

На правах рукописи



Рахуба Александр Владимирович

**ПРОСТРАНСТВЕННО–ВРЕМЕННАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ КАЧЕСТВА ВОД
САРАТОВСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА В УСЛОВИЯХ
НЕУСТАНОВИВШЕГОСЯ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО РЕЖИМА
(натурные эксперименты и численное моделирование)**

Специальность 25.00.36 – Геоэкология

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук



Екатеринбург – 2007

Работа выполнена в Институте экологии Волжского бассейна РАН

Научный руководитель доктор технических наук
Селезнев Владимир Анатольевич

Официальные оппоненты доктор физико-математических наук, профессор
Веницианов Евгений Викторович

доктор географических наук, профессор
Лепихин Анатолий Павлович

Ведущая организация Московский государственный университет
им М В Ломоносова

Защита диссертации состоится «30» мая 2007 г в 13 часов на заседании диссертационного совета Д 216 013 01 в Федеральном государственном унитарном предприятии «Российский научно-исследовательский институт комплексного использования и охраны водных ресурсов» (ФГУП РосНИИВХ) по адресу 620049, г Екатеринбург, ул Мира, 23

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГУП РосНИИВХ

Автореферат разослан «24» апреля 2007 г

Отзыв на автореферат, заверенный гербовой печатью, просим направлять по адресу 620049, г Екатеринбург, ул Мира, 23

Факс (343) 374-26-79, 374-27-15

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор технических наук, профессор

Ю С Рыбаков

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Процессы урбанизации и рост масштабов хозяйственной деятельности в последнее время приводят к заметному ухудшению качества вод рек, озер и водохранилищ. В отличие от естественных природных водоемов, водохранилища являются сложными природно-техническими системами с неустановившимся гидродинамическим режимом, который определяет изменчивость пространственной структуры качества вод во времени. Интенсивные колебания скорости и разнонаправленность течений на водохранилищах, обусловленные режимом работы гидроэлектростанций, непосредственно влияют на процессы накопления и распространения в воде примесей, осложняя наблюдения и контроль экологического состояния природных вод. Особенно неблагоприятная обстановка складывается на акваториях водохранилищ в районах крупных промышленных городов, где формируются зоны загрязнения с повышенным содержанием в воде химических веществ.

При планировании ряда водохозяйственных мероприятий, особенно в питьевом водоснабжении, важное практическое значение имеет оценка и прогноз пространственно-временной изменчивости качества вод. Существующий в настоящее время традиционный способ проведения мониторинга на Саратовском водохранилище не позволяет достаточно эффективно отслеживать эти изменения в условиях постоянного регулирования стока. Поэтому, для успешного решения данной проблемы необходимо совместное применение, как целенаправленных наблюдений, так и методов численного моделирования.

Указанные обстоятельства обуславливают актуальность сформулированной темы исследования, направленной на решение конкретных задач водопользователей и, в целом, на повышение эффективности эксплуатации Саратовского водохранилища.

Цель и задачи исследования. Целью настоящей диссертационной работы является оценка особенностей гидродинамического режима Саратовского водохранилища и его влияния на процессы формирования качества вод в условиях суточного и недельного регулирования стока.

Для достижения цели были поставлены следующие задачи:

- 1 Провести натурные исследования, направленные на изучение особенностей гидродинамического режима и пространственно-временной изменчивости качества вод Саратовского водохранилища
- 2 Создать разномасштабные компьютерные модели Саратовского водохранилища для численного моделирования качества вод в условиях неустановившегося режима
- 3 Провести адаптацию построенных моделей к реальным условиям водохранилища по данным натурных измерений
- 4 Провести эксперименты по численному моделированию влияния гидродинамического режима на процессы формирования качества вод на всем протяжении Саратовского водохранилища

Методика исследований и материал наблюдений. Решение поставленных задач осуществлялось путем проведения экспедиционных наблюдений, организованных автором и выполненных при его непосредственном участии на Саратовском водохранилище в период 1993-2006 гг. Натурные исследования велись на судах “Наука” и “Биолог”, оборудованных современной автоматизированной информационно-измерительной системой гидрохимического зондирования “Хитон” и системой спутниковой навигации GPS. На основе собранных данных проводилось детальное моделирование изучаемых процессов. Численные эксперименты на моделях осуществлялись на персональном компьютере IBM с использованием программ “CARDINAL” и “ВОЛНА”, написанных на языке Pascal в системах Delphi и Kylix.

Научная новизна. Впервые на примере долинного водохранилища на основе совместно проведенных натурных наблюдений и численного моделирования выявлены следующие особенности гидродинамического режима и формирования качества вод:

- 1 Суточная изменчивость скорости и направления течения в зоне выклинивания подпора под влиянием режима сбросов ГЭС
- 2 Циклический водообмен на границе впадения боковых притоков в водохранилище
- 3 Суточная изменчивость гидрохимических показателей качества воды в русловой части водохранилища в результате взаимодействия аккумуляционных вод поймы с руслом

Основные положения и результаты, выносимые на защиту:

- 1 Определяющим фактором в формировании разномасштабных пространственных неоднородностей качества вод является суточный, недельный и сезонный режимы регулирования стока Саратовского водохранилища
- 2 Особенности формирования качества вод для долинного водохранилища обусловлены режимом взаимодействия водных масс боковой приточности и поймы с основной водной массой водохранилища
- 3 Разработана система иерархических моделей территориального и локального масштаба Саратовского водохранилища, позволяющая осуществить оценку и прогнозирование качества вод при типичных и чрезвычайных ситуациях

Практическая значимость. Результаты, представленные в настоящей диссертации, нашли практическое применение в области природоохранных мероприятий, связанных с совершенствованием мониторинга качества вод и улучшением экологической ситуации на Саратовском водохранилище. Проведенные исследования выполнялись в соответствии с планами научно-исследовательских работ ИЭВБ РАН в рамках программ, утвержденных отделением РАН (Влияние гидродинамических процессов на формирование качества вод водохранилищ, Совершенствование методологии экологического мониторинга на основе изучения структуры и динамики водных масс водохранилищ Средней и Нижней Волги), где нашли отражение результаты

исследований автора Данное направление работ поддержано в 2007 г в рамках гранта РФФИ № 07-05-96608 «Разработка теории и методов локального мониторинга водных объектов»

Разработанные гидроэкологические модели Саратовского водохранилища использовались при изучении экологического состояния водных объектов в бассейне Волги (Заказчик – ИВП РАН в рамках Федеральной Целевой Программы «Возрождение Волги»), при оценке влияния сточных вод г Тольятти на качество вод Саратовского водохранилища в районе питьевого водозабора НФС-2 г Самара (заказчики – Администрации г Самары и г Тольятти), при прогнозировании изменения качества воды Саратовского водохранилища в районе питьевого водозабора г Самара при возникновении возможных неблагоприятных условий или чрезвычайных ситуаций (заказчик – СамНЦ РАН в рамках Федеральной Целевой Программы «Интеграция науки высшего образования России на 2002-2006 гг») В настоящее время модели используются в ИЭВБ РАН для оценки и прогнозирования качества вод при возникновении аварийных и чрезвычайных ситуаций

Апробация работы и публикации. Основные положения диссертации представлены на III Международном конгрессе «Вода экология и технология» (Москва, 1998), Международной конференции «Экологические проблемы бассейнов крупных рек» (Тольятти, 1998, 2003), IV конференции "Динамика и термика рек, водохранилищ, внутренних и окраинных морей" (Москва, 1994) По теме диссертации опубликовано 6 работ

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложений Основной текст изложен на 129 страницах

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследований, научная новизна и практическая значимость работы

Глава 1. Формирование неоднородностей качества вод Саратовского водохранилища

В данной главе приводится характеристика и общие сведения об объекте исследования Рассмотрены гидрометеорологические и антропогенные факторы формирования качества вод Саратовского водохранилища Представлены результаты экспедиционных исследований пространственной неоднородности и временной изменчивости качества вод в районах сброса сточных вод, устьевых участков притоков и поймы, испытывающих высокую антропогенную нагрузку загрязняющими веществами

Саратовское водохранилище расположено на территории среднего и частично нижнего Поволжья Входным створом водохранилища служит створ Жигулевской ГЭС (г Тольятти), замыкающим – створ Балаковской ГЭС (г Балаково) Протяженность водохранилища 336 км по главному судовому ходу, площадь

акватории при НПУ 1831 км², объем 12,9 км³, ширина изменяется от 1 до 12 км, глубина на верхнем участке от г Самара до п Печерское составляет 3 м, ниже г Сызрани - 8,6 м, а наибольшая составляет 26 м Коэффициент условного водообмена Саратовского водохранилища равен 18 [Куйбышевское и Саратовское водохранилища, 1978]

Гидродинамический режим На формирование качества вод Саратовского водохранилища существенное влияние оказывает суточная и недельная изменчивость гидродинамических процессов, обусловленная неравномерным режимом работы Куйбышевского и Саратовского гидроузлов На всем протяжении водохранилища прослеживаются интенсивные разнопериодные колебания уровня воды Во время половодья эти колебания сглаживаются Типичным для режима уровня Саратовского водохранилища является более значительные суточные колебания в верхней части (1,5 – 2,0 м) и небольшие – в нижней его части (0,5 – 0,9 м) В результате, на водохранилище образуются длинные прямые и обратные волны, которые усложняют режим стокового течения Наличие волн подобного рода также отмечено на Рыбинском [Белых Ф И , 1959], Горьковском [Ярославцев Н А , 1967] водохранилищах, Днестровском каскаде ГЭС [Векслер А Б , 1985]

Результатом распространения прямых волн попуска является возникновение подпоров в боковых притоках и пойме, что вызывает изменения не только скорости, но и направления течения на водохранилище Измерения скорости течения показали, что на участке Зольное – Самара она может изменяться в интервале 0,3 – 1,3 м/с и на участке Сызрань – Балаково в интервале 0,03 – 0,8 м/с При прохождении гребня прямой волны часть воды аккумулируется в пойме и в притоках Накопленная вода возвращается в водохранилище, когда ГЭС работает на малых нагрузках – это, в основном, в ночные часы и в выходные дни

Показано, что такой циклический водообмен боковых притоков и поймы с русловой частью водохранилища формирует пространственную неоднородность качества основной водной массы на всей его акватории

Антропогенная нагрузка По данным Госкомстата в бассейн Волги ежегодно сбрасывается около 22 млн тонн загрязняющих веществ, что составляет 20-80% всего сброса по России Расчеты показали, что содержание в волжской воде химических элементов антропогенного происхождения по отдельным показателям может достигать 4-79 % (табл 1)

По бассейнам водохранилищ Волжско-Камского каскада антропогенная нагрузка распределена неравномерно На Саратовском водохранилище свой вклад в загрязнение Волги вносят городские сбросы таких городов как Жигулевск, Тольятти, Самара, Новокуйбышевск, Чапаевск, Сызрань, а так же воды притоков Сок, Самара, Чапаевка, Сызранка, Чагра и Малый Иргиз Так, например, качественный состав воды этих боковых притоков по многим гидрохимическим показателям в 1,5 – 20 раз превышает фоновую концентрацию в водохранилище Самый загрязненный приток – река Чапаевка, гидрохимические показатели которого в десятки раз выше, чем в водохранилище

Таблица 1 – Антропогенная нагрузка загрязняющими веществами в бассейне Волги

Название вещества	$N_{зв}$ мг/л	$C_{фон}$ мг/л	N_a %
БПК	0,59	2,05	28,8
Нефтепродукты	0,02	0,04	50
Взвешенные вещества	0,77	2,5	30,8
Сульфаты	4,48	68	6,6
Хлориды	6,80	31	21,9
Фосфор общий	0,071	-	-
Азот общий	0,05	-	-
Железо	0,087	0,11	79,1
Медь	0,002	0,013	15,4
Цинк	0,002	0,05	4
СПАВ	0,007	0,013	53,8

Примечание $N_{зв}$ – масса загрязняющего вещества, приходящаяся на годовой объем стока Волги, $C_{фон}$ – средняя фоновая концентрация вещества, $N_a = (N_{зв} / C_{фон}) 100\%$ – антропогенная составляющая загрязняющих веществ в стоке Волги

Пространственно-временная изменчивость качества вод Для изучения пространственной неоднородности и временной изменчивости качества вод Саратовского водохранилища автором были организованы и выполнены при его непосредственном участии серии экспедиционных исследований и проведены наблюдения на стационарных пунктах в п Зольное, п Печерск, ст Лесобиржа (устье р Сок), п Студеный овраг в периоды летне-осенней межени (1995-2006 гг)

До начала экспедиционных работ намечались створы наблюдений, по которым осуществлялось зондирование вод по ширине и глубине водоема с борта судна при помощи информационно-измерительной системы «Хитон», разработанной НПЦ «ПЛАС» [Рубцов и др, 1989] В качестве критериев неоднородности качества вод Саратовского водохранилища были выбраны температура (Т) и удельная электропроводность (УЭП) воды, погрешность измерения которых составляет по Т – 0,01 °С, а по УЭП – 0,001 мкСм/см Обнаруженные при зондировании неоднородности природного и антропогенного происхождения в дальнейшем идентифицировались на основе химического анализа воды На рис 1 показаны УЭП и Т воды в створах проведенного зондирования по всей длине Саратовского водохранилища в июле 1996 г

Проведенные исследования показали, что на всем протяжении Саратовского водохранилища можно выделить зоны пространственной неоднородности качества вод различного масштаба Крупномасштабные неоднородности (более 10 км²) образуются в результате попусков Жигулевской ГЭС Мезомасштабные

неоднородности (от 1 до 10 км²) образуются водными массами боковых притоков Сок, Самарка, Чапаевка. Мелкомасштабные неоднородности (менее 1 км²) образуются от малых притоков и точечных источников загрязнения. Границы таких зон непостоянны. Их динамика, прежде всего, обусловлена особенностями гидродинамического режима Саратовского водохранилища.

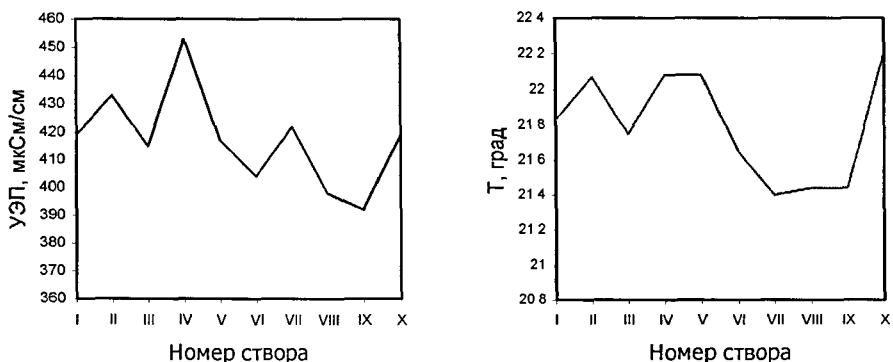


Рис.1. Средняя УЭП и Т воды в поверхностном горизонте в створах Саратовского водохранилища I – п Федоровка (нижний бьеф), II – п Зольное, III – район впадения р Сок, IV – район впадения р Самара, V – район впадения р Чапаевка, VI – п Печерск, VII – ниже г Сызрань, VIII – п Алексеевка, IX – г Хвалынский, X – район впадения р Малый Иргиз (верхний бьеф)

Наряду с многолетними и сезонными изменениями показателей качества вод особое внимание в диссертации уделено суточной и недельной изменчивости. Суточные наблюдения проводились в районе впадения притока Сок (ст Лесобиржа), в районе водозабора г Самара (п Студеный овраг) и в средней части водохранилища (п Печерское).

На рис 2 показано распределение УЭП в разные фазы колебания уровня в створе IIIА (ст Лесобиржа), расположенного ниже впадения реки Сок. Так, в дневные и вечерние часы, когда на водохранилище наблюдается максимальный уровень воды, разница УЭП в поперечном сечении потока незначительная и не превышает 40 мкСм/см (рис 2а). В ночные и утренние часы (рис 2 б и 2 в) при снижении уровня разница УЭП воды между придонными и поверхностными слоями достигает максимума и составляет 435 мкСм/см.

Исследования в этом районе показали, что во время снижения расхода воды на ГЭС водные массы р Сок (УЭП 1250 мкСм/см), попадая в водохранилище и частично смешиваясь с волжскими (УЭП 370 мкСм/см), опускаются на глубину и распространяются по дну самостоятельным потоком, достигая водозабора г Самара в часы прохождения максимального стока (рис 2 и рис 3).

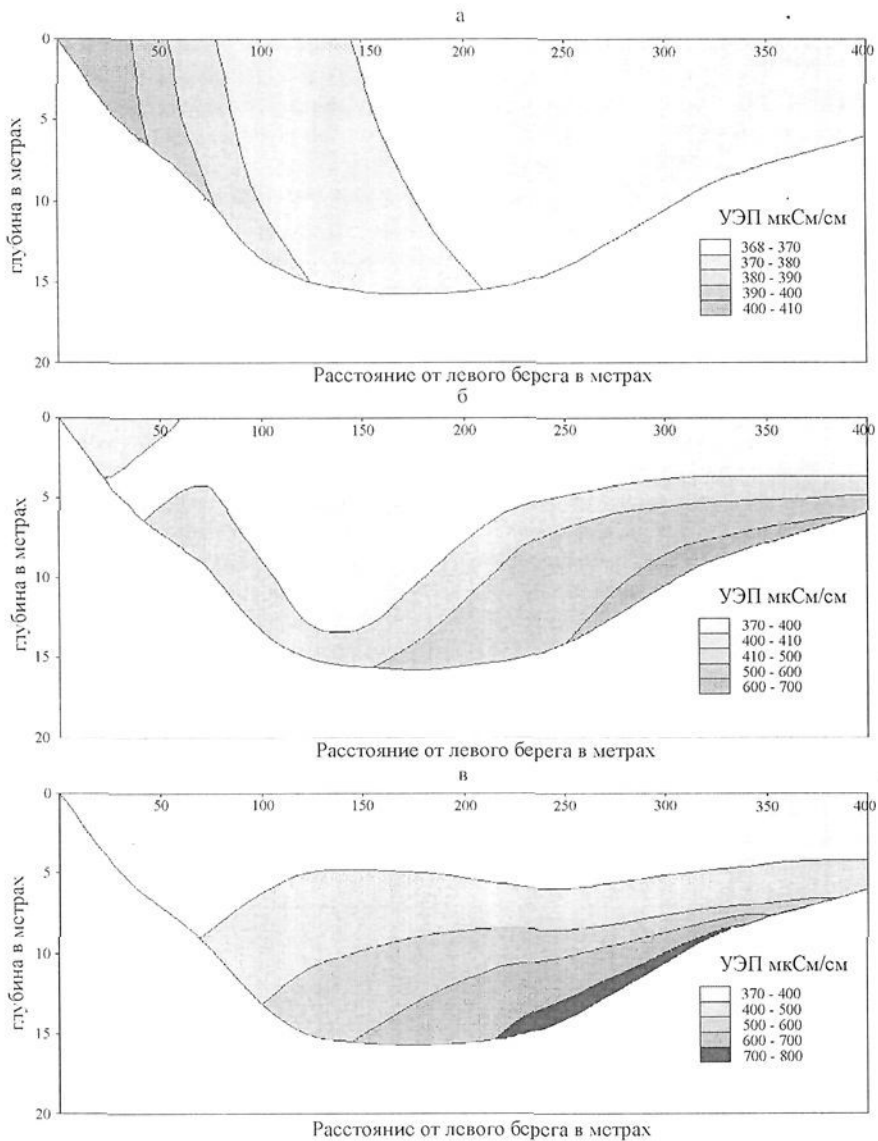


Рис.2. Распределение УЭП воды в поперечном сечении потока в створе ША:
а – 19:00, б – 2:00, в – 6:00

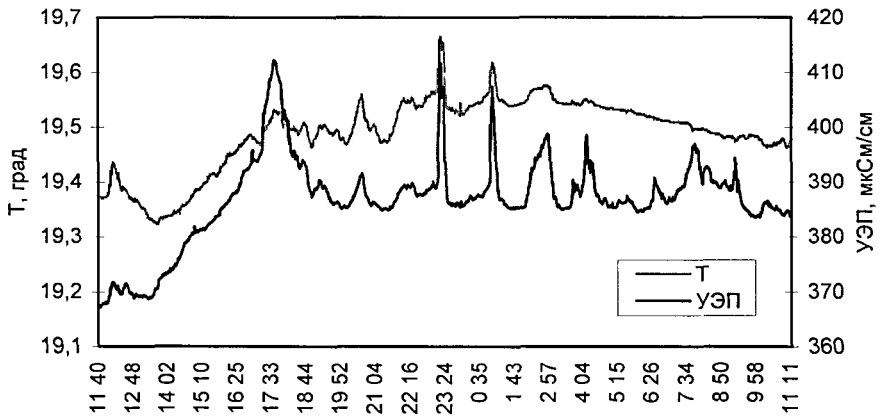


Рис. 3. Суточный ход УЭП и температуры воды в придонных слоях в районе водозабора г. Самара (НФС-2) 24-25 08 06

Похожий циклический процесс, как и с притоками, наблюдается и в случае взаимодействия основного русла и поймы Волги в районе р. Чапаевка. При прохождении гребня прямой волны часть воды задерживается в пойме, которая потом возвращается, когда нагрузка на ГЭС снижается. Как правило, вода притоков и поймы более минерализованная, чем воды основной водной массы Волги, поэтому колебания значений УЭП и расхода воды в этом районе носят несимметричный, противофазный характер (рис. 4). Сопоставляя графики ежечасного

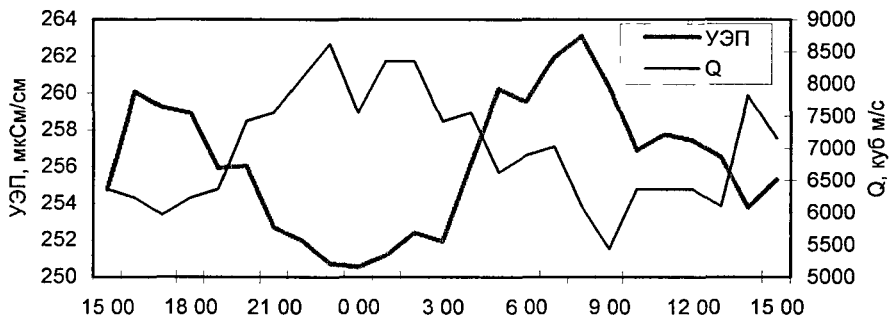


Рис. 4. УЭП в среднем сечении потока и расход воды в створе п. Печерское 11-12 10 01

изменения расхода воды и, соответственно, ежечасных изменений гидрохимических показателей можно увидеть, что при увеличении расхода воды в вечерние часы в п. Печерск значения УЭП пропорционально снижаются, а при

снижении расхода воды в ночные и утренние часы наблюдается повышение УЭП

В связи с полученными результатами натурных наблюдений следующей задачей исследования явилось создание системы компьютерных моделей для проведения численных экспериментов и более детального изучения особенностей гидродинамических и гидрохимических процессов

Глава 2. Выбор математических моделей для описания движения воды и переноса примесей применительно к условиям водохранилища

Исходя из поставленных задач, в данной главе приведен краткий анализ опыта математического моделирования процессов движения воды и переноса примесей. Обоснован выбор уравнений в длинноволновом приближении для построения моделей Саратовского водохранилища

Разработка моделей водохранилища осуществлялась на основе программной системы «CARDINAL», созданной Клеванным К А (Управление «Морзащита» мэрии Санкт-Петербурга) и программной системы «ВОЛНА», разработанной автором

Математическая модель движения воды В созданных программных системах для описания движения воды используются уравнения теории длинных волн, так называемые уравнения “мелкой воды” Эти уравнения в двумерной постановке имеют вид

уравнения количества движения

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + g \frac{\partial \zeta}{\partial x} - lv = F_x, \quad (1)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + g \frac{\partial \zeta}{\partial y} + lu = F_y \quad (2)$$

Преобразованное уравнение сохранения массы с учетом кинематических условий на свободной поверхности и на дне

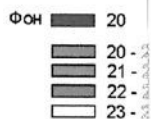
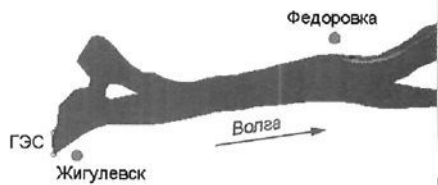
$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + u \frac{\partial \zeta}{\partial x} + v \frac{\partial \zeta}{\partial y} = w, \quad z = \zeta, \quad (3)$$

$$u \frac{\partial h}{\partial x} + v \frac{\partial h}{\partial y} + w = 0, \quad z = -h, \quad (4)$$

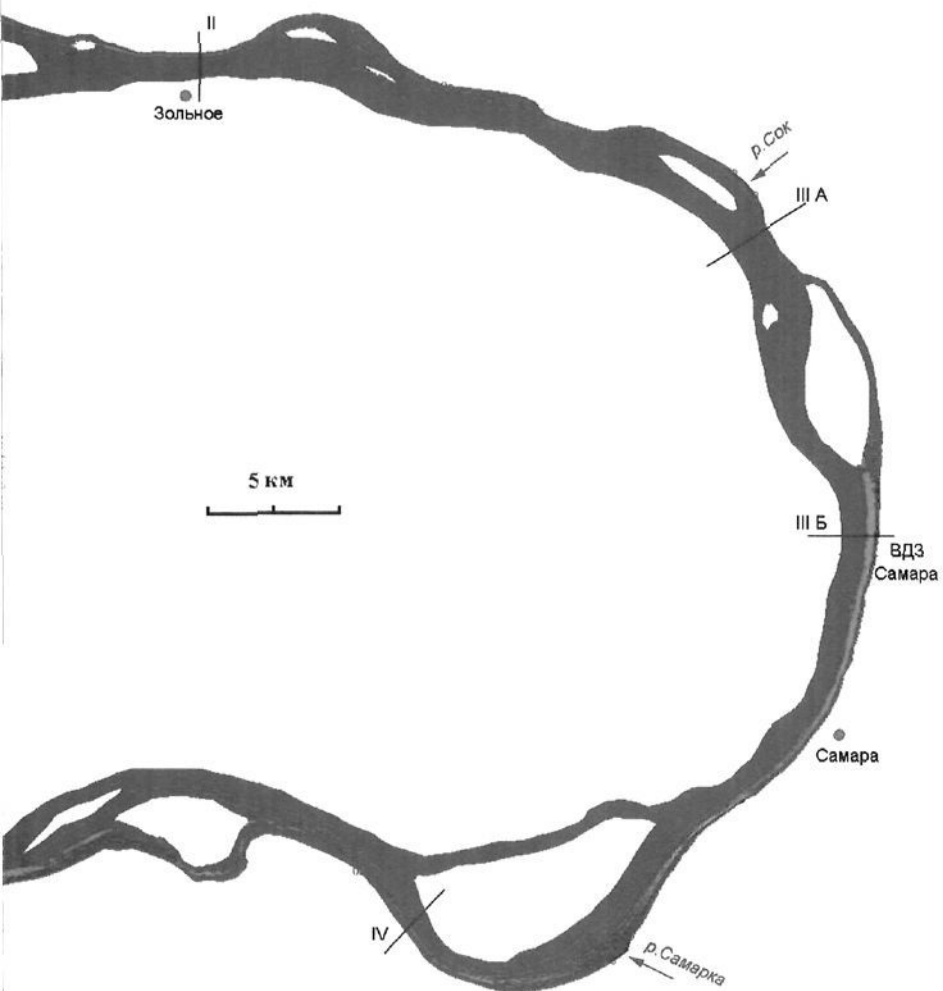
и проинтегрированное по глубине будет иметь вид

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial [u(h+\zeta)]}{\partial x} + \frac{\partial [v(h+\zeta)]}{\partial y} = 0, \quad (5)$$

где $u(x,y,t)$ и $v(x,y,t)$ – усредненные по глубине продольная и поперечная скорости, $h(x,y,t)$ – невозмущенная глубина, $\zeta(x,y,t)$ – уровень на свободной поверхности, $H=(h+\zeta)$ – полная глубина, g – ускорение свободного падения,



Приложение 1. Модельный расчет концентрации хлоридов в верхней



Саратовского водохранилища (Самарская лука) на момент 20 часов.

$l = 2\omega \sin\varphi$ - параметр Кориолиса, $\omega = 2\pi/\text{сут}$ – угловая скорость вращения земли, φ – географическая широта

Компоненты внешней силы F_x и F_y учитывают касательные напряжения, связанные с ветром и донной поверхностью, а также горизонтальный турбулентный обмен

$$F_x = c_a \frac{\rho_a}{\rho H} W_{(x)} |W| - \frac{f_{\text{дно}}}{H} u |v| + K_L \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P_a}{\partial x},$$

$$F_y = c_a \frac{\rho_a}{\rho H} W_{(y)} |W| - \frac{f_{\text{дно}}}{H} v |v| + K_L \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P_a}{\partial y} \quad (6)$$

Для касательного напряжения ветра c_a – безразмерный коэффициент аэродинамического сопротивления водной поверхности, назначаемый с использованием зависимости, например, Банкера и Смита

$$c_a = 10^{-3} (0,63 + 0,066 W) \quad (7)$$

или по экспериментальным данным ГГИ

$$c_a = 10^{-3} (0,80 + 0,05 W), \quad (8)$$

$\rho_a/\rho = 0,001$ – отношение плотностей воздуха и воды, $W_{(x)}$ и $W_{(y)}$ – компоненты составляющей скорости ветра, W – результирующий вектор скорости ветра

Для касательного напряжения, обусловленного трением о донную поверхность v – результирующий вектор скорости течения, $f_{\text{дно}} = g/C^2$ – безразмерный коэффициент придонного трения, g – ускорение свободного падения, C – коэффициент Шези, определяемый, например, по формуле Маннинга

$$C = \frac{1}{n} H^{1/6}, \quad (9)$$

где n – коэффициент шероховатости, зависящий от размеров и состава донного грунта

Горизонтальный турбулентный обмен задается коэффициентом K_L , а изменение атмосферного давления задается P_a .

В двумерной постановке уравнения для полных потоков, где

$$U = \int_{-h}^{\zeta} u dz \quad \text{и} \quad V = \int_{-h}^{\zeta} v dz \quad \text{имеют вид}$$

$$U_t + \left(\frac{U^2}{H} \right)_x + \left(\frac{UV}{H} \right)_y + gH \zeta_x = IV + c_a \frac{\rho_a}{\rho} W_{(x)} |W| - \frac{f_{\text{дно}}}{H^2} U |V| + K_L \nabla^2 U + \frac{H}{\rho} \frac{\partial P_a}{\partial x},$$

$$V_t + \left(\frac{VU}{H} \right)_x + \left(\frac{V^2}{H} \right)_y + gH \zeta_y = -IU + c_a \frac{\rho_a}{\rho} W_{(y)} |W| - \frac{f_{\text{дно}}}{H^2} V |V| +$$

$$+ K_L \nabla^2 V + \frac{H}{\rho} \frac{P_a}{\partial y}, \quad (10)$$

$$\zeta_t + U_x + V_y = 0, \quad (11)$$

Уравнения решаются при задании следующих граничных условий для u , v , ζ . На твердых боковых границах нормальная компонента скорости u_n равна нулю. Для тангенциальной компоненты u_τ вводится квадратичный закон трения, аналогичный придонному. Таким образом, граничное условие на твердых боковых границах имеет вид

$$u_n = 0, \\ K_L \frac{\partial u_\tau}{\partial n} = -f_b u_\tau |V|, \quad (12)$$

f_b – коэффициент бокового трения

На открытых боковых границах одним из граничных условий является равенство нулю касательной к границе составляющей скорости $u_\tau = 0$, второе граничное условие может быть разных типов. Для первого типа задается нормальная компонента скорости как функция времени $u_n = f(t)$. Для второго типа задается уровень воды $\zeta = \zeta(t)$. Для третьего типа задается линейная зависимость между нормальной компонентой скорости и уровнем

$$u_n = \pm(g/h)^{1/2} \zeta \quad (13)$$

Математическая модель конвективно-диффузионного переноса примеси. Известно, что изменение концентрации загрязняющего вещества C в воде происходит в результате действия трех основных факторов: рассеивания (молекулярная и турбулентная диффузия), адвекции (перенос загрязняющего вещества основным течением) и биохимической реакции (превращения вещества в воде). В двумерной постановке и усредненной по глубине концентрации растворенного вещества уравнение конвективно-диффузионного переноса записывается в следующем виде:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} + v \frac{\partial C}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(E \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(E \frac{\partial C}{\partial y} \right) - rC + C_s w_s, \quad (14)$$

где C – концентрация, E – коэффициент горизонтальной диффузии, r – коэффициент неконсервативности, C_s – концентрация примеси в воде, поступающей из источника, w_s – объем воды, поступающий в единичный объем за единицу времени из внутренних источников.

Уравнение (14) для полных потоков запишется следующим образом:

$$(CH)_t + (UC)_x + (VC)_y = EH \nabla^2 (CH) - rCH + C_s w_s, \quad (15)$$

Это уравнение решается при задании следующих граничных условий. На боковой поверхности Ω расчетной области примем

$$\varepsilon_t C + E \frac{\partial C}{\partial n} = \varepsilon(x, y, t), \quad (16)$$

Функция ε задает источники и стоки на Ω , $\varepsilon_I = \varepsilon = 0$ соответствует случаю непроницаемой для примеси стенки, $\varepsilon_I = \infty$, $\varepsilon \approx 0$ – случаю поглощения примеси стенкой. Начальное состояние характеризуется фоном $C^0 = C|_{t=0}$. Таким образом, при отсутствии внешних факторов решение уравнения (15) осуществляется с крайвым условием

$$E \frac{\partial C}{\partial n} \Big|_{\Omega} = 0, \text{ где } \mathbf{n} - \text{нормаль к боковой поверхности } \Omega$$

На открытых границах, через которые вода поступает в расчетную область, задается временный ход концентрации примеси $C(t)$. На открытых границах, через которые вода вытекает из расчетной области, граничные условия для C не задаются.

Глава 3. Адаптация компьютерной модели Саратовского водохранилища

В последнее время существует множество разработанных математических моделей, позволяющих описывать широкий диапазон гидроэкологических явлений. В связи с этим, важной и совершенно необходимой частью математического моделирования процессов движения и загрязнения вод является задание коэффициентов уравнений, характеризующих гидродинамические, гидрохимические, биологические и другие особенности водоемов. Погрешность результатов математического моделирования неустановившегося движения воды и примесей в значительной мере зависит от правильного определения параметров модели.

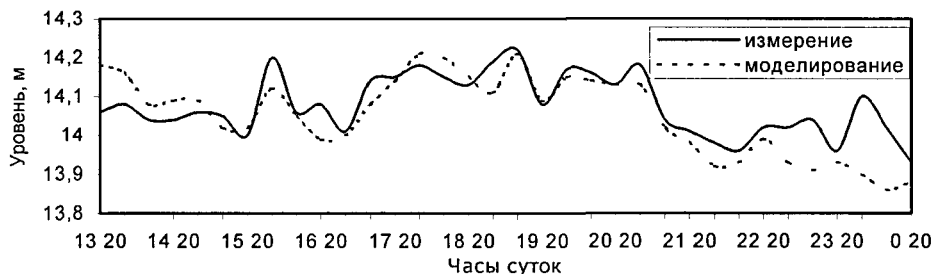


Рис. 5. Измеренный и расчетный ход уровня относительно отметки дна в п. Федоровка 02 – 03 09 05

Определение коэффициентов модели осуществлялось на отдельных участках водохранилища в районе сброса сточных вод г. Тольятти, в районе п. Зольное и в районе п. Печерск. По данным измерений и модельным экспериментам были определены следующие коэффициенты, используемые в модели: $f_{дно}$ – коэффициент придонного трения, используемый для параметризации сил трения донной поверхности, $f_{бок}$ – коэффициент бокового трения, используемый для параметризации сил трения на твердых боковых границах, K_L – коэффициент

горизонтального турбулентного обмена, используемый для параметризации турбулентности в вихрях, меньших масштаба сетки, c_a – коэффициент аэродинамического сопротивления водной поверхности, связывающий касательное напряжение на поверхности воды со скоростью ветра w , E – коэффициент горизонтальной турбулентной диффузии

Проверка адекватности модели производилась путем сравнения результатов моделирования с натурными данными (рис 5) Статистическая обработка результатов расчета на модели показала, что модельное и измеренное среднеквадратичное отклонение равно $\sigma_x/\sigma_y = 0,10/0,08$ и коэффициент корреляции равен $R_{xy} = 0,78$

Выполненные качественные и количественные оценки результатов моделирования неустановившегося движения воды в Саратовском водохранилище позволяют сделать вывод о том, что построенная модель, в целом, может быть использована для расчета динамического режима, а так же для решения задач, связанных с распространением примеси

Глава 4. Численное моделирование гидродинамического и гидрохимического режимов Саратовского водохранилища

В главе представлены результаты исследования процессов формирования качества вод на моделях Саратовского водохранилища территориального (GMRsar) и локального (LMRsar) масштаба

Для оценки пространственной неоднородности и временной изменчивости качества вод на модели GMRsar было выполнено численное моделирование на примере распространения хлоридов в условиях суточного режима пусков на ГЭС Построение модели осуществлялось в программной среде «CARDINAL» Вычислительная область модели водохранилища имеет криволинейную сетку с шагом 150-500 м, состоящую из 10125 расчетных узлов Все расчеты проводились с шагом по времени, равным 60 сек

Моделирование гидродинамики проведено для всей акватории водохранилища от Жигулевской ГЭС до Балаковской ГЭС протяженностью в 336 км по судовому ходу Рассматривались условия, когда гидроэлектростанции этих гидроузлов работают в синхронном суточном режиме Распространение хлоридов рассчитывалось для верхней части водохранилища протяженностью в 145 км (прил 1), которая наиболее перегружена сбросами, как сточных вод городов, так и подвержена влиянию крупных загрязняющих притоков В качестве сосредоточенных источников загрязнения в модели была задана интенсивность водовыпусков г Жигулевск расход $Q = 0,3 \text{ м}^3$ и концентрация $C = 100 \text{ мг/л}$, г Тольятти (сброс в п Федоровка) $Q = 5,6 \text{ м}^3/\text{с}$ и $C = 100 \text{ мг/л}$, г Самара $Q = 7,9 \text{ м}^3/\text{с}$ и $C = 80 \text{ мг/л}$, п Зольное $Q = 0,008 \text{ м}^3/\text{с}$ и $C = 50 \text{ мг/л}$ Расход и концентрация хлоридов в притоках задавалась равными р Сок $Q = 11,9 \text{ м}^3/\text{с}$ и $C = 43 \text{ мг/л}$, р Самарка $Q = 11,9 \text{ м}^3/\text{с}$ и $C = 42 \text{ мг/л}$, р Чапаевка $Q = 0,1 \text{ м}^3/\text{с}$ и $C = 40 \text{ мг/л}$ Фоновый показатель по хлоридам на Саратовском водохранилище составил 20 мг/л

Модельные расчеты показали, что в ночные часы суток, когда скорость течения на водохранилище не высока (с 0 до 4 часов), происходит значительное повышение концентрации хлоридов в местах сброса сточных вод, впадения боковых притоков и прилегающей поймы. В это время здесь формируются зоны загрязнения, которые вытягиваются широкой полосой вдоль левого берега. В дневные и вечерние часы суток скорости течения намного выше, в результате чего происходит интенсивный снос этих зон вниз по течению.

Для количественной оценки распределения хлоридов в данной модели выбрано шесть поперечных створов (прил. 1). Так, на участке от II до IV створа максимальная концентрация Cl^- отмечается возле левого берега и равна 20,6 – 21,3 мг/л, превышая фоновый показатель на 3 – 6,5 %. На участке от V до VI створа максимум концентрации Cl^- достигает 22,5 – 25 мг/л, что выше фона на 12,5-25 %.

В створе II и III Б (рис. 6 и рис. 7) наблюдается почти синхронный суточный ход изменения расхода воды и концентрации хлоридов.

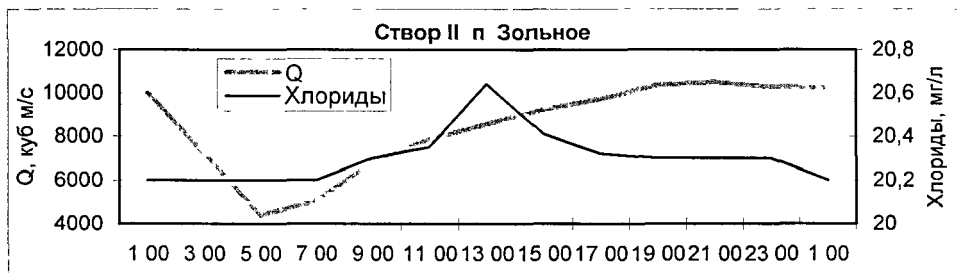


Рис. 6. Графики расчетного расхода воды и концентрации хлоридов в створе II

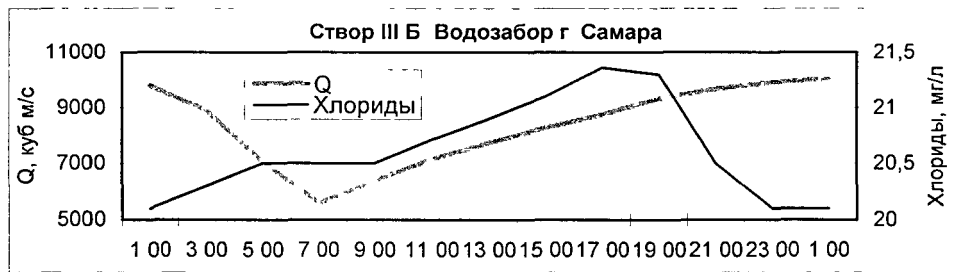


Рис. 7. Графики расчетного расхода воды и концентрации хлоридов в створе III Б

Ниже по течению в районе поймы в створах IV и V (рис. 8 и рис. 9) такого явного синхронного хода не прослеживается. Примечательно то, что в створе VI (рис. 10) наступает противофазный ход концентрации и расхода воды. Максимальный уровень хлоридов здесь держится в дневные часы (с 8 до 23 часов), тогда как расходы воды в это время минимальные. Напротив, снижение содержания в воде

хлоридов почти до фоновых значений наступает в ночные часы (с 1 до 5 часов), когда в этом районе наблюдается максимальный сток

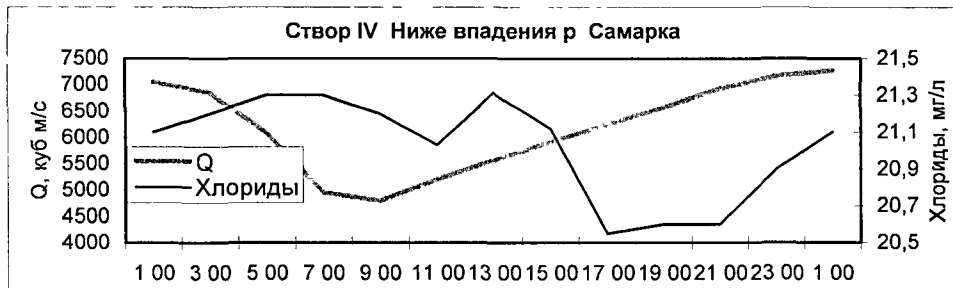


Рис.8. Графики расчетного расхода воды и концентрации хлоридов в створе IV

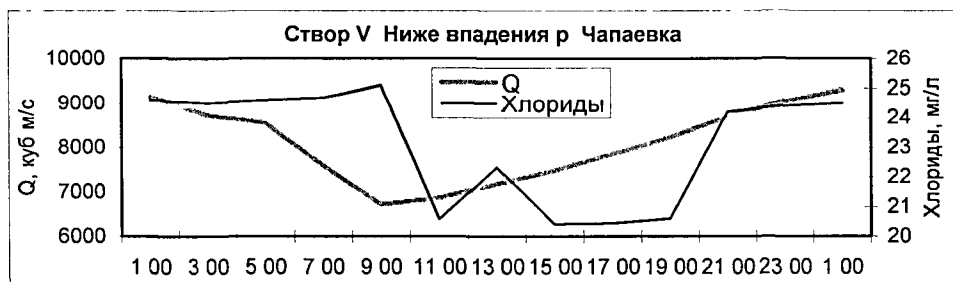


Рис.9. Графики расчетного расхода воды и концентрации хлоридов в створе V

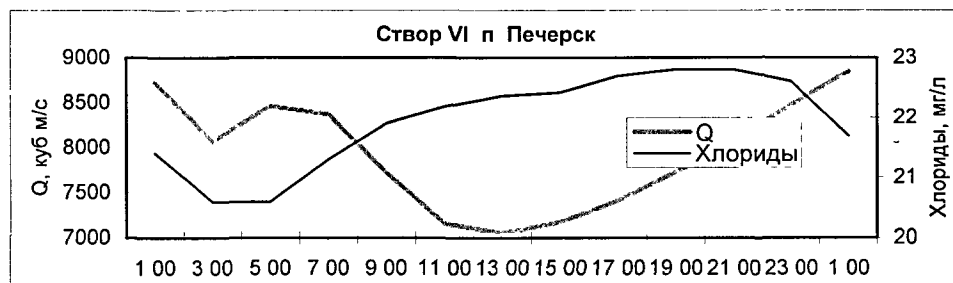


Рис.10. Графики расчетного расхода воды и концентрации хлоридов в створе VI

Надо отметить, что расчеты на модели в створе VI хорошо согласуются с натурными измерениями суточного хода расхода воды и УЭП, которые показаны на рис 4. Максимальные неоднородности качества вод (среднего масштаба) начинают формироваться выше по течению, на участке г Самара – п Переволоки, за короткий период ночного времени, а ниже, на участке п Печерск – г Сызрань,

неоднородности уже существуют более продолжительный период времени, в течение всего дня и вечера.

Таким образом, волновой (суточный) неустановившийся гидродинамический режим не только не способствует равномерному распределению загрязняющих веществ, а наоборот, создает условия для формирования зон с ярко выраженной неоднородностью качества вод. При таких условиях может возникнуть ситуация загрязнения городских водозаборов, попадающих под воздействие таких зон, как при штатном, так и аварийном режиме сброса сточных вод.

В следующем примере данной главы анализируются результаты моделирования воздействия р. Сок на качество вод Саратовского водохранилища в районе питьевого водозабора г. Самара в условиях суточного и недельного режимов работы ГЭС. В расчетах использовалась локальная модель LMRsar, построенная с помощью программного комплекса "ВОЛНА". Модель реализована на прямоугольной сетке с шагом 50 м и представляет собой двухмерный плановый участок Саратовского водохранилища и устьевой части реки Сок, сориентированной в северном направлении по оси Y протяженностью 16 км и в восточном направлении по оси X протяженностью 3,4 км (рис. 11). Расчетная область модели состоит из 15340 узлов. Устойчивость вычислений обеспечивалась временным шагом, равным 1 сек.

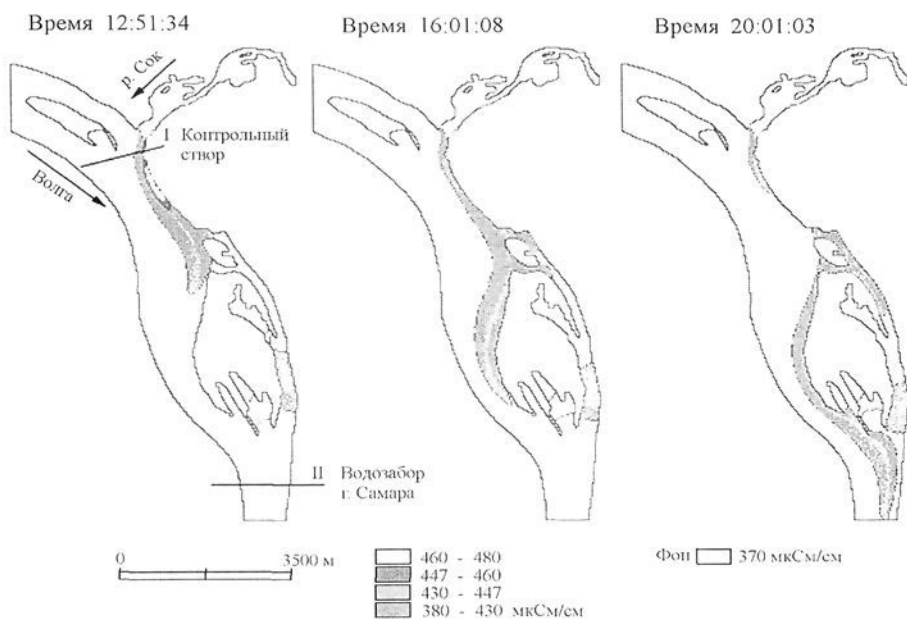


Рис.11. Модельный расчет распространения вод р. Сок на исследуемом участке Саратовского водохранилища

Разработанная модель позволила смоделировать изменчивость скорости и направления течения в зоне выклинивания подпора (устье р Сок) и количественно оценить интенсивность поступления водных масс реки Сок в Саратовское водохранилище в зависимости от гидродинамического режима. На рис 11 и рис 12 показано суточное распределение УЭП на участке Саратовского водохранилища от створа впадения р Сок до створа питьевого водозабора г Самара и изменение концентрации сульфатов в течение недели в створе водозабора г Самара.

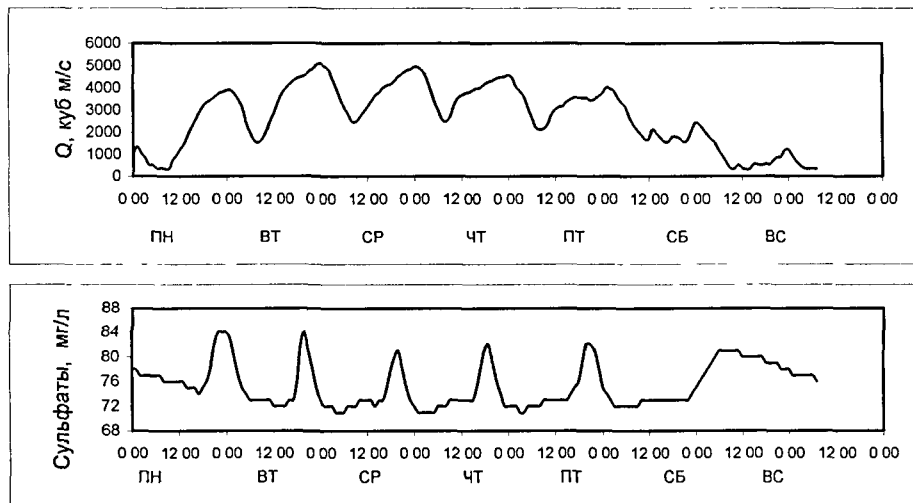


Рис.12. Рассчитанные по модели расход воды и концентрация SO_4^{2-} в 200 метрах от левого берега в створе II (водозабор г Самара)

Проведенные численные эксперименты показали, что акватория водозабора г Самара находится под периодическим влиянием вод р Сок, связанным с волновым характером гидродинамического режима Саратовского водохранилища преимущественно с суточным и недельным диапазоном колебаний. Поступающие водные массы р Сок, смешиваясь с волжскими, распространяются вниз по течению, достигая водозабора в вечерние часы. Показано, что в рабочие дни недели превышение концентрации сульфатов над фоновыми значениями в створе водозабора может достигать 18-19 %.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

- 1 На примере Саратовского водохранилища показаны основные гидродинамические факторы, влияющие на формирование качества вод в условиях суточно-недельного режима работы ГЭС. Проанализирован механизм возникновения обратных уклонов (в сторону ГЭС) и течений в центральной части водохранилища (переволокский плес), образующихся в

результате аккумуляции и отдачи значительных объемов воды поймой в зависимости от фазы колебания уровня. Для зоны выклинивания подпора в районах боковых притоков водохранилища исследованы и определены гидродинамические особенности пространственной и временной изменчивости скорости и направления течения.

2. Изучена пространственная неоднородность качества воды на всем протяжении Саратовского водохранилища. В районе сброса сточных вод г. Жигулевск, г. Тольятти, п. Зольное, г. Самара, г. Сызрань и устьев притоков Сок, Самара, Чапаевка выявлены неоднородности различного масштаба. Показано, что мелкомасштабная неоднородность прослеживается в районах сброса сточных вод, мезомасштабная неоднородность наблюдается в районах впадения в водохранилище боковых притоков и макромасштабная неоднородность создается попусками Жигулевской ГЭС.
3. В работе рассмотрены многолетние, сезонные, недельные, суточные изменения качества вод и выполнена оценка антропогенной нагрузки Саратовского водохранилища. Показано, что после создания Куйбышевского и Саратовского водохранилища произошло внутригодовое распределение минерализации воды в водохранилище, и ионный сток в паводок значительно вырос. При этом, содержание в волжской воде химических элементов антропогенного происхождения по отдельным показателям достигает 4-79 %.
4. Установлено, что в отдельных районах Саратовского водохранилища (нижний и верхний бьефы ГЭС, русловые и пойменные участки, участки впадения боковых притоков и районы сброса сточных вод) формируются зоны с различной степенью изменчивости показателей качества воды. Определены закономерности изменения их границ и размеров в суточном и недельном диапазоне. На основе данных натурных наблюдений и компьютерного моделирования проведена количественная оценка интенсивности поступления и распространения загрязняющих веществ через боковые притоки в зависимости от колебания уровня воды на водохранилище. Показано, что при высоком стоянии уровня воды в дневные часы воздействие боковых притоков на водохранилище незначительно или вообще отсутствует, а в ночные часы и выходные дни оно резко возрастает с понижением уровня. Ярко выраженные неоднородности прослеживаются и в районах сброса сточных вод, динамика распространения которых определяется в основном направлением и скоростью существующего течения.
5. Для прогностических расчетов течений и распространения загрязняющих веществ при возможных вариантах изменения гидродинамического и гидрохимического режимов Саратовского водохранилища предложена система компьютерных моделей территориального и локального масштаба.

Определены параметры этих моделей и выполнена верификация, результаты которой удовлетворительно согласуются с результатами натурных наблюдений

- 6 Проведено численное моделирование распространения хлоридов в акватории Саратовского водохранилища при типичном суточном режиме изменения расхода воды По результатам моделирования на рассматриваемой акватории Саратовского водохранилища построены карты поля скоростей течения и распределения хлоридов в суточном диапазоне
- 7 Выполнено прогнозирование изменения УЭП воды и концентрации сульфатов в районе водозабора г Самара в течение недели Расчеты показали, что на качество воды водозабора г Самара оказывает влияние сток реки Сок, который связан с суточно-недельным гидродинамическим режимом Саратовского водохранилища, а превышение концентрации загрязняющих веществ (выше фонового на 18-19 %) приходится как раз на фазу максимальных расходов

По теме диссертации опубликованы следующие работы:

- 1 Рахуба А В , Селезнев В А , Махиня А П Натурные исследования и численное моделирование процесса смешения водных масс рек Камы и Белой по длине Нижнекамского водохранилища IV конференция "Динамика и термика рек, водохранилищ, внутренних и окраинных морей" Том 1, М , 1994 – С 136-137
- 2 Рахуба А В , Селезнев В А Моделирование качества вод Саратовского водохранилища с учетом суточной изменчивости гидродинамических процессов // Экологические проблемы бассейнов крупных рек-2 Тольятти, 1998 – С 161-162
- 3 Рахуба А В Численное моделирование качества воды санитарных зон Саратовского водохранилища на основе его мониторинга Тезисы докладов III международного конгресса "Вода экология и технология" ЭКВАТЭК - 96, Москва, "СИБИКО Интернэшнл", 1996 – С 441-442
- 4 Рахуба А В Оценка качества вод Саратовского водохранилища в районе питьевого водозабора г Самара // Водное хозяйство России, Том 7, №6, Екатеринбург, РосНИИВХ, 2005 – С 601-611
- 5 Рахуба А В Использование математического моделирования в задачах контроля качества воды в районе питьевого водозабора г Самара Тезисы докладов VII международного конгресса "Вода экология и технология" ЭКВАТЭК - 2006, Москва, "СИБИКО Интернэшнл", 2006 – С 44-45
- 6 Рахуба А В Опыт совместного использования численных моделей и автоматизированной измерительной системы в мониторинге качества воды (на примере Саратовского водохранилища) Статьи и тезисы IX международного симпозиума "Чистая вода России – 2007", Екатеринбург, 2007 – С 211
- 7 Селезнев В А , Селезнева А В , Рахуба А В От мониторинга к регулированию антропогенного воздействия на качество вод водохранилищ Волжско-Камского каскада // ИЭВБ РАН Основные итоги и перспективы научных исследований Тольятти, 2003 – С 55-69

Подписано к печати 23 04 07
Объем 1 п л Тираж 100 экз Заказ № 57
Издательство ИЭВБ РАН
445003, г Тольятти, ул Комзина, 10