УДК 504.4.054:51.001

ПРОБЛЕМЫ СОЗДАНИЯ ГИДРОХИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ РЕК И ВОДОХРАНИЛИЩ НА ПРИМЕРЕ МОСКВЫ РЕКИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА HEC-RAS

© 2014 Д.А. Никифоров

Институт водных проблем РАН, г. Москва

Поступила в редакцию 21.05.2014

Для прогнозирования качества воды на участках рек и водохранилищ создается гидрохимическая модель этих водных объектов для возможности компьютерных расчетов распространения загрязнений. Рассматриваются связанные с созданием гидрохимической модели проблемы разработки гидравлической модели реки и калибровки указанных моделей. Тема раскрывается на примере участка Москвы реки в черте мегаполиса и использования программного комплекса гидравлических расчетов HEC-RAS.

Ключевые слова: *гидрохимическое моделирование, загрязнение, программный комплекс, гидравлика*

Наравне с гидравлическими расчетами рек и водохранилищ, гидрохимические расчеты качества воды в водных объектах в естественных и антропогенно-измененных условиях являются актуальной задачей для гидравлического и гидрохимического моделирования водных объектов. Одним из важных направлений гидрохимических расчетов является прогноз режима загрязнений и трансформации загрязнений на участке водного объекта по откалиброванной гидравлической модели. Гидрохимические расчеты используются для оценки распространения загрязняющих веществ (ЗВ) на участке реки и в водохранилище, что необходимо для прогноза изменения качества воды при изменениях водности в условиях стационарного режима загрязнений и при увеличении нагрузки ЗВ на водный объект вплоть до выявления и отслеживания возможных катастрофических изменений качества воды в водном объекте, для определения максимальной нагрузки ЗВ, когда река остается еще в пределах допустимых характеристик качества - это предельно допустимые загрязнения (предельно допустимая нагрузка), а также для контроля сбросов загрязняющих веществ.

Актуальность создания гидрохимических моделей рек и водохранилищ обусловлена возрастающей потребностью в водных ресурсах, являющихся составляющей устойчивого хозяйственного развития общества, и большим вниманием к качеству воды водных объектов, особенно там, где они являются источником питьевого водоснабжения сравнительно крупных населенных пунктов. Стоит также упомянуть интерес к гидрохимическим расчетам при аварийных ситуациях разного рода для определения их последствий. Так, при поступлениях больших объемов несанкционированных загрязнений возможны разные варианты изменения качества воды реки или водохранилища и состава в ней ЗВ, и в данном случае огромное значение приобретает корректность гидродинамической модели. При аварийной ситуации на нефтепроводах, пересекающих реку, очистных и водоподготавливающих сооружениях расчет качества воды и прогноз распространения загрязнений ниже по течению рассматривается как первостепенная задача оценки экологических последствий загрязнений. Хорошо подобранная для рассматриваемого водного объекта модель гидрохимических расчетов в экстренных случаях помогает определить створы аварийных сбросов ЗВ.

Водные объекты испытывают влияние антропогенной деятельности в отношении загрязнений двух видов: прямое загрязнение - непосредственное загрязнение водных объектов сбросами ЗВ с заводов, фабрик, площадей жилой застройки и др. - это точечные источники загрязнений. Косвенное загрязнение вод происходит как результат проведения различной хозяйственной деятельности на водосборах рек и водохранилищ: удобрение земельных угодий, разработка полезных ископаемых, загрязнение вод через загрязнение атмосферы выбросами ЗВ в воздушную среду - эти диффузные виды загрязнений распространяются по длине реки и водохранилища и на площади. Режим точечных источников загрязнений стационарный (без аварийных сбросов), он может лишь медленно меняться по сезонам года. На режим точечных

Никифоров Дмитрий Алексеевич, аспирант. E-mail:dmitry.nikif@gmail.com

источников загрязнений гидрологический режим стока реки существенного влияния не оказывает. Режим же диффузных источников загрязнений нестационарен в принципе. Влияние на режим диффузных источников гидрологического режима реки существенно. Смыв в половодье с прилегающих к реке площадей накопленных на водосборе ЗВ существенно увеличивает их концентрацию в воде. Зачастую наблюдается парадокс: весной в половодье при значительных объемах воды в реке и на затопленной пойме концентрация ЗВ выше, чем летом, когда в реке текут минимальные расходы. Все это результат «работы» диффузных источников загрязнений.

Подготовленные гидродинамическая и гидрохимическая модели участка реки с водохранилищем при наличии информации о режиме гидрологического притока к участку реки за определенный период времени и объемах сбросов загрязнений позволяют прогнозировать концентрации ЗВ на всем протяжении водного объекта во всех заданных створах, и проводить эти гидродинамические и гидрохимические расчеты неоднократно. Важно отметить связь гидрохимических и гидравлических расчетов – любые гидрохимические расчеты основаны на режимах, смоделированных с помощью гидравлической модели.

Как и гидравлические расчеты, гидрохимические расчеты качества воды можно проводить на разных програмных комплексах, разработанных, как в России, так и за рубежом. Самыми распространенными программами являются: MIKE-11 (Датский институт гидравлических исследований), HEC-RAS (корпус американских военных инженеров) [11], SOBEK (Голландия). Есть и отечественные программы, например, WPI-RQC (Water Problem Institute - River Quality Control), разработанная в институте водных проблем ИВП РАН [33], она считает перенос и трансформацию загрязнений от точечных и диффузных источников. Основные различия программ заключаются в методике учета параметров водных объектов, а также в возможности рассчитывать степень загрязнения водного объекта от разных источников - химические, биологические, физические загрязнители и совокупная нагрузка загрязнений.

Загрязнение вод проявляется в изменении физических и органолептических свойств - снижении прозрачности, изменении окраски, запахов, вкуса, увеличении содержания солей, изменении ионного состава, тяжелых металлов, уменьшении растворенного в воде кислорода, появлении радиоактивных элементов, болезнетворных бактерий и других загрязнителей. К наиболее распространенным химическим загрязнителям относят нефть и нефтепродукты, синтетические поверхностно-активные вещества (СПАВ), поверхностно-активные вещества (ПАВ), пестициды, тяжелые металлы, диоксиды и др. Очень опасными являются биологические загрязнители, например, вирусы, бактерии, грибы и др. К физическим загрязнителям относятся радиоактивные вещества и тепло. Наиболее часто встречаются химическое и бактериальное загрязнения. Значительно реже наблюдаются радиоактивное и тепловое загрязнения. Механическое загрязнение характеризуется попаданием в воду различных механических примесей - песка, шлама, ила и пр. Механические примеси в большом объеме значительно ухудшают органолептические показатели качества воды и отрицательно влияют на условия обитания рыб и состояние экосистем. Тепловое загрязнение проявляется в повышении температуры воды и появляется как результат смешивания с более нагретыми поверхностными или технологическими водами, в результате чего происходит изменение газового и химического состава воды, размножение анаэробных бактерий, рост количества гидробионтов и выделение ядовитых газов – сероводорода и метана.

Большую опасность для экосистем водоемов со стоячей водой представляет накопление органики, поступающей с сельскохозяйственными и животноводческими стоками, содержащими биогенные элементы, в том числе азот и фосфор. В результате в водоеме развивается процесс *эвтрофикации*, т.е. повышения биологической продуктивности водных объектов вследствие накопления биогенных элементов, сопровождающейся «цветением воды» из-за массового размножения фитопланктона, синезеленых водорослей и высших водных растений.

Точечные источники осуществляют загрязнение сбросами в реки и водоемы неочищенных сточных вод. Промышленные сточные воды загрязняют экосистемы разнообразными компонентами в зависимости от специфики отраслей промышленности. В коммунально-бытовых сточных водах преобладают органические вещества и микроорганизмы, что может вызвать бактериальное загрязнение. Точечные загрязнения могут также быть вызваны авариями на нефтепромыслах, нефтепроводах и нефтеналивных судах, при сбросе с судов балластных вод и др. причин. Даже без аварий известно, что небольшие, но повторяющиеся постоянно потери на нефтескважинах, загрязняют территорию вокруг нее самым серьезным образом. Совершенно иной состав загрязнений точечно и в определенные промежутки времени сбрасывается в реки и водоемы животноводческими комплексами.

Диффузные источники осуществляют загрязнения водных объектов, прежде всего, путем смыва и оседания ЗВ из атмосферы. Большое

количество пестицидов, аммонийного и нитратного азота, фосфора, калия смывается с сельскохозяйственных территорий, газодымовые соединения (аэрозоли, пыль), оседают из атмосферы на поверхность водосборных бассейнов и непосредственно на водные поверхности. К естественным диффузным источникам загрязнения относятся сильно минерализованные подземные воды (соленые и рассолы), которые могут внедряться в пресные незагрязненные воды рек и водоемов. Загрязнение подземных вод напрямую влияет на качество поверхностных, но проявляется через значительные промежутки времени, причем загрязнения подземных вод не ограничивается местом тех предприятий и хранилищ отходов, загрязняющих подземные воды, а распространяются вниз по подземному потоку на расстояния до 20-30 км от источников загрязнений и влияет на открытые водные объекты, особенно в период меженного стока.

На основе проведенного системного анализа процессов загрязнений водных объектов и самих ЗВ формулированы условия, цели и задачи цифровой модели гидрохимических расчетов рек и водоемов.

1. Цифровая гидрохимическая модель представляет собой набор данных в памяти компьютера, структурированных по требованиям программы расчетов распространения загрязнений в реке и оценки качества вод (в нашей работе применялся программный комплекс HEC-RAS). Гидрохимическая модель использует результаты гидравлических расчетов водного объекта, поэтому работает на фундаменте созданной гидравлической модели, являясь как бы надстройкой к ней. Модель состоит из системы створов с описанием поперечных сечений и других данных по ним (базовая модель геометрии реки), гидрологической информации (оперативные данные гидравлических расчетов), фиксированного набора ингредиентов ЗВ и показателей, характеризующих изменение их концентраций в воде (базовая модель распространения ЗВ), также оперативные данные об объемах и составе сбросов сточных вод.

2. В базовую модель распространения ЗВ включается фоновые концентрации ЗВ на рассматриваемом участке реки в мг/л, коэффициенты дисперсии (диффузии) в $м^2/с$, коэффициенты неконсервативности или распада органических веществ в 1/сутки, коэффициенты осаждения неорганических примесей, коэффициенты сорбции [3, 7]. Существуют различные табличные данные с указанием этих величин в различных справочниках по гидравлическим расчетам и химии природных вод. Для речных вод это значение равняется 101 $м^2/с$ при температуре воды 20^oC, для большинства расчетов принята эта величина. Базовыми являются и данные ближайшей к водному объекту метеостанции на водосборе: координаты местности, высота над уровнем моря, варианты температуры воздуха, влажности, показателя облачности в баллах, скорости ветра, атмосферного давления, показателя коротковолновой солнечной радиации, приходящей к земле.

3. Гидрохимический расчет использует результаты, как правило, установившегося движения воды в реке, поскольку даже, если при пропуске половодий и паводков реализуется неустановившееся движение, это медленно изменяющееся движение, при котором скорость процессов распространения загрязнений сильно превышает скорость изменения расходов в реке.

4. Данные по сбросам ЗВ точечных источников загрязнений можно получить по отчетам предприятий и коммунальных служб, как правило, проверяемых иногда прямыми измерениями концентраций в сбросных водах. Данные же сбросов диффузных загрязнений с сельскохозяйственных угодий, из атмосферы и др. источников получить можно лишь косвенным путем на основе литературных прикидочных норм с высокой ошибкой конкретного применения.

5. Большая часть заданных створов, по которым ведется расчет распространения загрязнений, представляют собой створы, выбранные для гидравлической модели участка реки с водохранилищем. Среди этих створов есть створы наблюдений за уровнями (иногда сопровождается и вычислением расходов) и створы гидрохимических наблюдений, на которых ведется систематический отбор воды и анализ концентраций содержащихся ЗВ.

6. Серьезной и трудоемкой задачей подготовки гидрохимической модели участка реки с водохранилищем, как и для подготовки гидравлической модели участка, является ее калибровка. Калибровка гидравлической модели заключается в корректировке заданных первоначально поперечных сечений реки таким образом, чтобы оценка разбежки уровней на створах наблюдений в результате гидравлических расчетов при тех же гидрологических условиях расходов установившегося или неустановившегося движения воды в реке была бы минимальной от фактических уровней на створах наблюдений [8]. За оценку может быть принята среднеквадратичная ошибка или диапазон максимального и минимального значений уровней при неустановившемся течении.

Калибровка гидрохимической модели состоит в корректировке заданных базовых величин концентраций фоновых загрязнений, коэффициентов распада, осаждения, сорбции таким образом, чтобы концентрации ингредиентов ЗВ, вычисленных по расчету распространения их в реке и водохранилище, минимально отличались

бы от полученных фактических данных на створах наблюдений при одинаковых условиях гидрологии и поступления загрязнений. При установившемся движении проводится прямое сравнение величин расчетных и фактических концентраций, при неустановившемся течение реки оценками сравнения расчетных и фактических концентраций по ингредиентам является среднеквадратичное отклонение или диапазон максимума минимума.

7. Поскольку для рек и водохранилищ сложно получить верные данные о величине сбросов в них ЗВ, особенно в отношении диффузных источников загрязнений, можно использовать интегрированную по времени оценку концентрации загрязнителей, т.е. за достаточно длительный интервал времени, при котором число наблюдений велико и ошибки полученных данных сглаживаются. Это касается и точечных и диффузных источников загрязнений; в отношении последних могут быть применены методы исследований в условиях неопределенности.

В исследованиях использовался программный комплекс HEC-RAS, предназначенный для проведения гидравлических расчетов рек, а также расчетов режима движения наносов и расчетов гидрохимических параметров рек и водоемов. Работа с программой начинается с построения гидравлической модели рассматриваемого участка реки и водохранилища: рисуется схема участка, отмечаются на ней расчетные створы, вводится базовая информация по поперечным сечениям реки и водохранилища, затем вводится гидрологическая информации, возможен ряд ее вариантов. Проводятся расчеты с последующей калибровкой гидравлической модели. Корректность гидрохимических расчетов во многом зависит от качества подготовленной гидродинамической модели.

Программный комплекс HEC-RAS позволяет рассчитывать параметры загрязнений трех видов: температурное моделирование (подразумевает расчет температурного распределения водных масс), моделирование распространения и трансформации органических веществ, моделирование неорганических ингредиентов загрязнений. Гидрохимический блок в модели HEC-RAS позволяет осуществлять гидрохимический расчет при трех видах движения воды: установившимся, так наываемым квазиустановившимся, неустановившимся. Для расчета необходима информация о расходах загрязняющих веществ по каждому створу. При недостатке информации о температурном и гидрохимическом режимах, программа интерполирует данные на створах с недостающей информацией, причем процесс интерполяции можно задавать автоматически или проводить вручную с определенными параметрами интерполяции.

Для гидрохимического расчета необходимо установить граничные и начальные условия расчета. Граничные условия задаются при помощи данных по содержанию загрязняющих веществ в водном объекте на определенных створах, причем можно задать граничные условия для любого числа этих створов. Можно вводить информацию граничных условий в различных видах: табличные данные, файл, составленный в Microsoft office Excel или задать в виде постоянных величин, что наиболее удобно при расчетах с использованием гидравлической модели установившегося движения. Начальные условия расчета задаются с использованием готового файла или прямым указанием начальных данных по концентрациям и температуре.

В гидрохимической модели, подготавливаемой в HEC-RAS, дана возможность представить данные по взаимодействию и трансформации органических веществ. Если у автора и пользователя модели есть информация о процессах взаимодействия и трансформации органических веществ, а также некоторых химических соединений, он может свободно устанавливать нужные данные, заданные в модели изначально «по умолчанию». В основе расчетов распространения загрязнений в HEC-RAS лежат известные уравнения Стритера-Фелпса [12]. В работе [1] предложена поправка к ним, уточняющая скорость окисления органических веществ растворенным кислородом, что позволяет более точно определить коэффициент трансформации веществ.

Результаты расчета по составленной цифровой гидрохимической модели реки можно видеть на автоматически сформированных программой таблицах. Кроме того можно визуализировать графики распределения изменения концентраций ЗВ и температур для установившегося или неустановившегося движения воды. При неустановившемся движении расчет в гидрохимическом блоке производится с использованием временного интервала, который задается перед расчетом в данных и который должен быть больше или равен временному интервалу, использованному при предварительной работе с гидродинамической моделью неустановившегося движения.

Калибровка гидрохимической модели реки и водохранилища также важна, как гидравлической модели. Процессы калибровки моделей представляет собой по сути решения обратных задач гидравлики и распространения загрязнений. Однако анализ технической литературы по гидравлическим моделям рек показал, что, несмотря на указание в необходимости проведения процедуры калибровки и определение ряда базовых параметров моделей, формализация процесса калибровки нигде не описана. В ряде

источников даны практические приемы калибровки для разных режимов, однако, авторы не рассматривают проблему в виде общей теории, позволяющей единообразно подходить к калибровке гидравлических и гидрохимических моделей в целом [2, 4]. Общий принцип калибровки моделей представляет собой сравнение полученных после расчета и имеющихся фактических данных по различным параметрам на известных гидрологических постах наблюдений, вычисление различий между этими данными, по возможности, устранение этих различий до максимального приближения к фактическим данным корректировкой параметров модели [5, 6, 9, 10]. Каждый шаг калибровки по изменяемому параметру сопровождается новым расчетом и сравнением расчетных и фактических величин уровней и объемов воды или концентрации загрязнений. Общий алгоритм калибровки, как гидравлической, так и гидрохимической моделей по изменяемым параметрам можно описать принципиальной схемой алгоритма калибровки по итерациям:

1. Вычисление оценок разбежки вычисленных и фактических значений сравниваемых показателей на створах наблюдений.
2. Проверка точности приближения к решению, если калибровка признана удовлетворительной и не требуются дальнейшие уточнения - переход к п.9.
3. Определение для каждого створа необходимости корректировки по числу варьируемых параметров.
4. Выбор наиболее эффективных параметров корректировки.
5. Определение величин коррекции выбранных для вариации параметров.
6. Изменение данных цифровой модели участка реки.
7. Проведение расчета по откорректированной модели.
8. Переход к пункту 1.
9. Конец алгоритма.

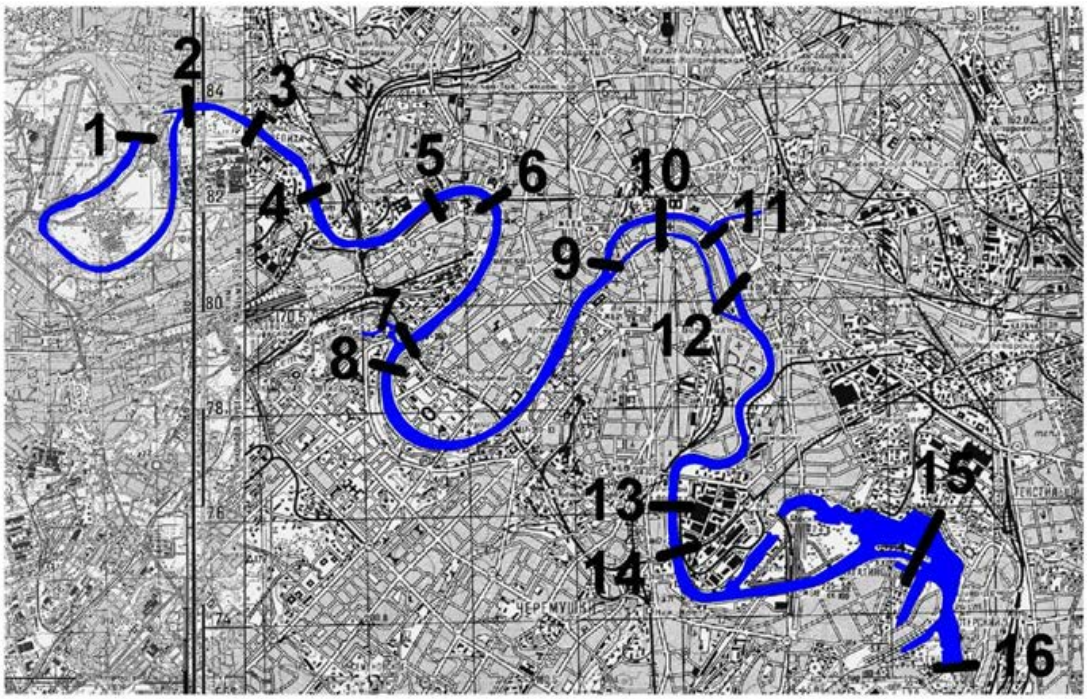

Рис. 1. Карта участка гидрохимического расчета р. Москвы

Для исследования процесса калибровки гидрохимической модели, а также в целях получения определенных результатов моделирования была создана гидравлическая и потом гидрохимическая модель участка Москвы-реки в черте г. Москва (рис. 1). Гидрохимическое моделирование на примере р. Москвы проводилось на участке Карамышевская плотина - Перервинская плотина с учетом двух наиболее крупных притоков р. Москвы на этом участке – р. Сетунь и р. Яуза. Морфометрия данного участка реки простая и реализация гидравлической модели позволяет быстро осуществлять расчеты пропуска расходов установившегося и неустановившегося потоков. Гидрохимическая же модель усложнена многочисленными впадениями речек – притоков р. Москвы, многие из которых давно заключены в трубы и имеют сложные режимы сбросных сильно загрязненных расходов.

Створы слежения за концентрацией загрязнений следующие: 1 - плотина Карамышевского гидроузла; 2 - Карамышевская набережная; 3 - устье р. Таракановки; 4 - устье р. Филька; 5 - ручей Ваганьковский Студенец; 6 - устье р.

Пресня; 7 - Бережковский мост; 8 – устье р. Сетунь; 9 - Бабьегородская плотина; 10 - Большой Москворецкий мост, устье р. Неглинки; 11 – устье р. Яуза; 12 - Большой Краснохолмский мост; 13 - устье р. Чура; 14 - устье р. Котловка; 15 – завод АМО ЗИЛ; 16 - Перервинская плотина. Все указанные притоки реки Москвы используются для канализации.

Следует отметить, что принятый для создания гидрохимической модели объект очень хорошо освещен данными наблюдений, поскольку измерения концентраций ЗВ на всех указанных на плане реки створах проводятся ежедневно. Разработанная гидрохимическая модель будет использована для исследований режимов загрязнений в р. Москве и планирования мероприятий по очищению реки, но обсуждение ряда уже полученных результатов расчетов не входит в цели настоящей статьи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. *Готовцев А.В.* Модификация системы Стритера-Фелпса с целью учета обратной связи между концентрацией растворенного кислорода и скоростью окисления органического вещества // Водные ресурсы. 2010. Т. 37, №2. С. 250-256.
2. *Грушевский, М.С.* «Неустановившееся движение воды в реках и каналах». – Л.: Гидрометеоиздат, 1982. 288 с.
3. *Долгоносов, Б.М.* Нелинейная модель трансформации примесей в водной среде / *Б.М. Долгоносов, Т.Н. Губернаторова* // ИВП РАН, www.iwp.ru/sites/files/iwp.ru
4. *Кюнж, Ж.А.* Численные методы в задачах речной гидравлики: практ. применение / *Ж.А. Кюнж, Ф.М. Холли, А. Вервей*. – М.: Энергоиздат, 1984. 255 с.
5. *Левит-Гуревич, Л.К.* Калибровка гидравлической модели реки методом многомерного поиска Фибоначчи // Фундаментальные проблемы водных ресурсов. Мат-алы третьей Всерос. науч. конф. – Барнаул: Изд-во АРТ, 2010. С.162-167.
6. *Левит-Гуревич, Л.К.* Математические основы калибровки компьютерных гидравлических моделей рек и водохранилищ / *Л.К. Левит-Гуревич, Д.А. Никифоров* // Чистая вода России. Сб. мат-лов XII межд. науч.-практ. симпозиума. – Екатеринбург, 2013. С. 190-198.
7. Никаноров, А.М. Гидрохимия. Учебник. 2-е изд, перераб. и доп. – СПб: Гидрометеоиздат, 2001. 444 с.
8. *Никифоров, Д.А.* Калибровка цифровых компьютерных моделей для гидравлических расчетов рек и водохранилищ // Сб. трудов Всерос. науч. конф. «Вода и водные ресурсы: системобразующие функции в природе и экономике». – Новочеркасск, 2012. С. 454-461.
9. *Никифоров, Д.А.* Влияние корректировки параметров программного комплекса HEC-RAS на точность гидравлических расчетов и формализация процесса калибровки гидравлических моделей рек и водохранилищ // Чистая вода России. Сб. мат-лов XII межд. науч.-практ. симпозиума. – Екатеринбург, 2013. С. 226-234.
10. *Никифоров, Д.А.* Калибровка гидравлических моделей рек и водохранилищ. Влияние корректировки параметров программной модели на точность гидравлических расчетов // Современные проблемы водохранилищ и их водосборов. Труды межд. науч.-практ. конф. Управление водными ресурсами. Гидро- и геодинамические процессы. Том I. – Пермь, 2013. С. 253-260.
11. “HEC-RAS River Analysis System”, U.S. Army Corps or Engineers, Davis, California, 1995.
12. *Streeter, H.W.* A study of the pollution and natural purification of the Ohaio River / *H.W. Streeter, E.B. Phelps* // U.S. Publ. Health Service Bull. 1925. №146, P.1-75.

PROBLEMS OF CREATION THE RIVERS AND RESERVOIRS HYDROCHEMICAL MODELS ON THE EXAMPLE OF MOSCOW RIVER WITH THE HELP OF HEC-RAS PROGRAM COMPLEX

© 2014 D. A. Nikiforov

Institute of Water Problems RAS, Moscow

For prediction the water quality on parts of rivers and reservoirs the hydrochemical model of these water objects for possibility of computer calculations of pollution distribution is created. Bound to creation the hydrochemical model problems of development the hydraulic analog of the river and calibration of the specified models are considered. The subject reveals on the example of a part of Moscow river within the megalopolis and use of HEC-RAS program complex for hydraulic calculations.

Key words: *hydrochemical modeling, pollution, program complex, hydraulics*

Dmitriy Nikiforov, Post-graduate Student. E-mail: dmitry.nikif@gmail.com