

УДК 628.1.034.2:556.51(282.2)

А. А. Кувалкин, А. В. Кувалкин, Б. Х. Санжапов

МОДЕЛЬ УПРАВЛЕНИЯ ВОДНЫМИ РЕЖИМАМИ В ОТКРЫТЫХ КАНАЛАХ КРУПНОМАСШТАБНЫХ ИРРИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ

Рассмотрена постановка задачи и численный метод моделирования процессов функционирования неустойчивого движения воды в открытых руслах мелиоративных каналов крупномасштабных ирригационных систем на основе специального алгоритма интегрирования известных уравнений гидродинамики.

Ключевые слова: ирригационная и мелиоративная системы, магистральные, распределительные каналы, хозяйственные водовыделы, неустойчивое движение воды, уровень режим, добегание водных масс, регулирование водоподачи.

The formulation of the problem and the numerical method for modeling the functioning processes of unsteady flow in open reclamation channels of large-scale irrigation systems on the basis of a special algorithm of integrating well-known equations of hydrodynamics are considered.

Key words: irrigation and reclamation systems, trunk, distribution channels, farm waterway division, unsteady water flow, water level regime, lag of water masses, water supply regulation.

Общая схема постановки задачи. Система мелиоративных каналов, включая магистральную и распределительные открытые сети, гидротехнические сооружения, насосные станции, внутрисистемные водохранилища, в условиях оперативного регулирования процессов их функционирования требует согласования режимов водоподачи и водозаборов в головных и распределительных частях каналов, в т.ч. в хозяйственные водовыделы, в соответствии с определенным графиком. Поэтому основная часть задачи управления мелиоративными каналами связана с оценкой и планированием характера добегания технологических расходов к отдельным створам магистральной и распределительной сети, формированием оптимального уровня режима в местах расположения водозаборных сооружений и насосных станций (НС), обеспечением возможности и режима забора потребных расходов с помощью самотечной подачи либо забора НС. Решение данной задачи может позволить сформировать оптимальный режим работы сети мелиоративных каналов с учетом своевременности доставки нужных объемов воды, формирования оптимальных уровней режимов в местах расположения НС и водозаборных сооружений, обеспечить минимальные холостые сбросы и дефициты водоподачи, обеспечить безаварийность работы регулирующих сооружений.

Для решения данной задачи используются математические модели гидравлики открытых русел каналов для неустойчивого режима расходов и уровней. Однако сложность алгоритма такого моделирования заключается в разнообразии конкретных технических схем мелиоративных каналов, что требует специальной адаптации алгоритмов к конкретному случаю.

Рассматривая в целом систему мелиоративных каналов, представим ее в виде структурных элементов, существенных для построения алгоритма имитационного моделирования процессов руслового добегания технологических расходов в каналах и их распределения по сети между водопотребляющими объектами.

Вся система каналов мелиоративного комплекса структурируется по следующим элементам: а) участки магистральной, распределительной и внутрихозяйственной сети, представляющие собой линейные участки, на которых отсутствуют регулирующие гидротехнические сооружения и водовыделы; б) участки с водовыделами в канал-распределитель или внутрихозяйственную сеть (с самотечным водозабором или с помощью НС); в) внутрисистемные водохранилища (бассейны) суточного регулирования.

Особенность распределения на выделенные элементы основана на специфике моделирования поступающих по неравномерному графику расходов воды.

Структура технической схемы мелиоративной системы (МС) представляется с помощью ориентированного графа-дерева (рис. 1). Вершинами такого графа служат расчетные узлы МС, а ребрами — участки каналов, причем длина каждого ребра соответствует длине участка канала. Каждая вершина одновременно характеризует ребро графа (формально его длина может быть принята в отдельных случаях нулевой). При этом каждая вершина классифицируется и относится к определенному типу вершин: исток (голова) канала определенного порядка, участок канала, водовыдел, гидротехническое сооружение и его тип, насосная станция и т. д. Соответственно, для каждого типа вершин задается информация, которая согласно типу вершины имеет определенную структуру, включая призначную часть (тип вершины, местоположение в системе вершин согласно заданной системе кодировки) и информационную часть, характеризующую технические характеристики данного объекта, в т. ч. линейные размеры, пропускные способности, гидравлические характеристики и пр.

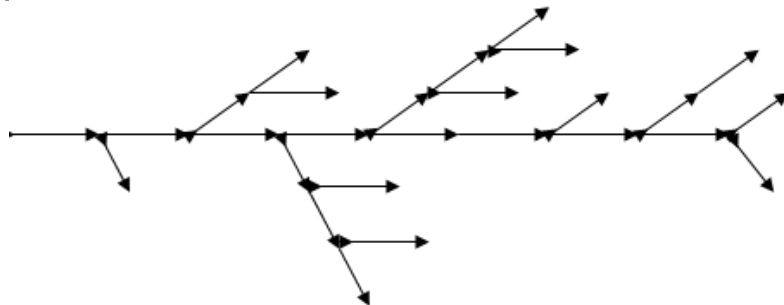


Рис. 1 Схематическое представление графа-дерева сети мелиоративных каналов с системой расчетных вершин

Совокупность данных об отдельных элементах и вершинах графа составляет информационный образ объекта, а множество всех информационных образов различных структурных объектов составляет информационную модель системы с учетом ее топологии и наиболее существенных параметров, необходимых и достаточных для решения данной задачи. Система обозначений и нумерация вершин графа-дерева осуществляется таким образом, чтобы учесть ветвление графа с учетом разного порядка элементов ветвления. Здесь выделяются аналогично с естественными водными объектами основной водоток (магистральный канал), водотоки первого порядка (распределительные каналы), запитываемые из основного, водотоки второго порядка, третьего и

т. д. База данных, в которой предусматривается хранение систематизированных сведений обо всех элементах системы, включает матрицу смежности ребер и вершин графа системы, на основе которых программным путем при компьютерных расчетах осуществляется «сборка» системы, а также словари и справочники для атрибутивной характеристики расчетных элементов и формирования выходных таблиц и графиков в соответствии с выполняемыми расчетами.

Математическая модель расчета неустановившегося потока воды на участках мелиоративных каналов в детальном масштабе времени.

Расчет движения воды в открытом канале мелиоративной системы описывается с помощью дифференциальных уравнений неустановившегося потока, хорошо разработанных и изученных в гидродинамике [1—5]. Модель медленно изменяющегося неустановившегося неравномерного движения водных масс (Сен-Венана) включает уравнение неразрывности и количества движения. Консервативная форма одномерного уравнения неразрывности для каналов, включающих элементы водоотбора и потери воды из живого тока, имеет вид

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial \omega}{\partial t} = -q, \quad (1)$$

а в развернутой форме

$$\omega \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial \omega}{\partial x} + \frac{\partial \omega}{\partial t} = -q, \quad (2)$$

где Q — расход воды, м³/с; ω — площадь живого сечения, м²; V — средняя скорость течения, м/с; q — отбор воды из канала (включая потери) на единицу длины, м²/с; x и t — пространственная, м, и временная, с, координаты соответственно.

Развернутая форма одномерного уравнения количества движения для каналов с учетом отбора воды из него и потерь по длине участка имеет вид

$$\frac{\partial V}{\partial t} + V \frac{\partial \omega}{\partial x} + \frac{g}{\omega} \frac{\partial (\bar{H}\omega)}{\partial x} - \frac{Vq}{\omega} = g(I - I_f), \quad (3)$$

где g — ускорение силы тяжести, м/с²; \bar{H} — расстояние от водной поверхности до центра тяжести водного сечения (в других формулах вместо него используют среднюю по сечению глубину потока); I — уклон дна канала, м/м; I_f — гидравлический градиент (уклон трения):

$$I_f = \frac{Q^2}{K^2},$$

где $K = C\omega\sqrt{R_h}$ — пропускная способность канала, определяемая гидравлическим радиусом (отношением площади живого сечения к смоченному периметру) R_h , площадью живого сечения ω и коэффициентом пропорциональности C (скоростной коэффициент Шези), связанного со скоростью движения потока, а также шероховатостью русла. Существуют различные формулы для его расчета, например (формула Маннинга)

$$C = \frac{1}{n} h^{\frac{1}{6}},$$

где h — глубина; n — коэффициент шероховатости, который табулирован для основных характеристик каналов и широко применяется при гидравлических расчетах.

Уравнение неразрывности (1)—(2), переписанное в виде

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} = -\frac{\partial Q}{\partial x} - q, \quad (4)$$

в конечно-разностной интерпретации представляет собой уравнение руслового баланса элементарного участка Δx :

$$\frac{dW}{dt} = -(\Delta Q + q\Delta x). \quad (5)$$

Второе уравнение системы (1)—(3) — уравнение количества движения — описывает динамику потока, характеризующуюся вязкостью, уклоном, шероховатостью и гравитационными силами. Эти параметры, увязанные с распространением массы потока по руслу канала (русловым водным балансом), и позволяют оценивать в любом створе в заданный момент t интересующие нас гидравлические характеристики и, прежде всего, расход, уровень и скорость течения. Уравнение (3), если имеются достаточные данные о гидравлических параметрах русла на основе специально сделанных инструментальных измерений, может быть заменено взаимосвязью $\omega = f(Q, x)$ (кривая русловой емкости канала), и тогда уравнение неразрывности, если подставить в него данную зависимость, даст искомое решение с приемлемой степенью достоверности.

Если существует однозначная взаимосвязь $\omega = f(Q, x)$ или $Q = \varphi(\omega, x)$, то уравнение неразрывности в форме (1), (2) или (4) называют уравнением кинематической волны (или уравнением сохранения массы), что позволяет использовать модели руслового баланса в расчетах неустановившегося потока в канале с учетом специально подобранного соотношения конечных интервалов Δx и Δt без существенной потери точности. Дальнейшая апробация моделей в условиях реальных наблюдений позволяет откорректировать (калибровать) их параметры. Последующее использование данных моделей на практике дает вполне приемлемые результаты с точки зрения корректности их применения и получаемой точности расчетов для конкретных створов и участков канала.

Описанные уравнения с учетом сделанных упрощений дают достаточно надежные результаты, если:

поток относительно прямолинеен и скорости примерно одинаковы по всему живому сечению;

давление по живому сечению потока подчиняется гидростатическому закону;

уклон канала относительно мал по сравнению с протяженностью;

скорость течения воды в канале определяется формулой Шези — Маннинга, т. е. существует однозначная зависимость расхода воды от уровня, что

в практических случаях вполне допустимо, так как такие гидравлические параметры, как скорость, уровень и расход сравнительно медленно изменяются даже при неустановившемся режиме и могут считаться неизменными на малом отрезке времени;

водоотборы в распределительные каналы и хозводовыделы при самотечной подаче расположены нормально по направлению к последнему, а скорость в канале более низшего порядка не превышает существенно скорость потока, из которого отбирается вода;

водохранилище, если оно включено в общий участок в качестве замыкающего створа, сравнительно вытянуто и имеет среднюю глубину не более 3 м, либо представляет собой озеровидный бьеф, небольшой по длине сравнительно с общей длиной всего расчетного участка.

Алгоритм численной реализации модели Сен-Венана неустановившегося движения водных масс в системе мелиоративных каналов. Для расчета по уравнениям (1)—(3), описывающим неустановившееся неравномерное движение водных масс, необходимо задать начальные и граничные условия на участке. Термин «начальные условия» означает состояние потока, его скорость или расход во всех точках русла канала в момент времени $t = 0$. Граничные условия определяют высоту слоя воды, ее скорость или расход в верхнем и нижнем створах канала в любой момент времени $t > 0$.

В качестве начального условия задаются параметры равномерного установившегося потока (либо нулевые значения, если канал не действовал) или данные предыдущего цикла расчетов. Это условие описывается расходами, которые были известны во всех расчетных узлах каналов на предыдущем цикле расчетов. Таким образом, выделяется всего $n + 1$ расчетных створов и n расчетных участков, в которых рассчитывается трансформация входного потока, поступающего в створе № 0 (головной забор магистрального канала). Если поток на начальный момент расчета является неустановившимся, то следует задать индивидуальные значения расходов для всех створов по данным предыдущего расчета или известные (предположительные) значения. Считается, что если поток установившийся, то расходы в створах участка одинаковые и отличаются лишь на величину водоотбора в распределительные каналы и хозводовыделы плюс потери по каналам.

В качестве граничных условий задаются для каждого t в верхнем створе значения поступающих расходов в голове канала. В нижнем створе участка для каждого t задаются расходы, минимально необходимые для обеспечения технологических уровней и транзитных расходов для подачи на нижерасположенные участки и обеспечения работы водозаборов.

Для реальных русел каналов в условиях неравномерного движения площадь поперечного сечения меняется вдоль водотока (координаты x). Неустановившееся движение влечет ее изменение и со временем, т. е. $\omega = \omega(x, t)$.

Однако поскольку не всегда имеются детальные морфометрические параметры каналов, используются усредненные характеристики для участков на основе имеющихся морфометрических данных. Таким образом, весь участок разбит на «характерные» участки, в пределах которых считается, что морфометрические характеристики неизменны. При этом для отправного створа № 0 в голове канала гидрограф водоподачи задается в соответствии с текущим планом Q_0 , в расчетные интервалы $0 \dots t$, м³/с.

Затем рассчитывается трансформация расхода на первом участке и выходной гидрограф, который, в свою очередь, служит входным гидрографом для второго участка и т. д. Такой алгоритм позволяет существенно упростить расчет и избежать многих математических и вычислительных трудностей.

Схема алгоритма предполагает расчет для отдельных ветвей графа-дерева каналов в несколько этапов. На первом этапе расчет выполняется для основного канала по всей длине в разрезе выделенных «характерных» участков. Соответственно отходящие (забирающие воду) каналы и водовыделы следующего порядка рассчитываются на втором этапе в зависимости от получаемого гидрографа от питающего канала, третьим этапом рассчитываются каналы и водовыделы следующего порядка и т. д.

Для каждого «характерного» участка решается уравнение кинематической волны с учетом согласования решения по известным для данного участка морфометрическим характеристикам, данным поперечников и составленного продольного профиля, на основе которых строятся аналитические зависимости в виде кусочно-непрерывных кривых:

$Q(H)$ — зависимость расхода в створе канала от уровня;

$H_{cp}(Q)$ — зависимость среднего уровня воды от расхода в створе;

$w(Q)$ — зависимость живого сечения от расхода в створе;

$H(Q)$ — зависимость абсолютного значения отметки уровня от расхода в створе;

$Q(w)$ — зависимость расхода от площади поперечного сечения.

Данные взаимосвязи строятся на основе выполненных инструментальных измерений, с использованием гидравлических уравнений Шези — Маннинга для вычисления скорости потока в зависимости от уклона, шероховатости участка, формы и поперечного сечения русла. Поскольку данные параметры так или иначе связаны с остальными характеристиками потока, в частности средней шириной, максимальными и средними уровнями участка канала, площадью поперечного сечения и расходом на участке, не представляет труда выполнить математические построения для определения указанных зависимостей.

Для водохранилищ составляются поперечные профили для более точного учета распределения объема водохранилища по длине при расчете динамической емкости в условиях поступления неустановившихся расходов во входном створе. Общие характеристики водохранилища описываются с помощью батиграфических кривых:

$F(H)$ — зависимость площади зеркала водохранилища от уровня у плотины;

$W(H)$ — зависимость объема водохранилища от уровня у плотины;

$H(W)$ — зависимость уровня в водохранилище от объема наполнения.

Расчетный временной интервал (шаг) Δt выбирается исходя из длины расчетного участка Δx с учетом времени добегания расхода τ при данном расходе или уровне на участке таким образом, чтобы Δt было близко к нему, но не превышало $\Delta t \leq \tau$. В противном случае расчет по формуле кинематической волны дает искаженные результаты — возникает как бы эффект подпертого бьефа со стороны нижерасположенного створа.

Как правило, в предложенном алгоритме соотношение конечных интервалов времени Δt и длины расчетного «характерного» участка Δx подбирается

таким образом, чтобы можно было выполнять расчеты с временным шагом от 10 до 20 мин, что вполне достаточно для принятия оперативных решений по управлению процессами водораспределения. Параметр временного шага Δt задается экспериментатором исходя из интересующего его дробления всего расчетного интервала T . Если устанавливается крупность интервала большая, чем время добегания расхода в соответствии со средней скоростью движения потока на участке, то расчет выполняется для более мелкого интервала для усредненных данных, а затем полученный результат обобщается для установленного более крупного.

Конечный результат расчетов по «характерным» участкам обобщается для основных створов.

Алгоритм расчета для каждого линейного участка канала (ветви графа-дерева) состоит в следующем:

1. Рассчитываем гидрограф $Q_{i,t}$ в створе i для всех расчетных интервалов времени $t = 0, 1 \dots T$ на основе входного гидрографа $Q_{i-1,t}$. Для первого створа (в голове канала) таковым является задаваемый или рассчитываемый так называемый «граничный» гидрограф.

2. Расчет выполняем для рассматриваемого участка для каждого отдельного интервала времени t путем решения уравнения распространения потока (кинематической волны) от верхнего створа участка к нижнему в форме (5), в результате чего определяем расход и уровень в конце текущего расчетного интервала времени.

3. Согласно формулам гидравлической связи определяем остальные гидравлические характеристики с учетом проверочных связей. При этом определяем невязку, возникающую при расчете среднего уровня в нижнем створе участка. С учетом этого делаем серию итеративных уточняющих расчетов, в результате чего определяем для рассматриваемого створа окончательные величины расхода и уровня в конце интервала t (на начало интервала $t + 1$):

$$Q_{i,(t+1)}, H_{i,(t+1)}.$$

4. На следующем интервале расчета $t + 1$ полученное на предыдущем временном шаге $Q_{i,t+1}$ считаем нижним граничным расходом, а верхним граничным расходом — $Q_{(i-1)(t+1)}$ и продолжаем расчет согласно предыдущим пунктам 2 и 3 до тех пор, пока не будут исчерпаны все заданные интервалы времени.

5. Расчетную последовательность действий 1—4 выполняем последовательно для всех створов и участков вниз по течению канала. По окончании расчета принимаем полученные расчетные гидрографы и соответствующие им уровни в створах в качестве искомого решения для нахождения расходов и уровней.

6. В процессе выполнения расчета распространения неустановившегося водного потока по линейному участку водотока выполняется проверка соответствия условий для осуществления запланированных расходов в расчетные промежутки времени. Если не соблюдаются технологические условия для осуществления заданного отбора воды (не позволяет низкий уровень, ожидаемый объем воды еще «не пришел» и др.), то гидрограф водоподдачи корректируется по фактической пропускной способности водозаборного сооружения.

7. После завершения цикла расчетов для основного линейного участка с заданными гидрографами водоподачи в распределительные каналы расчет выполняется последовательно по каждому каналу следующего порядка согласно правилам, последовательно вышеизложенным в пунктах 1—6.

8. Расчеты выполняются последовательно для всех порядковых уровней водотоков графа-дерева мелиоративной системы. Результаты фиксируются в выходных таблицах. По результатам серии расчетов подбирается оптимальный режим водоподачи в головной части мелиоративной системы для обеспечения плановых режимов работы всех участков системы.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Годунов С. К. Уравнения математической физики. М. : Наука, 1971. 416 с.
 2. Грушевский М. С. Неустановившееся движение воды в реках и каналах. Л. : Гидрометеоздат, 1982. 288 с.
 3. Картвелишвили Н. А. Неустановившиеся открытые потоки. Л. : Гидрометеоздат, 1968. 127 с.
 4. Ле Монте Б. Введение в гидродинамику и теорию волн на воде. Л. : Гидрометеоздат, 1974. 368 с.
 5. Стокер Дж. Волны на воде. М. : Иностранная литература, 1959. 618 с.
-
1. Godunov S. K. Uravneniya matematicheskoy fiziki. M. : Nauka, 1971. 416 s.
 2. Grushevskiy M. S. Neustanovivsheesya dvizhenie vody v rekakh i kanalakh. L. : Gidrometeoizdat, 1982. 288 s.
 3. Kartvelishvili N. A. Neustanovivshiesya otkrytye potoki. L. : Gidrometeoizdat, 1968. 127 s.
 4. Le Monte B. Vvedenie v gidrodinamiku i teoriyu voln na vode. L. : Gidrometeoizdat, 1974. 368 s.
 5. Stoker Dzh. Volny na vode. M. : Inostrannaya literatura, 1959. 618 s.

© Кувалкин А. А., Кувалкин А. В., Санжапов Б. Х., 2013

Поступила в редакцию
в ноябре 2013 г.

Ссылка для цитирования:

Кувалкин А. А., Кувалкин А. В., Санжапов Б. Х. Модель управления водными режимами в открытых каналах крупномасштабных ирригационных систем // Интернет-вестник ВолгГАСУ. Сер.: Строит. информатика. 2013. Вып. 10(30). Режим доступа: [www.vestnik.vgasu.ru/attachments/KuvalkinKuvalkinSanzhapov-2013_10\(30\).pdf](http://www.vestnik.vgasu.ru/attachments/KuvalkinKuvalkinSanzhapov-2013_10(30).pdf)