

10. Лабораторная работа № 10

Расчет разбавления примесей в реках при сосредоточенных стационарных выпусках сточных вод

Антропогенное загрязнение водоемов является серьезной проблемой природопользования в мировом масштабе. Рациональное использование водных ресурсов подразумевает снижение их удельного потребления, глубокую очистку сточных вод от загрязнения, воспроизводство водных ресурсов и поддержание их качества на уровне, соответствующем естественным условиям биосферы.

Загрязнение рек Урала сточными водами является серьезной проблемой при регулировании использования и охраны поверхностных вод. Наряду с экспериментами важное значение в решении этой проблемы имеет применение методов математического моделирования, позволяющих расчетным путем решать следующие задачи:

- определять показатели качества воды в любой точке потока после сброса в него сточных вод на любом расстоянии от сосредоточенного стационарного выпуска;
- определять максимально допустимую концентрацию загрязнения в месте выпуска сточных вод, при которой обеспечивается их разбавление и очистка до требуемых санитарных условий (ПДК) в расчетном створе (пункте водозабора);
- оценивать комплексное влияние на состояние реки сточных вод, сбрасываемых группой предприятий – источников загрязнения и рационально устанавливать для таких предприятий предельно допустимые сбросы сточных вод (ПДС);
- определять створы и точки отбора проб для определения качества воды в реках.

10.1. Сточные воды

Сточная вода – это вода, отводимая после использования в хозяйственно-бытовой и производственной деятельности человека. В сточных водах содержатся различные примеси, находящиеся в нерастворенном и растворенном состоянии, поэтому изменяется фазовый, химический составы воды, ее свойства. Значительную часть сточных вод составляют производственные, образующиеся в результате использования воды для контуров охлаждения, при осуществлении физико-химических процессов в различных технологиях.

Производственные сточные воды могут быть разделены на следующие группы:

1. Воды, содержащие примеси неорганического происхождения, обладающие специфическими свойствами (стоки металлургических, гальванических и других цехов). Эти воды могут заметно изменять pH водоемов, а содержащиеся в них соли тяжелых металлов токсичны по отношению к водным организмам.

2. Воды, в которых неорганические примеси не обладают токсичным действием (стоки обогатительных фабрик, цементных заводов и др.). Примеси в таких водах находятся во взвешенном состоянии и для водоемов особой опасности не представляют.

3. Воды, содержащие нетоксичные органические вещества (стоки предприятий пищевой промышленности). При попадании в водоем таких вод возрастает окисляемость, снижается концентрация растворенного кислорода, увеличивается биохимическая потребность в кислороде (БПК).

4. Воды, содержащие органические вещества со специфически токсичными свойствами (сточные воды предприятий органического синтеза, заводов по переработке нефти и др.) Такие воды содержат минеральные взвешенные вещества, неорганические кислоты, цианиды, нефтепродукты, жиры, хлориды, сульфаты, ПАВ, фенолы и др.

Сточные воды промышленных предприятий выводятся из производственного цикла в водные объекты (реки, водоемы). Обычно это осуществляется с помощью стационарно действующих спусков, размещаемых у берега или в самом водном объекте.

Для ограничения вредного воздействия на гидросферу количество сточных вод нормируется путем установления для каждого стационарного выпуска предельно допустимого сброса (ПДС). Под *ПДС* понимается *масса вещества в сточной воде, максимально допустимая к отведению с установленным режимом выпуска в данном пункте водного объекта в единицу времени с целью обеспечения норм качества воды в контрольном пункте*. Величина ПДС определяется с учетом ПДК веществ в местах водозабора, ассимилирующей способности водного объекта и рационального распределения сбрасываемых веществ между водопользователями, которые осуществляют выпуски сточных вод. Расчет ПДС производится по наибольшему среднечасовому расходу сточных вод (q , $\text{м}^3/\text{с}$) за период их выпуска при концентрации примеси S , $\text{мг}/\text{м}^3$, т.е. $\text{ПДС} = qS$.

При спуске в водный объект загрязненных сточных вод концентрация содержащихся в них примесей изменяется за счет разбавления, биологических, физико-химических и химических превращений (процессов самоочищения). В реках эти процессы происходят преимущественно вдоль и поперек течения. Задача инженерных расчетов прогнозирования качества воды состоит прежде всего в определении концентрации примесей в отдельных точках или створах реки.

Пусть в створе А в реку осуществляется стационарный во времени выпуск сточных вод с расходом q_A и концентрацией данной примеси S_A . Выше по течению реки данное вещество содержится в количестве S_p (фоновая концентрация). Пусть ниже по течению реки в створе С находится пункт водозабора пользователя (например, предприятия) и по рассматриваемой примеси установлена ПДК.

Между створами А и С в результате процессов самоочищения концентрация примеси будет снижаться до S_c . Причем S_c включает и естественное содержание примеси в воде реки (S_p). Для выполнения

требований качества воды у водопользователя S_c должна быть не больше ПДК. Поэтому если установлена ПДК по данной примеси и известен расход сточных вод от стационарного выпуска q_u , то инженерная задача состоит в определении такой концентрации примеси S_A (с учетом S_p), чтобы выполнялось условие $S_c \leq \text{ПДК}$ и тогда $\text{ПДС} = q_o S_A$, $q_o = q_A$.

Для рек, расход воды в которых регулируется, важно знать количество воды, достаточное для разбавления сточных вод у пункта водопользования до величины концентрации примеси, не превышающей ПДК.

Актуальной задачей при проектировании водозаборов является определение места их размещения по отношению к имеющимся выпускам сточных вод в реку. Это предполагает расчет такого расстояния X от створа A до створа C , чтобы выполнялось условие $S_c \leq \text{ПДК}$ по рассматриваемой примеси.

При расчете качества воды в реке исходные данные подразделяются на три группы:

1. Гидрологические и гидравлические характеристики водного объекта.
2. Характеристика источника загрязнения.
3. Требования к качеству воды в пункте водопользования (расчетном или контрольном).

В группу гидрологических и гидравлических характеристик реки входят расчетные расходы, скорости течений и гидравлические параметры ложа реки (площадь зеркала реки, ее глубина, ширина, смоченный периметр, гидравлический радиус, шероховатость русла).

В качестве расчетного расхода объекта питьевого и культурно-бытового водопользования принимается: для незарегулированных рек – наименьший среднесуточный расход воды в реке за год при 95% -ной обеспеченности; для зарегулированных рек – установленный, гарантированный расход воды ниже плотины. Для объектов рыбохозяйственного назначения принимается: для незарегулированных рек расчетный расход не более 1/3 от минимального суточного расхода воды года 95% -ной обеспеченности; для зарегулированных рек - не более 1/3 минимального гарантированного расхода ниже плотины (санитарный пропуск).

Поскольку расчеты процессов самоочищения речных вод проводятся для определенного участка реки, то гидравлические и морфологические характеристики на нем определяются усреднением параметров, получаемых для отдельных зон этих участков, где эти параметры относительно постоянны. К основным характеристикам, используемым в расчетах относятся гидравлический радиус (R), площадь живого сечения ($F_{ж}$), смоченный периметр (γ), глубина (H) и ширина (B) реки. Для широких рек можно принимать $R=H$, $\gamma=B$, в остальных случаях $R= F_{ж}/\gamma$, где γ определяется на основе морфологических измерений в отдельных зонах участка реки (измерений гидравлических уклонов, H , B , площади зеркала реки и др.)

Шероховатость русла определяется по справочным данным и характеризуется коэффициентом n_u , зависящим от структуры ложа реки, наличия водной растительности.

Основными исходными данными по источнику загрязнения являются расход сточных вод и концентрация в них отдельных примесей.

Промышленные стоки для производств с непрерывным технологическим циклом отличаются достаточной стабильностью расхода и содержанием примесей в сточных водах. Такие стоки можно считать стационарными. Для спусков в водный объект дождевых вод из ливневой канализации наблюдается заметная неравномерность расходов во времени и изменение концентрации примесей в стоках. В начале поступления ливневых вод содержание примесей незначительно. В зависимости от интенсивности выпадения осадков и площади водозабора в канализационные сети расход сточных вод и содержание в них примесей сначала увеличиваются, а затем снижаются. Поэтому изменение этих характеристик во времени имеет форму кривых с максимумом. Такой же нестационарный процесс наблюдается при аварийных выпусках сточных вод.

Требования к качеству воды определяются в зависимости от вида водопользования (питьевое, хозяйственно-питьевое, рыбохозяйственное, промышленное и др.)

В качестве оценки допустимой степени снижения качества поверхностных вод служат требования к их составу, свойствам и предельно допустимые концентрации (ПДК) веществ в воде в соответствии с видом водопользования. В случае одновременного использования воды на различные нужды для оценки ее качества используют наиболее жесткие требования в ряду одноименных нормативов качества воды. Например, содержание взвешенных веществ в воде не должно увеличиваться более чем на 0,25 мг/л для объектов питьевого водопользования и не более чем на 0,75 мг/л в объектах для купания, спорта, отдыха. Если река является источником водопользования на питьевые цели и для культурно-оздоровительных мероприятий, то в месте водозабора не допускается увеличение содержания взвешенных веществ более чем на 0,25 мг/л.

Требования к составу, свойствам воды и нормативы ПДК приводятся в "Санитарных правилах и нормах охраны поверхностных вод от загрязнения сточными водами" (далее - Правила).

При использовании Правил следует иметь в виду, что загрязняющие вещества подразделены на три группы: по лимитирующему показателю вредности (ЛПВ), по воздействию на организм человека и на биологические процессы в водоемах и реках. Кроме того, разделяют общесанитарный, санитарно-токсикологический и органолептический показатели.

Принято, что качество воды водного объекта достигает границы экологического сдвига, если содержание в ней примесей равно одной дозе. Для определенного вещества эта доза соответствует ПДК. Для нескольких веществ одного ЛПВ ($i=1, \dots, m$) одна доза соответствует

$$\sum_{i=1}^m S_i / \text{ПДК}_i \leq 1,$$

где S_i – средняя концентрация i -го вещества в воде;

ПДК _{i} – предельно допустимая концентрация того же вещества.

Отметим, что состав и свойства воды должны соответствовать нормативам в створе, расположенном на реке на 1 км выше ближайшего по течению пункта водозабора, а для водоемов – на 1 км в обе стороны от водозабора. При выпуске сточных вод в черте города первым пунктом водопользования является город, поэтому требования к качеству воды в реке или водоеме должны относиться к самим сточным водам. Это значит, что данные воды должны быть очищены перед выпуском в водный объект и соответствовать требованиям к их составу и свойствам.

10.2. Определение качества воды в реке ниже сосредоточенных стационарных выпусков сточных вод

Расчет качества воды рек осуществляется на основе полуэмпирической теории турбулентности. Согласно этой теории принимаются следующие предположения:

- 1) жидкость является несжимаемой;
- 2) скорости потока (числа Рейнольдса) достаточно велики и эффектом влияния молекулярной диффузии можно пренебречь,
- 3) количество сточных вод, содержащих примеси, незначительно по сравнению с количеством речных вод и их влиянием на турбулентный перенос можно пренебречь.

В общем случае рассматривается стационарный во времени режим выпуска сточных вод из сосредоточенного источника. На участке между местом выпуска сточных вод и створом водозабора река имеет достаточно прямую береговую линию и достаточно постоянную форму ложа. Графическое представление схемы дано на *рис. 10.1*. Направление течения реки совпадает с осью X . В зоне стока река имеет среднюю ширину B и среднюю глубину H .

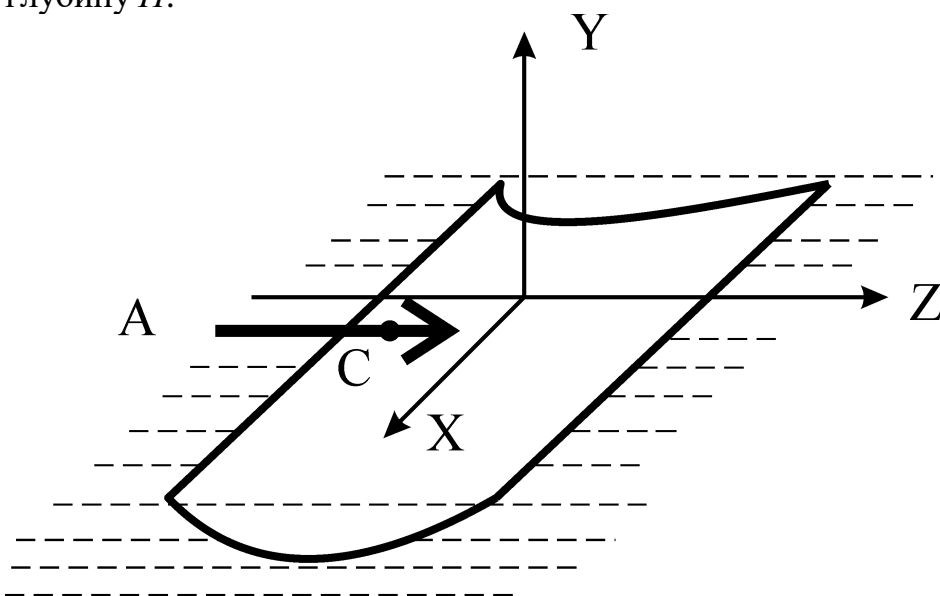


Рис. 10.1. Схема стационарного выпуска сточных вод в реку

Выпуск сточных вод в створе A , совпадающем с осью Z , находится в точке C . Он может осуществляться в центре потока, у берега или в точке потока на расстоянии b от берега и на глубине h от поверхности реки.

Примеси, содержащиеся в сточных водах, могут быть *консервативными* или *неконсервативными*. Первые изменяют свою концентрацию в реке только за счет разбавления (например, соли тяжелых металлов). Неконсервативные вещества кроме разбавления изменяют свою концентрацию за счет физико-химических превращений.

В общем случае нестационарный турбулентный диффузионный перенос примесей в реке происходит по направлениям X , Y и Z и описывается дифференциальным уравнением вида

$$\frac{\partial S}{\partial \tau} + V_x \frac{\partial S}{\partial X} + V_y \frac{\partial S}{\partial Y} + V_z \frac{\partial S}{\partial Z} - D_x \frac{\partial^2 S}{\partial X^2} - D_y \frac{\partial^2 S}{\partial Y^2} - D_z \frac{\partial^2 S}{\partial Z^2} + F(S) = 0 \quad (10.1)$$

где S – концентрация примеси в точке реки с координатами X, Y, Z ;

V_x, V_y, V_z , – скорости течения реки в направлениях X, Y, Z соответственно;

D_x, D_y, D_z , – коэффициенты диффузии в направлениях X, Y, Z ;

$F(S)$ – функция неконсервативности примеси (для консервативного вещества $F(S)=0$, иначе $F(S)>0$).

При стационарном режиме выпуска сточных вод $\frac{\partial S}{\partial \tau} = 0$, $\frac{\partial^2 S}{\partial X^2} = 0$,

а $V_y \approx V_z \approx 0$.

Для рек обычно ширина потока намного превышает его глубину ($B \gg H$), поэтому можно допустить, что $\frac{\partial^2 S}{\partial Z^2} = 0$. Тогда с учетом принятых допущений уравнение турбулентного диффузионного переноса примет вид

$$V_x \frac{\partial S}{\partial X} - D_y \frac{\partial^2 S}{\partial Y^2} + F(S) = 0 \quad (10.2)$$

Распад неконсервативного вещества учитывается функцией вида

$$F(S) = \exp\left(-K_1 \cdot \frac{X}{V}\right),$$

где K_1 – константа неконсервативности (константа скорости процесса), учитывающая скорость превращения в реакциях первого порядка, $1/C$; $V=V_x$.

Решение данного уравнения зависит от выбора начала координат. На участке перемешивания сточной воды с рекой средняя скорость течения V , $м/с$. От стационарного выпуска сточная вода поступает в количестве q_0 , $м^3/с$, и содержит примесь в количестве $S(\tau)=S_0$, $мг/м^3$.

Приведем решение уравнения (2.2) для различных вариантов выпуска сточных вод при указанных граничных условиях.

Центральный выпуск (начало координат в точке выпуска)

$$S = \frac{2q_0 S_0}{4\pi \cdot V \cdot R \cdot X^{3/2} \Phi_{o,b} \Phi_{o,h}} \exp\left[-\frac{y^2 + z^2}{R \cdot X^{3/2}} - K_1 \frac{X}{V}\right] + S_p \exp\left(-K_1 \frac{X}{V}\right). \quad (10.3)$$

Береговой выпуск (начало координат в точке выпуска)

$$S = \frac{2q_o S_o}{\pi V \cdot P \cdot x^{3/2} \Phi'_{o,B} \cdot \Phi'_{o,h}} \exp \left[-\frac{y^2 + z^2}{P \cdot x^{3/2}} - K_1 \frac{x}{V} \right] + S_p \exp(-K_1 \frac{x}{V}). \quad (10.4)$$

Выпуск в точке потока на расстоянии «в» от берега и «h» от поверхности реки (начало координат в центре потока B/2 и H/2)

$$S = \frac{2q_o S_o}{\pi V \cdot P \cdot x^{3/2} |\Phi_{o,B} \Phi_{o,B-v}| \cdot |\Phi_{o,h} + \Phi_{o,H-h}|} \cdot \exp \left[-\frac{(y+h-H/2)^2 + (z+v-B/2)^2}{P \cdot x^{3/2}} - K_1 \frac{x}{V} \right] + S_p \exp(-K_1 \frac{x}{V}). \quad (10.5)$$

В уравнениях (10.3), (10.4) и (10.5) приняты следующие обозначения:

$S=S(y,z,x)$ – концентрация примеси в точке с координатами y (глубина);

z – ширина; x – расстояние от точки выпуска сточных вод, $мг/м^3$;

S_p – фоновая концентрация данной примеси в реке выше места выпуска стока, $мг/м^3$;

$\Phi_o(a) = \frac{2}{\sqrt{2\pi}} \int_0^a e^{-t^2/2} dt$ – интеграл вероятности Гаусса. Значения функции

$\Phi_o(a)$ определяются по таблице *Прил. 10.1*;

$P=k \cdot B^{1/2} (2g)^{1/4} / C \cdot H^{3/4}$ – размерный коэффициент, $м^{1/2}$;

B, H – соответственно средняя ширина и средняя глубина реки на участке перемешивания, $м$;

C – скоростной коэффициент (коэффициент Шези), характеризующий интенсивность турбулентного перемешивания, $м^{1/2}/с^2$; K_1 – константа неконсервативности, определяемая по табл. 10.2 и 10.3.

Параметр «а» в интеграле вероятности Гаусса, входящем в уравнения (10.3) - (10.5), определяется из выражений:

$$\begin{aligned} \Phi_{o,B} &= \Phi_o \left(\frac{B}{\sqrt{2P} \cdot x^{3/4}} \right); & \Phi'_{o,h} &= \Phi_o \left(\frac{H\sqrt{2}}{\sqrt{2P} \cdot x^{3/4}} \right); \\ \Phi_{o,v} &= \Phi_o \left(\frac{B\sqrt{2}}{\sqrt{2P} \cdot x^{3/4}} \right); & \Phi_{o,h} &= \Phi_o \left(\frac{(B-v)\sqrt{2}}{\sqrt{2P} \cdot x^{3/4}} \right); \\ \Phi_{o,h} &= \Phi_o \left(\frac{h\sqrt{2}}{\sqrt{2P} \cdot x^{3/4}} \right); & \Phi_{o,H-h} &= \Phi_o \left(\frac{(H-h)\sqrt{2}}{\sqrt{2P} \cdot x^{3/4}} \right); \\ \Phi_{o,H} &= \Phi_o \left(\frac{H}{\sqrt{2P} \cdot x^{3/4}} \right). \end{aligned}$$

Определение качества воды состоит в расчете концентрации примеси в планируемых точках водозабора по уравнениям (10.3), (10.4) или (10.5). Для выполнения расчета необходимо определить значения параметров и коэффициентов, т.е. исходные данные, входящие в состав трех групп:

- 1) гидрологические и гидравлические характеристики реки;
- 2) характеристики источника загрязнения;
- 3) требования к качеству воды в реке в выбранных расчетных или

контрольных пунктах (точках) водозабора.

В группу гидрологических и гидравлических характеристик входят расчетные расходы и уровни воды в реке, гидравлические характеристики ложа реки. Расходы определяют согласно Санитарным нормам и правилам для расчетного участка реки. Для выбранного створа водозабора определяются гидравлические характеристики реки при расчетном расходе воды Q . Зная морфологические характеристики реки, определяют площадь живого сечения потока $F_{ж}$, $м^2$. По этим гидравлическим характеристикам рассчитывается коэффициент Шези $C = V / \sqrt{R \cdot I}$, где I – гидравлический уклон ложа реки. Часто при проведении расчетов данные о гидравлических уклонах отсутствуют и коэффициент Шези определяют по формуле Павловского $C = R^\alpha / n_{ш}$, где $n_{ш}$ – коэффициент шероховатости дна реки, определяемый по табл. 10.1; α -показатель, определяемый из условий: $\alpha = 1,5 \sqrt{n_{ш}}$ при $R < 1 м$, $\alpha = 1,3 \sqrt{n_{ш}}$, при $R \geq 1 м$.

Таблица 10.1

Скоростной коэффициент (коэффициент Шези)

<i>Характеристика русла реки</i>	<i>$n_{ш}$</i>
Песчаное русло, ровное, без растительности, с незначительным перемещением донных наносов	0,2 – 0,23
Песчаное извилистое русло, с большим перемещением донных наносов	0,2 – 0,23
Пойма, заросшая травой	0,23 – 0,33
Пойма, заросшая кустарником или редким лесом	0,33 – 0,45
Пойма, заросшая лесом	0,45 – 0,60

Константу скорости процесса (неконсервативности) самоочищения от ряда металлов при различных температурах воды и водородных показателях следует принимать по табл. 10.2 и 10.3.

Таблица 10.2

Константы неконсервативности (K_1) в системе без донных отложений

$PН$	$T, ^\circ C$	Значения константы скорости процесса самоочищения от металлов				
		Fe^{3+}	Zn^{2+}	Cu^{2+}	Pb^{2+}	As^{5+}
7	20	0,78	0,17	0,15	$1,9 \cdot 10^{-3}$	0,64
6	20	1,16	0	0,45	$0,83 \cdot 10^{-2}$	0,24
3,9	20	0,96	0,32	0	0,31	0,01
7	3	0,10	0,04	0	0,02	0,05

Таблица 10.3

Константы скорости процесса (неконсервативности) в системе при наличии остатков высшей водной растительности

$PН$	Значения константы скорости процесса « K » самоочищения от металлов				
	$Fe^{3+,2+}$	Zn^{2+}	Cu^{2+}	Pb^{2+}	As^{5+}
<i>Аэробные условия</i>					
5	0,002	0,08	0,026	0,02	0,09
7	0,002	0	0,0001	0,72	0,06
<i>Анаэробные условия</i>					
7	0,16	0,11	5,26	-	1,14
5	0,14	0,03	0,74	-	1,45

При расчетах для одного стационарного сосредоточенного выпуска сточных вод содержание примеси до створа этого выпуска соответствует фоновой концентрации S_p . Если стоков несколько, то сначала определяют концентрацию примеси у водозабора для наиболее удаленного от него стока, затем для стоков по мере их приближения к водозабору. Концентрация примеси в расчетном створе водозабора вычисляется как сумма концентраций примесей, полученных в данном створе по отдельным стокам. Примеры расчетов для одного и двух стоков приведены в Прил. 10.2.

Для выполнения исследовательских расчетов и решения задач анализа изложенная выше методика реализована программными продуктами:

- **задача 1: Расчет распределения загрязнения от сосредоточенного стационарного выпуска сточных вод в реку** (построение поля концентрации примеси в реке в заданном створе водозабора):

- **задача 2: Расчет качества воды в реке при наличии нескольких выпусков сточных вод** (расчет концентрации на оси струи).

10.3. Расчет максимально допустимой концентрации примеси в месте выпуска сточных вод для оценки ПДС

Количество примеси в сточных водах, сбрасываемых в реку (S_o), должно быть таким, чтобы в первом по течению реки створе водопользования (с учетом разбавления для консервативных и самоочищения неконсервативных примесей) выполнялись требования, установленные законодательными и нормативными актами. При наличии в речной воде нескольких примесей с одинаковым лимитирующим показателем вредности (ЛПВ) в первом створе водопользования должно быть выполнено условие по величине нормируемой концентрации S_n , т.е.

$$S_n = \text{ПДК} \left[1 - \sum_{i=1}^{i-1} \frac{S_{\max, i-1}}{\text{ПДК}_{i-1}} \right], \quad (10.6)$$

где ПДК – предельно допустимая концентрация данного вещества, мг/м^3 ;

$S_{\max, i-1}$ – максимальные концентрации веществ с одинаковыми ЛПВ, содержащихся в воде в пункте водопользования, кроме расчетного, мг/м^3 ;

ПДК_{i-1} – предельно допустимые концентрации этих же веществ, мг/м^3 .

Поскольку в створе водопользования концентрация примеси не должна превышать ПДК по соответствующей примеси, то $S_{\max, i} - \text{ПДК}_i \leq 0$. Подставив в это условие вместо $S_{\max, i}$ выражение, получаемое из уравнений (10.3) – (10.5), и решив полученное неравенство относительно S_o , получим формулы для расчета допустимых концентраций примеси при различном расположении сосредоточенных стационарных выпусков ($S_o = S_{\max, i}$, $S_d = \text{ПДК}_i$);

а) центральный выпуск

$$S_o \leq \frac{(S_d - S_p \exp(-K_1 x / V))}{q_o \exp(-K_1 x / V)} \cdot 4\pi \cdot V \cdot P \cdot x^{3/2} \Phi_{o,B} \cdot \Phi_{o,H}; \quad (10.7)$$

б) береговой выпуск

$$S_o \leq \frac{(S_d - S_p \exp(-K_1 x / V))}{q_o \exp(-K_1 x / V)} \cdot \pi \cdot V \cdot P \cdot x^{3/2} \Phi'_{o,B} \cdot \Phi'_{o,H}; \quad (10.8)$$

в) выпуск в точке потока на расстоянии «в» от берега и глубине «h» от поверхности реки

$$S_o \leq \frac{(S_d - S_p \exp(-K_1 x / V))}{q_o \exp(-K_1 x / V)} \cdot 4\pi \cdot V \cdot P \cdot x^{3/2} (\Phi_{o,B} + \Phi_{o,B-v})(\Phi_{o,h} + \Phi_{o,H-h}) \quad (10.9)$$

При $q_0 = const$ величина $ПДС = q_0 S_0$.

Для выполнения расчетов по большому количеству вариантов используется программный продукт - **задача 3: Расчет допустимой концентрации примеси в сточных водах при сосредоточенном стационарном выпуске сточных вод.**

10.4. Определение створа достаточного перемешивания

Створ достаточного перемешивания соответствует створу реки, где отличие между максимальной S_{max} и минимальной S_{min} концентрациями примеси в поперечном сечении потока не превышает 20%, т.е. $S_{max}/S_{min} \leq 1,2$. С учетом этого условия решение уравнений (10.3)-(10.5) относительно координаты x дает расчетные формулы вида:

а) выпуск в центре потока

$$x = \sqrt[3]{\left(\frac{H^2 + B^2}{4P \cdot \ln(S_{max}/S_{min})}\right)^2}; \quad (10.10)$$

б) береговой выпуск

$$x = \sqrt[3]{\left(\frac{H^2 + B^2}{P \cdot \ln(S_{max}/S_{min})}\right)^2}; \quad (10.11)$$

в) выпуск в точке сечения на расстояниях « B/z - в» и « $H/2 - h$ » от центра потока

$$x = \sqrt[3]{\left(\frac{H^2 + B^2}{4P \cdot \ln(S_{max}/S_{min})}\right)^2}; \quad (10.12)$$

В этих формулах фоновая концентрация примеси (S_p) не учитывается, так как ее распределение в речной воде равномерно по сечению потока.

При расчетах значительного числа вариантов используется программный продукт - **задача 4: Определение створа достаточного перемешивания.**

10.5. Определение расхода воды для разбавления примеси до ПДК в створе водопользования

При ориентированных расчетах расход воды для разбавления консервативной примеси до ПДК может быть оценен по уравнению материального баланса

$$Q = q_0 \cdot (S_0 - ПДК) / (ПДК - S_p) \quad (10.13)$$

Для более точных расчетов следует использовать решения, полученные из уравнений (10.3)–(10.5) и (10.7)–(10.9):

а) центральный выпуск

$$Q = q_0 \left[\frac{S_0 B \cdot H \cdot \exp(-K_1 x / V)}{4\pi \cdot (ПДК - S_p \exp(-K_1 x / V)) P \cdot x^{3/2} \Phi_{o,b} \cdot \Phi_{o,h}} - 1 \right]; \quad (10.14)$$

б) береговой выпуск

$$Q = q_o \left[\frac{S_o B \cdot H \cdot \exp(-K_1 x / V)}{4\pi \cdot (\text{ПДК} - S_p \exp(-K_1 x / V)) P \cdot x^{3/2} \Phi'_{o,B} \cdot \Phi'_{o,H}} - 1 \right]; \quad (10.15)$$

в) выпуск в точке сечения на расстояниях «В/2 - в» и «Н/2 - h» от центра потока

$$Q = q_o \left[\frac{S_o B \cdot H \cdot \exp(-K_1 x / V)}{\pi (\text{ПДК} - S_p \exp(-K_1 x / V)) P \cdot x^{3/2} (\Phi_{o,B} + \Phi_{o,B-h})(\Phi_{o,h} + \Phi_{o,H-h})} - 1 \right] \quad (10.16)$$

Длина участка достаточного перемешивания (х) вычисляется по уравнениям (10.10)–(10.12). Расчет расхода воды, необходимого для разбавления консервативной примеси, ведется в следующей последовательности. Сначала принимают в качестве заданного расхода Q величину среднемесячного расхода воды 95% обеспеченности Q_c . По ней и известному расходу q_o вычисляют гидравлико-морфологические характеристики реки. Затем по одному из уравнений (10.10)–(10.12) определяют длину участка от створа выпуска сточных вод до створа полного перемешивания. После этого по одной из формул (10.14)–(10.16) выполняют расчет расхода Q . Если вычисленный расход Q и принятый как требуемая величина Q_c близки, то расход Q принимается в качестве расчетного. При достаточно большом отличии расходов расчеты повторяются при задании большей или меньшей величины расхода воды Q_c . Если длина участка между створами выпуска сточных вод и достаточного перемешивания больше расстояния от места выпуска сточных вод до створа водопользования, то исходная величина расхода воды без дальнейших расчетов корректируется.

Для выполнения расчетов по формулам (10.14)–(10.16) используется программный продукт - **задача 5: Расчет расхода воды для разбавления примеси до ПДК в створе водопользования.**

Интеграл вероятности Гаусса

$$\Phi(a) = \frac{2}{\sqrt{2\pi}} \int_0^a e^{-t^2/2} dt$$

X	$\Phi(x)$	X	$\Phi(x)$	X	$\Phi(x)$	X	$\Phi(x)$
0,00	0	0,30	0,2358	0,60	0,4515	0,90	0,6319
0,01	0,008	31	0,2434	61	0,4581	91	0,6372
0,02	0,016	32	0,251	62	0,4647	92	0,6424
0,03	0,0239	33	0,2586	63	0,4713	93	0,6476
0,04	0,0319	34	0,2661	64	0,4778	94	0,6528
0,05	0,0399	35	0,2737	65	0,4843	95	0,6579
0,06	0,0478	36	0,2812	66	0,4997	96	0,6629
0,07	0,0558	37	0,2886	67	0,4971	97	0,668
0,08	0,0638	38	361	68	0,5035	98	0,6729
0,09	0,0717	39	0,3035	69	0,5098	99	0,6778
0,10	0,0797	0,40	0,3108	0,70	0,5161	1,00	0,6827
11	0,0876	41	0,3182	71	0,5223	01	0,6875
12	0,0955	42	0,3255	72	0,5285	02	0,6923
13	0,1034	43	0,3328	73	0,5346	03	0,697
14	0,1113	44	0,3401	74	0,5407	04	0,7017
0,15	0,1192	0,45	0,3473	0,75	0,5467	1,05	0,7063
16	0,1271	46	0,3545	76	0,5527	06	0,7109
17	0,135	47	0,3616	77	0,5587	07	0,7154
18	0,1428	48	0,3688	78	0,5646	08	0,7199
19	0,1507	49	0,3759	79	0,5705	09	0,7243
0,20	0,1585	0,50	0,3829	0,80	0,5763	1,10	0,7287
21	0,1663	51	0,3899	81	0,5821	11	0,733
22	0,1741	52	0,3969	82	0,5878	12	0,7373
23	0,1819	53	0,4039	83	0,5935	13	0,7415
24	0,1897	54	0,4108	84	0,5991	14	0,7457
0,25	0,1974	0,55	0,4177	0,85	0,6047	1,15	0,7499
26	0,2051	56	0,4245	86	0,6102	16	0,754
27	0,2128	57	0,4313	87	0,6157	17	0,758

Окончание приложения 10.1

X	$\Phi(x)$	X	$\Phi(x)$	X	$\Phi(x)$	X	$\Phi(x)$
28	0,2205	58	0,4381	88	0,6211	18	0,762
29	0,2282	59	0,4448	89	0,6265	19	0,766
0,30	0,2358	0,60	0,4515	0,90	0,6319	1,20	0,7699
1,20	0,7699	1,50	0,8664	1,80	0,9281	2,50	0,9876
21	0,7737	51	0,869	81	0,9297	55	0,9892
22	0,7775	52	0,8715	82	0,9312	60	0,9907
23	0,7813	53	0,874	83	0,9328	65	0,992
24	0,785	54	0,8764	84	0,9342	70	0,9931
1,25	0,7887	1,55	0,8789	1,85	0,9357	1,75	0,994
26	0,7923	56	0,8812	86	0,9371	80	0,9949
27	0,7959	57	0,8836	87	0,9385	85	0,9956
28	0,7995	58	0,8859	88	0,9399	90	0,9963
29	0,8029	59	0,8882	89	0,9412	95	0,9968
1,30	0,8064	1,60	0,8904	1,90	0,9426	3,00	0,9973
31	0,8098	61	0,8926	91	0,9439	10	0,9981
32	0,8132	62	0,8948	92	0,9451	20	0,9986
33	0,8165	63	0,8969	93	0,9464	30	0,999
34	0,8198	64	0,899	94	0,9476	40	0,9993
1,35	0,823	1,65	0,9011	1,95	0,9488	3,50	0,9945
36	0,8262	66	0,9031	96	0,9500	60	0,9997
37	0,8293	67	0,9051	97	0,9512	70	0,9998
38	0,8324	68	0,907	98	0,9523	80	0,9999
39	0,8355	69	0,909	99	0,9534	90	0,9999
1,40	0,8385	1,70	0,9109	2,00	0,9545	4,00	0,9999
41	0,8415	71	0,9127	05	0,9596	4,417	1
42	0,8444	72	0,9146	10	0,9643		
43	0,8473	73	0,9164	15	0,9684		
44	0,8501	74	0,9181	20	0,9722		
1,45	0,8529	1,75	0,9199	2,25	0,9756		
46	0,8557	76	0,9216	30	0,9786		
47	0,8584	77	0,9233	35	0,9812		
48	0,8611	78	0,9249	40	0,9836		
49	0,8638	79	0,9265	45	0,9857		
1,50	0,8664	1,80	0,9281	2,50	0,9876		

Примеры расчета качества воды в реке.

1. Проектируется русловый выпуск сточных вод в центре реки. Расход сточных вод $q_o = 0,5 \text{ м}^3/\text{с}$, содержание консервативной примеси в них $S_o = 1 \text{ г/л}$. Фоновая концентрация этой примеси в реке $S_\phi = 0,0005 \text{ г/л}$. Осредненные гидравлические и морфологические характеристики реки на участке смешения по расчетному расходу с учетом расхода сточных вод равны: $B = 308 \text{ м}$, $H = 2,42 \text{ м}$, $V = 0,18 \text{ м/с}$, $C = 8,6 \text{ м}^{1/2}/\text{с}$. Необходимо вычислять концентрацию примеси S в 1000 м ниже выпуска на расстоянии 70 м от берега и 2 м от поверхности реки в точке планируемого водозабора.

Поскольку примесь консервативная, то $K_1 = 0$. Для расчетов используем уравнение (2.3). Вычислим сначала ряд коэффициентов:

$$P = 0,026 \cdot B^{1/2} \cdot (2g)^{1/4} / C H^{3/4} = 0,026 \cdot 308^{1/2} (2 \cdot 9,81)^{1/4} / 8,6 \cdot 2,42^{3/4} = 0,0575 \text{ м}^{1/2}.$$

$$a = \frac{B}{\sqrt{2P \cdot X^{3/4}}} = \frac{308}{\sqrt{2 \cdot 0,0575 \cdot 1000^{3/4}}} = 5,1.$$

По таблице прил. 10.1 $\Phi_{0,B}(5,1) = 1$.

$$\text{Для } a = \frac{H}{\sqrt{2P \cdot X^{3/4}}} = \frac{2,42}{\sqrt{2 \cdot 0,0575 \cdot 1000^{3/4}}} = 0,04$$

получим $\Phi_{0,h}(0,04) = 0,032$.

Координаты точки планируемого водозабора $x = 1000 \text{ м}$,
 $y = 2 - H/2 = 2 - 2,42/2 = 0,79 \text{ м}$; $z = B/2 - 308/2 - 70 = 84 \text{ м}$. Концентрация примеси в точке водозабора

$$S = \frac{2q_o S_o}{4\pi \cdot V \cdot P \cdot X^{3/2} \Phi_{0,B} \Phi_{0,h}} \exp\left[-\frac{y^2 + z^2}{P \cdot X^{3/2}} - K_1 \frac{x}{V}\right] + S_\phi \exp(-K_1 \frac{x}{V}) =$$

$$= \frac{2 \cdot 0,5 \cdot 1}{4 \cdot 3,14 \cdot 0,0575 \cdot 1000^{3/2} \cdot 1 \cdot 0,032} \exp\left[-\frac{0,79^2 + 84^2}{0,075 \cdot 1000^{3/2}}\right] + 0,0005 =$$

$$= 0,0008 \text{ г/л}$$

Если требуется определить максимальную концентрацию примеси, то нужно вычислить ее на оси струи, т.е. при $y = Z = 0$, и она равна

$$S_{\max} = 0,0157 \text{ г/л}.$$

2. Пусть кроме выпуска, приведенного в первом примере, имеется второй выпуск, расположенный ниже по течению реки на расстоянии 100 м. Параметры обоих стоков при этом одинаковы. Поскольку объем сточных вод небольшой, то гидравлико-морфологические характеристики реки можно оставить без изменения. Расчет концентрации примеси от второго источника приводим для точки водозабора на расстоянии $x = 900 \text{ м}$ по течению реки.

Не повторяя вычислений, аналогичных первому примеру, определим интегралы вероятности Гаусса:

$$\text{при } a = \frac{B}{\sqrt{2P \cdot X^{3/4}}} = \frac{308}{0,317 \cdot 900^{3/4}} = 5,53 \quad \Phi_{0,B}(5,53) = 1,$$

$$\text{при } a = \frac{H}{\sqrt{2P \cdot X^{3/4}}} = \frac{2,42}{0,317 \cdot 900^{3/4}} = 0,044 \quad \Phi_{0,н}(0,044)=0,036.$$

Решаем уравнение (10.3), но вместо фоновой концентрации, использованной при расчете первого примера, подставляем для точки водозабора $S_p=0,0008$ г/л, а для оси струи $S_p = 0,0157$ г/л. Тогда соответствующие концентрации примесей в створе планируемого водозабора при наличии двух стоков равны $S = 0,000973$ г/л, $S_{max} = 0,0314$ г/л.