УДК 556.5:519.8

ОСОБЕННОСТИ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПЛОТНОСТНЫХ СТРАТИФИКАЦИОННЫХ ЭФФЕКТОВ В ДИНАМИКЕ КРУПНЫХ ВОДОХРАНИЛИЩ*

© 2016 г. А.П. Лепихин^{1,2}, Т.П. Любимова³, Я.Н. Паршакова³,
Ю.С. Ляхин¹, А.В. Богомолов¹

¹ ФГБУН «Горный институт Уральского отделения Российской академии наук», г. Пермь, Россия

² ФГБУ «Российский научно-исследовательский институт комплексного использования и охраны водных ресурсов», Камский филиал, г. Пермь, Россия

³ ФГБУН «Институт механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук», г. Пермь, Россия

Ключевые слова: стратификация водных масс, водные объекты, формирование качества воды водохранилища, тепловое загрязнение водохранилищ, комбинированные схемы гидродинамических расчетов в 1D-2D-3D постановке, Камское водохранилище, динамика водохранилищ, гидрохимический режим водохранилища, избыточные рассолы.

А.П. Лепихин Т.П. Любимова Я.Н. Паршакова Ю.С. Ляхин А.В. Богомолов

Плотностные стратификационные эффекты, обуславливаемые неоднородностью распределения температурных полей и полей минерализации, могут играть существенную роль в формировании как гидрологического, так и гидрохимического режима поверхностных водных объектов. При этом они не могут быть описаны в рамках гидродинамических моделей в постановке мелкой воды. Рассмотрено описание данных процессов в рамках комбинированного подхода, основанного на сопряжении моделей в 1D, 2D, 3D постановках на конкретных примерах: формирование качества воды ниже слияния находящихся в подпоре от

* Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФН (проект №14-17-00672) и гранта РФФИ-Урал (проект №16-41-59-0006)

Камской ГЭС рек Чусовой и Сылвы; особенности структуры и характер формирования зон теплового загрязнения Камского водохранилища вследствие работы Пермской ГРЭС; особенности распространения в водных объектах сточных вод высокой плотности. Показано, что предложенная схема расчетов позволяет эффективно воспроизвести процессы подтекания в зимний период более плотных водных масс р. Сылвы под воды р. Чусовой, что имеет принципиальное значение для обеспечения устойчивого питьевого водоснабжения г. Перми. На примере расчета формируемых под воздействием сброса термальных стоков Пермской ГРЭС зон теплового загрязнения показано, что предложенный подход значительно более объективно воспроизводит и оценивает характер рассматриваемых температурных полей, чем традиционная гидродинамическая модель мелкой воды в 2D постановке. Оценка воздействия поступающих в Камское водохранилище избыточных рассолов предприятий калийной промышленности показала более высокую эффективность предложенной методики расчетов по сравнению с зафиксированными в действующих нормативно-методических документах.

В настоящее время одним из наиболее эффективных инструментов решения широкого круга задач, связанных с динамикой водохранилища и формированием его гидрохимического режима, является численное моделирование в приближении мелкой воды. Обзор успешного решения на этой основе прикладных задач представлен в [1–5] и др. Применение моделей мелкой воды, в первую очередь, обусловлено однородностью распределения рассматриваемых параметров по глубине водного объекта. Однако эти модели не учитывают, как правило, плотностные эффекты, вызванные неоднородностью распределения температуры и минерализации воды. В то же время водные массы водохранилищ – крупных водных объектов с замедленным водообменном – весьма чувствительны к проявлению плотностной неоднородности, вызванной неравномерностью распределения полей течений. Эти эффекты в ряде случаев могут не только принципиально изменить гидрохимический и гидрологический режимы водного объекта, но и влиять на условия его использования для хозяйственных нужд.

В настоящее время при исследовании этих явлений существенную роль начинают играть не только детальные натурные исследования, но и вычислительные эксперименты в 3D постановке с использованием мощных современных кластеров. В работе предлагается рассмотрение этой проблемы на примере решения нескольких актуальных водохозяйственных задач.

Использование стратификационных эффектов для улучшения качества забираемой воды

Основной водозабор г. Перми, крупного промышленного центра на Урале, расположен в верхнем бьефе Камского водохранилища ниже слияния рек Чусовой и Сылвы. Лимитирующим показателем качества забираемой

воды является ее жесткость. Характерная особенность гидрохимического режима р. Сылвы – высокая жесткость, которая в зимний период достигает 10–11 °Ж. В то же время жесткость воды р. Чусовой значительно ниже и составляет 4–5 °Ж. Соответственно минерализация воды р. Сылвы составляет 0,8–0,9 г/л, что существенно выше минерализации воды р. Чусовой (0,2–0,3 г/л) [6, 7]. Данная гидрологическая система, является частью Камского водохранилища, морфометрия которой представлена на рис. 1.

Рассматриваемые реки имеют близкие водосборные площади: р. Чусовая – 23 000 км², р. Сылва – 21 000 км². Расходы весеннего паводка и летней межени на р. Чусовой значительно больше, чем на р. Сылве, в то же время расходы зимней межени в силу особенностей водосборной территории р. Сылвы больше, чем расходы р. Чусовой. Из-за почвенно-геохимических особенностей водосборных площадей химический состав рассматриваемых рек существенно различается. Данные различия особенно существенны при малых расходах, характерных для лимитирующего периода зимней межени. Устойчивость соотношения отдельных лимитирующих компонентов хими-

ческого состава воды обуславливает очень высокую статистическую надежность зависимости удельной электропроводности воды от общей минерализации, при этом связь линейна $M(y) = 0,78y - 3,6$; $R^2 = 0,98$, где M – общая минерализация в мг/л; y – удельная электропроводность воды в мкСм/см.

В связи с существенным различием минерализации рассматриваемых водотоков ниже их слияния наблюдается значительная вертикальная неоднородность (рис. 2). Наличие устойчивой вертикальной стратификации предлагается использовать для улучшения качества забираемой воды [6, 7].

Однако данная вертикальная неоднородность формируется не только в зоне ниже слияния рек Сылвы и Чусовой, но и в нижнем течении до их слияния. Наблюдается ситуация, когда более плотные воды р. Сылвы «подтекают» под менее плотные воды р. Чусовой, а воды Чусовой «натекают» на воды Сылвы. Более полно особенности распределения вод рассматриваемых рек в зоне смешения представлены на рис. 3, где показано распределение удельной электропроводности воды по глубине потока по линии развертки А–С–В, охватывающей приустьевые участки обеих рек. Расположение створов А, С, В показано на рис. 1.

Рис. 2. Распределение удельной электропроводности воды по глубине потока в районе Чусовского водозабора.

Для гидродинамического моделирования рассматриваемого явления использовалась комбинированная схема, построенная на основе сопряжения моделей в 1D, 2D, 3D постановке. Детальное описание данной комбинированной схемы дано в [8]. Использование такой схемы расчетов обусловлено существенной неоднородностью рассматриваемых полей как по акватории, так и глубине, и крайне ограниченной системой гидрологических наблюдений на водохранилище.

Современные возможности даже наиболее мощных из доступных кластеров не позволяют проводить расчеты в 3D для крупных участков водохранилищ. В то же время результаты расчетов, получаемые в 3D приближении в целом по водохранилищу, как правило, не используются в последующем анализе. Вычислительные эксперименты в 3D постановке проводились при помощи пакета вычислительной гидродинамики ANSYS Fluent с использованием $k-\epsilon$ модели для описания турбулентных пульсаций. Задача решалась в рамках нестационарного изотермического подхода. Течение рассматривалось как изотермическое, однако плотность считалась зависящей от минерализации воды. Выполненные результаты расчетов обсуждены в [9]. Вычислительные эксперименты позволили уточнить условия формирования устойчивой стратификации полей минерализации, соответственно, и жесткости воды в районе основного питьевого водозабо-

ра г. Перми, что имеет существенное значение для повышения надежности водоснабжения. Анализ результатов выполненного вычислительного эксперимента позволил впервые установить наличие значительной вихревой структуры, охватывающей устьевые участки рек Сылвы и Чусовой. Данная структура, по-видимому, и обуславливает эффекты рассмотренного выше взаимного проникновения вод этих двух водотоков.

Оценка теплового воздействия ГРЭС на водохранилище

Решалась задача оценки теплового воздействия на Камское водохранилище одной из крупнейших тепловых электростанций в Европе – Пермской ГРЭС. Значимость рассматриваемой проблемы подчеркивает то обстоятельство, что первые прикладные модели плоской гидродинамики для решения данных задач оценки тепловых воздействий разрабатывались еще в начале 1930-х годов. [10, 11]. Их решение в значительной мере усложняется фрактальностью морфометрии естественных водных объектов, значительным различием масштабов лимитирующих естественных и технологических параметров, существенной изменчивостью гидрометеорологических факторов. При этом, как правило, лимитирующим обстоятельством выступает ограниченность мощностей доступных вычислительных средств. Поэтому, начиная с пионерских работ Н.М. Бернадского [10, 11] и до последнего времени, наиболее распространенный подход к решению данных задач основан на плоских моделях в 2D постановке [12, 13] и др. Однако многочисленные материалы полевых наблюдений показали, что представления о двухмерности рассматриваемых полей равномерности распределения температуры воды по глубине нуждаются в существенном уточнении. Достаточно часто распределение рассматриваемых параметров в водохранилище существенно неоднородно не только по акватории, но и по глубине, и для получения более адекватных результатов требуется переход на 3D-модели.

Рассматриваемый объект – Пермская ГРЭС расположен на левом берегу Камского водохранилища в 5 км выше г. Добрянки и в 60 км выше плотины Камской ГЭС. Забор воды из Камского водохранилища осуществляется через подводящий канал длиной около 2,3 км, сброс производится через отводящий канал (900 м) также в Камское водохранилище (рис. 4). Мощность ГРЭС по техническому проекту должна составлять 4800 тыс. кВт (6 энергоблоков по 800 тыс. кВт каждый). В настоящее время введены в эксплуатацию 3 энергоблока (2400 тыс. кВт), имеющие прямоточную систему охлаждения.

По морфометрическим особенностям участок водохранилища в районе водопользования Пермской ГРЭС представляет относительно мелководную зону со средними глубинами 4–7 м. Ширина водохранилища около 4 км. Старое русло Камы проходит у противоположного берега, где максимальные глубины достигают 23 м.

Рис. 4. Общая схема расположения Пермской ГРЭС на Камском водохранилище.

Основным параметром для лимитирующих видов водопользования в рассматриваемом районе водохранилища является максимальная температура воды в зоне влияния ГРЭС. Поэтому решение самой задачи строится, исходя из оценки зон максимальных температур в наиболее теплый период года. В связи с этим решение задачи оценки характера возможных зон теплового воздействия ГРЭС состояло из двух отдельных, тесно связанных этапов. На первом этапе проведена детальная оценка теплового поля, создаваемого в водохранилище сбросом теплых вод ГРЭС, отработка сценариев для выполнения модельных расчетов и верификация модели. Задачей второго этапа было проведение сценарных расчетов.

Натурные исследования для верификации модели включали измерение температуры воды как по акватории, так и по глубине водохранилища при различных метеорологических условиях и режиме работы Пермской ГРЭС.

Программа производства работ предусматривала проведение соответствующих измерений в 16 створах. Температуру измеряли с шагом по глубине 1 м с помощью специализированных приборов WTWProfiLineCond 1970i. Наблюдения за метеоэлементами (температурой воздуха, направлением и скоростью ветра, влажностью, давлением и другими параметрами с заданным интервалом 5 мин) проводили в автоматическом режиме с помощью портативной полевой метеостанции Kestrel 4500. После обработки данных было получено распределение температуры по акватории и глубине водохранилища в районе водопользования Пермской ГРЭС при конкретных метеоусловиях (рис. 5, 6).

Для моделирования теплового воздействия в зоне влияния Пермской ГРЭС использовалась аналогичная комбинированная схема, построенная на основе сопряжения моделей в 1D, 2D, 3D постановке. Полученные в рамках 3D моделирования расчетные зависимости распределения температуры воды по глубине на отдельных характерных вертикалях в контрольных створах представлены на рис. 7.

Как следует из сопоставления рис. 6 и 7, построенная гидродинамическая модель в 3D приближении хорошо воспроизводит распределение температурных полей на рассматриваемом участке водохранилища в зоне теплового воздействия Пермской ГРЭС. На основе отработанной модели проведены сценарные расчеты для экстремальных метеорологических условий и технологических характеристик забора свежей воды и выработаны рекомендации по минимизации неблагоприятных последствий.

Расчет зон загрязнений вследствие поступления сточных вод с высокой плотностью

Существенная ненулевая плавучесть отводимых стоков, формирующая плотностные эффекты и обуславливающая применение для их описания гидродинамических моделей в 3D постановке, может быть связана не только с повышенной температурой, но и с повышенной минерализацией стоков. К сожалению, задачи распространения сточных вод с ненулевой плавучестью вследствие их высокой минерализации до последнего времени, как правило, не рассматривались. Однако для бассейна Верхней Камы данный вопрос очень актуален из-за проблемы утилизации высокоминерализованных рассолов. В данном районе располагается одно из крупнейших в мире месторождений калийных и магниевых руд, при добыче которых производится обогащение в водной фазе (для растворения 1 т руды требуется около 3 м³ воды). В связи с этим приобретает особую актуальность исследование поведения высокоминерализованных рассолов в поверхностных водных объектах. Характерной особенностью отводимых избыточных рассолов предприятий калийной промышленности является их значительная минерализация (~300 г/л) и, соответственно, высокая плотность (~1200 г/л).

Тяжелые рассолы из-за подавления вертикальных турбулентных пульсаций могут распространяться на значительные расстояния, не снижая заметно концентрации [14, 15]. Данная задача в масштабах Соликамско-Березниковского промузла решалась также на основе комбинированной схемы построения расчетной модели [8]. Для изучения влияния плотностной стратификации на процессы разбавления и переноса высокоминерализованных рассолов были проведены вычислительные эксперименты для различных вариантов как поступления избыточных рассолов в Камское водохранилище, так и гидрологического режима водохранилища.

Расчеты проводились с использованием коммерческого пакета ANSYS Fluent, реализующего метод конечных объемов [14, 16]. Использовалась $k-\epsilon$ модель турбулентности. В уравнениях для турбулентной кинетической энергии и скорости учитывался вклад эффектов плотностной стратификации. На входе расчетной области задавалась постоянная скорость основного потока, имеющая одну ненулевую компоненту, и постоянная концентрация, равная фоновой концентрации примеси в реке. Сетку строили с помощью программы Gambit 2.4.16, расчетную область разбивали на ячейки со сгущением вблизи выпускного отверстия. Основные расчеты проведены с использованием сетки, состоящей примерно из $4 \cdot 10^5$ элементов. На рис. 8 представлены результаты модельных расчетов при поступлении рассолов через щелеобразный водовыпуск вблизи дна при скорости истечения $U = 2,4$ м/с, скорость основного течения $V = 0,1$ м/с, минерализация отводимых рассолов варьировала от 1 до 300 г/л, фоновая концентрация соли в воде водоема-приемника принималась 0,2 г/л.

Рис. 8. Зависимость относительной концентрации рассолов по глубине на расстояниях 60 и 80 м от выпускного отверстия (сплошные линии – начальная концентрация $C_0 = 10$ г/л, штриховые линии $C_0 = 300$ г/л, начальная скорость сброса $U = 2,4$ м/с, скорость основного потока $V = 0,1$ м/с).

Результаты вычислительных экспериментов с диаметром $d = 0,05$ м при различных скоростях истечения представлены на рис. 9. Распределение поля минерализации при поверхностном отведении избыточных рассолов отражено на рис. 10.

Даже при поверхностном расположении форсунок зона максимальных концентраций достаточно быстро, вследствие высокой плотности отводимых стоков, смещается в придонную область. Процессы разбавления плотных рассолов протекают с существенным отличием от разбавления гидродинамически пассивных примесей. Вследствие возникновения запирающего слоя они могут распространяться, не снижая концентраций, на весьма значительные расстояния (рис. 8–10). Данное обстоятельство необходимо учитывать при регламентации отведения избыточных рассолов и оценке их воздействия на поверхностные водные объекты.

ВЫВОДЫ

Плотностные стратификационные эффекты, обуславливаемые неоднородностью распределения температурных полей и полей минерализации, могут играть существенную роль в формировании как гидрологического, так и гидрохимического режима поверхностных водных объектов. Между тем, они не могут быть описаны в рамках гидродинамических моделей в постановке мелкой воды.

Такие эффекты, как показано в представленном исследовании на конкретных примерах, могут быть весьма успешно описаны при использовании гидродинамических моделей в 3D постановке. К сожалению, широкое применение данных технологий в гидрологических и водохозяйственных расчетах сдерживается высокими требованиями к вычислительным ресурсам. В связи с этим представляется весьма перспективным использование моделей в 3D постановке в сопряжении с моделями в 1D и 2D постановках. Данный подход позволяет при минимальной плотности гидрометрической сети и ограниченности доступных вычислительных ресурсов проводить детальные гидродинамические расчеты в 3D постановке для наиболее важных объектов, а также учитывать для них плотностные эффекты, играющие в ряде случаев определяющую роль при оценке их возможного хозяйственного использования. Эффективность подхода, основанного на сопряжении гидродинамических моделей в 1D, 2D, 3D постановках, продемонстрирована на трех конкретных примерах: формирование качества воды ниже слияния находящихся в подпоре от Камской ГЭС рек Чусовой и Сылвы; особенности структуры и характер формирования зон теплового загрязнения Камского водохранилища вследствие работы Пермской ГРЭС; особенности распространения в водных объектах сточных вод, характеризующихся высокой плотностью. Показано, что предложенная схема расчетов позволяет достаточно эффективно воспроизвести процессы подтекания в зимний период более плотных водных масс р. Сылвы под воды р. Чусовой, что имеет принципиальное значение для обеспечения устойчивости питьевого водоснабжения г. Перми по показателю «жесткость воды».

Расчет формируемых под воздействием сброса термальных стоков Пермской ГРЭС зон теплового загрязнения показал, что предложенный подход позволяет значительно более объективно воспроизводить и оценивать характер рассматриваемых температурных полей, чем традиционная гидродинамическая модель в 2D постановке в приближении мелкой воды. Данная модель неэффективна в водохранилищах не только при описании поведения сточных вод с положительной плавучестью, но и с отрицательной, что имеет место при поступлении плотных стоков. Оценка воздействия поступающих в Камское водохранилище избыточных рассолов предприятий калийной промышленности показала высокую эффективность предложенной методики расчетов по сравнению с рекомендуемыми в действующих нормативно-методических документах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Иваненко С.А.* Расчет течений в водоемах на криволинейных сетках. М.: Вычислительный центр АН СССР, 1991. 64 с.
2. *Лепихин А.П., Садохина Е.А., Иваненко С.А.* Опыт создания и эксплуатации гидродинамических моделей крупных водохранилищ (на примере Камского и Воткинского водохранилищ // Глобальные природно-антропогенные процессы и экология среды обитания. Сб. тр. 1996. Вып. 4. С. 53–66.
3. *Чурусаева В.В., Старченко А.В.* Математическая модель и численный метод для расчета турбулентного течения в русле реки // Вестник Томского ун-та: сер. Математика. Механика. 2015. № 6 (38). С. 100–112.
4. *Лепихин А.П., Перепелица Д.И., Тиунов А.А.* Анализ и обоснование возможных схем защиты г. Кунгура от наводнений // Водное хозяйство России. 2007. № 2. С. 80–94.
5. *Лепихин А.П., Ляхин Ю.С., Тиунов А.А., Дробный О.Ф., Вахромеев И.Е.* Отработка возможных схем снижения воздействия ОАО «МКК» на Магнитогорское водохранилище на основе вычислительных экспериментов // Водное хозяйство России. 2014. № 5. С. 85–96.
6. *Лепихин А.П., Немковский Б.Б., Онянов В.А., Капитанова Е.Н.* Селективный отбор воды // Водоснабжение и санитарная техника. 1988. № 3. С. 27–28.
7. *Лепихин А.П., Любимова Т.П., Паршакова Я.Н., Возняк А.А., Коновалов В.В., Шумилова Н.С.* Использование стратификационных эффектов для селективного забора воды из поверхностных водных объектов на питьевые цели // Водное хозяйство России. 2011. № 5. С. 89–109.
8. *Лепихин А.П., Любимова Т.П., Паршакова Я.Н., Тиунов А.А.* Комбинированный подход к описанию плотностных эффектов разбавления и переноса высокоминерализованных рассолов в водных объектах // Вестник Пермского ун-та. Серия: Математика. Механика. Информатика. 2011. № 5. С. 130–134.
9. *Lyubimova T., Lepihin A., Parshakova Y., Konovalov V., Tiunov A.* Formation of the density currents in the zone of confluence of two rivers // J. of Hydrology. 2014. 508. P. 328–342.
10. *Бернадский Н.М., Проскуряков Б.В.* Опыт теории и практика расчета прудово-холодильников // Мат-лы по гидрологии, гидрографии и водным силам СССР. Т.V. М.-А.: ГНТИ, 1931. 128 с.

11. *Бернадский Н.М.* Теория турбулентного потока и ее применение к построению течений в открытых водоемах // Мат-лы по гидрологии, гидрографии и водным силам СССР. М. Теплоэнергопроект, 1933. 95 с.
12. *Архипов Б.В., Киселев В.Г., Солбаков В.В.* Двумерная модель термического режима водоема сложной формы // Тр. ИОФАН. 1997. Т. 53. С. 89–100.
13. *Апухтин А.А., Клеванная М.К., Квеванный К.А., Смирнова Е.В.* Расчет максимальной температуры воды в Белоярском водохранилище // Метеорология и гидрология. 2013. № 12. С. 85–91.
14. *Лепихин А.П., Любимова Т.П., Паршакова Я.Н., Тиунов А.А.* Численное моделирование разбавления и переноса высокоминерализованных рассолов в турбулентных потоках // Вычислительная механика сплошных сред. 2010. № 5. С. 68–79.
15. *Лепихин А.П., Любимова Т.П., Паршакова Я.Н., Тиунов А.А.* К проблеме отведения избыточных рассолов предприятиями калийной промышленности в водные объекты // Водное хозяйство России. 2010. № 3. С. 57–74.
16. *Лепихин А.П., Любимова Т.П., Паршакова Я.Н., Тиунов А.А.* К проблеме утилизации избыточных рассолов предприятиями калийной промышленности в водные объекты // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2012. № 2. С. 185–193.
17. *Lyubimova T., Lepihin A., Parshakova Ya., Tiunov A.* The risk of river pollution due to washout from contaminated floodplain water bodies during periods of high magnitude floods // J. of Hydrology. 2016. Vol. 534. P. 579–589.

Сведения об авторах:

Лепихин Анатолий Павлович, д-р геогр. наук, профессор, заведующий лабораторией проблем гидрологии суши, ФГБУН «Горный институт Уральского отделения Российской академии наук» (ГИ УрО РАН), Россия, 614007, ул. Сибирская 78А; директор Камского филиала ФГБУ «Российский научно-исследовательский институт комплексного использования и охраны водных ресурсов» (КамНИИВХ), Россия, 614007, г. Пермь, ул. Островского 113; e-mail: lepihin49@mail.ru

Любимова Татьяна Петровна, д-р физ.-мат. наук, профессор, заведующий лабораторией вычислительной гидродинамики, ФГБУН «Институт механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук» (ИМСС УрО РАН), Россия, 614013, г. Пермь, ул. Ак. Королева, 1; e-mail: lubimova@psu.ru

Паршакова Яна Николаевна, канд. физ.-мат. наук, научный сотрудник, ФГБУН «Институт механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук» (ИМСС УрО РАН), Россия, 614013, г. Пермь, ул. Ак. Королева, 1; e-mail: parshakova@icmm.ru

Ляхин Юрий Сергеевич, инженер, лаборатория проблем гидрологии суши, ФГБУН «Горный институт Уральского отделения Российской академии наук», Россия, 614007, г. Пермь, ул. Сибирская, 78А

Богомоллов Андрей Владимирович, младший научный сотрудник, лаборатория проблем гидрологии суши, ФГБУН «Горный институт Уральского отделения Российской академии наук», Россия, 614007, г. Пермь, ул. Сибирская, 78А; e-mail: whitewing85@mail.ru