

СИНТЕЗ УПРАВЛЕНИЯ БЬЕФОМ ОРОСИТЕЛЬНОГО КАНАЛА

Постановка проблемы. Реализацию экономически эффективного управления комплексом мелиоративной системы в Украине значительно затрудняет большая протяженность водораспределительных сетей, территориальная рассредоточенность гидротехнических сооружений и дождевальной техники, устаревшие технологии управления водораспределением и поливами [4].

Главными задачами при проектировании, строительстве, эксплуатации и реконструкции оросительных каналов являются оптимизация водоотборов, разработка и внедрение высокоэффективных ресурсосберегающих технологий водораспределения. С особой актуальностью это проявляется в условиях оросительных магистральных каналов, нетехнологические сбросы воды из которых достигают 30 – 40% [6].

Возникающие гидравлические переходные процессы непосредственно связаны не только с многократной и частой сменой режимов работы гидротехнических сооружений и насосных станций. Последствия, вызванные волновыми процессами, связаны с значительными потерями воды, но и с угрозой перелива воды через дамбы каналов и их разрушения.

Анализ последних исследований и публикаций. В практике проектирования и эксплуатации оросительных систем открытого типа применяются в основном две схемы управления водораспределения: регулирование по верхнему бьефу, регулирование по нижнему бьефу. С помощью первой схемы создадутся системы управления «по плану», а с помощью второй – «по требованию».

Исследование вопросов водораспределения в оросительных каналах и системах, динамических свойств неустановившихся течений в открытых потоках представлены в работах [2, 4, 5, 8, 9]. При разработке схем регулирования водоподачи управляющее воздействие на канал определяется как функция времени (программное управление) или как параметр потока (уровень или расход).

Большинство существующих рекомендаций по эксплуатации и проектированию [2, 5] позволяет выделить из оросительной сети отдельные подзадачи управления, координирование которыми производится только для условий стационарного установившегося режима работы объекта управления. Такой подход к решению задачи управления является одной из причин того, что до настоящего времени не разработана единая методика выбора схем водораспределения, степени автоматизации процессов и необходимый уровень оснащения распределительной сети средствами водоучёта для обеспечения рационального водопользования.

Новые подходы к вопросам проектирования, эксплуатации и реконструкции оросительных систем предполагают создание систем управления водораспределением и систем водоучёта как единого технологического комплекса с применением стандартизированных средств измерения расходов и объёмов воды в рамках SCADA систем (аббр. от англ. supervisory control and data acquisition, диспетчерское управление и сбор данных).

Современные автоматизированные системы управления технологическими процессами (АСУТП) водораспределения имеют иерархическую структуру и используют микропроцессорную технику, которая позволяют создавать распределенные АСУ с множеством (до нескольких сот) управляющих локальных технологических станций.

Цель работы. Повышение эффективности управления бьефом оросительного канала как нелинейного объекта с распределенными параметрами

Основная часть. Для моделирования динамики потока жидкости в открытом русле используют уравнения Навье-Стокса, Сен-Венана или Буссинеска [2]. Уравнения Навье-Стокса и Буссинеска описывают широкий класс задач: ондуляции, солитоны, кноидальные волны. Для многих водохозяйственных расчетов, не требующих высокой точности расчетов, а также для приближенных оценок параметров движения воды, используются и более простые модели, основанные на решении обыкновенных дифференциальных уравнений или на анализе функциональных связей между параметрами потока и пространственно-временными переменными. Поэтому при исследовании задач водораспределения используют уравнения Сен-Венана, методика решения которых достаточно отработана.

Уравнения Сен-Венана с начальными и граничными условиями являются математической моделью технологического процесса. Управляющие воздействия, формируемые на концах открытых участков, являются для уравнений движения граничными условиями. Задачу можно решать либо как стохастическую, учитывая, что возмущения меняются случайным образом, либо как детерминированную.

Показателями, отражающими качество управления, являются волнограммы и системы частных критериев: амплитуда фронта волны, его крутизна, время длительности переходных процессов и др. [6]. Поэтому целесообразно оценивать качество управления с помощью интегрального критерия:

$$I = \int_0^T \int_0^L \left(\frac{H - H_0}{\Delta H} \right)^{2p} dx dt, \quad (1)$$

где p – определяет скорость роста критерия I при выходе H за указанные пределы, обычно $p = 1$, иногда $p = 2$.

В общем случае в критерий (1) могут входить уровень и расход воды, при этом минимум критерия соответствует оптимальному управлению.

Для решения задачи управления динамической системой с распределенными параметрами применяют современные методы вариационного исчисления [1, 5]. В результате решения задачи итерационным методом к системе Сен-Венана добавляются уравнения для сопряженных переменных, которые наряду с параметрами потока входят в выражение для производной критерия (1) по управлению. Задают значения гидравлических и морфометрических характеристик русла, начальные и граничные условия с начальными приближениями, например, константами управления, входящие в граничные условия. Решив исходные уравнения, определяют значения параметров потока, которые используют для нахождения сопряженных переменных. Далее определяют производную критерия (1) по управлению и если не достигнут минимум критерия (1) по управлению, значения производной в расчетных точках используют для коррекции управления.

Однако задача управления в такой постановке требует значительных вычислительных затрат, где приходится многократно решать систему уравнений Сен-Венана на расчетном интервале времени. В этом случае особо актуальным является поиск безитерационных методов синтеза управления.

Преимущества метода управления с использованием прогнозирующей модели заключаются в том, что он позволяет предсказывать динамику системы и рассчитать управления, принимая во внимание будущие известные возмущения. Это обстоятельство особенно важно для водохозяйственных систем, имеющих большую протяженность (десятки и сотни километров), а следовательно, и большое транспортное запаздывание.

Для моделирования одномерного потока жидкости с постоянной плотностью используем уравнения Сен-Венана [2]. В модели применяют два типа нелинейных уравнений первого порядка, описывающие баланс массы и моментов в виде двух переменных: сечения потока воды $S(x, t)$ и расхода потока $Q(x, t)$, как зависимости от основных пространственных координат потока (бьефа канала) x и от времени t (рис. 1).

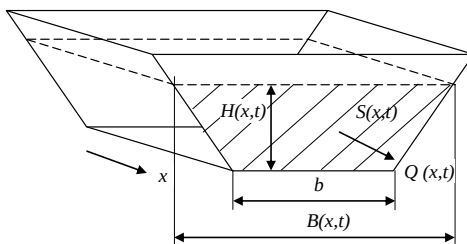


Рис. 1. Переменные в схеме сечения потока ирригационного канала

В формулах (2) и (3) первое уравнение отражает условие сохранения массы, а второе – уравнение сохранения импульса.

$$\begin{cases} \frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial S}{\partial t} = 0 \\ \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{S} \right) + gS \cdot \frac{\partial H}{\partial x} + gS \cdot (I_f - I_0) = 0 \end{cases}, \quad (2)$$

(3)

где $S(x, t)$ – площадь живого сечения потока; $Q(x, t)$ – расход потока в сечении $S(x, t)$ по глубине $H(x, t)$; $I_f(x, t)$ – угол гидравлического трения; I_0 – уклон дна русла; g – гравитационное ускорение.

Угол гидравлического трения определяют как:

$$I_f(x, t) = \frac{(Q/S)^2}{C^2 \cdot R}, \quad R = \frac{S}{P}, \quad (4)$$

где: $C(x, t)$ – коэффициент Шези; $R(x, t)$ – гидравлический радиус; $P(x, t)$ – смоченный периметр сечения канала.

Учитывая, что в большинстве случаев сечение ирригационного канала имеет трапециевидальную форму (рис. 1), введем следующие расчетные соотношения:

$$P = b + 2H \cdot \sqrt{1 + m^2},$$

где: b – ширина канала по дну, m – заложение откоса.

Тогда: $B = b + 2mH$ – ширина канала поверху (по урезу воды); $v = Q/S$ – средняя скорость в сечении потока. Для призматических русел площадь живого сечения зависит только от глубины $\partial S / \partial H = B$, тогда:

$$\frac{\partial S(x, t)}{\partial t} = B \cdot \frac{\partial H(x, t)}{\partial t}. \quad (5)$$

Замена этих уравнений в формулах Сен-Венана (2) - (3) для модели канала позволяет получить полную систему уравнений в частных производных в форме Коши:

$$\begin{cases} \frac{\partial H}{\partial t} = -\frac{1}{B} \cdot \frac{\partial Q}{\partial x} \\ \frac{\partial Q}{\partial t} = -2v \cdot \frac{\partial Q}{\partial x} + [B \cdot v^2 - gS] \cdot \frac{\partial H}{\partial x} + gS(I_0 - I_f) \end{cases}. \quad (6)$$

Решения системы дифференциальных уравнений (6), получаем, подставляя в пространственные производные соответствующие конечные разности. Для этого целесообразно разбить весь бьеф на J элементов вдоль направления потока, каждый из которых длиной $dx = X/J$, где X – общая длина бьефа канала.

Схема пространственно-временной дискретизации переменных потока (6) показана на рис. 2.

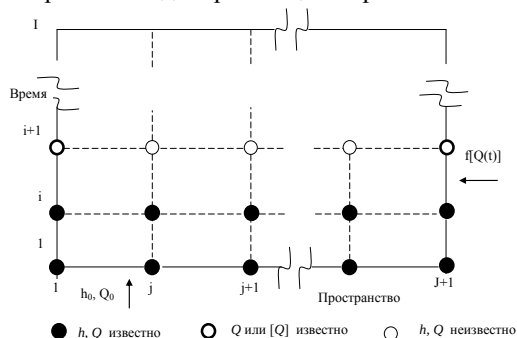


Рис. 2. Схема пространственно-временной дискретизации переменных потока в бьефе

Производные определяются по длине канала через конечные разности (6) и (7):

$$\frac{\partial H_j}{\partial x} \approx \frac{(H_{j+1} - H_j)}{dx}, \quad (7)$$

$$\frac{\partial Q_j}{\partial x} \approx \frac{(Q_j - Q_{j-1})}{dx}. \quad (8)$$

Подставив конечные разности в (6), получим системы уравнений в конечных разностях (9)-(11), которые можно использовать при моделировании потока в бьефе.

$$\begin{cases} \frac{\partial H_1}{\partial t} = -\frac{2}{B_1} \cdot \frac{Q_1 - Q_{jn} + Q_{rr1}}{dx} \\ \frac{\partial Q_1}{\partial t} = -2v_1 \cdot \frac{Q_1 - Q_{jn}}{dx} + \left[(B_1 \cdot v_1^2 - g \cdot S_1) \cdot \left(\frac{H_2 - H_1}{dx} \right) + g \cdot S_1 \cdot \left(I_0 - \frac{v_1^2}{R_1 \cdot C_1^2} \right) \right] \end{cases} \quad (9)$$

$$\begin{cases} \frac{\partial H_j}{\partial t} = -\frac{1}{B_j} \cdot \frac{Q_j - Q_{j-1} + Q_{rr(j)}}{dx} \\ \frac{\partial Q_j}{\partial t} = -2v_j \cdot \frac{Q_j - Q_{j-1}}{dx} + \left[(B_j \cdot v_j^2 - g \cdot S_j) \cdot \left(\frac{H_{j+1} - H_j}{dx} \right) + g \cdot S_j \cdot \left(I_0 - \frac{v_j^2}{R_j \cdot C_j^2} \right) \right] \\ j \in [2, J] \end{cases} \quad (10)$$

$$\frac{\partial H_{J+1}}{\partial t} = -\frac{2}{B_j} \cdot \frac{Q_{out} - Q_J + Q_{rr(J+1)}}{dx} \quad (11)$$

Такой традиционный расчет предполагает определение переменных $Q(t)$ и $H(t)$ последовательно по временным слоям с шагом dt .

Если в створе канала известен гидрограф, что является обязательным условием упреждающего управления (заявки потребителей на воду) и желаемый уровеньный режим, который определяется технологической схемой автоматического водорегулирования, то изменив схему пространственно-временного разделения переменных потока (6), как показано на рис. 3, возможно реверсным методом расчета по пространственной переменной найти необходимое управление – водоподачу в бьеф.

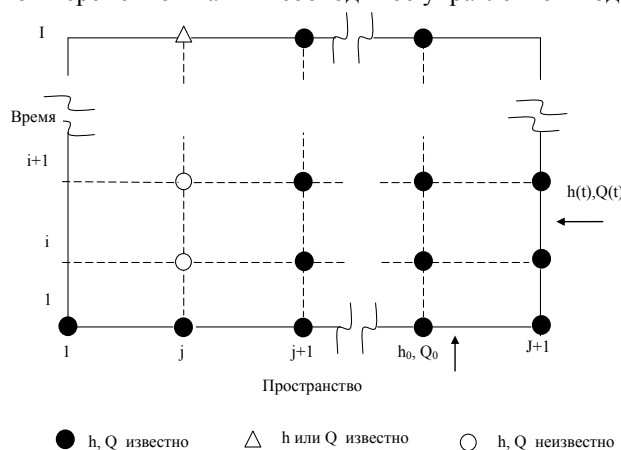


Рис. 3. Схема временно-пространственной дискретизации переменных потока

Таким образом, систему координат расчетной сетки поворачивают на 90° против часовой стрелки и получаем систему уравнений (12):

$$\begin{cases} \frac{\partial Q}{\partial x} = -B \cdot \frac{\partial h}{\partial t} \\ \frac{\partial h}{\partial x} = \frac{g \cdot S \cdot (I_0 - I_f) - \frac{\partial Q}{\partial t} + 2 \cdot v \cdot B \cdot \frac{\partial h}{\partial t}}{(g \cdot S - B \cdot v^2)} \end{cases} \quad (12)$$

Если производные глубины и расхода потока по времени равны нулю, то после преобразований получим известное нелинейное дифференциальное уравнение неравномерного плавноизменяющегося движения жидкости в призматических руслах [7]. Впервые подобный подход был предложен Wylie [9] для определения водоподачи в акведуках, где был использован метод характеристик для решения уравнений Сен-Венана.

Решения системы дифференциальных уравнений (12) получаем, подставляя во временные производные соответствующие конечные разности. Для этого целесообразно разбить весь интервал времени на I интервалов, длиной $dt = T/I$, где T – общая длина временного интервала.

Схема временно-пространственной дискретизации переменных потока (12) соответствует шаблону рис. 3.

$$\begin{cases} \frac{\partial Q_i}{\partial x} = -\frac{(B_i + B_{i+1})}{2} \cdot \frac{(h_i - h_{i+1})}{dt} \\ \frac{\partial h_i}{\partial x} = \frac{g \cdot S_i \cdot (I_0 - I_{fi}) - \frac{(Q_i - Q_{i-1})}{dt} + 2 \cdot v_i \cdot B_i \cdot \frac{(h_i - h_{i+1})}{dt}}{(g \cdot S - B \cdot v^2)} \end{cases} \quad (13)$$

Решение системы нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных (13) реализовано с использованием стандартных методов решения систем обыкновенных дифференциальных уравнений в форме Коши.

Проверка алгоритма решения системы (13) выполнена на тестовых примерах расчета динамики модели канала, выполненных В/О «Союзводпроект» [3].

В результате решения традиционным и реверсным методами расчета для модели канала, мгновенные значения профилей свободной поверхности потока и расходов совпадают в контролируемых створах канала с относительной ошибкой не более 3,5% по расходу и 3,3% по глубине потока.

Выводы и перспективы дальнейших исследований. Разработанная гидродинамическая модель прямого и реверсного расчета потока в бьефе оросительного канала позволяет с достаточной точностью моделировать переходные процессы во всем диапазоне изменений нагрузки в обоих пространственно-временных направлениях.

Такой подход позволяет решить задачу синтеза управления бьефом, как нелинейного объекта с распределенными параметрами и оптимизировать использование резервного объема бьефа.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Воцелка С.А. Моделирование нестационарного потока в ирригационном канале/С.А. Воцелка, С.А. Рожков // Вестник Херсонского национального технического университета. –2011. –№2 (42). –С. 133–139.
2. Грушевский М.С. Неустановившееся движение воды в реках и каналах / Грушевский. – Л.: Гидрометеиздат, 1982. –288 с.
3. Жарковский А.М. Каналы саморегулирующиеся с расходом до 2 м³/с для оросителей и тупиковых распределителей автоматизированных оросительных систем с широкозахватной дождевальной техникой. Технические решения /А.М. Жарковский, М.Ш. Марголин, М.Р. Линович и др. – М.: В/О Союзводпроект, 1985.–100 с.
4. Коваленко П. И., Попов В. М. Управління водорозподільними системами за принципами ресурсо-та енергозаощадження. - К.: Аграрна наука, 2011. – 368 с.
5. Маковский Э.Э. Автоматизация гидротехнических сооружений в системах каскадного регулирования расходов воды / Маковский. –Фрунзе: Илим, 1972. –302 с.
6. Ткачев А.А. Оптимизация процессов управления водораспределением на магистральных оросительных каналах : Монография / Новочеркасска государственная мелиоративная академия. –Новочеркасск : Оникс+, 2007. –146 с.
7. Справочник по гидравлике. / Под редакцией Большакова В.А. – К.: Вища школа, 1977. – 280 с.
8. Bautista E., Clemmens A. J., Strelkoff T. Comparison of Numerical Procedures for Gate Stroking // Journal of Irrigation and Drainage Engineering, Mar. 1997, Vol. 123, No.2, pp. 129-136.
9. Wylie E. B. Control of transient free-surface flow //J. Hydr. Div., ASCE, 1969.–P.347-361.

ВОЦЕЛКА Сергей Александрович – ст. преподаватель Херсонского государственного аграрного университета

Научные интересы:

– математическое моделирование технологических процессов и систем управления в мелиорации