

Гидравлика и инженерная гидрология

УДК 502/504:556

М. В. БОЛГОВ, Г. Ф. КРАСНОЖОН, К. Ю. ШАТАЛОВА

Институт водных проблем РАН

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЙ УРОВНЯ ВОДЫ НА НИЖНЕЙ ВОЛГЕ

Описана структура гидродинамической модели Нижней Волги и приведены некоторые результаты компьютерного моделирования изменений уровней воды на участке от Волгоградской ГЭС до Каспийского моря.

Гидродинамическая модель, уровни и расходы воды, гидрометрические измерения, длина водотока, коэффициенты Шези, рассчитанный и модельные гидрографы.

There is described a structure of the hydrodynamic model of the Nizhniaya Volga and some results are given of the computer simulation of water level changes on the distance from the Volgogradskaya HEPs to the Caspian sea.

Hydrodynamic model, levels and consumptions of water, hydrometric measures, waterway length, Chezy factors, estimated and modeled hydrographs.

Среди разнообразия математических моделей неустановившегося движения речного потока, которые можно использовать для условий Нижней Волги, большой интерес для авторов статьи представляла модель с численным решением уравнений движения потока Сен-Венана. Реализовать такую модель для участка от Волгоградской ГЭС до Каспийского моря удалось на основе компьютерной системы SOBEK (Delft Hydraulics Software). При этом характер изменения уровней и расходов воды в дельте позволил

считать (значительную часть времени) движение воды квазиустановившимся, когда отсутствуют резкие кратковременные изменения объемов и скоростей движения воды, что в свою очередь дает возможность при численном решении системы уравнений Сен-Венана использовать одномерные варианты моделей и легко подбирать требуемые переменные (параметры).

Для условий межени в дельте Волги было рекомендовано применение одномерной математической модели,

позволяющей быстро вычислять уровни и расходы воды в рукавах, делать подбор (калибровку) по материалам наблюдений за уровнем на постах, проводить гидрометрические измерения, выбирать коэффициенты гидравлических сопротивлений на основных участках.

Коэффициент сопротивления зависит от числа Фруда (Fr), Рейнольдса (Re) и критерия гомохронности (в общем случае). Однако для равномерного (квазиустановившегося) турбулентного движения (установлено натурными измерениями), когда число Re достаточно велико, а число Fr мало, силу трения целесообразно описывать выражением, известным как уравнение Шези.

В модели на основе численного решения уравнения движения, известного как уравнение Сен-Венана (УСВ), и уравнения неразрывности потока определяют неизвестные гидравлические характеристики в любом рукаве и створе потока по любым заданным входным расходам или уровням воды и морфометрическим характеристикам в различных створах исследуемого участка бассейна (площадь живого сечения, гидравлический радиус и гидравлические сопротивления по участкам, т. е. коэффициенты Шези). Математическая основа гидравлической модели изложена в работе*.

Для разработанной структуры гидравлической модели назначены расчетные точки и участки от нижнего бьефа Волгоградского водохранилища по всем рукавам до морского края дельты, выбрана сетка 1×1 в масштабе карт $1:100\ 000$, рабочий шаг модели – 500 м. В модель для расчетов включены все основные рукава и протоки, действующие в период межени, ширина которых ориентировочно превышает $20...25$ м и обеспечивает пропуск расхода больше определенной величины.

* **Болгов, М. В.** Компьютерная гидравлическая модель многорукавной дельты Волги [Текст] / М. В. Болгов, Г. Ф. Красножон, К. Ю. Шаталова // Водные ресурсы Волги. Настоящее и будущее, проблемы управления : сборник статей Всероссийской научно-практической конференции. – Астрахань, 2008. – С. 35–41.

Гидрографическая расчетная схема модели создана на основе космоснимков бассейна Нижней Волги, топографических карт масштаба $1:100\ 000$ и лоцманских карт $1:25\ 000$ (1970, 1982) с учетом всех характерных точек русел (перегибов, разветвлений, островов и пр.). Выбраны расчетные участки, определены необходимые для расчетов поперечные сечения (flow cross section – 646 створов), глубина и ширина русел, площадь живого сечения. Положение расчетных узлов (flow connection node – 535 створов) выбрано с учетом рисунка гидрографической сети. Оболочка модели (Delft Hydraulics Software) дает возможность, используя в качестве подложки карту либо космоснимок объекта, соединять расчетные створы не прямыми линиями, а криволинейно по действующим руслам (рис. 1).

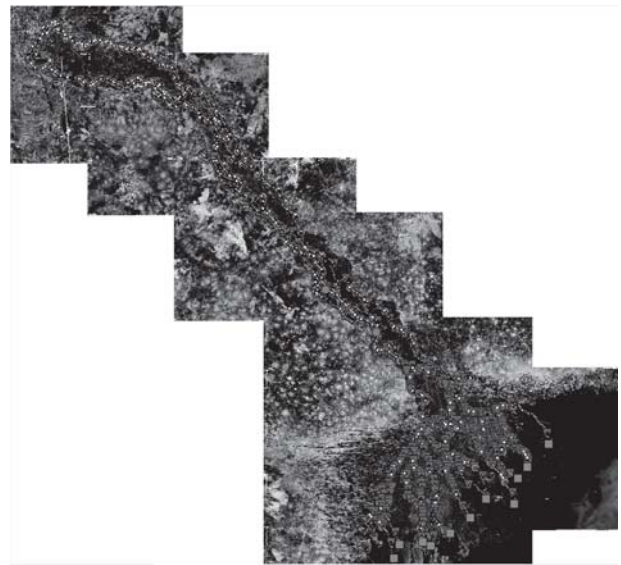


Рис. 1. Топографическая схема гидравлической модели Нижней Волги

Это позволяет назначить расчетные узлы там, где это действительно необходимо (в местах разветвления основных рукавов, на существующих постах наблюдений, в крупных населенных пунктах и т. д.), и отразить истинную длину каждого русла. Такая расчетная сеть создана вручную, но для корректной работы модели и получения наибольшей информации на выходе через каждые 500 м по длине водотоков (flow calculation point – 5761

створов) в автоматическом режиме добавлены так называемые расчетные точки. Таким образом, модель последовательно обрабатывает 7035 участков русел (flow channel). Характеристики поперечных сечений (ширина, глубина, высотные отметки) определяются либо по экспедиционным материалам ИВП РАН за прошлые годы, либо (при отсутствии данных) по лоцманским картам масштаба 1:25 000 (1970, 1982) или топокартам.

Модель Нижней Волги имеет один входной граничный узел (flow boundary), расположенный в створе Волгоградской ГЭС, и одиннадцать выходных в низовьях дельты. По условиям работы модели заданы разные типы граничных условий на входе и выходе: вход (верхний узел) – расход воды ($\text{м}^3/\text{с}$), выход (нижние узлы) – уровень (м абс).

В качестве верхних граничных условий были заданы ежедневные расходы воды (сбросы) в нижнем бьефе Волгоградской ГЭС, а для нижних – соответствующий уровень Каспийского моря. Уровень моря определяли по трем постам наблюдений – Искусственный, Двенадцатая Огневка и Карайский Маяк.

Для начальных условий задана глубина 1 м во всех ветвях водотока и расход на входе в течение 30 дней (до начала действительного периода моделирования). За это время модель достигает стационарных условий и результаты счета являются начальными условиями для дальнейшего моделирования.

На выходе модель позволяет получить следующие величины: уровень воды, глубина, превышение воды над поверхностным уровнем в узлах и расчетных точках, скорость течения и расходы на всех участках ветвей сети.

Для проверки работоспособности одномерной модели проведена пробная верификация, точнее, калибровка, при заданных сбросах из Волгоградского водохранилища и наблюдаемых уровнях воды в конце (низовья дельты, 11 замыкающих створов условия межени 1978 г.). Результаты расчетов сопоставлены с гидрологическими

измерениями в период экспедиционных работ 1978–1982 гг. и использованы при выборе коэффициентов Шези для модели. Измеренные в дельте Волги величины коэффициентов Шези находились в пределах от 15 до 65 $\text{м}^{1/2}/\text{с}$.

В результате обработки данных гидрометрических измерений определены среднестатистические для некоторых участков коэффициенты Шези, необходимые для модели. Окончательно их назначали по результатам калибровки в пределах 40...65.

Необходимо уточнить, что в уравнении Шези фигурирует обобщенный уклон трения, характеризующий все силы сопротивления и пропускную способность русла в районе измерений. В период межени все величины в формуле должны быть среднестатистическими, если местные колебания характеристик русел не оказывают значительного влияния.

Проверка одномерной модели в дельте.

При проверке модели в дельте вначале приняли единый постоянный коэффициент Шези $C = 55 \text{ м}^{1/2}/\text{с}$, который затем, в процессе калибровки, уточнялся. Модель калибровалась в период с 01 апреля до 10 декабря по измеренным на 17 постах дельты Волги и 3 постах Нижней Волги среднесуточным уровням 1978 г. При калибровке были выбраны коэффициенты Шези в пределах 40...66 $\text{м}^{1/2}/\text{с}$. При этом средняя ошибка (разница) вычисленных и наблюдаемых уровней воды равнялась 6,2 см при использовании одномерной модели. Величина стандартных отклонений не превышала 20 см, по калибровке она не превышала 22 см, а на 12 постах была ниже 20 см.

Валидация модели проводилась по данным 1977 г. и показала примерно такие же результаты, причем средняя ошибка была менее 10 см на 12 постах.

Проверка совместной одномерной и двумерной модели на участке дельты.

Использовать круглый год двумерную модель для условий дельты Волги не нужно. В периоды, когда уровень

воды находится в пределах речных берегов и вода не затопливает пойму, можно применять более простую одномерную модель. В дельфтской модели в качестве основы предлагается использовать одномерную модель, а для половодья – расширенную сетку с учетом затопленных в период половодья ячеек, изменяя граничные условия. Новые уровни учитываются в поперечных сечениях русловой расчетной сетки для случая одномерной модели. Изменения водного баланса рассчитываются на участках. Результаты калибровки такой совмещенной модели показали лучшие результаты по сравнению с одномерной моделью, особенно для периода половодья.

При использовании совместной модели необходимо иметь данные по площадям и контурам затопления. В большинстве случаев они устанавливаются либо по данным рекогносцировочных исследований, либо по данным космических съемок. По этим данным уточняются контуры затопления на расчетной сетке. Глубину воды в общем случае легко установить, зная уровни воды затопленной части дельты и данные по высотам рельефа дельты. Для этих целей необходимо иметь цифровую модель рельефа дельты. В Дельфтской модели цифровая модель была построена по материалам топографической карты масштаба 1:100 000 и атласа Нижней Волги 2002 г., а границы затопления взяты по данным со спутников за 2000–2001 гг.

Наибольшую трудность представляет выбор и назначение одинаковых для межени и половодья коэффициентов гидравлического сопротивления (коэффициентов Шези). Для их назначения использовали данные экспедиционных работ в дельте Волги, проводившихся в ИВП РАН во второй половине 70-х и начале 80-х гг. прошлого века, и литературных источников. По этим данным в дельте Волги наблюдаемые коэффициенты Шези $K_{ш}$ изменялись в пределах от 15 до 55 м^{1/2}/с, причем на их величину влияла фаза гидрологического режима (половодье, межень) и особенности водотоков.

В связи с большой сложностью подбора расчетных значений $K_{ш}$ калибровку модели проводили по данным наблюдений за уровнями воды, измеренными на постах в 1978 г. При сравнении наблюдаемых и рассчитанных уровней по 17-ти постам средняя ошибка оказалась равной приблизительно 6 см, а в большинстве случаев расхождение не превышало 20 см. Первый опыт расчетов на модели показал, что стремление унифицировать $K_{ш}$ по рукавам и по времени приводит в ряде случаев к увеличению расхождений наблюдаемых и вычисляемых значений уровней воды. Имеются трудности в оценке достоверности всего банка данных по характеристикам поперечных сечений, а также в оценке правильности подбора всех характеристик для отдельных участков, на которых обычно наблюдаются большие ошибки (очень часто на участках, расположенных ниже западных ильменей – пост Оля).

Избежать больших ошибок при определении уровней воды на участках в районах ниже западных ильменей можно с помощью дополнительного ввода нескольких емкостей для оттока (притока) воды параллельно руслу реки Бахтемира. В начале участка – для выхода воды в Западные ильмени при подъеме уровней, в конце участка – для сброса забранной воды обратно в реку в конце половодья. Подбор режима работы емкостей должен быть осуществлен при калибровке моделей. Он должен полностью решить задачу изменения водного баланса во времени на участках со сложным рельефом (Западные ильмени – река Бахтемир, Восточные Ильмени – река Бузан).

Наиболее часто изменения формы гидрографа могут быть вызваны перераспределением стока во времени и изменением величины потерь стока в дельте.

Проверка одномерной модели на участке Волжская ГЭС – Верхнее Лебяжье.

Прежде всего, необходимо указать на то, что до настоящего времени еще никто ни в каком виде не пытался

моделировать участок русла Волги в пределах Волго-Ахтубинской поймы. Для этого участка характерна чрезвычайно сложная морфометрия, на нем часто изменяются глубины, размах колебаний достигает 3...5 м и более, что значительно осложняет не только задачу назначения морфометрических характеристик даже в местах створов в районах гидрометрических постов, но и задачу проверки результатов вычислений на модели по данным натурных наблюдений. Кроме частой смены глубин русла на участке после выхода речного потока на пойму, затапливается еще более сложный рельеф поймы. При увеличении расходов воды до 10 000 м³/с на пойме устанавливается свой сложный поток. Его влияние наиболее сильно сказывается при формировании пика половодной волны, который в случае использования одномерной модели (без учета растекания воды на пойме) всегда будет завышенным (рис. 2, 3).

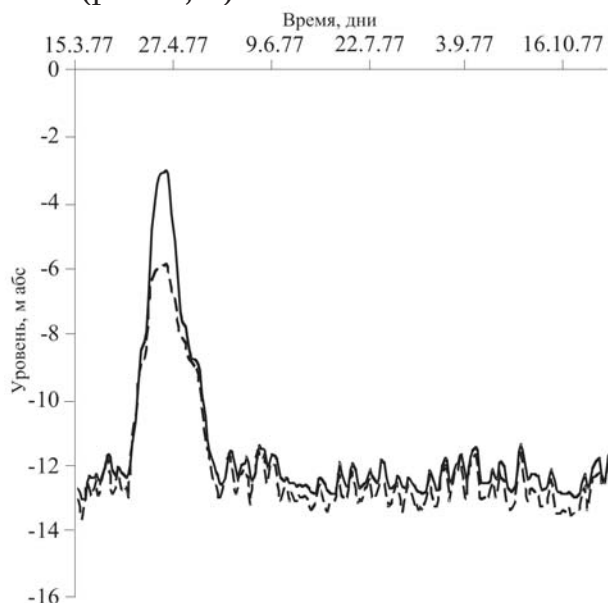


Рис. 2. Рассчитанный и модельный гидрографы у поселка Верхнее Лебяжье (река Волга, 15 марта – 30 ноября 1977 г.): — модельный; - - - - наблюдаемый

Из сравнения гидрографов видно, что расплывание волны половодья на участке поймы достигает 3 м, но в период межени результаты вычислений на мо-

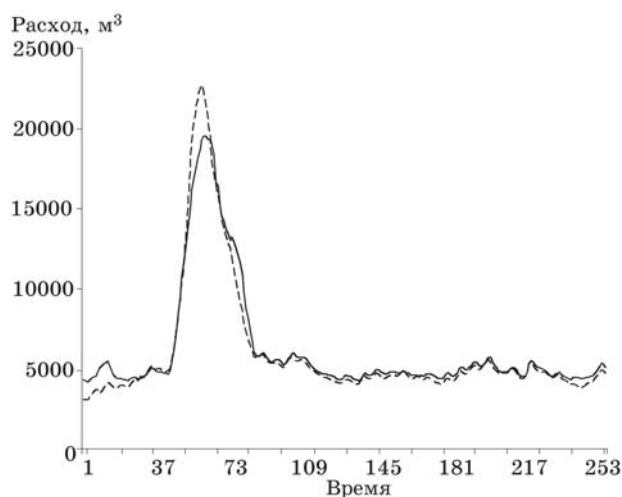


Рис. 3. Рассчитанный и модельный гидрографы у поселка Верхнее Лебяжье (река Волга, 15 марта – 30 ноября 1977 г.): — наблюдаемый; - - - - модельный

дели отличаются от наблюдаемых незначительно. Величина средних отклонений для межени обычно не превышает 25 см.

Выводы

Проверку возможностей модели по моделированию формирования гидрографов в период половодья на этом участке планируется провести на основе использования цифровой модели рельефа.

Несмотря на существующие сложности, опыт показал возможность использования таких моделей для прогностических вычислений уровней воды в бассейне Нижней Волги по заданным расходам воды в створе Волгоградской ГЭС как для условий межени, так и для половодья.

Материал поступил в редакцию 28.04.09.

Болгов Михаил Васильевич, доктор технических наук, и. о. заместителя директора, заведующий лабораторией

Тел. 8 (499) 783-38-09

E-mail: Bolgov@mail.ru

Красножон Гений Федорович, доктор географических наук, главный научный сотрудник

Тел. 8 (499) 783-38-60

E-mail: k.shat@mail.ru

Шаталова Ксения Юрьевна, кандидат технических наук, старший научный сотрудник

Тел. 8 (499) 783-38-09

E-mail: k.shat@mail.ru