

ных условиях. В этом случае для учета угла подхода волн к сооружению необходимо ввести коэффициент k_{β} [5]. Тогда формула (1) примет вид

$$\Delta H_{\text{в}} = ah_{\text{н}} k_{\beta}. \quad (2)$$

В табл. 2 в выборочном порядке представлена часть опытных данных.

В связи с тем что на откос воздействовали нерегулярные волны, для расчета высоты наката принимались волны обеспеченностью 10 % в группе [6], которые определялись по рекомендациям авторов [7, 8].

Сравнение экспериментальных и расчетных данных по формуле (2) подтверждает их хорошую сходимость.

Для более конкретного представления о численном значении дополнительного напора $\Delta H_{\text{в}}$ в реальных условиях выполнен расчет на примере плотины одного из гидроузлов. При скорости ветра 22 м/с, длине разгона 1,7 км [1, 2] высота волны, по [7–8], $h_{\text{в}} = 0,6$ м; значение $\Delta H_{\text{в}}$ получается по предлагаемой формуле равным 0,45 м, что оказывается существенным для случая низконапорной плотины.

Л и т е р а т у р а

1. Л е в к е в и ч Е.М., Ю х н о в е ц В.Н. Лабораторные исследования влияния волнения в верхнем бьефе на фильтрационный режим в напорной дамбе // Водное хозяйство Белоруссии. — Минск, 1972. — Вып. 2. — С. 104–108.
2. Л е в к е в и ч Е.М., Ю х н о в е ц В.Н. Некоторые особенности ветрового волнения на водоемах с малыми разгонами волн // Водное хозяйство Белоруссии. — Минск, 1973. — Вып. 4. — С. 143–147.
3. Гидротехнические сооружения: Справочник проектировщика / Под общ. ред. В.П. Недриги. — М., 1983. — 543 с.
4. Справочное пособие для фильтрационных расчетов земляных плотин // Тр. Харьков.отделение. ВНИИВОДГЕО. — Харьков, 1970. — Вып. IV. — С. 81.
5. Строительные нормы и правила "Нагрузки и воздействия на гидротехнические сооружения (волновые, ледовые и от судов)". СНиП 2.06.04–82. — М., 1983. — 39 с.
6. Ш а й т а н В.С. Крепления земляных откосов гидротехнических сооружений. — М., 1974. — 351 с.
7. Л е в к о в и ч Е.М., Ю х н о в е ц В.Н. К расчету высоты ветровой волны на водохранилищах с малой длиной разгона // Водное хозяйство Белоруссии. — Минск, 1974. — Вып. 4.
8. Ю х н о в е ц В.Н. О распределении высоты ветровых волн в водохранилищах // Водное хозяйство и гидротехническое строительство. — Минск, 1978. — Вып. 8.

УДК 532.5

В.П. РОГУНОВИЧ,

З.А. ВОЙТЕХОВСКАЯ, кандидаты техн. наук,

И.И. ФЕДОРОВА (ЦНИИКИВР)

ТЕХНОЛОГИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО РАСЧЕТА ВОДНОГО РЕЖИМА В СИСТЕМЕ ВОДОТОКОВ

Проектирование и эксплуатация водохозяйственных объектов, имеющих большую протяженность, разнообразные по форме и размеру поперечные сечения с переменной, изменяющейся во времени и пространстве шерохова-

нхтью, гидротехнические сооружения, которые влияют на естественный режим, требуют расчетов неустановившегося движения воды в системе водотоков. В настоящее время выполнение таких расчетов стало возможным лишь с помощью математического моделирования, численных методов решения возникающих задач и вычислительной техники. Для этого потребовалось создание автоматизированной технологии расчетов неустановившегося движения воды в сложной системе водотоков, реализованной в виде пакета прикладных программ [1, 2]. С помощью такого комплекса программ можно оперативно обрабатывать большое количество первичной информации о водных объектах, выявлять случайные ошибки, выполнять расчеты для разных видов движения воды в системах водотоков, готовить к анализу многочисленные результаты расчетов и т.д. Комплекс программ используется самостоятельно, а также в составе комплексов, выполняющих взаимосвязанные функции.

Расчет неустановившегося движения воды начинается с создания математической модели объекта. Для этого заданная система водотоков представляется в виде графа типа "дерево" с разбивкой на расчетные участки (дуги), которые нумеруются и увязываются по расстоянию: указываются расстояния начала и конца каждой дуги графа от единого начала, за которое, как правило, принимается устье реки. Нумеруются дуги, начиная от верховья реки (максимального расстояния) в направлении к устью, включая притоки любого порядка. Необходимо располагать исходной информацией об объекте, которая ввиду большой протяженности и сложности водных объектов весьма объемна. Значительный объем информации приходится на морфометрические и гидравлические характеристики сечений водотоков, необходимых для определения параметров уравнений [3,4], положенных в основу решения задачи о движении воды [1, 2].

Система водотоков представляется характерными сечениями, которые выбираются таким образом, чтобы гидравлические параметры между ними изменялись плавно. Большая протяженность систем водотоков, большое количество неправильных форм характерных сечений обуславливают значительные затраты времени на задание, подготовку и обработку исходной информации. В этой связи разработана определенная система подготовки исходных данных, по которой морфометрическая и гидравлическая информация о характерном створе задается в виде координат поперечного сечения и локальных на участках периметра коэффициентов шероховатости по форме, приспособленной для перфорации. Указываются также координаты явно непроточных частей сечения. Сведения о поперечных сечениях в виде координат могут содержать ошибки, в значительной мере влияющие на точность расчетов. Для осуществления контроля за правильностью заданной информации создана программа, предусматривающая графическое изображение на АЦПУ поперечных сечений в масштабе исходных материалов по ширине водотоков. Такое наглядное изображение сечения позволяет исключить грубые ошибки при сопоставлении его с первоисточником, например с топографической картой.

Предусмотрена также возможность изменения количества координат первоначально заданного поперечного сечения в сечение с меньшей степенью детализации. Такая необходимость может возникнуть при проектировании и управлении русл.

В качестве параметров уравнений движения используются ширина и площадь водного и живого сечений, средний в сечении коэффициент шероховатости и модуль расхода. Их расчет выполняется по специальной программе, в результате работы которой для каждого характерного сечения вычисляются таблицы зависимостей параметров уравнений от уровней воды в сечении. Таблицы упорядочиваются по расстоянию, образуя некоторую систему, которая в необходимом для математического моделирования объеме полностью характеризует систему водотоков. Такая система таблиц названа математической моделью объекта, а коэффициенты в них — параметрами математической модели [3, 4].

Разработанная математическая модель движения [1, 2] предлагается для использования в условиях плавно изменяющегося движения. Для выполнения этого необходимо при задании характерных поперечных сечений осуществлять соответствующий контроль. В настоящее время считается, что условие плавной изменяемости выполняется, если угол расширения между двумя соседними характерными створами находится в пределах 3–17° в зависимости от размера шероховатости [5]. Учитывая, что изменение размеров поперечных сечений может иметь место и в горизонтальной, и в вертикальной плоскостях, целесообразно осуществлять контроль за изменением площади между двумя соседними характерными створами, которое не должно превышать некоторую заданную величину, учитывающую допустимый предел расширения.

В математических моделях процессов необходимо учитывать изменение в пространстве и во времени существенно зависящих от сезона года коэффициентов шероховатости пойм, а следовательно, и модуля расхода. Кроме того, эти коэффициенты не могут быть определены непосредственно и с требуемой точностью. Коэффициенты шероховатости (n) являются некоторой интегральной характеристикой, включающей различные свойства поверхности, относительные размеры и расположение неровностей рельефа, закустаренность, залесенность, т.е. они являются некоторой статистической характеристикой поверхности водотока, методы расчета которой в настоящее время разработаны недостаточно.

Численные значения коэффициентов шероховатости устанавливают, как правило, по словесной характеристике поверхности водотока с помощью имеющихся таблиц. При таком выборе значения n не исключается субъективный фактор. Кроме того, в существующих таблицах для закустаренных, залесенных и заболоченных пойм значения n , соответствующие одному и тому же словесному описанию водотока, значительно отличаются друг от друга. В этой связи возникает необходимость уточнения коэффициентов, например, по результатам наблюдений за изменением уровней и расходов выполнять идентификацию параметров уравнений движения к конкретному объекту с помощью решения уравнения установившегося неравномерного движения [6]. Поскольку коэффициенты шероховатости могут существенно изменяться во времени (по сезонам года), при потребности расчетов уровней и расходов в течение длительного периода идентификация может выполняться с помощью решения уравнений неуставившегося движения. Однако в этом случае можно также выполнять идентификацию с помощью решения уравнений неравномерного движения для нескольких относительно небольших интервалов времени, а в промежутках между ними — интерполировать параметры. Возможность иден-

тификации параметров реализована в разработанном комплексе программ.

Уточнением параметров математической модели путем контроля и идентификации завершается создание математической модели конкретного объекта.

Для выполнения расчетов требуется гидрологическая информация, в качестве которой задаются: гидрографы на граничных и внутренних водпостах $Q(t)$ или зависимости вида $Q(Z)$, $Z(t)$; гидрографы боковой приточности (распределенной $q(t)$ и сосредоточенной $Q(t)$ по длине расчетных участков водотоков). Эта информация заносится в специально разработанный бланк, в котором предусмотрена ее взаимозаменяемость. Если в системе водотоков имеются гидротехнические сооружения, построенные для управления уровнями или расходами, то на них обычно задаются графики изменения $Z(t)$, $Q(t)$, $Q(Z)$, которые можно использовать как граничные условия для определенного участка. По отношению к внешним граничным условиям системы водотоков эти условия называют внутренними. Они назначаются аналогично внешним граничным условиям.

С учетом большого объема гидрологической информации при ее вводе осуществляется контроль на корректность задания и случайные ошибки. Кроме того, для уточнения расчетов при использовании в качестве граничных условий $Q(t)$ или $Z(t)$ предусмотрено расчетный шаг по времени назначать таким образом, чтобы все характерные точки заданных гидрографов были учтены (не наблюдалась срезка гидрографов). Расстояния, заданные для гидрографов и приточностей, проверяются на согласование с расчетными узлами начальных данных.

Расчет неустановившегося движения воды начинается обычно с некоторого начального момента, в который движение воды можно считать установившимся. Поэтому при отсутствии данных наблюдений за уровнями и расходами на расчетных участках начальные условия определяются из решения уравнения неравномерного движения, причем необходимо предусматривать реформирование используемых в качестве начальных данных результатов расчета в убывающем порядке (по расстоянию), так как расчет неустановившегося движения воды, в отличие от неравномерного, выполняется от верховья к устью. Кроме того, в зависимости от требуемой точности расчетов имеется возможность изменять шаг по расстоянию.

Разработанная программа расчета неравномерного движения воды в системе водотоков имеет также самостоятельное значение для использования при построении кривых свободной поверхности в случаях, когда гидравлические характеристики водотоков незначительно изменяются во времени.

После создания математической модели объекта, определения начальных условий из решения уравнения установившегося неравномерного движения с использованием граничных условий выполняются расчеты неустановившегося движения воды в системе водотоков с помощью созданного комплекса программ.

В процессе расчета в течение длительного периода при значительном колебании уровней неизбежны случаи выхода потока на пойму. Это влечет за собой изменение положения гидродинамической оси, а следовательно, и расстояний между характерными створами. Учет данного фактора предусмотрен в разработанном комплексе.

Результатами расчета неустановившегося движения воды являются гидрографы расходов, графики изменения уровней во времени на водпостах и в заданных створах, а также мгновенные значения уровней и расходов по длине водотока, которые в зависимости от требуемой детализации выводятся на печатающее устройство в табличном и графическом виде.

Большой практический интерес при проведении инженерных мероприятий в бассейнах рек представляют значения максимальных и минимальных уровней и расходов. Первые необходимы при проектировании сооружений на водотоках, определении их высотного расположения, вторые — с точки зрения охраны окружающей среды. Организация их получения и вывода на печать в табличном и графическом виде предусмотрена в разработанном комплексе программ.

Из краткого описания технологии выполнения гидравлических расчетов в системах водотоков с помощью комплекса программ следует, что он использует в качестве исходных данных большое количество цифровой информации. При выполнении расчетов для больших систем водотоков именно обработка первичной информации, преобразование ее в удобную форму, корректировка, подготовка результатов к виду, доступному и удобному для анализа, требует очень больших затрат. В комплексе программ эти функции выполняет система вспомогательных программ.

Таким образом, описанная технология выполнения расчетов, реализованная с помощью комплекса программ, позволила автоматизировать гидравлические расчеты в сложных системах водотоков с гидросооружениями, с различными видами движения воды, притоками разных порядков, имеющими разнообразные по форме и размерам поперечные сечения с переменной по периметру шероховатостью.

Получаемые в результате расчетов уровни и расходы необходимы при проектировании, эксплуатации водохозяйственных систем для определения высотного положения и пропускной способности гидросооружений, размеров подтоплений и затоплений территорий и решении других водохозяйственных задач.

Л и т е р а т у р а

1. Р о г у н о в и ч В.П. Расчет водного режима систем водотоков // Численные методы в гидравлике: Тез. докл. Всесоюзн. симпоз. — Телави Груз. ССР. — Л., 1980. — С. 54—57.
2. Р о г у н о в и ч В.П., В а п Ю.И., Ф е д о р о в а И.И. и др. Математическое моделирование водного режима системы водотоков бассейна р. Припять в естественном состоянии и при обваловании // Проблемы Полесья. — Минск, 1982. — С. 135—148.
3. Р о г у н о в и ч В.П., В а п Ю.И. Определение параметров математической модели водотока в случае неправильных форм поперечных сечений // Изучение и использование водных ресурсов. — М., 1980.
4. Р о г у н о в и ч В.П., В а п Ю.И., Ш н и л о в Ф.Д., Б а м п и С.А. Математическая модель системы водотоков бассейна р. Припять в естественном состоянии и при обваловании // Проблемы Полесья. — 1982. — Вып. 8. — С. 75—92.
5. С о л о в е в а А.Г. Экспериментальное исследование плавного расширения потока при наличии водоворотных зон // Изв. ВНИИГ им. Веденеева. — М.:Л, 1951. — Т. 46. 6. С т а н к е в и ч А.П. Уточнение коэффициентов шероховатости для систем водотоков бассейна р. Припять // Проблемы Полесья. — Минск, 1982. — Вып. 8. — С. 148—155.