

На правах рукописи

ГОРБУНОВ

Николай Евгеньевич

**ПРОГНОЗ И НОРМИРОВАНИЕ ТЕХНОГЕННОГО
ЗАГРЯЗНЕНИЯ ВОДОТОКОВ НА ОСНОВЕ
СХЕМОТЕХНИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ**

Специальность 25. 00. 36 – Геоэкология

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург
2004

Работа выполнена в Государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Санкт-петербургском государственном политехническом университете»

Научный руководитель к.т.н., профессор Шишкин Александр Ильич

Официальные оппоненты: доктор технических наук,
профессор Растоскуев Виктор Васильевич;
кандидат географических наук,
доцент Третьяков Виктор Юрьевич

Ведущая организация ООО «Ленводпроект»

Защита состоится __ июня 2004 года в __ часов на заседании
диссертационного совета Д212.229.17 при ГОУ ВПО
«Санкт-Петербургский государственный политехнический университет» по
адресу: 195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29, гидрокорпус-II,
ауд. 411.

С диссертацией можно ознакомиться в Фундаментальной библиотеке ГОУ
ВПО «СПбГПУ».

Автореферат разослан ____ мая 2004 года

Учёный секретарь
диссертационного совета

Орлов В.Т.

Актуальность проблемы Современная методология оценки предельно-допустимых вредных воздействий (ПДВВ) на водный бассейн предопределяет необходимость учёта взаимовлияния водовыпусков различных водопользователей в пределах всего водного бассейна или большей его части. Для решения задач такого рода необходимо развитие методов и средств имитационного моделирования всего водного бассейна или большей его части с учётом места расположения и специфики работы каждого водовыпуска, их взаимовлияния, а также особенностей водного объекта. Реализация принципа бассейнового нормирования техногенного загрязнения водных объектов с учётом требований новой методологии оценки ПДВВ связана с необходимостью разработки технических и программных средств нового поколения. Эти средства должны позволить реализовать математические модели переноса и превращения загрязняющих веществ с учётом переменных гидролого-морфологических и гидродинамических характеристик на всех расчётных участках водного бассейна, а также учесть естественные притоки, сосредоточенные и диффузные источники загрязнения.

При реализации новой концепции экологического нормирования особенно актуально развитие методики моделирования обеспечивающей как учёт взаимовлияния всех водопользователей, так и возможность перераспределения нагрузки между ними. Появляются возможности реализации таких параметров и условий, которые ранее учесть было достаточно сложно. Современный уровень развития вычислительной техники и программного обеспечения позволяет перейти на новый тип моделирования и сделать процедуру создания структурных схем замещения более простой, а имитационное моделирование более удобным для пользователей.

Практическое осуществление новой методики бассейнового нормирования в связи с её комплексностью должно базироваться на использовании современных пакетов прикладных программ, адаптированных для моделей соответствующих исследуемому объекту.

Цель работы Разработать методику нормирования техногенного загрязнения и прогнозирования качества воды водных объектов с применением средств схмотехнического моделирования.

Основные задачи исследований

- Разработка методики и алгоритма имитационного моделирования речного бассейна.
- Разработка специализированных схмотехнических средств для реализации типовых моделей КДП и ПВ, начальных и граничных условий.
- Разработка методики оценки предельно-допустимых вредных воздействий (ПДВВ) на водные объекты и алгоритма перераспределения нагрузки в речном бассейне на основе методов и средств схмотехнического моделирования.

Методика исследования Использовались теория подобия и моделирования, имитационного моделирования с использованием пакетов прикладных программ (ППП) нового поколения. Имитационное моделирование распределения техногенной нагрузки в речном бассейне проводилось с использованием схмотехнических средств, разработанных автором. При моделировании речного бассейна использовалась информация Госкомгидромета о качестве речных вод и данные о гидрологических наблюдениях, а также данные о составе сточных вод основных источников загрязнения по форме 2ТП-водхоз. Достоверность полученных результатов подтверждена сравнением с аналитическим решением, а также натурными данными других исследователей.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Методика и алгоритм имитационного схмотехнического моделирования типовых уравнений КДП и ПВ.
2. Методика бассейнового нормирования техногенной нагрузки на основе оценки ПДВВ на водный объект с применением схмотехнического моделирования.

Научная новизна На основании выполненных теоретических и практических исследований впервые разработана методика прогноза и нормирования техногенного загрязнения водотоков на основе схмотехнического моделирования. Также автором впервые предложены практические средства для реализации методологии оценки ПДВВ на водный объект с учётом современных требований.

Основной вклад – методическое и программное обеспечение бассейнового принципа распределения нагрузки и практическая реализация предложенной методики. Переход от нормирования локальной системы «предприятие – водный объект» на основе моделирования отдельных участков водотоков к нормированию сброса сточных вод от группы рассредоточенных источников загрязнения на основе моделирования бассейна реки в целом.

Предложенный подход позволил существенно улучшить методику перераспределения нагрузки между группой водопользователей с целью обеспечения заданного качества воды.

В работе развито новое направление схмотехнического имитационного моделирования применительно к задачам бассейнового нормирования техногенной нагрузки. Разработаны структура и схмотехнические средства реализации для прогноза и нормирования допустимой нагрузки в речном бассейне при различных схемах аппроксимации. Разработана и апробирована методика схмотехнического моделирования группы водовыпусков с целью обеспечения заданных экологических нормативов для отдельных участков речного бассейна.

Получены решения одно- и двухмерных задач конвективно-диффузионного переноса и превращения веществ (КДП и ПВ) с граничными условиями I-II рода и произвольными режимами водовыпусков. Для решения задач КДП и ПВ схмотехнические средства (решение аналого-численными методами с использованием современных пакетов прикладных программ (ППП)) не применялись ранее.

Практическая ценность

Разработанная методика нормирования техногенного загрязнения рекомендуется для инженерных расчётов на стадии предпроектных и проектных обоснований в рамках общей методологии оценки ПДВВ на водные объекты.

Повышена эффективность решения задач прогноза качества воды при различных видах и режимах техногенной нагрузки за счёт использования комплекса схмотехнических средств имитационного моделирования.

Разработанные методы и программные комплексы положены в основу методики бассейнового нормирования техногенной нагрузки и рекомендованы Невско-Ладужским бассейновым водным управлением и центром РАН (ИНЕНКО) к применению в инженерной практике.

Даны рекомендации по структуре, функциям, информационному и программному обеспечению имитационного схмотехнического моделирования водохозяйственных задач для штатных и аварийных ситуаций.

Апробация работы Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих Всероссийских и международных симпозиумах, конференциях и семинарах:

- X научно-практической конференции (НПК) «Проблемы сбросов и выбросов загрязняющих веществ, размещение отходов». (2001 г.).
- XII межотраслевой научно-практической международной конференции «Проблемы сбросов и выбросов загрязняющих веществ, размещение отходов» (2002 г.).
- Политехническом симпозиуме «Молодые учёные – промышленности северо-западного региона» на секциях: «Компьютерные технологии, коммуникации, численные методы и математическое моделирование» и «Охрана окружающей среды» (2001 г.).

- Межвузовской конференции «XXVIII неделя науки СПбГТУ» (1999 г.).
- Межвузовской конференции «XXIX неделя науки СПбГТУ». (2000 г.).
- The 3rd International Youth Environmental Forum of Baltic Countries «Ecobaltica'2000» (2000 г.).
- The 4rd International Youth Environmental Forum of Baltic Countries «Ecobaltica'2002» (2002 г.).
- НПК, посвящённой 10-летию НИИ радиоэлектронных систем прогнозирования чрезвычайных ситуаций «Прогноз» Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» «Проблемы прогнозирования и предотвращения чрезвычайных ситуаций и их последствий». (2002 г.)
- Политехническом симпозиуме «Молодые учёные – промышленности северо-западного региона» на секциях: «Экология и энергоресурсосбережение» и «Численные методы и математическое моделирование» (2003 г.)

Объём диссертации Диссертация представлена на страницах машинописного текста. Содержит таблиц, рисунка, библиографию из наименований.

Структура работы Диссертация состоит из введения, четырёх глав, выводов, библиографии, приложений и актов внедрения.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность темы диссертации, сформулирована цель работы и основные положения, выносимые на защиту, определены основные задачи исследования. Общая структура работы представлена на рис. 1.

В первой главе выполнен обзор состояния изученности проблемы имитационного моделирования речного бассейна с целью прогноза и нормирования предельно-допустимого вредного воздействия (ПДВВ) на водный объект при различных видах техногенной нагрузки на основе бассейнового подхода.

На основании системного подхода определены основные факторы, определяющие условия формирования качества воды. Рассмотрены основные типы моделей и средств имитационного моделирования, применяемые при нормировании допустимой нагрузки на речной бассейн. Проведён анализ возможности применения в инженерных расчётах массопереноса типовых детерминированных и вероятностных моделей.

Выполнен аналитический обзор методов и средств прогноза качества воды в водных объектах, разработанных А.В. Караушевым, Н.Н. Лапшевым, А.Д. Гиргидовым, Н.И. Хрисановым, И.Д. Родзиллером, Н.И. Дружининым, А.И. Шишкиным, Г.К. Осиповым, Х.А. Вельнером, Л.Л. Паалем, В.В. Растоскуевым, О.Г. Воробьёвым, Б.Г. Скакальским, В.В. Дмитриевым, И.И. Мечитовым, В.Л. Трушевским, Фелпсом, Стритером, Имгофом, Бруксом, Томасом и Устермейером, Кренклем, Фишером и др.

На основании проведённого анализа определены основные типы моделей, которые возможно использовать для практической реализации бассейнового принципа нормирования.

Выявлены основные требования при разработке нормативов предельно допустимого вредного воздействия на водный объект, которые заключаются в:

- определении величины предельно допустимой антропогенной нагрузки для различных видов воздействия на водные объекты в целях защиты их экосистем от деградации, а водный объект - от загрязнения и истощения;
- учете естественного режима водного объекта (гидрологического, гидрохимического и др.) и региональных особенностей формирования водных экосистем в условиях антропогенного воздействия;
- применении бассейнового принципа;

- ранжировании видов деятельности и их показателей по степени экологической опасности и значимости при установлении ПДВВ;
- соблюдении экономических интересов субъектов хозяйствования в условиях допустимой антропогенной нагрузки на водные объекты (квотирование нормативов ПДВВ).



Рис. 1. Общая структура выполненной диссертационной работы

Бассейновый принцип при разработке нормативов ПДВВ следует рассматривать в двух аспектах – экологическом (экосистемном) и социально-экономическом.

Интерес отдельных водопользователей предлагается учитывать с помощью квот использования аккумулирующей ёмкости водного объекта при общих интегральных ограничениях на расчетных участках.

В социально-экономическом аспекте бассейновый принцип подразумевает равенство исходных условий для водопользователей при сбросе на различных участках водного объекта, загрязненного в разной степени, и равном соблюдении экономических

интересов субъектов хозяйствования. Для различных видов воздействия это может выражаться в разной форме.

На основании проведённого анализа была выявлена необходимость в разработке методики моделирования воздействия техногенных источников загрязнения с учётом их взаимовлияния на водный объект при различных естественных факторах. Особое внимание необходимо уделить выбору и адаптации математических моделей в соответствии с поставленной задачей и разработке программно-технических средств для практической реализации.

Во второй главе проведён анализ численных методов решения задач конвективно-диффузионного переноса и превращения веществ (КДП и ПВ), описываемых уравнениями в обыкновенных и частных производных.

Выполнено сравнение методов численного интегрирования типовых уравнений КДП и ПВ с точки зрения эффективности их аппаратной реализации. Обоснована необходимость в совершенствовании аппаратных и программных методов и средств решения типовых уравнений КДП и ПВ.

Независимо от программного или аппаратного способа интегрирования дифференциальных уравнений, описывающих непрерывные системы возникает необходимость в автоматизации процесса их предварительной подготовки к виду, удобному для выполнения интегрирования на конкретных средствах. Цифровое моделирование непрерывных систем на ЭВМ предусматривает замену процессора – интегратора специальной программой, реализующей определённый численный метод интегрирования.

На определённом этапе специализированные вычислительные комплексы с автоматической коммутацией решающих блоков и автоматическим вводом параметров позволили повысить эффективность моделирования отдельных типов уравнений КДП и ПВ. С методической стороны они позволили достаточно легко перейти на использование схмотехнических средств.

На основе выполненных автором исследований в работе дан анализ применения программного и аппаратного обеспечения различных моделирующих комплексов и структуры пакетов моделирования непрерывных систем.

По результатам рассмотрения и анализа многочисленных работ по применению вычислительной техники для решения ряда прикладных задач физико-химической гидродинамики и массопереноса сделан вывод, что в настоящее время наиболее широко используются метод конечных разностей и метод прямых, реализуемые на аналоговых, цифровых и гибридных вычислительных машинах. На этой основе обосновано применение схмотехнического моделирования типовых уравнений КДП и ПВ, которое в определённой степени является развитием гибридного моделирования, но существенно отличается от него по аппаратной реализации на ПК. Процедура моделирования и построение расчётной схмотехнической модели значительно более проста, но сохраняет преимущества гибридного моделирования.

Общая структура схмотехнического имитационного моделирования речного бассейна представлена на рис. 2. Заштрихованные блоки разработаны автором диссертационной работы. Модели на основе уравнений КДП и ПВ, по которым строятся схмотехнические модели, относятся к детерминированным. Схмотехническое моделирование основано на комбинации аналоговых и численных методов. Сама модель представляет собой виртуальную копию аналоговой электрической схемы замещения, но процессы, протекающие в такой схеме, моделируются мощным численным аппаратом соответствующих пакетов прикладных программ. В соответствии со схемой рис. 2 основным инструментарием схмотехнического моделирования динамических задач являются достаточно универсальные пакеты прикладных программ (ППП) *MATLAB 5.*-6.** и *DesignLab 8.0*. В среде этих ППП по расчётной схеме, в соответствии с

разработанной методикой нормирования техногенного загрязнения создаётся схемотехническая модель, проводится моделирование и даётся графическая интерпретация полученных результатов.



Рис. 2. Общая структура схемотехнического имитационного моделирования задач КДП и ПВ

В третьей главе описаны основные принципы и методика нормирования техногенного загрязнения на основе схемотехнического моделирования.

Освещены вопросы схемотехнического моделирования прямых задач КДП и ПВ и обратных задач нормирования ПДВВ на водный объект.

Обоснованы отдельные типы одномерных нестационарных и двухмерных стационарных моделей КДП и ПВ, имеющих наиболее широкое применение в инженерной практике в виде:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\omega \cdot C) + \frac{\partial}{\partial x}(Q \cdot C) = \frac{\partial}{\partial x}\left(\omega \cdot D_x \cdot \frac{\partial C}{\partial x}\right) - k_1 \cdot \omega \cdot C, \quad (1)$$

с заданными начальными при $t = 0 - C(x, 0)$ и граничными: при $x = 0 - C(0, t)$, при $x = L - \partial C / \partial x = 0$ условиями,

$$v_x \cdot \frac{\partial C}{\partial x} = D_y \cdot \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} - k_1 \cdot C + F, \quad (2)$$

с граничными условиями: при $x = 0 - C(0, y)$ и при $y = 0 - \frac{\partial C}{\partial y} = \begin{cases} A|x| \leq a \\ 0|x| > a \end{cases}$ и при $y = B$

$-\partial C / \partial y = 0$,

где Q – расход воды, м³/с; k_l – коэффициент биохимического окисления, 1/сут; ω – площадь поперечного сечения русла, м²; v_x – средняя скорость течения, м/с; D_x, D_y – коэффициенты продольной и поперечной диффузии соответственно, м²/с; C – концентрация вещества, мг/л; t – время, с; F – интенсивность поступления примеси со дна или поверхности водоёма, мг/(л·с); x – продольная координата, м; y – поперечная координата, м; B – средняя ширина потока на расчётном участке, м; L – длина расчётного участка, м.

Кроме приведённых типов задач реализованы варианты уравнения (1) с постоянными параметрами и уравнения (2) с переменными параметрами.

Модели КДП и ПВ на основе уравнения (1) применяются для водотоков, в которых имеет место достаточно полное перемешивание и необходимо учесть нестационарные режимы водовыпусков и самого водотока. Для стационарных задач КДП и ПВ наиболее широкое применение в инженерной практике нашли уравнения (2)

Методика позволяет задавать граничные условия и более сложного вида, а также учитывать произвольное число и типы водовыпусков.

Коэффициенты турбулентной диффузии рассчитываются по одной из полуэмпирических зависимостей, выбираемых исходя из типа водного объекта, или принимаются по данным натурных исследований. Коэффициент биохимического окисления принимается в зависимости от типа загрязняющего вещества, температурного и кислородного режима водотока.

Разработана методика и примеры реализации типовых моделей КДП и ПВ и кинетических линейных и нелинейных уравнений БПК-О₂ с помощью аналого-цифровых средств нового поколения

Подробно описан механизм нормирования техногенного загрязнения и прогноза качества воды на основе схмотехнического моделирования. Автором сформулированы принципы схмотехнического моделирования, которое основано на сходстве, подобии математических описаний процессов в электрической цепи и водном объекте. Уравнения, описывающие процессы идентичны, различен лишь физический смысл входящих в них символов. Используемый в пакете прикладных программ математический изоморфизм различных физических систем позволил с помощью электрических систем моделировать процессы переноса и превращения загрязняющих веществ в водотоках. Для реализации этих моделей адаптирован современный пакет прикладных программ *Design Lab 8.0* и математический пакет *MatLab*. Используемые при переходе от модели к оригиналу аналогии приведены в табл. 1.

Таблица 1.

Электрическая цепь (модель)	Водный объект (оригинал)
U – электрический потенциал	C – концентрация вещества
$\vec{j} = -\sigma \cdot \text{grad}U$ - закон Ома	$\vec{j}_D = -D \cdot \text{grad}C$ - закон Фика
\vec{j} - плотность тока	\vec{j}_D - плотность потока вещества
σ - удельная электропроводность	D – коэффициенты диффузии
I – сила тока ($I = \int_s id\omega$)	G – количество переносимого вещества в единицу времени ($G = \int_\omega jd\omega$)

В работе для различных типов моделей КДП и ПВ созданы виртуальные электрические схемы, для которых и адаптировано современное программное обеспечение персональных компьютеров (ПК).

Уравнения (1) – (2) или их разновидности приводятся к системе конечно-разностных уравнений, где число уравнений соответствует количеству расчётных элементов вдоль реки (при одномерной модели) или по ширине реки (при двухмерной модели).

Для простоты и наглядности выкладок, не изменяя общности методики, рассмотрим уравнение (1) с постоянными в пределах исследуемого участка $x \in [0, L]$ параметрами ω, D_x, Q .

В этом случае уравнение примет вид:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + v_x \cdot \frac{\partial C}{\partial x} = D_x \cdot \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - k_1 \cdot C. \quad (3)$$

Заменив в уравнении (3) производные аппроксимируемыми выражениями, после приведения подобных членов получим систему обыкновенных дифференциальных уравнений с конечно-разностной аппроксимацией по координате x :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dC_1}{dt} = K_0 \cdot C_0 + K_1 \cdot C_1 + K_2 \cdot C_2 \\ \frac{dC_2}{dt} = K_1 \cdot C_1 + K_2 \cdot C_2 + K_3 \cdot C_3 \\ \dots \\ \dots \\ \frac{dC_i}{dt} = K_{i-1} \cdot C_{i-1} + K_i \cdot C_i + K_{i+1} \cdot C_{i+1} \\ \dots \\ \dots \\ \frac{dC_m}{dt} = K_{m-1} \cdot C_{m-1} + K_m \cdot C_m + K_{m+1} \cdot C_{m+1} \end{array} \right. , \quad (4)$$

$$\text{где } K_{i-1} = \frac{2 \cdot D_x + v_x \cdot h_x}{2 \cdot h_x^2}; \quad K_i = -\frac{2 \cdot D_x + k_1 \cdot h_x^2}{h_x^2}; \quad K_{i+1} = \frac{2 \cdot D_x - v_x \cdot h_x}{2 \cdot h_x^2};$$

h_x – расстояние между равноотстоящими точками по пространственной координате x ; $i = 1, 2, 3, \dots, m$ – узлы аппроксимации.

Пространственная координата x представлена набором дискретно расположенных точек, а концентрация C_i в любой точке координаты x является непрерывной функцией времени.

Для схемотехнического моделирования задачи составляется схема модели из m интеграторов (обозначены цифрой 1 на рис. 3), связующих элементов, блоков *Pulse Generator*, задающих начальные и граничные условия (обозначен цифрой 2 на рис. 3), а также блоков вывода получаемых в результате моделирования данных. Интеграторы являются ключевыми элементами схем, и их число соответствует количеству обыкновенных дифференциальных уравнений исследуемой системы. На выходе с каждого интегратора получается распределение концентраций для соответствующего створа или сечения реки (в зависимости от используемой модели).

Автором рассмотрены особенности задания различного типа начальных и граничных условий при схемотехническом моделировании.

В соответствии с методикой задания граничных и начальных условий концентрации задаются в расчётных элементах m_3 (элементы сетки, в которые имитируется сброс загрязняющего вещества), а на границе при $x = L$ реализуется условие: $\partial C / \partial x = 0$. Для каждого источника в фиксированном створе концентрации загрязняющего вещества в сточных водах – C_{cmi} в соответствии с конструкцией водовыпуска и схемой аппроксимации задаются как концентрации начального разбавления – $C_{H.P.i}$. Для их реализации используются импульсные источники – *Pulse Generator* и необходимые связующие блоки. В заданном створе, в схемотехническую цепь соответствующим источником *Pulse Generator* добавляется импульс напряжения, численно равный концентрации начального разбавления для данного водовыпуска (см. рис. 3).

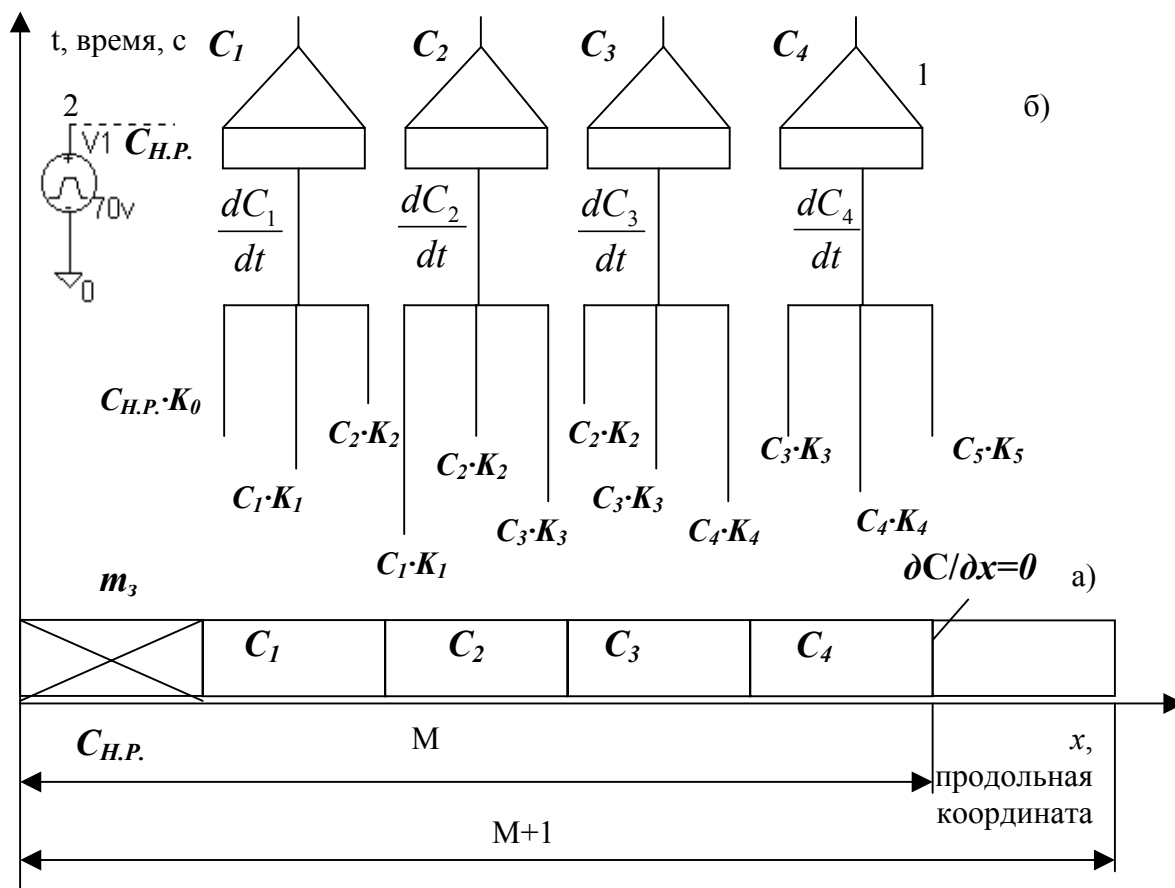


Рис. 3. Общая схема аппроксимации исследуемого одномерного пространства (а) и фрагмент схемотехнической модели (б)

Двухмерное уравнение КДП и ПВ (2) приводится к системе обыкновенных дифференциальных уравнений в виде:

$$\frac{dC_j}{dt} = A \cdot C_{j+1} - B \cdot C_j + A \cdot C_{j-1}, \quad (5)$$

где $A = \frac{D_y}{h_y^2}$ и $B = \frac{2 \cdot D_y}{h_y^2} + k_1$ — коэффициенты модели; где h_y — шаг сетки по ширине реки, м; $j = 1, \dots, n$.

Для реализации граничных условий, имитирующих непроницаемость через боковые поверхности, производится задание равных значений величин в двух граничных парах сечений. Для крайних сечений (рис. 3, 4) принимается, что $C_0 = C_1$; для n -го сечения - $C_n = C_{n+1}$ (аналогично $C_m = C_{m+1}$).

По результатам моделирования для каждой узловой точки расчётной схемы предусмотрена возможность построения графиков изменения расчётных концентраций во времени. В результате расчёта по одномерному нестационарному уравнению КДП и ПВ могут быть построены непрерывные графики изменения концентрации загрязняющего вещества во времени для каждого i -го расчётного створа заданной схемы аппроксимации. В результате расчёта по двухмерному стационарному уравнению КДП и ПВ могут быть построены эпюры изменения концентрации загрязняющего вещества по длине реки для каждого j -го расчётного элемента.

На рис. 5 представлена принципиальная схема алгоритма схемотехнического моделирования на основе разработанной методики нормирования качества воды речного бассейна. Пакет моделирования динамических систем *Simulink*, входящий в состав математического пакета *MATLAB* адаптирован для построения различных схем реализации типовых моделей КДП и ПВ. В соответствии с разработанным алгоритмом на

основе построенной математической модели и анализа исходного объекта должна быть произведена аппроксимация расчётной области. С учётом требований методологии оценки ПДВВ и бассейнового подхода к нормированию качества воды, по разработанной методике создаётся расчётная схема, по которой в *Simulink* строится схемотехническая модель. Построенная модель остаётся связанной с ядром ППП *MATLAB*, что расширяет возможности графической интерпретации и обработки полученных результатов моделирования и предоставляет широкие перспективы развития метода.

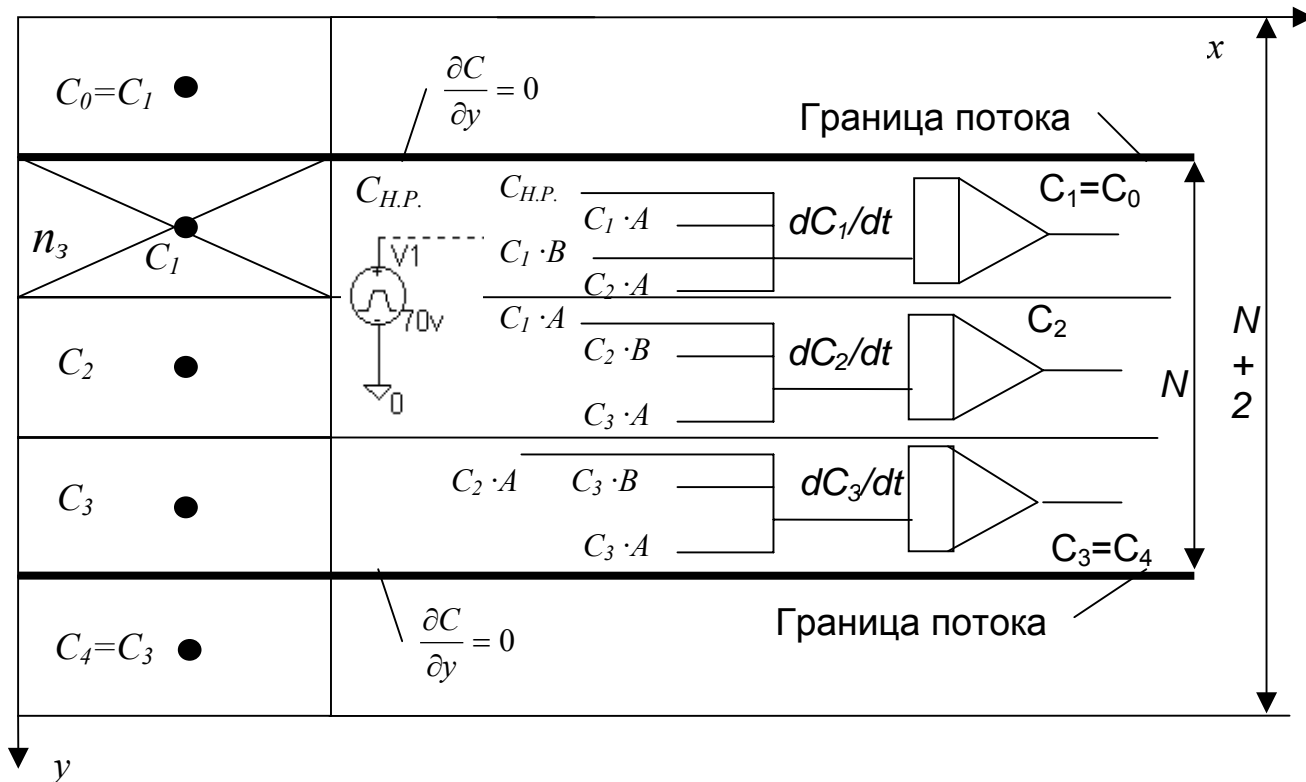


Рис. 4. Общая схема аппроксимации исследуемого двухмерного пространства и фрагмент схемотехнической модели

Алгоритм схемотехнического моделирования типовых задач КДП и ПВ представлен в следующем виде:

- 1) Построение математической модели КДП и ПВ с учётом особенностей водного объекта и выбор соответствующего пакета прикладных программ для схемотехнического моделирования.
- 2) Аппроксимация расчётной области в соответствии с гидроморфологической характеристикой водного объекта и расположением источников загрязнения.
- 3) Построение схемотехнической модели в соответствии с заданным уравнением и выбранной схемой аппроксимации по разработанной методике.
- 4) Реализация начальных и граничных условий в соответствии с математической постановкой задачи и условиями схемотехнического моделирования.
- 5) Проведение имитационного моделирования, получение различных вариантов решения и их графическая интерпретация в соответствующем ППП.

Представленный алгоритм схемотехнического моделирования речного бассейна может быть применён для широкого класса инженерных водохозяйственных задач, связанных с прогнозированием и нормированием техногенной нагрузки на основе моделей КДП и ПВ.

Решение «обратных задач» по обоснованию допустимых норм нагрузки для группы водопользователей и индивидуальных квот при обеспечении заданных критериев качества речной воды связано с необходимостью произвести:

- Анализ ситуации распределения зон по степени загрязнения в водном объекте, на основе проведённого моделирования. Выявление взаимовлияния основных источников загрязнения и сравнение с принятыми нормативами качества воды.
- Ранжирование источников загрязнения по массам сбрасываемых веществ и соответствию действующих технологий «наилучшим существующим технологиям».
- Задание расчётных значений допустимой сточной концентрации для каждого источника – $C_{cm}^{don}_{i,j}$ в соответствии с критериями по установлению квот, проведённым анализом и принятым решением.
- Проведение расчётов в соответствии с пп. 4) – 5) алгоритма решения прямой задачи прогноза. Методом последовательных приближений и анализа результатов имитационного моделирования определяются необходимые параметры, которые удовлетворяют заданным критериям.

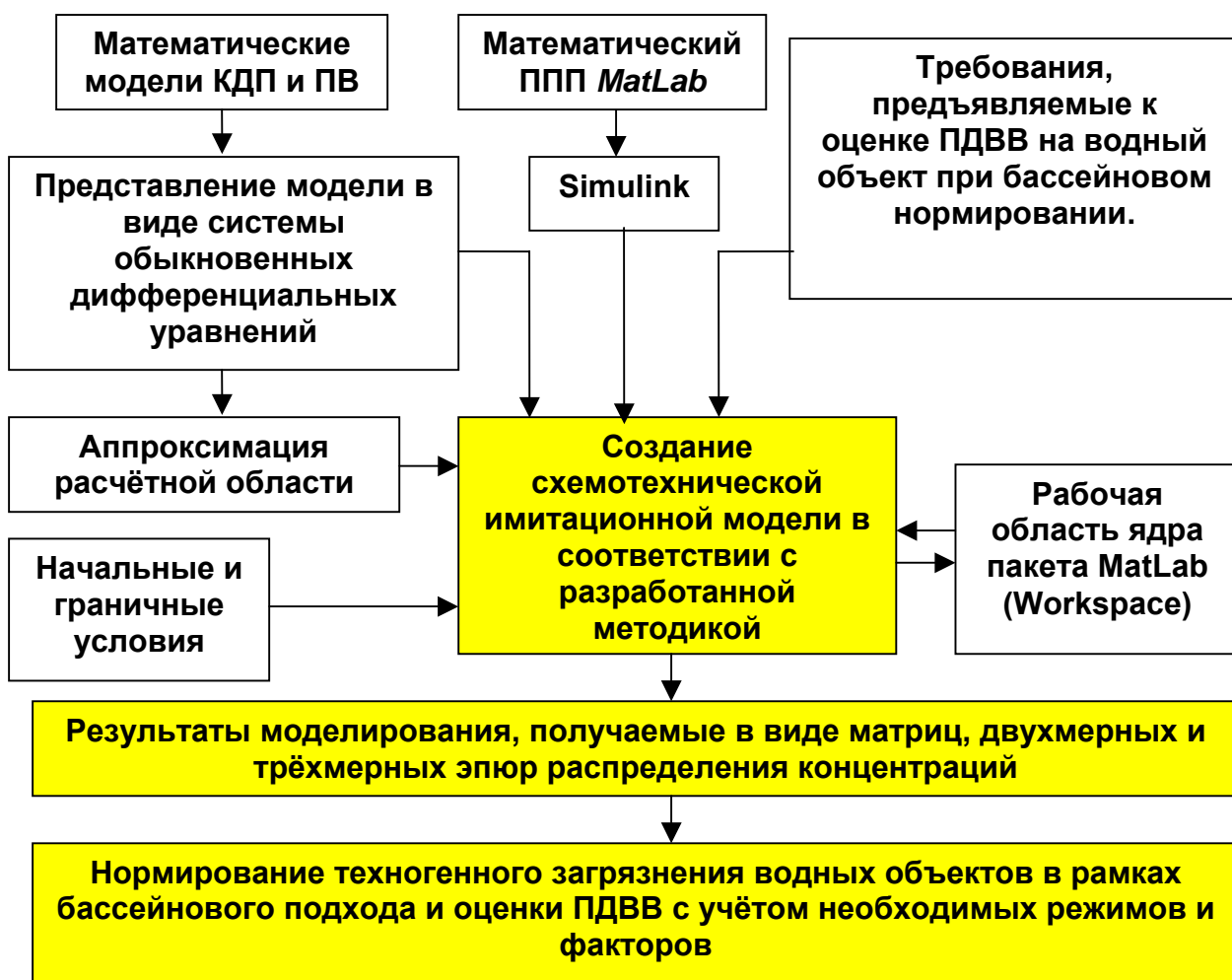


Рис. 5. Алгоритм схемотехнического моделирования на основе разработанной методики в *MATLAB*

Квоты использования аккумулирующей ёмкости водоёма для каждого водопользователя определяются с учётом всех остальных видов нагрузки речного бассейна по критериям соответствия «наилучшим существующим технологиям». Нормы уточняются для каждого водопользователя при комплексном эколого-экономическом обосновании водоохранных мероприятий. Предлагаемая методика с использованием имитационной модели позволяет с учётом требований к природно-технической системе бассейна в целом корректировать требования к каждому водопользователю. Наиболее перспективным становится комплексный подход по обеспечению заданных экологических критериев качества водоёма. Особенно важно подчеркнуть преимущество методики в том, что она позволяет практически совместить экологическое нормирование водного объекта

с экологическими стандартами технологий, используемых водопользователями на фиксированный период времени.

В четвёртой главе методика нормирования техногенного загрязнения водных объектов на основе схмотехнического моделирования рассмотрена на конкретных примерах и приведена сравнительная оценка схмотехнического моделирования с классическими видами моделирования.

При всём многообразии существующих программных продуктов, наибольшее распространение получили те, в которых используется метод конечных разностей на основе плоской и пространственной схем аппроксимации.

Произведено сравнение с существующими методами и средствами реализации, имеющими различные ограничения при решении задач нормирования и прогноза техногенного загрязнения. Наиболее приемлемыми можно считать те, которые позволяют учитывать взаимовлияние как самих водовыпусков, так и по группам лимитирующих показателей вредности.

При использовании явных конечно-разностных схем необходимо учитывать условие устойчивости, которое предопределяет выбор соотношения схемы аппроксимации по координатным направлениям. При этом алгоритм достижения этого условия в программах разный, а именно: в программе Waste после выбора метода расчёта коэффициента диффузии вручную вводится количество расчётных элементов (N_y) по ширине, а по длине количество расчётных элементов (M_x) рассчитывается автоматически и наоборот. Программа проверяет условие устойчивости, если оно не выполняется необходимо изменить количество расчётных элементов. Программа Waste и другие подобные программы, основаны на численных методах и имеют ограничения при построении расчётной сетки. Это становится особенно важным недостатком при необходимости введения в расчётную схему различного типа конструкций водовыпусков. Схмотехническая модель позволяет устранить этот недостаток.

Сравнение аналитического решения с результатами моделирования с применением программ DesignLab 8.0, Westa 4.5, Экопрогноз показало, что схмотехническая модель даёт минимальную погрешность 3%. Сравнение результатов схмотехнического моделирования по уравнению (3) с натурными данными, используемыми Л.Л. Паалем для проверки аналитической модели, показало, что расхождение не превысило 5% (рис. 6).

По сравнению с существующими методами предлагаемая методика позволяет задавать граничные условия и более сложного вида, а также учитывать произвольное число и типы водовыпусков. По итогам сравнения были выявлены параметры схмотехнической модели, при которых наблюдалось наибольшее совпадение с аналитическим решением; а также выявлены важные закономерности поведения схмотехнической модели.

Схмотехническая модель, в отличие от всех других, позволяет учитывать трансформацию загрязняющих веществ, как по мономолекулярной, так и по бимолекулярной схемам реализации, что позволяет более адекватно описывать реальные процессы.

Приведены примеры моделирования моно- и бимолекулярных процессов БПК- O_2 ; одномерной нестационарной задачи для неконсервативных примесей (рис. 7); двухмерной стационарной задачи для неконсервативных примесей; двухмерной стационарной задачи для неконсервативных примесей в случае нескольких техногенных источников сброса; двухмерной стационарной задачи для неконсервативных примесей для случая нескольких источников сброса с использованием пакета *DesignLab 8.0*; пример решения по двухмерной стационарной модели КДП и ПВ с несколькими водовыпусками с использованием пакета *MatLab 5.*-6.**.

Разработанная методика позволяет моделировать ситуации с аварийными и залповыми сбросами сточных вод, учитывая различный их характер и продолжительность.

В качестве примера на рис. 7 приведены результаты моделирования по одномерной нестационарной модели с прямоугольной эпюрой выпуска продолжительностью 1 час. Методика позволяет рассчитывать объекты, описываемые уравнениями с переменными параметрами (D_x , v , ω).

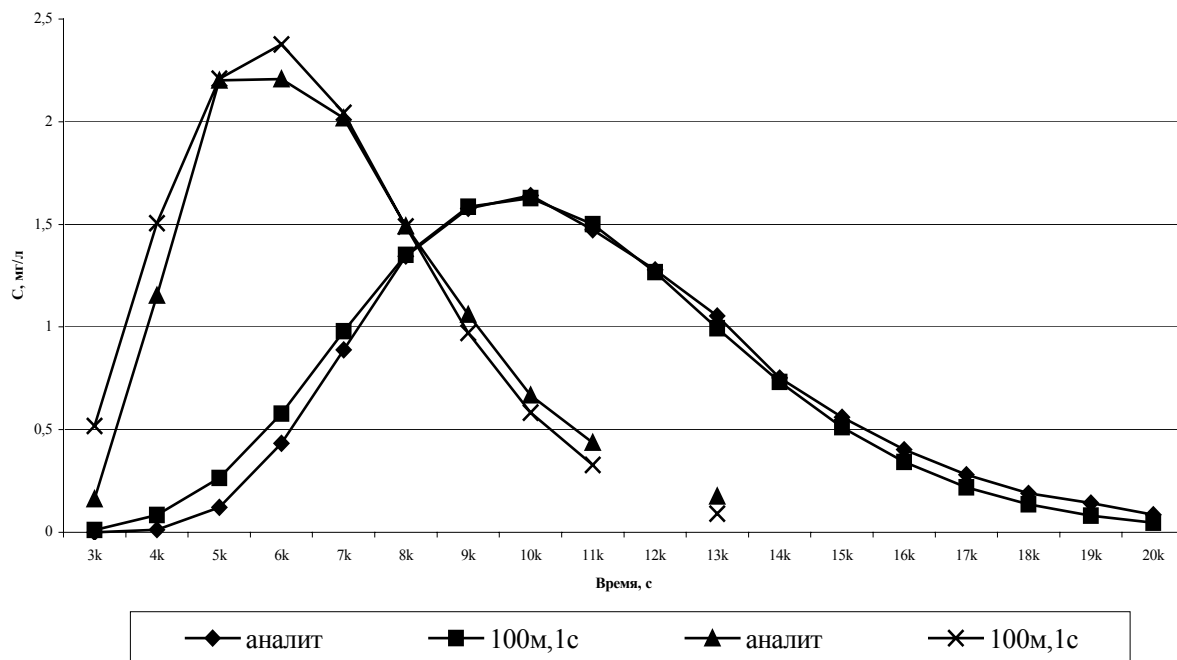


Рис. 6. Сравнение результатов схмотехнического моделирования по уравнению (1) с постоянными коэффициентами с аналитическим решением

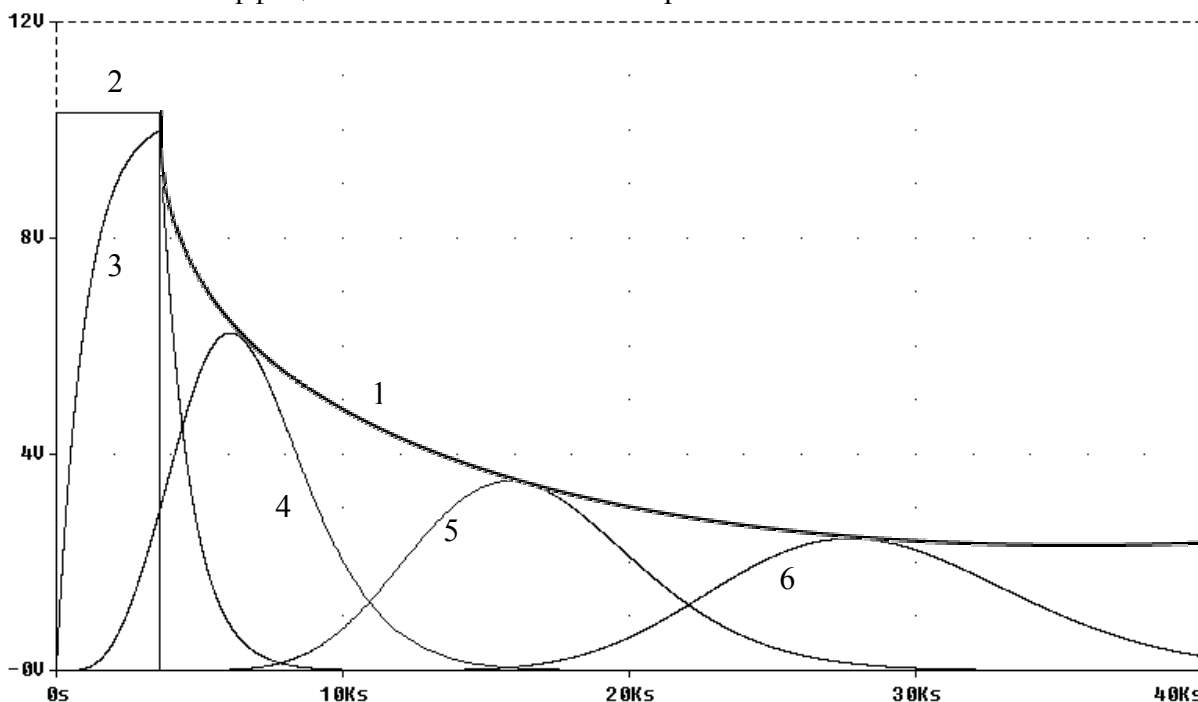


Рис. 7. Распределение максимальной концентрации загрязняющего вещества (обозначено цифрой 1) в водотоке по длине реки при условии прямоугольной эпюры сброса в течение 1 часа (обозначена цифрой 2) и зависимости изменения концентраций во времени (обозначены цифрами 3-6) для четырёх контрольных створов

Апробация методики проведена для различного типа водных объектов - для участка реки Вуокса (рис. 8) и для бассейна реки Луга (рис. 10). Расчёт проводился по двухмерной модели.

Объекты существенно отличались видом и характером техногенной нагрузки. В первом случае задача сводилась к моделированию процесса распределения загрязняющих веществ в большой реке от двух береговых и одного рассеивающего водовыпуска с целью регламентирования сброса от каждого из них по замыкающему контрольному створу.

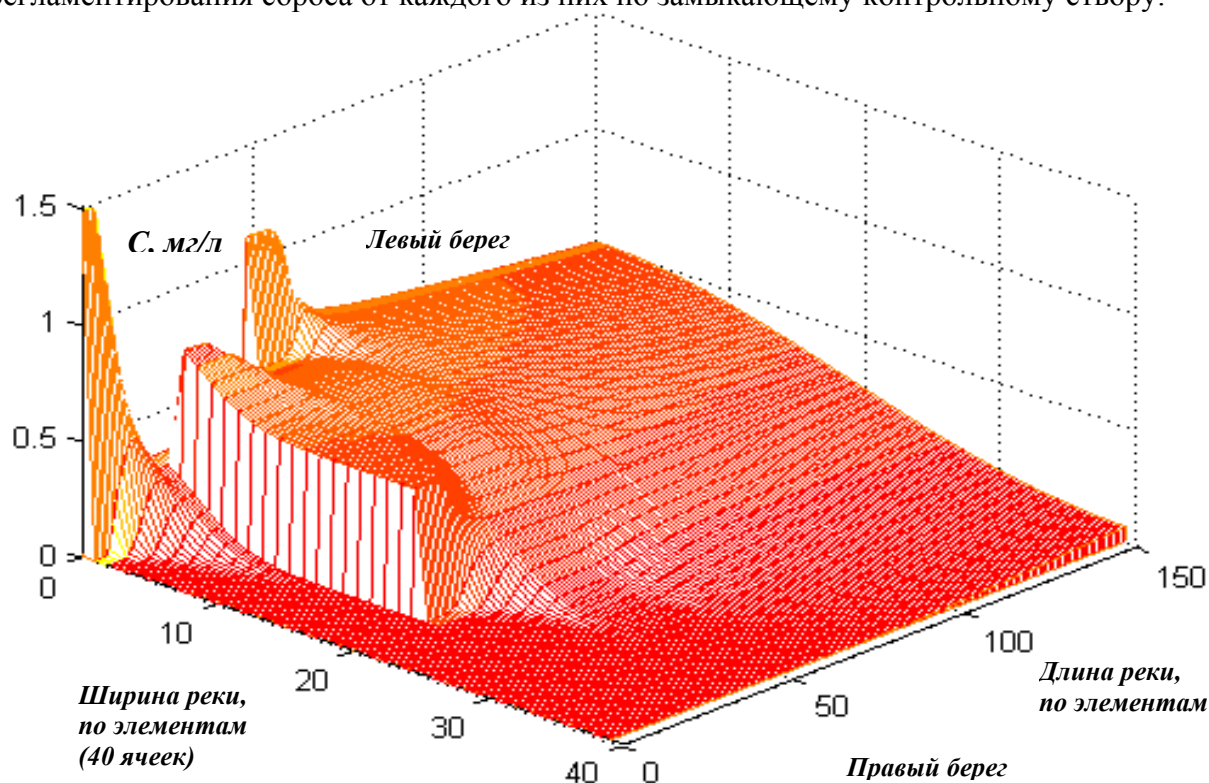


Рис. 8. Эпюра распределения концентраций загрязняющего вещества на участке реки Вуокса при сбросе от двух сосредоточенных и одного рассеивающего водовыпусков

Во втором примере в рамках совместной научно-исследовательской работы (НИР) с Невско-Ладожским бассейновым водным управлением (НЛБВУ) по разработке ПДВВ для бассейна реки Луга моделировался достаточно протяжённый участок реки в 225 км с береговыми сосредоточенными водовыпусками и притоками, - всего 26 источников.

Схема реки Луга, с нанесёнными параметрами и основными источниками загрязнения приведена на рис. 9. Расчёт проведён по модели как с переменными в пределах исследуемых участков реки параметрами, так и с постоянными (рис. 10).

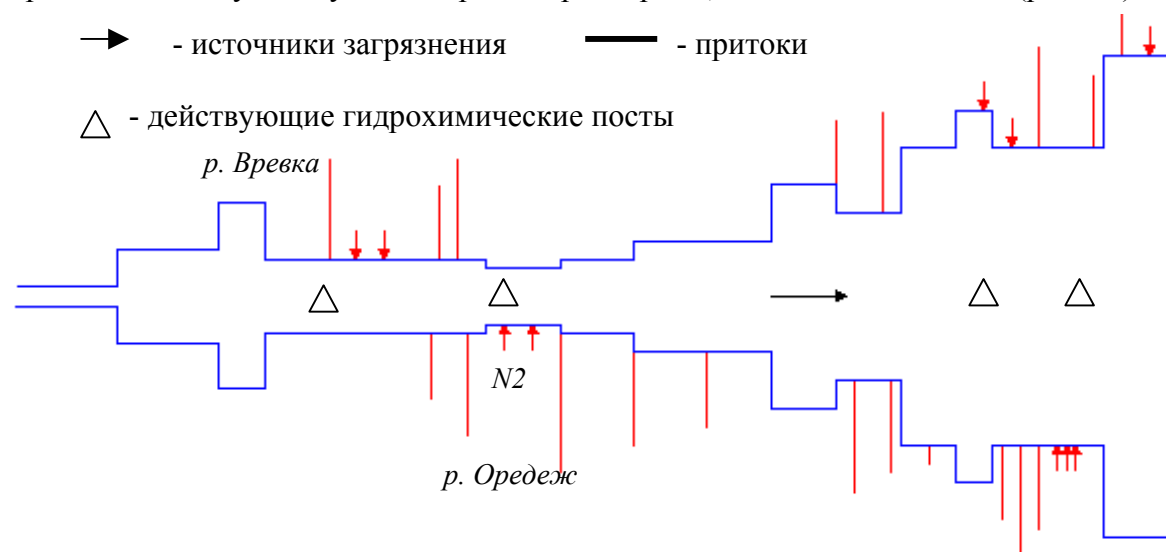


Рис.9. Расчётная схема р. Луга с нанесёнными основными источниками загрязнения

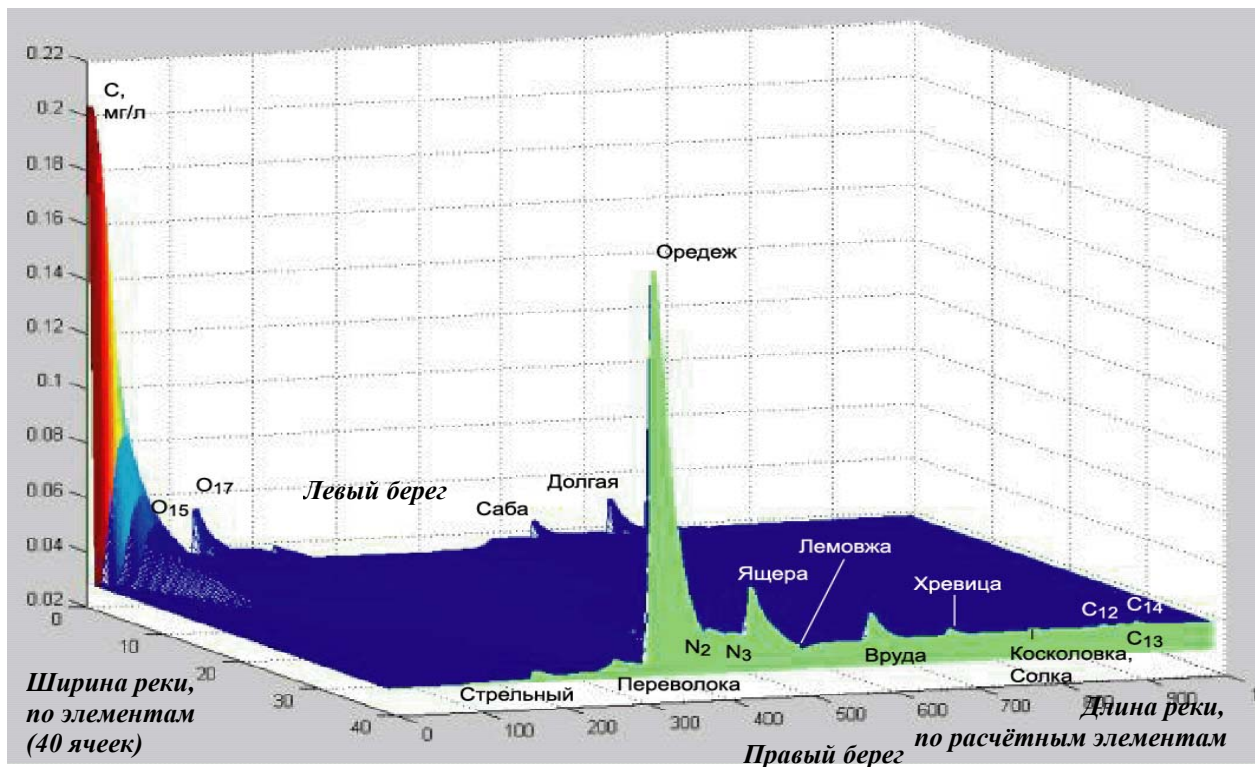


Рис. 10. Эпюра пространственного распределения загрязняющего вещества от группы водопользователей на реке Луга, при заданных показателях сброса

Верификация параметров расчётной модели выполнена по данным наблюдений на гидрохимических постах на участке от впадения реки Вревка до источника сброса N_2 (рис. 9). Сравнение результатов моделирования с натурными данными по максимальным концентрациям показало, что максимальное расхождение не превысило 27%. Произведено также сравнение расчёта всего водного бассейна по методике автора с расчётами водного бассейна реки Луги по отдельным участкам с помощью программы *Waste*. Преимущество данной методики в создании модели всего водного бассейна в целом, а также в возможности одновременного изменения параметров нескольких водовыпусков и реализации произвольных соотношений $C_{ст} - C_{ф}$, $C_{ф} - ПДК$ при учёте переменных гидроморфологических характеристик.

Большие возможности в графической интерпретации результатов схмотехнического моделирования позволяют с помощью графиков изменения максимальных концентраций, степени перемешивания, а также кратностей разбавления и, что особенно важно, эпюр, определять необходимые соотношения и относительные значения по массам сброса от каждого источника сброса по каждому показателю при одновременном учёте их взаимовлияния.

Методика прогноза и нормирования техногенного загрязнения водотоков на основе схмотехнического моделирования позволяет комплексно учесть ряд факторов, которые ранее не учитывались или учитывались в недостаточной степени. В первую очередь это относится к технологическим характеристикам производств, расположению и конструкции водовыпусков, учёту их взаимовлияния. Наглядное представление результатов моделирования в виде распределения концентраций загрязняющих веществ в водном бассейне позволяет исследователю или проектировщику обеспечить заданные нормы качества воды за счёт более целенаправленного ограничения отдельных источников загрязнения и перераспределения нагрузки от всех остальных водопользователей.

Показано, что схмотехнические средства позволяют учитывать с заданной точностью конструктивные особенности водовыпусков, возможность изменения их

пространственного расположения и, что особенно важно, не имеют практических ограничений по учёту их количества. Возможность учёта переменных гидроморфологических характеристик реки с произвольным числом притоков позволяет значительно повысить обоснованность принимаемых решений как на стадии ОВОС (оценки воздействия на окружающую среду), так и при проектировании. Весьма существенным с практической точки зрения является возможность моделировать ситуации с произвольными соотношениями $C_{ст}$ и $C_{ф}$, $C_{ф}$ и ПДК, а так же производить подбор относительных долей отдельных показателей внутри групп лимитирующих показателей вредности ($\sum C_i/ПДК_i \leq 1$).

Основные итоги диссертационной работы:

1. Впервые создана методика нормирования техногенного загрязнения речного бассейна на основе учёта экологических требований и технологических возможностей производств с применением методов и средств схмотехнического моделирования.

2. Разработана методика и алгоритм имитационного схмотехнического моделирования типовых уравнений КДП и ПВ с целью прогноза качества воды водных объектов.

3. Разработаны основные принципы и алгоритмы схмотехнического имитационного моделирования с целью оценки предельно-допустимого вредного воздействия на водный объект (ПДВВ) при различных видах техногенного загрязнения для обеспечения заданных экологических норм.

4. Разработаны методика и алгоритм схмотехнического моделирования типовых задач КДП и ПВ в среде пакета по схмотехнике DesignLab 8.0 (OrCAD 9.0, OrCAD 9.1) и в среде математического пакета MATLAB 5.*-6.*, которые применены при нормировании техногенной нагрузки. Средства схмотехнического моделирования существенно расширили возможности постановки и проведения имитационного моделирования в рамках природно-технических систем.

5. Решены практические задачи нормирования нагрузки на основе оценки ПДВВ на бассейны рек Вуокса и Луга с применением разработанных методов и схмотехнических средств.

6. Разработанная методика схмотехнического моделирования включена в лабораторные практикумы, используется при курсовом и дипломном проектировании студентов СПбГТУРП и СПбГПУ.

Публикации работы. По материалам диссертации опубликовано 16 статей:

1. Горбунов Н.Е., Шишкин А.И. Имитационное моделирование задач прогноза качества воды аналого-цифровыми средствами // Научно-технические ведомости СПбГТУ. – СПб: Изд-во СПбГТУ, 2000. - №4. - С. 122-130.

2. Горбунов Н.Е., Шишкин А.И. Разработка современного программного обеспечения для прогноза качества воды в водоёмах // Научно-технические ведомости СПбГТУ. – СПб: Изд-во СПбГТУ, 2001. - №3. - С. 137-142.

3. Горбунов Н.Е., Шишкин А.И. Применение пакета MatLab для имитационного моделирования режимов сброса сточных вод // Проблемы сбросов и выбросов загрязняющих веществ, размещение отходов: Материалы X научно-практической конференции 24-25 апреля. – СПб, 2001. - С. 58-63.

4. Горбунов Н.Е., Шишкин А.И. Применение пакета MatLab для имитационного моделирования распределения концентраций в реке Луга // Проблемы сбросов и выбросов загрязняющих веществ, размещение отходов: Материалы XII межотраслевой научно-практической международной конференции 23-24 апреля 2002 г. – СПб, 2002. - С. 66-71.

5. Горбунов Н.Е., Шишкин А.И. Реализация численных и аналоговых методов в пакетах прикладных программ DesignLab 8.0 и MatLab 5.2.1-6.1 при моделировании

трансформации загрязнений в водных объектах // Компьютерные технологии, коммуникации, численные методы и математическое моделирование: Материалы конференции 30 ноября 2001 г. – СПб, 2001. - С. 20.

6. Горбунов Н.Е., Шишкин А.И. Методика моделирования задач прогноза качества воды с использованием современного программного обеспечения // Охрана окружающей среды: Материалы конференции 7 декабря 2001 г. – СПб, 2001. - С. 37.

7. Горбунов Н.Е. Имитационное моделирование задач прогноза качества воды аналого-цифровыми методами // Инженерная защита окружающей среды. Краткое содержание дипломных проектов и работ. Выпуск 2001 года. – СПб: Изд-во СПбГТУ, 2001. - С. 10-15.

8. Горбунов Н.Е., Шишкин А.И. Сравнительная оценка применимости молекулярной и бимолекулярной модели БПК-О₂ для прогноза кислородного режима в водоёмах // XXVIII неделя науки СПбГТУ: Материалы межвузовской конференции 6-11 декабря 1999 г. – СПб, 2000. - Ч. 1. – С. 17-18.

9. Горбунов Н.Е., Шишкин А.И. Моделирование двумерных уравнений КДП и ПВ с переменными коэффициентами с использованием пакета DesignLab 8.0 // XXIX неделя науки СПбГТУ: Материалы межвузовской конференции 27 ноября - 02 декабря 2000 г. – СПб: Изд-во СПбГТУ, 2001. - Ч. 1. - С. 27-28.

10. N.E. Gorbunov, A.I. Shishkin Imitating modeling tasks of the forecast of quality of water by analog-digital means // The 3rd International Youth Environmental Forum of Baltic Countries 26-30 June 2000 «Ecobaltica'2000»: Proceedings Book. – Saint-Petersburg, 2001. - С. 182-186.

11. N.E. Gorbunov, A.I. Shishkin Imitating modeling tasks of the forecast of quality of water by analog-digital means // The 3rd International Youth Environmental Forum of Baltic Countries 26-30 June 2000 «Ecobaltica'2000»: Abstracts Book. – Saint-Petersburg, 2001. - С. 59-60.

12. N.E. Gorbunov, A.I. Shishkin Application of a package Matlab for imitating modeling of distribution of concentration in the river of a Luga // The 4th International Youth Environmental Forum of Baltic Countries 21-23 October 2002 «Ecobaltica'2002»: Book of abstracts and papers. – Saint-Petersburg, 2002. - С. 131-134.

13. Шишкин А.И., Горбунов Н.Е. Схемотехническое моделирование аварийных сбросов в водный объект // Проблемы прогнозирования и предотвращения чрезвычайных ситуаций и их последствий: Тез. докл. научно-практической конференции 2002 г. – СПб, 2002. – С. 10-12.

14. Горбунов Н.Е., Шишкин А.И. Имитационное моделирование аварийных сбросов в водный объект // Экология и энергоресурсосбережение: Материалы конференции 18 апреля 2003 г. – СПб, 2003. - С. 21.

15. Горбунов Н.Е., Шишкин А.И. Моделирование нестационарного одномерного уравнения конвективно-диффузионного переноса и превращения веществ (КДП и ПВ) в пакете прикладных программ DesignLab 8.0 при прогнозе качества воды в водотоках // Численные методы и математическое моделирование: Материалы конференции октября-ноября 2003 г. – СПб, 2003. - С. 46.

16. Горбунов Н.Е., Шишкин А.И. Применение пакета MatLab для имитационного моделирования распределения концентраций в реке Луга // Exponenta Pro: Математика в приложениях. – 2003. – №3. – С. 52-57.