

## ОЦЕНКА ПОГРЕШНОСТЕЙ РАСЧЕТОВ НЕУСТАНОВИВШЕГОСЯ ДВИЖЕНИЯ ВОДЫ С ПОМОЩЬЮ ПАКЕТА ПРИКЛАДНЫХ ПРОГРАММ

Для решения задач, связанных с проектированием и эксплуатацией водохозяйственных систем, управлением водными ресурсами, требуется знание их уровней и расходов. Вычисление последних в системах водотоков, являющихся составной частью водохозяйственных систем, целесообразно выполнять методами математического моделирования, с помощью которых можно получить необходимые параметры, рассчитать объекты любой протяженности и внести изменения в модель. Широкое распространение получили гидродинамические модели, использующие математический аппарат, которые позволяют выполнять расчеты неустановившегося движения воды в сложных системах водотоков различной протяженности. Выполнение гидравлических расчетов вызывает большие трудности, обусловленные сложностью процесса движения воды в водотоках с неправильными формами поперечных сечений, переменной шероховатостью и необходимостью обработки больших объемов исходной информации.

Пакет прикладных программ состоит из ядра и сервисных программ [1]. Программы, входящие в ядро, реализуют последовательность вычислительного процесса, состоящего из создания математической модели объекта (в нашем случае р. Тверцы), расчета неравномерного движения и идентификации параметров движения неустановившегося движения воды. Сервисные программы используются для упорядочения исходной информации, исключения ошибок в ней и подготовки к виду, пригодному для анализа.

При математическом моделировании неустановившегося движения воды в системе водотоков использована система уравнений [1], позволяющая учесть наличие нетранзитных зон в характерных сечениях.

$$\begin{cases} B_0 \frac{\partial z}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q; \\ \frac{\partial Q}{\partial t} + 2V \frac{\partial Q}{\partial x} + (C^2 - V^2) B_1 \frac{\partial z}{\partial x} = \Phi, \end{cases} \quad (1)$$

где

$$V = \frac{Q}{w}, \quad C = \sqrt{\frac{gw}{B_1}}, \quad \Phi = [B_1 I_0 + \left(\frac{\partial w}{\partial h}\right)_n] V^2 - \frac{\partial w_1}{K^2} Q |Q|;$$

$Q(x, t)$  — объемный расход;  $z(x, t)$  — ордината поверхности воды;  $w_1(x, t)$  — площадь поперечного сечения транзитного потока;  $h = z(x, t) - z_0(x, t)$  — глубина;  $z_0$  — ордината дна потока;  $B_0$  — ширина поперечного сечения створа, включающая транзитную и нетранзитную части сечения;  $q$  — боковой приток;  $B_1$  — ширина транзитной части;  $I_0$  — уклон дна;  $K(x, z)$  — модуль расхода;  $g$  — ускорение силы тяжести;  $c$  — скорость распространения малых возмущений.

Для решения системы уравнений (1) гиперболического типа используется метод конечных разностей. Дифференциальные уравнения аппроксимируются разностями на шеститочечной неявной схеме с весами слоев и неравномерным шагом по пространству. Полученная система алгебраических уравнений (1) решается методом матричной прогонки. Для ее решения необходимы также начальные и граничные условия. Морфометрические и гидравлические характеристики водотоков вычисляются для различных уровней характерных сечений по специальной программе, входящей в состав пакета прикладных программ.

Для получения начальных условий выполняется расчет неравномерного движения воды в системе водотоков. В результате последнего можно, используя результаты наблюдений за изменением уровней и расходов, идентифицировать некоторые параметры математической модели объекта, в частности коэффициенты шероховатости.

В качестве граничных условий используется гидрологическая информация в виде гидрографов расходов и графиков изменения уровней в крайних гидростворах. В каждом расчетном узле в определенный момент времени определяются расходы, уровни воды и средние скорости.

С целью проверки работы пакета прикладных программ были выполнены расчеты неустановившегося движения воды на р. Тверце при задании всей имеющейся морфометрической, гидравлической и гидрологической информации, оценены погрешности результатов расчета.

Экспериментальные исследования на р. Тверце выполнялись ГГИ на 48-километровом участке, ограниченном в верховом створе плотиной Новотверецкой ГЭС и получающем питание из Вышневолоцкого водохранилища. Верхняя часть экспериментального участка представляет собой искусственный канал, далее следует русло с низкими затопляемыми берегами и широкой (до 400 м) поймой. Нижняя часть экспериментального участка представляет собой беспойменное русло. В границах рассматриваемого участка р. Тверца принимает пять небольших рек и несколько ручьев и каналов. Общий расход всех притоков (около  $0,49 \text{ м}^3/\text{с}$ ) мал по сравнению с величинами попусков, которые колебались в пределах  $20\text{--}120 \text{ м}^3/\text{с}$ . Боковая приточность не могла повлиять на ход неустановившегося движения воды. Однако вследствие необходимости учета аккумулярующей емкости притоков расчеты неустановившегося движения воды велись и по ним.

По участку р. Тверцы имелись исходные данные для 200 характерных поперечных сечений. С целью задания приближенных значений локальных по участкам периметра коэффициентов шероховатости для 200 характерных створов использовалось краткое описание русла и поймы р. Тверцы.

Для наблюдения за водным режимом потока при неустановившемся движении на участке р. Тверцы действовала сеть временных гидрометрических створов и водомерных постов. Всего на участке было размещено 8 гидростворов и 32 водомерных поста. Экспериментальные попуски воды проводились в течение 13 суток (5–17 августа). График попуска предусматривал максимальное разнообразие видов волн. Выбранный участок р. Тверцы по своей протяженности вполне достаточен для того, чтобы в его пределах сглаживались попуски суточного регулирования.

Таким образом, по р. Тверцы имелась достаточно полная исходная инфор-

мация для расчета неустановившегося движения воды.

Порядок расчета был следующим. Вся имеющаяся исходная морфометрическая информация о поперечных сечениях р. Тверцы с помощью сервисной программы, входящей в состав пакета, была распечатана в заданном масштабе, проанализирована, исправлена. Далее по скорректированной информации создавалась математическая модель участка р. Тверцы и ее притоков. Начальные условия задавались путем расчета неравномерного движения на данном участке в момент времени, соответствующий началу попусков. Затем выполнялась идентификация математической модели на момент начала попусков и прохождения максимальных расходов (или уровней). Это позволило учесть изменение гидравлических характеристик русла по времени путем их интерполяции при расчете неустановившегося движения. В результате была получена идентифицированная математическая модель системы водотоков участка р. Тверцы на два момента времени.

На основе гидрологической информации выявлены:

1. Гидрографы  $Q = f(t)$  на левых границах и кривая связи  $Q = f(H)$  на правой границе.

2. Гидрографы распределенной по длине водотоков приточности  $q(t) = f(t)$ . Предварительные расчеты свидетельствуют о необходимости тщательного считывания гидрологической информации. Выполнение расчетов с постоянным шагом по времени приводило к тому, что многие характерные особенности гидрографов (максимумы, минимумы) не совпадали с расчетными моментами времени. Поэтому при расчете неустановившегося движения появлялась необходимость считывать в автоматическом режиме с наперед заданной точностью гидрологическую информацию. Реализация этой возможности осуществлялась с помощью специальной сервисной программы. Продолжительность процесса неустановившегося движения воды при расчетах составляла 4 суток. Время счета этого процесса на вычислительной машине ЕС 1060 составило около одного часа.

Результаты расчетов неустановившегося движения воды выводились на АЦПУ и на магнитный носитель (архив данных). Из архива данных подпрограммами пакета извлекалась следующая информация. В табличном виде распечатывались гидрографы расходов, графики изменения уровней во времени для различных водпостов и гидростворов. В табличном виде выводились огибающие максимальных уровней и расходов, а также время наступления этих характеристик. Для примера (рис. 1—3) приведены опытные и расчетные кривые изменения уровней по двум водпостам. На рис. 2 приведены совмещенные кривые изменения уровней и расходов по гидроствору. Анализ расчетов показал, что вычисленные уровни и расходы по фазе хорошо согласуются с опытными, однако по величине они несколько отличаются от опытных.

Для получения численных характеристик отклонений расчетных величин от опытных сделана их выборка. Из рис. 1—3 видно, что в точках максимумов отклонения достигают наибольших величин. Следует отметить, что характеристики отклонений максимальных расчетных уровней и расходов от опытных являются наиболее важными для проектирования.

Сделанная выборка была обработана статистическими методами [2]. Средняя погрешность максимальных уровней составляла 0,14 м, а с надеж-

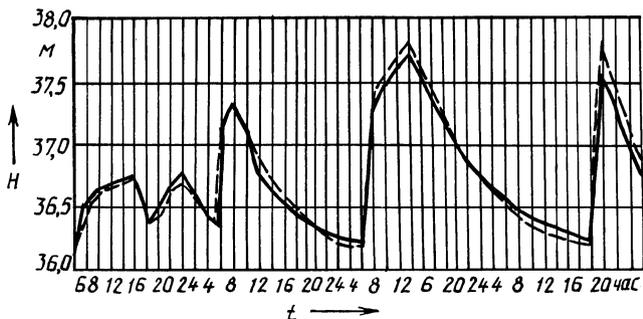


Рис. 1. Графики колебаний уровней воды у водпоста № 8:  
 — наблюдаемые уровни; — — — — расчетные уровни

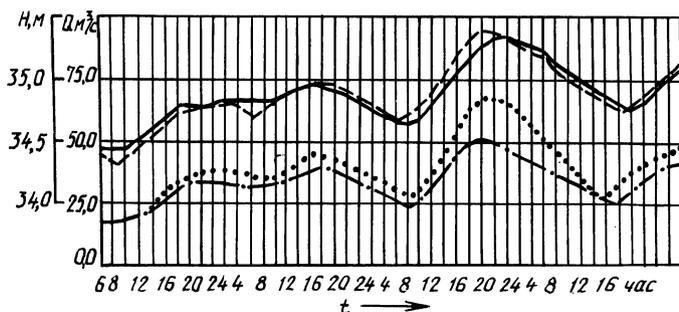


Рис. 2. Совмещенные графики колебаний уровней и расходов воды в гидростворе № 5:  
 — наблюдаемые уровни; — — — — расчетные уровни; — · — · — наблюдаемые расходы; · · · · · — расчетные расходы

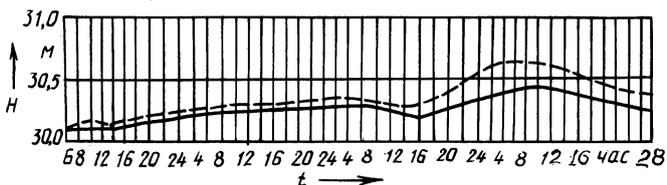


Рис. 3. Графики колебаний уровней воды у водпоста № 31:  
 — наблюдаемые уровни; — — — — расчетные уровни

ностью 0,95 не превышала 0,18 м; максимальных расходов равна 18 %, а с надежностью 0,95 не превышала 25 %.

Таким образом, предварительные расчеты дают основание считать, что созданный в ЦНИИКИВР пакет прикладных программ приемлем для расчетов неустановившегося движения воды как для существующих, так и для проектируемых объектов.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Рогуневич В.П., Войтеховская Э.А., Федорова И.И. Возможность пакета прикладных программ для автоматизации гидравлических расчетов систем водотоков // Гидравлика открытых русел, М., 1984. — С. 19—27. 2. ГОСТ 8.207-76. Прямые измерения с многократными наблюдениями. Методы обработки результатов наблюдений. — М., 1981. — С. 1—10.