающей на использование из водного объекта и иных источников водоснабжения.

Если по отдельным веществам (показателям загрязнения) фактически достигнуты величины, соответствующие ПДС, то лимит сброса для них не устанавливается. При согласовании лимитов сброса загрязняющих веществ учитываются следующие обязательные условия:

- сточные воды населенных пунктов и других объектов загрязнения, должны быть очищены и обеззаражены по традиционной схеме очистки (механическая, биохимическая) даже при большой ассимилирующей способности водных объектов

- сточные воды, должны быть очищены до уровней, соответствующих технологическим нормативам (проектным параметрам) очистки действующих очистных сооружений,

- вещества (препараты и смеси, их содержащие), запрещенные к производству и применению, должны быть исключены из использования, а неиспользованные остатки учтены для последующего уничтожения, захоронения, переработки;

- искусственно синтезированные вещества (в т.ч. входящие в состав смесей и препаратов), применяемые в производстве, должны быть:

- 1) Зарегистрированы в Белорусском регистре потенциально токсичных химических и биологических веществ.

- 2) Включены в Государственный каталог пестицидов и агрохимикатов, разрешенных к применению на территории Республики Беларусь

- 3) Изучены в отношении их гигиенической, рыбохозяйственной и экологической опасности, для них должны быть разработаны ПДК (в т.ч. «отсутствие») и разработаны и аттестованы методики их контроля.

#### **1.4 Региональные нормативы качества воды в поверхностных водных объектах**

Региональные нормативы должны отвечать следующим требованиям:

- 1 Региональные нормативы качества воды в водных объектах устанавливается в тех случаях, когда естественные фоновые концентрации веществ в воде превышают ПДК и снижение фоновых концентраций до уровня ПДК невозможно никакими водоохранными мерами.

2 Обоснованием для установления региональных нормативов являются фоновые естественные концентрации веществ в воде водных объектов.

3 Определение фоновых концентраций производится на основании данных стационарных гидрологических, гидрохимических, геохимических, гидробиологических и других наблюдений, проводимых организациями, имеющими лицензию на право проведения таких работ, а также на основании специальных гидрологических и гидрохимических измерений качества воды в том створе, выше которого отсутствуют источники антропогенного воздействия.

4 Региональные нормативы качества воды устанавливаются только для тех показателей качества воды, фоновые концентрации которых превышают ПДК.

5 Разработка региональных нормативов качества воды выполняется специализированными научными и проектными организациями в соответствии с действующими нормативно-методическими документами.

## **1.5 Выбор нормируемых и контролируемых показателей**

Загрязняющие вещества в сточных водах, указываемые в разрешениях на специальное водопользование, комплексных природоохранных разрешениях подразделяются на нормируемые и контролируемые.

Нормируемые загрязняющие вещества – это вещества в составе сточных вод, по которым устанавливаются нормативы допустимых сбросов или временные нормативы допустимых сбросов. Контролируемые загрязняющие вещества – это вещества в составе сточных вод, по которым производится контроль их содержания при отведении сточных вод в водные объекты.

Выбор нормируемых и контролируемых показателей проводится на основе анализа исходной информации.

1 Выполняется сравнение концентраций веществ (величин показателей) в сточных водах с ПДК, региональными нормативами или естественными фоновыми значениями (для водоприемников, характеризующихся своеобразным природным составом, в частности – дренирующих болотные массивы; принимающих воды самоизливающихся источников минеральных, термальных вод; соленых озер и морских вод).

В случае если концентрация вещества (величина показателя) в сточной воде не превышает ПДК, региональный норматив или величину естественного фона, вещество (показатель) исключается из состава контролируемых.

2 При определении списка нормируемых веществ особое внимание уделяется синтетическим веществам – ксенобиотикам, которые:

– запрещены к производству, закупке, применению;

– не прошли регистрацию в установленном порядке или в регистрационных документах отсутствуют данные об их гигиенической и экологической опасности;

– являются суперэкотоксикантами и иные особо опасными веществами: отнесены к 1-му и 2-му классам опасности по гигиеническим и рыбохозяйственным критериям; включены в списки международных конвенций и соглашений, к которым присоединилась Республика Беларусь.

Перечень этих веществ формируется на основе исходной информации об использовании веществ на конкретном предприятии и анализе данных о качестве поступающей и сточной воды.

Если установлено, что источником сброса таких веществ является конкретный водопользователь, вещества включаются в список нормируемых даже если их содержание в сточной воде не превышает наиболее жесткую ПДК из числа установленных или ПДК для них в Беларуси не разработана.

3 При сбросе сточных вод соленые (солончатые) озера нормативы ПДС и лимиты сброса загрязняющих веществ не устанавливаются на сухой остаток и компоненты основного солевого состава (хлориды, сульфаты, калий, натрий, кальций, магний).

Исключение могут составлять случаи, когда содержание указанных компонентов превышает естественное их содержание в водных объектах – водоприемниках.

4 В результате формируется перечень нормируемых вредных (загрязняющих) веществ, включающий в себя вещества/показатели, для которых одновременно характерно следующее:

– содержание/величина в сточных водах выше величин, установленных нормативами качества воды по химическим показателям, в том числе ПДК;

– содержание/величина в сточных водах повышается в сравнении с забираемой водой;

– сброс приводит или может привести к загрязнению вод водного объекта.

5 Перечень контролируемых веществ и показателей включает в себя все нормируемые вещества и показатели, в т. ч. общие свойства вод в соответствии с лицензией на водопользование, а также другие вещества, если существует риск загрязнения ими при непредвиденных ситуациях (нарушения герметичности замкнутых систем, нарушения технологической дисциплины, в том числе на абонентах сетей водоотведения, аварии и т. п.). Наименования контролируемых веществ включаются в аналитическую программу плана графика производственного контроля, но не включаются в списки ПДС и лимитов сброса.

6 Данные по выбору нормируемых и контролируемых веществ и показателей должны быть представлены в пояснительной записке к проекту по разработке нормативов ПДС и лимитов сброса.

7 Наряду с химическими методами контроля осуществляется контроль токсичности природных и сточных вод с использованием действующих методик биотестирования.

### **1.6 Учет типа сточных вод**

Тип сточных вод учитывается в расчетах следующим образом.

1 Для городских (смешанных) сточных вод допустимые концентрации устанавливаются в таком порядке:

а) по показателю БПК<sub>5</sub>, показателю ХПК, взвешенным веществам, аммоний-иону, азоту общему, фосфору общему – устанавливаются, исходя из показателей степени удаления этих веществ из сточных вод в процессе биологической очистки в соответствии с ТКП.

б) по остальным веществам – в соответствии с расчетами разбавления.

2 Для производственных сточных вод, отводимых непосредственно в водные объекты допустимые концентрации устанавливаются:

а) по отраслям производства и приведены в ТКП.

б) для веществ, отсутствующих в списках - в соответствии с расчетами разбавления.

3 Для смеси производственных сточных вод или смеси производственных сточных вод со сточными водами других категорий, не указанных в ТКП по отраслям, допустимые концентрации устанавливаются в соответствии с пунктом 1.

### **Контрольные вопросы**

1 Дайте характеристику категориям хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования.

2 Дайте характеристику категориям рыбохозяйственного водопользования.

3 Что такое нормы качества воды водных объектов?

4 Что такое лимитирующие показатели вредности (ЛПВ)?

5 Дайте характеристику санитарно-токсикологическому ЛПВ.

6 Дайте характеристику общесанитарному ЛПВ.

7 Дайте характеристику органолептическому ЛПВ.

8 Каковы условия сброса нормативно-чистых и ливневых сточных вод в водные объекты в черте населенного пункта?

9 Каковы условия сброса в водные объекты сточных вод после охлаждения оборудования?

10 Где располагают контрольные створы хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования?

11 Где располагают контрольные створы рыбохозяйственного водопользования?

12 Как распределяют нормативы допустимых сбросов при сбросе нескольких веществ с одинаковыми лимитирующими показателями вредности?

13 Как определяют временные нормативы допустимых сбросов?

14 Кто определяет временные нормативы допустимых сбросов?

15 Каковы ограничения и требования при установлении условий сброса сточных вод?

16 Что такое лимит сброса загрязняющих веществ?

17 В каких случаях принимаются региональные нормативы качества воды в поверхностных водных объектах?

18 Что такое контролируемые и нормируемые показатели?

19 Каким образом учитывают тип сточных вод при определении допустимых концентраций?

## **2 РАСЧЕТНЫЕ МЕТОДЫ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА ВОД**

Данные о распределении загрязняющих веществ в водных объектах могут быть получены путем:

1) химического анализа проб воды, отобранных в зоне загрязнения;

2) расчета разбавления на любом расстоянии от пункта выпуска сточных вод.

Задачей расчетных методов является определение максимальных концентраций на различных расстояниях от выпуска. Сопоставление расчетных концентраций с ПДК нормируемого ингредиента позволяет сделать выводы о возможности или невозможности сброса сточных вод в рассматриваемый водный объект, дать рекомендации о необходимости изменения объема и состава сточных вод. Методы расчета разбавления сточных вод в водных объектах лежат в основе установления нормативов ПДС (предельно допустимых сбросов).

Сейчас разработан целый ряд методов расчета разбавления, позволяющих определять показатели качества воды рек и водоемов после сброса в них сточных вод на любом расстоянии от пункта выпуска. Выбор конкретной методики определяется режимом поступления сточных вод (установившийся, неравномерный, залповый), типом сбросного сооружения (сосредоточенный или рассеивающий выпуск) и его расположением в водоеме (береговой или русловый), гидрологическим режимом водного объекта и требуемой точностью расчета.

Итак, для выбора расчетного метода необходима предварительная информация о сточных водах и о водном объекте.

### **2.1 Характеристика сточных вод**

Сточные воды обладают следующими основными характеристиками.

#### **1 Режим отведения.**

Нагрузка водных объектов сточными водами может производиться без учета гидрологического режима. В этом случае сброс осуществляется непрерывно, периодически или спонтанно. Некоторые предприятия осуществляют сброс сточных вод в соответствии с изменением расхода речной воды (например, посредством использования прудов-накопителей, отключения биологической очистки при прохождении паводка). При этом сброс сточных вод в водный объект осуществляется периодически с учетом наиболее благоприятных для этого условий гидрологического режима. В этом случае не исключены также и спонтанные аварийные сбросы.

### **2 Количество сточных вод в единицу времени или расход сточных вод, м<sup>3</sup>/с.**

В связи с неравномерностью сброса сточных вод замеры производят через определенные интервалы времени (20–60 мин) в течение всего периода суточной работы предприятия (т. е. одну, две или три смены). Для предприятий, работающих с перерывами (посезонно), следует устанавливать фактические периоды спуска сточных вод в водоем.

### **3 Состав сточных вод и их свойства (стабильность, биологическое воздействие).**

Для этого производится анализ средней пробы сточной воды. В ней определяется наличие и концентрации по возможности большего количества сбрасываемых загрязняющих веществ, а также общие показатели загрязнения: рН, Eh, растворенный кислород, БПК<sub>полн.</sub>, окисляемость, биогенные вещества и т. д. Из специфических веществ выбираются репрезентативные для данной сточной воды. Для них и производятся расчеты. Кроме того, расчеты производятся для обязательных показателей, регламентированных «Правилами охраны поверхностных вод».

### **4 Тип сбросного сооружения и его расположение в водном объекте.**

Выпуски сточных вод – это специальные сооружения, целью которых является обеспечение сброса стоков в водный объект.

Выпуски можно классифицировать:

- по месту расположения: береговые, русловые (глубинные);
- по конструкции: затопленные, незатопленные, сосредоточенные, рассеивающие.

*Береговые выпуски* служат в основном для сброса ливневых и условно чистых вод. Такие выпуски, как правило, оформляются в виде набережных или бетонных подпорных стенок с различным высотным уровнем выхода трубопровода. Могут быть затопленными и незатопленными (рисунок 2).

*Русловой выпуск* представляет собой трубопровод, выдвинутый в русло реки. Выпуски этого типа подразделяются на сосредоточенные, рассеивающие.

Сосредоточенный русловой выпуск заканчивается оголовком в виде бетонного блока. Разбавление через сосредоточенный выпуск, будет небольшим, особенно на небольших расстояниях и не обеспечит необходимого снижения концентраций загрязнений (рисунок 3).

Применение сосредоточенных русловых выпусков возможно или при разбавлении стоков перед выпуском или если разбавление по пути до расчетного створа достаточно.

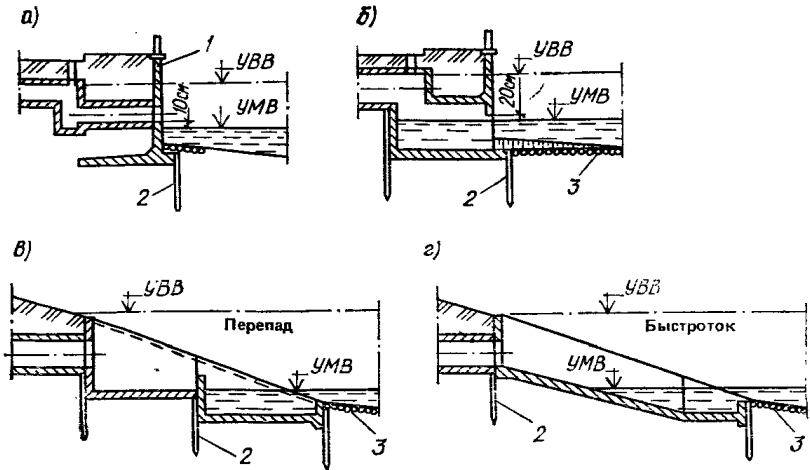


Рисунок 2 – Устройство береговых выпусков:

*a* – незатопленный через подпорную стенку (при  $Q < 10 \text{ м}^3/\text{с}$ ); *б* – затопленный через подпорную стенку (при  $Q > 10 \text{ м}^3/\text{с}$ ); *в* – с многоступенчатым колодезным перепадом; *г* – с быстротоком и водобойным колодезем: 1 – подпорная стенка; 2 – шпунтовое ограждение; 3 – крепление русла реки

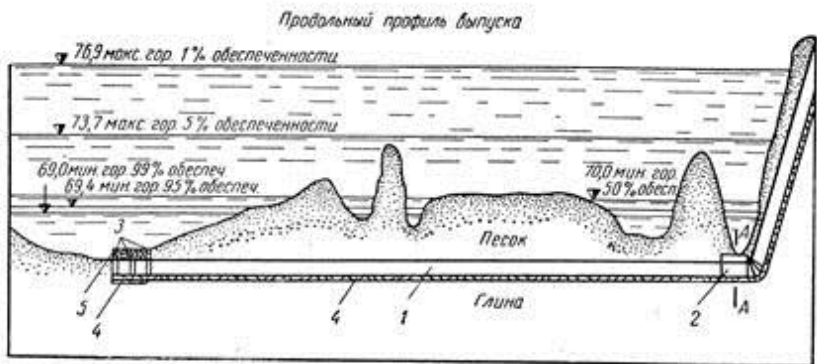


Рисунок 3 – Сосредоточенный русловой выпуск:



1 – труба стальная, 1000 мм; 2 – труба стальная в обойме; 3 – оголовок выпуска; 4 – подложка из щебня; 5 – каменная наброска

*Рассеивающие выпуски* имеют горизонтальный участок трубопровода, по всей длине которого расположены несколько оголовков или сделаны прорези. Такой участок может быть расположен в канаве с засыпкой или приподнят над дном реки. Рассеивающие выпуски улучшают процесс перемешивания сточных вод с основным потоком (рисунок 4).

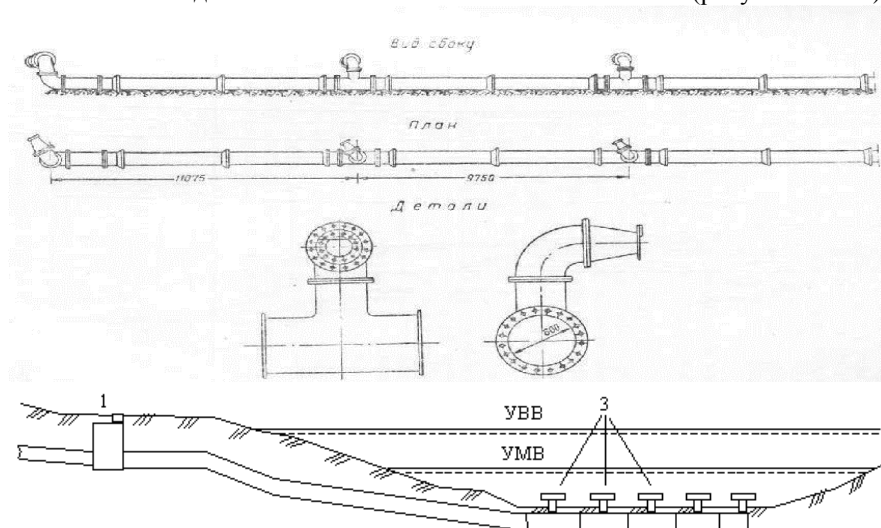


Рисунок 4 – Схемы русловых выпусков

1 – береговой колодец; 2 – бетонный оголовок; 3 – оголовки с насадками

*Глубинные выпуски* аналогичны русловым. Они применяются при спуске стоков в озера, водохранилища и моря. Эти выпуски отличаются большим заглублением оголовков, обычно до глубины 10–15 м.

Самотечные трубы в русле реки обычно стальные или пластмассовые проложены в траншеи и засыпаны каменной наброской со щебнем. Разбавление протекает более интенсивно при использовании рассеивающего руслового выпуска.

## 2.2 Общие закономерности разбавления сточных вод

Разбавление сточных вод – это процесс уменьшения концентраций загрязняющих веществ в водоемах и водотоках, протекающий вследствие перемешивания сточных вод с окружающей водной средой.

При решении различных вопросов, связанных с загрязнением водотоков, возникают в основном две задачи:

- 1) связанная с нахождением расстояния от створа выпуска сточных вод до створа с заданной степенью разбавления;
- 2) задача нахождения концентрации загрязняющих веществ в пункте водопользования на заданном расстоянии от места выпуска сточных вод.

*Разбавление* – процесс, протекающий объективно вследствие перемешивания сточных вод с окружающей водной средой.

Сопоставление расчетных концентраций с ПДК нормируемого ингредиента позволяет сделать выводы о возможности или невозможности сброса сточных вод в рассматриваемый водный объект, дать рекомендации о необходимости изменения объема и состава сточных вод. Методы расчета разбавления сточных вод в водных объектах лежат в основе установления нормативов ПДС (предельно допустимых сбросов).

На сегодня разработан целый ряд методов расчета разбавления, позволяющих определять показатели качества воды рек и водоемов после сброса в них сточных вод на любом расстоянии от пункта выпуска. Участок водоема или водотока от места выпуска сточных вод до сечения, где произойдет их полное смешение с водой водного объекта условно делят на три зоны (рисунок 5).

**В зоне I** процесс начального разбавления происходит за счет увлечения жидкости водоема турбулентным потоком струи сточной воды, истекающей из выпускных устройств. Концентрация загрязнений уменьшается до тех пор, пока разность скоростей струй сточной воды и жидкости водотока не станет минимальной.

**В зоне II** процесс основного разбавления происходит за счет турбулентного перемешивания. Градиент концентраций загрязнений по длине этой зоны значительно меньше, чем в первой.

**В зоне III** процесс разбавления закончен, снижение концентраций загрязнений в ней происходит только за счет биологических процессов, т. е. за счет процессов самоочищения воды.

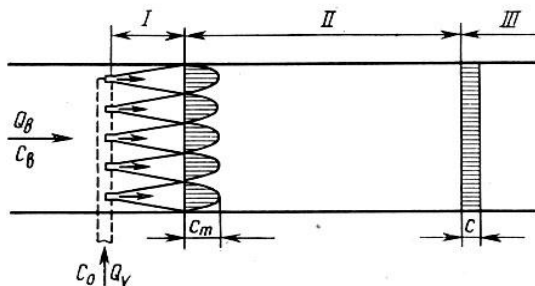


Рисунок 5 – Схема распространения сточных вод в водотоке

### 3 РАСЧЕТ ОСНОВНОГО РАЗБАВЛЕНИЯ МЕТОДОМ ФРОЛОВА - РОДЗИЛЛЕРА

Распространение примесей сточных вод происходит в направлении установившихся течений, в этом же направлении возрастает и кратность разбавления. В месте выпуска сточных вод кратность разбавления равна 1 и достигает максимального значения при полном перемешивании. Коэффициент смешения в этом же направлении изменяется от нуля до единицы.

В створе *сосредоточенного выпуска* преобладающая часть ширины русла реки свободна от влияния стока. Но по мере удаления от места выпуска сточные воды всё больше смешиваются с речной водой, всё шире становится зона загрязнения и всё меньше концентрация в максимально загрязненной струе. На некотором расстоянии от выпуска сточных вод они смешиваются с речной водой на всём створе, однако в различных струях концентрация загрязнения всё ещё может быть несколько различной.

Наконец, немного дальше от выпуска сточные воды смешиваются полностью с водой водоёма, и во всех точках створа концентрации загрязнения практически будут между собой равны.

Расчет разбавления сточных вод в реках, предложенный В. А. Фроловым и уточненный И. Д. Родзиллером основывается на условии сохранения и единичного турбулентного вещества

Для решения этих задач выполняется расчет турбулентной диффузии.

Турбулентная диффузия растворенных и взвешенных веществ в водных объектах в общем виде описывается дифференциальным уравнением, выведенным В. М. Маккавеевым в 1931 г.:

$$\frac{dc}{dt} = \underbrace{\left( v_x \frac{dc}{dx} + v_y \frac{dc}{dy} + v_z \frac{dc}{dz} \right)}_1 + D \underbrace{\left( \frac{d^2c}{dx^2} + \frac{d^2c}{dy^2} + \frac{d^2c}{dz^2} \right)}_2 - \underbrace{u \frac{dc}{dz}}_3, \quad (2)$$

где  $v_x, v_y, v_z$  – компоненты скорости течения относительно координат  $x, y, z$  соответственно, м/с.

$c$  – концентрация растворенных или взвешенных веществ в воде, мг/м<sup>3</sup>;

$u$  – скорость равномерного падения взвешенных частиц в воде, м/с (для растворов  $u = 0$ );

$t$  – время;

$D$  – коэффициент турбулентной диффузии, м<sup>2</sup>/с.

Ось  $x$  направлена по течению потока, ось  $y$  – от поверхности к дну, ось  $z$  – по ширине потока.

В формуле (2):

- 1 – перенос растворенных или взвешенных веществ в воде;
- 2 – процессы диффузии или перемешивания в потоке;
- 3 – процесс оседания взвешенных веществ в воде.

Уравнение (2) применяется для решения многих задач о распространении и транспортировке растворенных и взвешенных веществ в естественных потоках. В зависимости от характера потока и особенностей решаемой задачи уравнение упрощается.

Решение по методу Фролова – Родзилера проводят при следующих допущениях:

- 1)  $\frac{dc}{dt} = 0$  – режим стационарный;
- 2) расчет идет по одной координате  $x$ ;
- 3) речной поток считается безграничным;
- 4) начальное разбавление не учитывается;
- 5) выпуск сточных вод сосредоточенный.

Решение уравнения позволяет найти концентрацию загрязняющих веществ на любом расстоянии от места сброса сточных вод.

$$C = \frac{c_0}{n_{\text{общ}}} \quad (3)$$

где  $c_0$  – концентрация ЗВ в сточной воде;  
 $n_{\text{общ}}$  – кратность общего разбавления.

Кратность общего разбавления равна произведению кратности начального разбавления  $n_n$  на кратность основного разбавления  $n_o$ :

$$n = n_n n_o. \quad (4)$$

Кратность основного разбавления определяется по формуле

$$n_o = \frac{q + K_{\text{см}} Q}{q}, \quad (5)$$

где  $Q$ ,  $q$  – расход воды в реке и сточных вод соответственно,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;  
 $K_{\text{см}}$  – коэффициент смешения.

Авторами метода введено понятие коэффициента смешения, или коэффициента Родзиллера,  $K_{\text{см}}$ , показывающего, какая доля расхода реки участвует в смешении со сточными водами в рассматриваемом створе. Расчет коэффициента смешения производится следующим образом:

$$K_{см} = \frac{1 - \exp\left(-K_{гв} \sqrt[3]{L_{\phi}}\right)}{1 + \frac{Q}{q} \exp\left(-K_{гв} \sqrt[3]{L_{\phi}}\right)}, \quad (6)$$

где  $L_{\phi}$  – расстояния до контрольного створа по фарватеру,

$K_{гв}$  – коэффициент, учитывающий гидравлические условия в реке,

$$K_{гв} = K_{изв} K_{вып} \sqrt[3]{\frac{D}{q}}, \quad (7)$$

где  $K_{изв}$  – коэффициент извилистости;

$K_{вып}$  – коэффициент, зависящий от места выпуска сточных вод (при выпуске у берега  $K_{вып} = 1$ , при выпуске в стрежень реки  $K_{вып} = 1,5$ );

$D$  – коэффициент турбулентной диффузии, м<sup>2</sup>/с.

$K_{изв}$  – коэффициент извилистости, определяется по формуле

$$K_{изв} = \frac{L_{\phi}}{L_{п}}, \quad (8)$$

где  $L_{п}$  – расстояния до контрольного створа по прямой (рисунок 6).

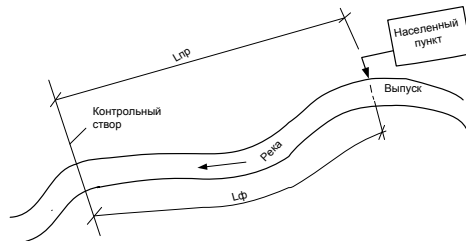


Рисунок 6 – Схема участка реки, в котором происходит смешение сточных вод с водой водотока:

$L_{пр}$  – расстояние по прямой;  $L_{ф}$  – расстояние по фарватеру

Коэффициент турбулентной диффузии  $D$  определяется несколькими методами.

## 1 Метод Караушева

$$D = \frac{g v_{cp} H_{cp}}{MC}, \quad (9)$$

где  $g$  – ускорение свободного падения,  $m/c^2$ ;

$v_{cp}$  – скорость течения реки,  $m/c$ ;

$H_{cp}$  – глубина реки,  $m$ ;

$C$  – коэффициент Шези,  $m^{1/2}/c$ ;

$M$  – функция коэффициента Шези.

Для пределов  $10 \leq C \leq 60$  она связана с  $C$  следующей зависимостью:

$$M = 0,7C + 6, \quad (10)$$

при  $C > 60$ ,  $M = \text{const} = 48$ .

Коэффициент Шези определяется по формуле Н. Н. Павловского:

а) для летнего времени

$$C = \frac{R^y}{n_{ш}}, \quad (11)$$

где  $R$  – гидравлический радиус потока,  $m$ ;

$n_{ш}$  – коэффициент шероховатости ложка реки (таблица А. 1);

$y$  – степенной показатель, определяемый по формуле

$$y = 2,5\sqrt{n_{ш}} - 0,13 - 0,75\sqrt{R}(\sqrt{n_{ш}} - 0,1); \quad (12)$$

б) для зимнего времени (период ледостава) в формулы (11) – (12) вместо глубины потока  $H_{cp}$  вводится значение  $0,5H_{cp}$ , а вместо коэффициента шероховатости ложка  $n_{ш}$  – его приведенное значение  $n_{шпр}$ :

$$n_{шпр} = n_{ш} \left[ 1 + \left( \frac{n_{л}}{n_{ш}} \right)^{1,5} \right]^{0,67}. \quad (13)$$

## 2 Метод Фролова – Родзиллера

$$D = \frac{g v H}{37 n_{ш} C^2}. \quad (14)$$

### 3 Метод Павлова

В настоящее время в Республике Беларусь в соответствии с ТКП 17.06-08-2012 (02120) используется именно этот метод.

$$D = \frac{Hv}{200} \quad (15)$$

В расчетах нередко учитывают поперечные течения (циркуляция в потоке, что увеличивает турбулизацию процесса) путем введения к коэффициенту  $D$  поправочного коэффициента  $K_{п.ц.} > 1$ .

Аналогично, т. е. введением поправочного коэффициента  $K_h$  учитывается изменчивость глубин по длине реки, которая также приводит к турбулизации водных масс.

$$D = D_0 \underbrace{K_{п.ц.} K_h}_{K_{общ}} \quad (16)$$

$K_{общ}$  находят по специальным номограммам.

В точных расчетах учитывают также и скорость ветра, которая влияет на скорость течения. Поправку также находят по номограммам.

Рассмотренный метод может применяться при соблюдении следующего неравенства:

$$0,0025 < \frac{q}{Q} < 0,1. \quad (17)$$

Если сточные воды и притоки могут поступать с обоих берегов реки, обеспечивая практически постоянную струйность речных вод вдоль каждого берега, то для расчетов концентраций веществ в максимально загрязненной струе рекомендуется использовать метод Фролова – Родзиллера для случая впадения сточных вод с обоих берегов реки.

Для формирования модели водного объекта водоток разбивается на секции с постоянным расходом, в пределах которых все параметры модели можно принять постоянными, границы секций совмещаются с местами сброса сточных вод, водозаборами, устьями притоков, створами, в которых контролируется качество воды, и местами резкого изменения гидromетрических характеристик водотока.

При совпадении места водозабора с местами сброса сточных вод или устьем притока, для этого водозабора вводится отдельная секция нулевой протяженности.

Для каждого притока и основной реки помимо створов контроля качества воды необходимо указать расчетный створ в устье и начальный створ и качество воды в истоке реки. Все створы нумеруются последовательно от истока к устью для каждого притока и основной реки. Аналогично нумеруются расчетные секции.

Метод Фролова – Родзиллера достаточно прост в применении и позволяет получить достоверное представление о потенциально возможном разбавлении сточных вод в стационарных максимально неблагоприятных условиях, что и определяет целесообразность его использования для расчета допустимых концентраций загрязняющих веществ в сточных водах.

### Пример расчета

Планируется сбрасывать в водоток сточные воды промышленного предприятия с максимальным расходом  $q = 1,42 \text{ м}^3/\text{с}$ .

Водоток, по данным Госкомгидромета, характеризуется на этом участке следующими показателями:

- среднемесячный расход водотока 95%-ной обеспеченности  $Q = 37 \text{ м}^3/\text{с}$ ;
- средняя глубина – 2,5 м;
- средняя скорость течения – 0,9 м/с;
- коэффициент извилистости русла – 1,35.

Определить кратность разбавления сточных вод в расчетном створе. Выпуск сточных вод – береговой.

**Р е ш е н и е.** Так как водоток используется в качестве водного объекта второй категории, предназначенного для рыбохозяйственного водопользования, то расчетный створ устанавливается за 500 м до границы поселка, где вода должна отвечать требованиям применительно для данного вида водопользования.

Определим коэффициент турбулентной диффузии по выражению (15) :

$$D = \frac{2,5 \cdot 0,9}{200} = 0,01 \text{ м}^2/\text{с}.$$

Определим коэффициент, учитывающий гидравлические условия перемешивания по формуле (7)

$$K_{ГУ} = 1,35 \cdot 1 \sqrt[3]{\frac{0,01}{1,42}} = 0,26.$$

Коэффициент смешения речной воды со сточной показывает, какая доля речной воды смешивается со сточной, и вычисляется по формуле (6):



$$K_{см} = \frac{1 - 2,72^{-0,26\sqrt[3]{500}}}{1 + \frac{97,7}{2,6} \cdot 2,72^{-0,26\sqrt[3]{500}}} = 0,165.$$

Расчет показал, что на расстоянии 500 м от места сброса сточных вод (в данном случае в контрольном створе) 16,5 % сточных вод смешивается с речной водой.

Кратность основного разбавления рассчитывается по формуле (5):

$$n_o = \frac{1,42 + 0,165 \cdot 48,8}{1,42} = 6,70.$$

Следовательно, на расстоянии 500 м концентрация любого загрязняющего вещества в сточной воде уменьшится в 6,70 раз.

### Контрольные вопросы

- 1 Назовите способы получения данных о распределении загрязняющих веществ в водных объектах.
- 2 Назовите основные характеристики сточных вод.
- 3 Какие существуют методы выпуска сточных вод в водные объекты?
- 4 Перечислите типы сбросных сооружений и их расположение в водном объекте.
- 5 Дайте характеристику основным типам сбросных сооружений.
- 6 Что означает процесс разбавления сточных вод?
- 7 На какие три зоны делят участок водоема или водотока от места выпуска сточных вод до сечения, где произойдет их полное смешение?
- 8 Дайте характеристику процессам, происходящим на каждом участке.
- 9 Каким уравнением описывается метод разбавления Фролова – Родзиллера?
- 10 Какие процессы описывает уравнение турбулентной диффузии В. М. Маккавеев?
- 11 При каких допущениях решают уравнение в методе Фролова – Родзиллера?
- 12 Что означает общее разбавление?
- 13 Каков физический смысл коэффициента смешения?
- 14 От каких факторов зависит коэффициент  $K_{ГУ}$  и каков его физический смысл?
- 15 Что означает коэффициент извилистости и как его определить?
- 16 Перечислите методы определения коэффициента турбулентной диффузии. Какой из них рекомендован белорусским ТКП и почему?
- 17 В каких случаях применим метод Фролова – Родзиллера?
- 18 Назовите достоинства и недостатки метода Фролова – Родзиллера.

#### 4 РАСЧЕТ РАЗБАВЛЕНИЯ МЕТОДОМ КАРАУШЕВА

Методы расчета разбавления делятся:

1) на упрощенные, которые строятся на аналитической или графической аппроксимации решений дифференциального уравнения турбулентной диффузии. Они позволяют определить  $C_{max}$  на заданном расстоянии от места выпуска сточных вод, а также определить, на каком расстоянии будет иметь место требуемая кратность разбавления – метод Фролова – Родзиллера;

2) детальные, представляющие собой непосредственное численное решение уравнения турбулентной диффузии и позволяющие получить распределение концентраций загрязняющего вещества во всей области распространения сточных вод в реке (поле концентраций загрязняющего вещества в потоке) – метод Караушева.

Данный метод, в отличие от рассмотренного выше метода В. А. Фролова - И. Д. Родзиллера, учитывает, как начальное, так и основное разбавления сточных вод.

Метод А. В. Караушева позволяет получить детальную картину загрязнения в пределах всей расчетной области, начиная от источника загрязнения до створа водопользования, в том числе по ширине реки. Метод может быть использован для расчета разбавления, как в реках, так и в водоемах при сбросе сточных вод в зоны устойчивых однонаправленных течений и дает стационарное поле концентрации.

Метод А. В. Караушева основан на решении уравнения турбулентной диффузии (конвективно-диффузионного переноса примесей) методом конечных разностей для плоской задачи. Для установившегося потока, т. е. стационарного во времени процесса, уравнение в форме конечных разностей будет иметь вид:

$$\frac{\Delta C}{\Delta X} = \frac{D}{v_{cp}} \frac{\Delta^2 C}{\Delta Y^2} \quad (18)$$

Согласно этому методу при расчете речной поток (река) разбивается сеткой из равных клеток каждая размером  $(\Delta X \times \Delta Y)$ ,

где  $\Delta X$  – длина клетки по течению реки, т. е. расстояние между вертикальными линиями сетки;

$\Delta Y$  – ширина клетки, т. е. расстояние между горизонтальными линиями сетки (по ширине реки).

Каждой ячейке присваивается свой индекс :

–по оси  $X$  – индекс  $k$ ;

–по оси  $Y$  – индекс  $m$ .

Расчетная зависимость, позволяющая вычислить распределение концентрации по длине и ширине потока, записывается уравнением:

$$C_{k,m} = \frac{C_{k+1,m+1} + C_{k-1,m-1}}{2} \quad (19)$$

Получим концентрацию вещества в клетке  $(k, m)$ , равную среднему арифметическому из концентрации вещества в соприкасающихся с ней клетках, расположенных в предыдущем сечении (рисунок 7).

Когда раствор загрязняющего вещества достигнет граничных поверхностей потока (берегов), для расчета диффузии следует использовать соотношения, учитывающие отсутствие переноса через стенки потока.

$$\left(\frac{\Delta C}{\Delta y}\right)_{\text{гр.пов}} = 0. \quad (20)$$

Учет граничных условий осуществляется путем введения в расчеты экстраполяционных значений концентрации. Расчетная сетка и поле концентрации условно распространяются за ограничивающие поток поверхности.

При этом экстраполяционное значение концентрации в клетке, примыкающей к внешней поверхности стенки  $c_{\text{эстр}}$  и значение концентрации  $c_1$  в клетке, примыкающей к внутренней поверхности стенки на том же поперечнике, должны удовлетворять указанному условию, что возможно только в случае, если  $c_{\text{эстр}} = c_1$ .

Экстраполяционные значения концентрации используются в расчете по формуле среднеарифметического так же, как и реальные значения.

Учет начальных условий осуществляется путем задания места выпуска сточных вод, их расхода ( $q$ ) и концентрации ( $c_0$ ).

Скорость поступления сточных вод ( $v_{\text{ст}}$ ), сбрасываемых в водный объект, принимается равной скорости течения реки ( $v_{\text{ср}}$ ).

В методе Караушева приняты следующие допущения.

1 В пределах расчетного участка принимаем основные гидравлические параметры водотока: глубину, скорость, коэффициент Шези – средними.

2 Рассматривается плоская задача, т. е. принято, что изменение концентрации загрязняющих веществ по глубине реки незначительно. Такое допущение справедливо для большинства равнинных рек, имеющих при большой ширине относительно малую среднюю глубину.

3 Коэффициент извилистости не рассчитывается, а для его учета на осевой линии отмечаются точки перегиба, соответствующие перекатам, и строятся соединяющие их шаги меандра. Расчет ведется по каждому меандру.

4 Метод рекомендуется использовать при выпуске сточных вод в относительно прямолинейный поток, имеющий сравнительно малую глубину, т. е. когда  $H \ll B$ . В этом случае перемешивание по глубине осуществляется значительно быстрее, чем по ширине.

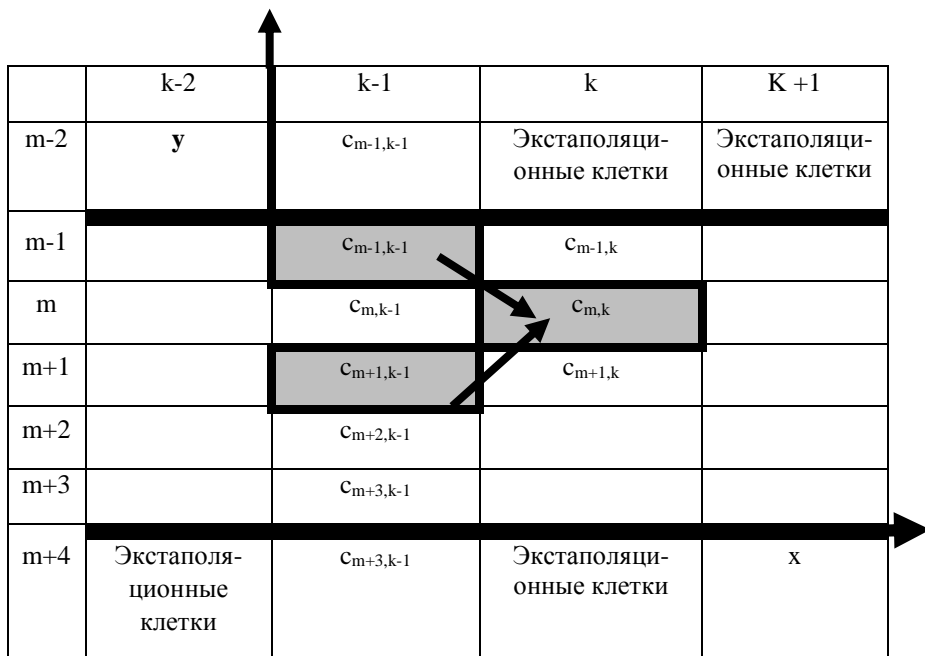


Рисунок 7 – Схема расчетных клеток к методу А. В. Караушева

Расчет разбавления следует производить в такой последовательности:

1) на существующем плане реки производится разбивка на отдельные участки – меандры;

2) на плане реки обозначают место сброса;

3) для выбранного расчетного участка определяются основные параметры водотока: расход воды в реке  $Q_p$ , средняя глубина  $H_{cp}$ , ширина водотока  $B$ , средняя скорость  $v_p$ , расход сточных вод  $q$ ;

4) рассчитывают площадь поперечного сечения загрязненной струи  $\delta$ , т. е. часть площади поперечного сечения реки, занятую сточными водами по формулам

– выпуск у берега 
$$\delta = \frac{q_0}{v_{cp}} ; \quad (21)$$

– выпуск русловый 
$$\delta = \frac{q_o}{2v_{cp}} . \quad (22)$$

5) определяется ширина загрязненной струи  $b$ .

При расчете вся изучаемая область потока делится на прямоугольные параллелепипеды, объемы которых равны

$$\Delta x \Delta y H , \quad (23)$$

где –  $H$  средняя глубина в рассматриваемой области.

Предполагается, что уже вблизи от выпуска сточные воды равномерно распространяются по всей глубине реки  $H$ :

– выпуск у берега 
$$b = \frac{\delta}{H} = \frac{q_o}{v_{cp}} , \quad (24)$$

– выпуск русловый 
$$b = \frac{\delta}{H} = \frac{q_o}{2v_{cp}} . \quad (25)$$

б) в зависимости от полученного значения  $b$  назначается ширина расчетной ячейки

$$\Delta Y \geq \frac{b}{2} ; \quad (26)$$

7) определяют число клеток, занятых загрязнением в начальном сечении: ( $n_{заг}$ )

$$n_{заг} = \frac{b}{\Delta Y} \quad (27)$$

8) определяют общее число клеток по ширине реки ( $n_{общ}$ )

$$n_{общ} = \frac{B_{cp}}{\Delta Y} \quad (28)$$

Чаще задают нечетное число ячеек по ширине реки, минимальное число. Однако если значения  $\Delta Y$  оказываются очень большими, то их уменьшают так, чтобы выполнялось неравенство

$$\Delta Y \leq \frac{1}{10} B_{cp} , \quad (29)$$

где  $B_{cp}$  – ширина реки, м;

9) определяется длина клетки, т.е. расстояние между расчетными сечениями по формуле

$$\Delta X = \frac{v_{\text{ср}} \Delta Y^2}{2D} \quad (30)$$

10) ниже поперечного сечения точки сброса по течению реку делят на расчетные ячейки с найденными размерами;

11) клетки, попадающие в струю потока сточных вод в начальном поперечнике заполняются цифрами, которые соответствуют концентрации сточных вод  $c_0$ , остальные клетки – цифрами, выражающими естественную концентрацию  $c_0$ , исследуемого вещества в воде ( $c_p$ ); в частном случае (река не загрязнена) это могут быть нули;

12) для расчета значений концентраций в граничных с берегом клетках формально переносят границу реки на оба берега на одну клетку (условная река).

13) в клетках условной реки записывают значения концентраций, равные концентрациям в ближайших клетках реки данного сечения.

14) по формуле Караушева проводят моделирование перемешивания вещества с водой реки до тех пор, пока значения в двух соседних створах не будут отличаться более чем на  $\varepsilon$  (заданная точность).

Часто оказывается удобным вести вычисления в относительных величинах, например, в процентах от  $c_0$ , полагая  $c_0 = 100\%$ .

Такой прием позволяет использовать данные расчета для оценки распределения в потоке любого числа загрязняющих ингредиентов, если будут заданы исходные содержания последних в сточных водах.

В начальном сечении клетки, соответствующие загрязненной струе, заполняются значениями концентрации загрязняющих веществ  $c_0 = 100\%$ , а остальные клетки – нулевыми концентрациями ( $c_p = 0$ ). В каждом расчетном сечении следует проверять сумму концентраций загрязняющего вещества  $\sum c = \text{const}$ .

Расчетное поле концентрации загрязняющих веществ в процентах может быть пересчитано в абсолютные величины концентрации в мг/л, если известно содержание этого вещества в сточных водах.

С целью ускорения расчета можно произвести укрупнение клеток (в 2; 4 раза и т. д.), и с некоторого расстояния от места выпуска сточных вод все дальнейшие расчеты можно вести по новым размерам клеток.

Концентрация загрязняющего вещества в укрупненной клетке вычисляется как среднее арифметическое из концентрации в объединенных клетках.

По методике А. В. Караушева рассчитываются размеры клеток  $\Delta x$  и  $\Delta y$ , дискретных областей, на которые разбивается расчетный участок.

**Пример.** Определить максимальную концентрацию загрязняющего веществ-

ва в водостоке на расстоянии 700 м от местных вод – береговой. Расход сточных вод  $q_0 = 50,6 \text{ м}^3/\text{с}$ .

Водоток характеризуется следующими показателями:

- средняя скорость течения  $v_{\text{ср}} = 2,42 \text{ м/с}$ ;
- средняя глубина водотока  $H_{\text{ср}} = 2,37 \text{ м}$ ;
- ширина водотока  $B = 26,5 \text{ м}$ .

Коэффициент турбулентной диффузии  $D = 0,073 \text{ м}^2/\text{с}$ . Для упрощения расчетов примем, что фоновое загрязнение водотока отсутствует, т. е.  $c_p = 0$ , концентрация загрязняющего вещества в сточной воде  $c_0 = 100 \text{ г/м}^3$ .

Р е ш е н и е. Определим начальное сечение струи по формуле (21):

$$\delta = \frac{q_{\text{ср}}}{V_{\text{ср}}} = \frac{50,6}{2,42} = 20,9 \text{ м}^2.$$

Определим ширину загрязненной части водотока по формуле (24)

$$b = \frac{\delta}{H_{\text{ср}}} = \frac{20,9}{2,37} = 8,8 \text{ м}.$$

Выбираем ширину расчетной клетки, соблюдая условия (26) и (29)

$$\Delta Z = 1,3 \text{ м}.$$

В этом случае чисто клеток по ширине потока, занятых загрязненной водой в результате выпуска сточных вод:

$$n_{\text{зар}} = \frac{b}{\Delta Z} = \frac{8,8}{1,3} = 7.$$

Общее число клеток по ширине водотока

$$n = \frac{b}{\Delta Z} = \frac{26,5}{1,3} = 20.$$

Определим расстояние между расчетными сечениями вдоль водотока по формуле (30) :

$$\Delta X = \frac{V_{\text{ср}} \Delta Z^2}{2D} = \frac{2,42 \cdot 1,69}{2 \cdot 0,073} = 28.$$

Строим сечение водотока, определяем распространение концентрации загрязняющего вещества по длине и ширине водотока по формуле (19).

Результаты расчетов приведены в таблице 1.





## Контрольные вопросы

- 1 В каких случаях используют метод Караушева?
- 2 На решении какого уравнения основан метод Караушева?
- 3 Чем отличается метод Караушева от метода Фролова?
- 4 Как определяется длина клетки?
- 5 Как определяется ширина клетки?
- 6 Как определяют число клеток, занятых загрязнением в начальном сечении?
- 7 Как определяют общее число клеток по ширине реки?
- 8 Как учитывают граничные условия?
- 9 Что такое интерполяционные клетки?
- 10 Какой принимают концентрацию загрязняющих веществ в начальном сечении?
- 11 Как учитывают фоновые концентрации?
- 12 Как рассчитывают значения концентрации в граничных с берегом клетках?
- 13 Какие значения концентраций записываются в экстраполяционные клетки?
- 14 Как проводят моделирование перемешивания загрязняющих веществ с водой реки?
- 15 Как определяется скорость поступления сточных вод, сбрасываемых в водный объект?
- 16 В каких случаях и каким образом производят укрупнение клеток?
- 17 Как учитывают кривизну русла?
- 18 Как проверяют правильность расчета?

## 5 РАСЧЕТ НАЧАЛЬНОГО РАЗБАВЛЕНИЯ МЕТОДОМ ЛАПШЕВА

Начальное снижение концентрации загрязняющих веществ связано с инъекцией (проникновением) сточной жидкости в приточную струю водотока.

Начальное разбавление существует не всегда. Так как возникновение начального разбавления зависит от интенсивности турбулентных завихрений, которые, в свою очередь, зависят от разности скоростей истечения сточных вод из водовыпуска и скорости основного потока, то для этого необходимо выполнение двух условий:

1) для напорных сосредоточенных и рассеивающих выпусков в водоток при соотношении скоростей течения реки  $v_p$  и выпуска  $v_o$ , должно соблюдаться соотношение  $v_o \geq 4 v_p$ ;

2) при абсолютных скоростях истечения струи из выпуска, больших 2 м/с.

При меньших скоростях расчет начального разбавления не производится.

Расширяющаяся струя может достигнуть дна водотока или его свободной поверхности. В этом случае интенсивность, а следовательно, и фактическая кратность начального разбавления  $n_n$ , будет ниже теоретической.

Для **единичного** напорного выпуска кратность начального разбавления рассчитывается следующим образом:

1 Без учета стеснения струи (когда диаметр пятна ( $d$ ) меньше средней глубины воды в реке ( $H$ ) в зоне начального разбавления)

$$n_H = \frac{0,248}{1-m} \bar{d}^2 \left( \sqrt{m^2 + 8,1 \frac{1-m}{\bar{d}^2}} - m \right); \quad (31)$$

$$m = \frac{v_p}{v_0} \quad (32)$$

где  $v_p, v_0$  – скорость течения реки и истечения сточных вод, м/с,

$$\bar{d} = \frac{d}{d_0}, \quad (33)$$

где  $d, d_0$  – диаметры загрязненного пятна в граничном створе зоны начального разбавления (относительный диаметр струи в расчетном сечении) и диаметр выпуска соответственно, м,

По номограмме (рисунок 8) находится отношение  $d$  к  $d_0$ . Рассчитывается диаметр нестесненной струи в расчетном сечении:

$$d = d_0 \bar{d}. \quad (34)$$

Находится скорость на оси струи:

$$v_m = v_p + \Delta v, \quad (35)$$

где  $\Delta v$  – превышение скорости речного потока над скоростью на оси струи (задается в пределах 0,1–0,15 м/с).

2 С учетом стеснения струи (когда диаметр пятна ( $d$ ) больше средней глубины воды в реке ( $H$ ) в зоне начального разбавления):

$$n_H = \frac{0,248}{1-m} \bar{d}^2 \left( \sqrt{m^2 + 8,1 \frac{1-m}{\bar{d}^2}} - m \right) f\left(\frac{H}{d}\right), \quad (36)$$

где  $f\left(\frac{H}{d}\right)$  – понижающий поправочный коэффициент, определяемый по диаграмме (рисунок 9).

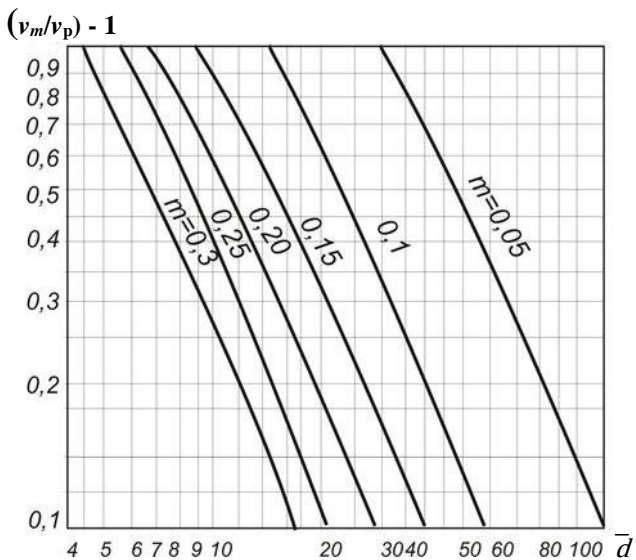


Рисунок 8 – Номограмма для определения диаметра струи в расчетном

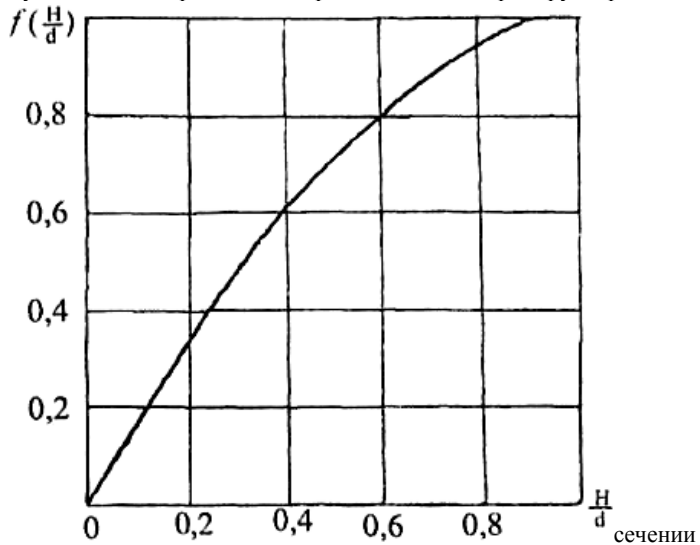


Рисунок 9 – Зависимость поправочного коэффициента от соотношения диаметра пятна и средней глубины воды в водотоке

3 Без стеснения струи в створе в предельном случае (когда она достигает дна и поверхности потока) рассчитывают по формуле (31), при этом диаметр струи принимают равным средней глубине реки, т. е.  $d = H$ .

Для **рассеивающего** напорного выпуска расчет осуществляется следующим образом. Задаваясь числом выпускных отверстий оголовка выпуска  $N_0$  и скоростью истечения сточных вод из них  $v_0 \geq 2$  м/с определяют диаметр отверстия или оголовка рассеивающего выпуска

$$d_0 = \sqrt{\frac{4q}{\pi v_0 N_0}}, \quad (37)$$

где  $q$  – суммарный расход сточных вод,  $\text{м}^3/\text{с}$ ,

$N_0$  – число выпускных отверстий оголовка выпуска.

Расстояние, где заканчивается начальное разбавление, определяют по формуле

$$L_n = \frac{\bar{d}}{0,48(1+3,12m)}, \quad (38)$$

**Пример.** В реку осуществляется сброс сточных вод через один сосредоточенный выпуск. Диаметр сечения оголовка  $d_0 = 1,2$  м, скорость истечения сточных вод  $v_0 = 2,3$  м/с.

Водоток характеризуется следующими показателями:

– средняя скорость течения  $v_p = 0,7$  м/с,

– средняя глубина водотока  $H = 4$  м.

Найти кратность начального разбавления  $n_n$  и протяженность зоны начального разбавления.

**Решение.** Выясним, будет ли иметь место начальное разбавление, т. е. проверяем, соблюдается ли хотя бы одно условие:

1)  $v_0 \geq 4 v_p$ ;  $2,3 < 4 \cdot 0,7$  – не соблюдается;

2)  $v_0 = 2,3 > 2,0$  м/с – соблюдается, следовательно, при расчетах необходимо учитывать начальное разбавление.

Найдем параметр  $m$  по формуле (32):

$$m = \frac{0,7}{2,3} = 0,3.$$

Найдем скорость на оси струи, м/с по формуле (35):

$$v_m = 0,7 + 0,15 = 0,85.$$

Найдем соотношение  $\frac{v_m}{v_p} - 1 = \frac{0,85}{0,7} - 1 = 0,21$ .

По номограмме на рисунке 8 найдем  $\bar{d} = 11$ .

Найдем диаметр струи  $d$ , м по формуле (34):

$$d = 1,2 \cdot 11 = 13,2$$

Диаметр струи больше глубины реки:  $13,2 > 4$ , следовательно, струя стесненная и начальное разбавление необходимо рассчитывать по формуле (36), предварительно определив функцию  $f\left(\frac{H}{d}\right)$  по номмограмме на рисунке 9:

$$\frac{H}{d} = \frac{4}{11} = 0,36, \text{ следовательно, } f\left(\frac{H}{d}\right) = 0,58.$$

$$n_n = \frac{0,248}{1-0,3} \cdot 13,2^2 \left( \sqrt{0,3^2 + 8,1 \frac{1-0,3}{11^2}} - 0,3 \right) \cdot 0,58 = 3 \cdot 0,58 = 1,74.$$

Найдем протяженность зоны начального разбавления по формуле (38):

$$L_n = \frac{11}{0,48(1 + 3,12 \cdot 0,3)} = 11,84 = 12 \text{ м.}$$

### Контрольные вопросы

- 1 Чем обусловлено начальное разбавление?
- 2 В каких случаях учитывают начальное разбавление?
- 3 Каким методом рассчитывают начальное разбавление?
- 4 Как учитывают стеснение струи потока?
- 5 Как определяют стесненность струи?
- 6 В чем особенность расчета для рассеивающего напорного выпуска?
- 7 Как рассчитывают протяженность зоны начального разбавления?

(справочное)

Параметры разбавления сточных вод в водных объектах

Таблица А.1 – Значения коэффициента шероховатости ложа реки

Характеристика русла	Коэффициент шероховатости $n_{ш}$
Естественные русла в весьма благоприятных условиях (чистое, прямое, не засоренное, земляное со сводным течением)	0,025
Русла постоянных водотоков равнинного типа, преимущественно больших и средних рек, в благоприятных условиях ложа и течения реки, периодические водотоки (большие и малые) при очень хорошем состоянии поверхности и формы ложа	0,03
Сравнительно чистые русла постоянных равнинных водотоков в обычных условиях, извилистые, с некоторыми неправильностями в направлении струи или же прямые, но с неправильностями в рельефе дна (отмели, промоины, месами камни). Земляные русла периодических водотоков в относительно благоприятных условиях	0,04
Русла больших и средних рек, значительно засоренные, извилистые и частично засоренные, каменистые, с беспокойным течением. Периодические (ливневые и весенние) водотоки с крупногалечным или покрытым растительностью ложем. Поймы больших и средних рек, сравнительно разработанные, покрытые растительностью (травы, кустарники)	0,05
Русла периодических водотоков, сильно засоренные и извилистые. Сравнительно заросшие, неровные, плохо разработанные поймы рек (промоины, кустарники, деревья с наличием заводей). Галечно-валунные русла горного типа с неправильной поверхностью водного зеркала. Порожистые участки равнинных рек	0,067
Русла со слабым течением и поймы, значительно заросшие, с большими глубокими промоинами. Валунные, горного типа русла с неправильной поверхностью водного зеркала (с летящими вверх брызгами воды)	0,08
Русла горно-водопадного типа с крупновалунным и извилистым строением ложа, перепады ярко выражены, извилистость весьма сильная. Поймы значительно заросшие, но с резко выраженным косоструйным течением, заводями и др.	0,1
Русла болотного типа (заросли, кочки, во многих местах почти стоячая вода и др.). Поймы с очень большими мертвыми пространствами, с местными углублениями (озерами и др.)	0,133

**Таблица А.2 – Значение коэффициента шероховатости нижней поверхности льда для периода ледостава**

Период ледостава, сут	Коэффициент шероховатости нижней поверхности льда $n_d$
1–10	0,15–0,05
10–20	0,1–0,04
20–60	0,05–0,03
60–80	0,04–0,015
80–100	0,25–0,01

**Таблица А.3 – Предельно допустимые концентрации примесей в водоемах рыбохозяйственного значения**

Ингредиенты и показатели	Предельно допустимая концентрация, мг/дм <sup>3</sup>
Алюминий	0,5
Аммоний солевой (NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> )	0,5 (NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> ) = 0,39(N)
Ацетон	0,05
Бериллий	0,0002
БПКполная	3,0 мг О <sub>2</sub> / дм <sup>3</sup>
Ванадий	0,001
Висмут	0,1
Вольфрам	0,0008
Железо (общее)	0,1
Кадмий	0,005
Кобальт	0,01
Магний	40
Марганец	0,01
Медь	0,001
Метанол	0,1
Минерализация	1000
Молибден	0,001
Муравьиная кислота	1,0
Мышьяк	0,01
Натрия триполифосфат	0,16
Нитрат-ион (NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> )	40 (NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ) = 9,0(N)
Нитрит-ион (NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> )	0,08 (NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> ) = 0,02(N)
Никель	0,010
Нефть и нефтепродукты	0,05
Ртуть	0,0001
Роданид	0,1

*Окончание таблицы А.3*

Ингредиенты и показатели	Предельно допустимая концентрация, мг/дм <sup>3</sup>
Свинец	0,03
СПАВ	0,5
Сульфаты (анион)	100
Толуол	0,5
Уксусная кислота	0,01
Фенолы	0,001
Формальдегид	0,01
Фосфаты натрия, калия	0,05
Хлориды (анион)	300,0
Хром шестивалентный	0,02
Хром трехвалентный	0,07
Цианиды	0,05
Циклогексан	0,01
Цинк	0,01

## Список рекомендуемой литературы

1 Колобаев, А.Н. Рациональное использование и охрана водных ресурсов : учеб. пособ. для вузов / А. Н. Колобаев. – Минск : БНТУ, 2005. – 170с.

2 ТКП 17.06-02–2008. Правила разработки схем комплексного использования и охраны водных ресурсов бассейна реки. Минск : Минприроды, 2008.

3 ТКП 17.06-08 – 2012 (02120). Порядок установления нормативов допустимых сбросов химических и иных веществ в составе сточных вод. Минск : Минприроды, 2012.

4 Расчет кратности разбавления по методу Н. Н. Лапшева в водотоки [Электронный ресурс]. – Режим доступа : [https://studopedia.ru/5\\_150651\\_raschet-kratnosti-razbavleniya-po-metodu-nn-lapsheva-v-vodotoki.htm](https://studopedia.ru/5_150651_raschet-kratnosti-razbavleniya-po-metodu-nn-lapsheva-v-vodotoki.htm). – Дата доступа : 01.08.2018.

5 Расчет кратности разбавления сточных вод для водотоков (рек) [Электронный ресурс]. – Режим доступа : [http://libraryno.ru/1-6-2-raschet-kratnosti-razbavleniya-stochnyh-vod-dlya-vodotokov-rek-ekolog\\_audit/](http://libraryno.ru/1-6-2-raschet-kratnosti-razbavleniya-stochnyh-vod-dlya-vodotokov-rek-ekolog_audit/). – Дата доступа : 05.08.2018.

6 Экологическое нормирование: методы расчета допустимых сбросов загрязняющих веществ в поверхностные водные объекты суши. Ч. 1. [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://docviewer.yandex.by/view/0&lang=ru>. – Дата доступа: 05.08.2018.

7 Расчет кратности разбавления в зависимости от гидрологических условий [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://poznayka.org/s97312t1.html>. – Дата доступа : 05.08.2018.

8 Методические основы оценки антропогенного влияния на качество поверхностных вод [Электронный ресурс]. – Режим доступа : [http://elib.rshu.ru/files\\_books/pdf/img-216194124.pdf](http://elib.rshu.ru/files_books/pdf/img-216194124.pdf). – Дата доступа : 05.08.2018.



9 Методика расчета кратности разбавления сточных вод [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://lektsii.org/7-2173.html>. – Дата доступа : 05.08.2018.

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	3
1 Общие требования к нормированию сбросов сточных вод в поверхностные водные объекты.....	4
1.1 Виды водопользования и нормирования.....	4
1.2 Условия сброса сточных вод в поверхностные водные объекты.....	8
1.3 Установление лимитов сброса загрязняющих веществ.....	8
1.4 Региональные нормативы качества воды в поверхностных водных объектах..	10
1.5 Выбор нормируемых и контролируемых показателей.....	11
1.6 Учет типа сточных вод.....	12
2 Расчетные методы оценки качества вод.....	14
2.1 Характеристика сточных вод.....	14
2.2 Общие закономерности разбавления сточных вод.....	17
3 Расчет основного разбавления методом Фролова – Родзиллера.....	19
4 Расчет разбавления методом караушева.....	26
5 Расчет начального разбавления методом Лапшева.....	34
Приложение А Значения коэффициента шероховатости ложа реки.....	38
Список рекомендуемой литературы.....	40

Учебное издание

Децук Валерия Сергеевна

Оценка загрязнения водных объектов

Учебно-методическое пособие по дисциплине «Рациональное использование водных ресурсов»

Редактор

Технический редактор

Компьютерный набор и верстка В. С. Децук