

3. З а л у ц к и й Э.В. О потерях энергии в турбулентных неравномерных открытых потоках. — В кн.: Исследование турбулентных одно- и двухфазных потоков. Киев, 1966, с. 45–54. 4. О с и п о в и ч А.А., Ш н и п о в Ф.Д. Экспериментальное исследование распределения продольных осредненных скоростей в каналах трапецеидального сечения. — В кн.: Водное хозяйство и гидротехническое строительство. Минск, 1981, вып. 11, с. 135–140. 5. Ф е д о р о в Г.Ф. Изучение кинематики волны попуска. — В кн.: Труды ЦНИИЭВТ. М., 1960, вып. 19, с. 83–95. 6. Ф е д о р о в Н.Н. Влияние неустановившегося движения воды на распределение осредненных скоростей по вертикали. — В кн.: Труды ГГИ. М., 1965, вып. 121, с. 52–63. 7. Ш а б р и н А.М. Швдкїсна структура відкритих потоків при неусталеному русі. — Доповіді АН УРСР, 1963, № 11, с. 1448–1451. 8. Ш а б р и н А.Н. Исследование скоростной структуры неустановившегося открытого потока: Автореф. дис. ... канд.техн.наук. — Киев, 1964. — 17 с. 9. Экспериментальное исследование переноса примесей в натуральных условиях/ В.П.Рогуневич, Э.А.Войтеховская, С.А.Бампи, М.И. Богданович. — В кн.: Водоотведение, очистка и использование природных и сточных вод. Минск, 1985, с.54–60. 10. Р о з о в с к и й И.Л., Е р е м е н к о Е.В., Б а з и л е в и ч В.А. Неустановившееся движение водного потока ниже гидроэлектростанций и его влияние на русло. — Киев, 1967. — 276 с. 11. Г р у ш е в с к и й М.С. Неустановившееся движение воды в реках и каналах. — Л., 1982. — 289 с.

УДК 532.543

А.П.СТАНКЕВИЧ (ЦНИИКИВР)

РАСЧЕТ НЕРАВНОМЕРНОГО ДВИЖЕНИЯ ВОДЫ В СИСТЕМАХ ВОДОТОКОВ С ПРОТОКАМИ

Основной задачей неравномерного движения в открытых руслах является построение кривой свободной поверхности. При расчетах достаточно больших объектов применение ЭВМ весьма целесообразно. В настоящее время созданы эффективные алгоритмы и пакеты программ для расчета неравномерного движения в водотоках [1, 2]. Наряду с этим практика выдвигает вопрос о расчете неравномерного движения жидкости в системе водотоков, включая протоки. При расчетах проток возникает задача определения в них расходов воды при разветвлении потока.

Подобная задача для расчетов неустановившегося движения воды решается в [5] с помощью метода параметрической прогонки. Однако он основан на том, что исходные уравнения неустановившегося движения аппроксимируются системой линейных разностных уравнений. В то же время неравномерное движение описывается нелинейным уравнением. Поэтому наиболее эффективно применение итерационного метода.

В качестве исходного взято одномерное дискретное уравнение неравномерного движения жидкости с переменным расходом [2]

$$z_{i+1} = z_i + \frac{1 + \xi}{2g} \left(\alpha_i \frac{Q_i |Q_i|}{\omega_i^2} - \alpha_{i+1} \frac{Q_{i+1} |Q_{i+1}|}{\omega_{i+1}^2} \right) + \frac{1}{\beta_1} \left(\frac{Q_i |Q_i|}{K_i^2} + \frac{Q_{i+1} |Q_{i+1}|}{K_i^2} \right) (x_{i+1} - x_i + \beta\beta_2), \quad (1)$$

где

$$\beta = z_{i+1} - z_{0i+1} - (z_i - z_{0i});$$

$$\beta_1 = \frac{2(x_{i+1} - x_i)}{\sqrt{(x_{i+1} - x_i)^2 + (z_{0i+1} - z_{0i})^2}}; \quad \beta_2 = \frac{z_{0i+1} - z_{0i}}{x_{i+1} - x_i};$$

i — номер расчетного узла водотока; z_i — отметка свободной поверхности воды в i -м узле; z_{0i} — отметка дна; Q_i — расход воды; ω_i — площадь поперечного сечения водотока; K_i — модуль расхода; $\xi = -1$, если $Q_j/\omega_j < Q_{j+1}/\omega_{j+1}$, в противном случае $\xi = 0$; α_i — корректив кинетической энергии; x_i — расстояние от постоянного начала, на которой находится i -й расчетный узел.

Входящие в уравнение гидравлические и морфометрические параметры водотока определим и представим в виде табличных функций, зависящих от глубины водотока [3]. Уравнение (1) является нелинейным алгебраическим относительно z_{i+1} , поскольку неизвестны не только z_{i+1} , но и ω_{i+1} и K_{i+1} , зависящие от него. Поэтому для решения уравнения (1) был применен метод последовательных решений. Таким образом, задав уровень воды в начале водотока, можно определить уровни воды во всех расчетных узлах водотока. Параметры водотока ω и K в его промежуточных узлах интерполируются с помощью кубических сплайнов [4].

Рассмотрим построение кривой свободной поверхности воды в системе водотоков с проточными участками на модельном примере, представленном на рис. 1.

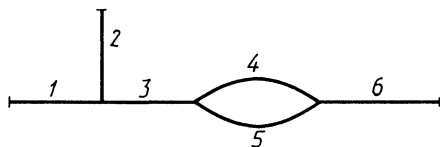


Рис. 1. Схема модельной системы водотоков.

Пронумеруем последовательно участки системы в таком порядке, в каком необходимо вести расчет от участка к участку. Таким образом, получим одномерный комплекс, состоящий из 6 участков, схематизирующий данную систему водотоков. Далее составим для комплекса матрицу инцидентности [5]. Она будет состоять из 6 векторов, каждый из которых соответствует одному участку. В вектор войдут величины x^{+j} , x^{-j} , z^{+j} , z^{-j} , Q^{+j} , Q^{-j} , где j — номер участка; "—" — означает принадлежность к левой границе участка; "+" — принадлежность к правой; z — уровень свободной поверхности воды; Q — расход воды.

Считаем заданным только z^1 , т.е. уровень воды в начале системы водотоков. Кроме того, имеем в узлах слияния следующие соотношения инцидентности:

$$1. z^{+1} = z^{+2} = z^{-3}; \quad z^{-4} = z^{-5} = z^{+3}; \quad z^{+5} = z^{+4} = z^{-6};$$

$$2. Q^{-3} = Q^{+1} + Q^{-2}; Q^{+3} = Q^{-4} = Q^{-5}; Q^{-6} = Q^{+4} = Q^{+5}.$$

На каждом участке расчет кривой свободной поверхности происходит единообразно, согласно вышеописанному методу для одного водотока. Задача состоит в определении Q^j и z^j . На первом участке z^{-1} и Q^{-1} заданы, поэтому на нем построение кривой свободной поверхности воды не вызывает затруднений. Для расчета второго участка используем условие $z^{+2} = z^{+1}$, при расчете третьего $-Q^{-3} = Q^{+1} + Q^{-2}$ и $z^{-3} = z^{+1}$. При переходе к построению кривой свободной поверхности воды для четвертого и пятого участков необходимо определить расходы Q^{-4} и Q^{-5} . Применим метод последовательных итераций. В качестве начального приближения $Q_0^{-4} = Q_0^{-5} = Q^{+3}/2$. Для нахождения Q_{s+1}^{-4} , где s — номер итерации, используем уравнение

$$Q_{s+1}^{-4} = Q_s^{-4} \frac{h_s^{+5}}{h_s^{+4}}, \quad h - \text{глубина воды. Условие окончания итераций} - \text{выполнение}$$

неравенства $|z_s^{+5} - z_s^{+4}| < \varepsilon$, где ε — заданная точность, причем $Q_{s+1}^{-5} = Q^{+3} - Q_{s+1}^{-4}$. Таким образом, после завершения итерационного процесса имеем уровни и расходы воды во всех расчетных узлах для 4-го и 5-го участков. Используя далее соотношения $Q^{-6} = Q^{+4} + Q^{+5}$ и $z^{-6} = z^{+4}$, рассчитаем последний участок системы водотоков. Аналогично можно построить кривую свободной поверхности воды в системе водотоков произвольной формы строения.

По данному алгоритму была составлена программа на алгоритмическом языке ФОРТРАН-IV. Время расчета кривой свободной поверхности для системы водотоков суммарной длины 100 км для ЕС ЭВМ-1020 составляет 6 мин. Результаты расчетов выводятся на печать в табличном и графическом виде, причем, помимо уровней воды и расходов, печатаются и средние скорости потока в расчетных узлах. Это позволяет определить места, где скорость потока выходит за критические пределы, т.е. движение воды приводит к размыву русла. Программа применялась при расчетах неравномерного движения воды в системе водотоков рек Припять и Западный Буг.

ЛИТЕРАТУРА

1. К о й д а К.Н. Пакет прикладных программ "Сож" для численного решения задач неравномерного движения на ЕС ЭВМ. — В кн.: Численные методы в гидравлике. Телави, 1980, с. 46–48.
2. С т а н к е в и ч А.П. Уточнение коэффициентов шероховатости для систем водотоков бассейна р. Припять. — В кн.: Проблемы Полесья. Минск, 1982, вып. 8, с. 149–155.
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. — В кн.: Изучение и использование водных ресурсов. М., 1980, с. 99–104.
4. З а л у ж н ы й Г.И., С т а н к е в и ч А.П. Особенности вычисления по интерполяционным сплайнам функции расхода и вектора площадей поперечного сечения открытых русел. — В кн.: Водное хозяйство и гидротехническое строительство. Минск, 1979, вып. 9, с. 123–128.
5. В о е в о д и н А.Ф., Ш у г р и н С.М. Численные методы расчета одномерных систем. — Новосибирск, 1981. — 201 с.