

МОДЕЛЬ УПРАВЛЕНИЯ ВОДНЫМИ РЕСУРСАМИ БАССЕЙНА Р. АМУДАРЬИ С УЧЕТОМ КАЧЕСТВА ВОДЫ¹

М.В. Болгов*, Г.Х. Исмаилов, В.М. Федоров***

**Институт водных проблем РАН, 119991 Москва, ул. Губкина, д.3*

***Московский государственный университет природообустройства, Москва, ул. Прянишникова, д. 19*

Рассмотрена имитационная модель управления объемом и минерализацией речной воды для бассейнов рек с преимущественным развитием орошаемого земледелия. Исследуются результаты имитационного эксперимента, проведенного для бассейна Амударьи, где из-за поступления больших объемов ирригационного возвратного стока ухудшаются гидролого-экологические показатели речной воды. Предложены варианты управления водными ресурсами бассейна, улучшающие гидролого-водохозяйственные и экологические условия водопользования

ОБЩАЯ ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Отличительной чертой современного подхода к решению задачи рационального использования водных ресурсов является, с одной стороны, необходимость учета влияния природной среды на характер и масштабы использования водных ресурсов, а с другой - требуется учет воздействия развивающейся водноресурсной системы (ВРС) и в целом экономики на природную среду и прежде всего на экологические условия региона. Немаловажным, а в настоящее время зачастую и главным является в этих условиях переход от изучения взаимовлияния отдельных локальных систем и процессов, связанных с использованием водных ресурсов, к анализу функционирования этих систем в целом на основе применения современных компьютерных и информационных технологий.

В связи с этим одной из центральных задач при исследовании закономерностей функционирования ВРС является взаимосогласование требований водопотребителей и производительности водоохранных комплексов с режимом речного стока и стока возвратных вод. Для решения этой задачи в качестве основного инструмента выступает имитационная модель функционирования ВРС с учетом режима работы водоохранных комплексов. Основное ядро этой модели принадлежит модели функционирования каскада водохранилищ многоцелевого назначения.

При построении модели синтеза оптимального управления каскадом водохранилищ с учетом водоохранной деятельности следует различать следующие две взаимосвязанные задачи. К первой относится задача оптимального планирования и создания регулируемых водоохранных комплексов, гарантирующих выполнение заданной надежности снабжения потребителей водой требуемого качества. Ко второй - непосредственно задача оптимального управления ВРС, включая каскад водохранилищ и водоохранные комплексы.

Таким образом, общая постановка задачи функционирования каскада водохранилищ может быть сформулирована следующим образом.

Рассмотрим водноресурсную систему, состоящую из каскада N водохранилищ с ГЭС, расположенных на основных и боковых притоках реки. Каждое

¹ Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант 04-05-64048

водохранилище имеет m участников. В качестве участников учитываются: ирригация, гидроэнергетика, промышленное и коммунальное водоснабжение, санитарные попуски и требования природных комплексов. Период регулирования $[0, T]$ разбивается на n равных (или неравных) отрезков $\Delta t = T/n$ с помощью $n+1$ моментов времени t_0, t_1, \dots, t_n , таких, что $t_0 = 0, t_1 = t_0 + \Delta t, \dots, t_n = T$. Выбор Δt зависит от вида регулирования речного стока в пределах одного водохозяйственного года с увязкой его со следующим годом, а продолжительность расчетного интервала (Δt) полагается равной одному месяцу, декаде или пентаде. Учитывая важность водоснабжения населения, а также малую долю промышленного водоснабжения (не более 5% от общего водопотребления), в рамках данной постановки предусматривается их полное обеспечение и соответственно их требования в модель включаются в виде ограничения. Предполагается также, что все ирригационные и неирригационные потребители ($j = \overline{1, J}$), расположенные вдоль реки, формируют загрязненные сбросные и возвратные воды. Сброс этих вод в русло реки прежде всего ухудшает показатели качества речной воды, это в свою очередь сопряжено с ухудшением почвенно-мелиоративных условий и, как следствие этого, со снижением продуктивности орошаемых земель. В связи с этим предполагается, что каждая ирригационная система на выходе имеет накопители (искусственные или естественные), позволяющие в зависимости от ассимилирующей способности реки перераспределять во времени и в пространстве сток возвратных вод и тем самым сохранять нормативы показателей качества речной воды. Основным требованием к накопителям является максимум их опорожнения в конце водохозяйственного года (в зависимости от водности года) при сохранении в некоторых контрольных створах водотока, расположенных ниже по течению, концентрации загрязняющих веществ (ЗВ) в речной воде, не превышающей предельно допустимую.

В соответствии с принятыми условиями требуется определить оптимальные режимы работы каскада водохранилищ с ГЭС с учетом оптимального регулирования сброса сточных и возвратных вод с целью сохранения ПДК речной воды по концентрации загрязняющих веществ.

Математическая постановка рассматриваемой задачи такова: требуется минимизировать функционал

$$\Phi(\vec{V}, \vec{U}, t) = \min_{\vec{U}} M \left[\sum_{t=0}^T \left| \frac{\vec{U}_t - \vec{U}_{opt}}{\vec{U}_{opt}} \right| \right] \quad (1)$$

$$\vec{V} = A\vec{W} + B\vec{U} \quad (2)$$

$$\vec{V} \leq \vec{V} \leq \vec{V} \quad (3)$$

$$\vec{U} \geq \mathbf{0} \quad (4)$$

при $t = 0, \vec{V} = \vec{V}_0$, где \vec{V} -вектор наполнения, \vec{U} -вектор попусков из водохранилищ, \vec{U}_{opt} -оптимальные значения попусков, \vec{W} -вектор водных ресурсов, t -текущее время, A и B -матрицы системных условий.

Решение задачи управления каскадом водохранилищ в постановке (1)-(4) требует использования прямых методов стохастического программирования. Учитывая

неполноту вероятностной характеристики исходной информации, исключительную трудоемкость расчетов (особенно при динамической постановке задачи) для решения поставленной задачи (1)-(4) строится имитационная модель функционирования каскада водохранилищ многоцелевого назначения.

В настоящей работе для решения задачи управления каскадом водохранилищ постановке (1) — (4) использована имитационная модель, приведенная в работе [1]. Численная реализация данной модели осуществлена применительно к ВРС бассейна р.Амударьи. В её русловую часть входят три водохранилища с ГЭС (основное средство управления объемами и минерализацией речной воды), семь распределительных узлов, основные и боковые притоки, включая сток возвратных вод; водозаборы на нужды народного хозяйства и населения. Агроэкосистема включает в себя орошаемые и богарные земли, ирригационные системы (ИС), места формирования и использования ирригационного возвратного стока (ИВС).

МЕТОДЫ РЕШЕНИЯ

При описании функционирования речной части водно-ресурсной системы необходимо различать участки реки, где построены и функционируют водохранилища сезонного и многолетнего регулирования, и нерегулируемые участки реки. При выборе стратегии управления водными ресурсами при помощи модели функционирования каскада водохранилищ надо исходить не только из того, что она должна обеспечить в течение достаточно длительного периода оптимальное снабжение водой всех важных потребителей, но и должна учитывать динамику показателей, характеризующих состояние экосистем водохранилищ. Однако, учитывая сложность такого подхода как в методическом, так и в информационном плане, на данном этапе исследований учитывается лишь минерализация воды в водохранилищах и русле реки.

Динамику воды в водохранилище в момент времени t можно описать балансовым дифференциальным уравнением:

$$\frac{dV_i(t)}{dt} - Q_i(t) + \rho_i(t) + U_i(t) + r_i(t) = 0, \quad V_i(t_0) = V_i^0, \quad i = \overline{1, N} \quad (5)$$

$$V_i = V_i(Q_i, H_i), \quad i = \overline{1, N}$$

где t - время, $V_i(t)$ - объем воды в i -ом водохранилище в момент t , $Q_i(t) =$

$\sum_{j=1}^{n_i} q_{ij}(t)$ - объем главных и боковых притоков к водохранилищу, включая сток

возвратных вод из накопителей в момент t , $\rho(t)$, $U(t)$, $r(t)$ - соответственно водопотребление, попуск из водохранилища, потеря воды на испарение, фильтрацию и ледообразование из водохранилища в момент t , V_i^0 - начальный объем водохранилища в момент t_0 , H - глубина водохранилища.

Уравнение кинетики процессов смешения солей в водохранилище в момент времени t может быть описано в следующем виде;

$$\begin{aligned} \frac{dM_i(t)}{dt} - \sum_{j=1}^{n_i} q_{ij}(t) C_{ij}(t) - m_{\text{дн},i}(t) + \rho_i(t) \cdot C_i(t) + \\ + U_i(t) \cdot C_i(t) + \alpha_i V_i(t) \cdot C_i(t) = 0, \quad M_i(t_0) = M_i^0, \quad i = \overline{1, N}, \end{aligned} \quad (6)$$

где $M_i(t) = C_i(t) \cdot V_i(t)$ - масса солей в i -ом водохранилище в момент t , C_{ij} - минерализация притока, C_i - минерализация воды, вытекающей из водохранилища, $m_{дн}(t)$ - количество солей, поступающих в момент времени t в водохранилище с подземным стоком через донные отложения, α - параметр, учитывающий самоочищение, M_0 - масса солей в водохранилище в момент t_0 .

Динамику воды в накопителе в момент t можем описать следующим дифференциальным балансовым уравнением:

$$\frac{dV_i^c(t)}{dt} - q_i^c(t) + U_i^c(t) + r_i^c(t) = 0, \quad V_i^c(t_0) = V_i^{c0}, i = \overline{1, N} \quad (7)$$

$$V_i^c = V_i^c(q_i^c, H_i^c), i = \overline{1, N}$$

где $V_i^c(t)$ - объем воды в i -ом накопителе в момент t , $q_i^c(t)$ - объем возвратных вод, поступающих в накопитель в момент t , $U_i^c(t)$, $r_i^c(t)$ - соответственно попуск и потери воды на испарение и фильтрацию из накопителя в момент t , H_i^c - глубина накопителя; V_i^{c0} - начальный объем накопителя в момент t_0 .

Уравнения (5)-(7) записываются в конечно-разностном виде и в итоге преобразуются в уравнения:

$$C_i(t) = \frac{C_i(t-1) \cdot V_i(t-1) + \sum_{j=1}^{n_i} w_{ij}(t) \cdot C_{ij}(t) + m_{дн_i}(t)}{V_i(t) + P_i(t) + U_i(t) + \alpha_i \cdot V_i(t)}, \quad (8)$$

$$C_i(t_0) = C_i^0, \quad V_i(t_0) = V_i^0, \quad i = \overline{1, N}, \quad t = t_1, t_2, \dots, T$$

$$C_i^c(t) = \frac{C_i^c(t-1) \cdot V_i^c(t-1) + w_i^c(t) \cdot C_{i1}^c(t)}{V_i^c(t) + U_i^c(t)} \quad (9)$$

$$C_i^c(t_0) = C_i^{c0}, \quad V_i^c(t_0) = V_i^{c0}, \quad i = \overline{1, N}, \quad t = t_1, t_2, \dots, T$$

Здесь следует отметить, что α можно определить в результате натурных или лабораторных исследований. Для этого необходимо иметь значения $C(1)$, $C(2)$, ..., $C(m)$ концентрации солей в водохранилище в различные моменты времени t_1 , t_2 , ..., t_m . Тогда α можно определить как среднее значение всех α_i .

В отличие от зарегулированного участка реки на незарегулированном участке на формирование качества воды оказывают влияние такие факторы, как сравнительно большие скорости течения и интенсивное перемешивание водных масс. В связи с этим в створе сосредоточенного выпуска коллекторно-дренажных или сточных вод не происходит полное разбавление сточной жидкости, поступившей в водоем. По мере перемещения от створа выпуска вниз по течению к сточной жидкости будет присоединяться все большая часть расхода реки. Следовательно, для створа полного смешения (при $I = \text{Iполн}$) должно обеспечиваться условие $C_{\max} = C_{\min} = C_{\text{ср}}$. Соответственно, средняя концентрация будет равна

$$C_{\text{ср}} = \frac{q^c C^c + Q_p C_{\Phi}}{q^c + Q_p}, \quad (10)$$

где $C_{\text{ср}}$ - концентрация консервативного вещества в сбросных и коллекторно-дренажных водах, C_{Φ} - фоновая концентрация того же вещества в речной воде выше выпуска коллекторно-сточных вод.

Учитывая многокомпонентность задачи функционирования каскада водохранилищ, для изучения данной системы наиболее подходящим представляется блочная структура имитационной модели. При этом её основное назначение представить изучаемый процесс функционирования каскада водохранилищ в виде ряда составных процессов, определяемых уравнениями (5) - (10), и зафиксировать все это в виде структурной схемы.

С учетом гидролого-водохозяйственных особенностей бассейна Амударьи задача управления объемом и минерализацией речной воды формулируется следующим образом: при заданной структуре русловой части ВРС и орошаемой агроэкосистемы найти такие объемы и режимы речного и ирригационно-возвратного стока, при которых обеспечиваются надежное снабжение водой пользователей и надлежущая минерализация речной (≤ 1 г/л), оросительной ($\leq 1,5$ г/л) и хозяйственно-питьевой (≤ 1 г/л) воды при соблюдении специальных попусков (санитарных, экологических, энергетических) по всей длине реки.

Для оценки эффективности функционирования ВРС бассейна р. Амударьи, прежде всего, была проведена проверка адекватности принятой имитационной модели применительно к природно-хозяйственным особенностям этого бассейна. С этой целью проведена серия воднобалансовых расчетов для периода с 1981/82 по 1985/86 гг., характеризующего реальные условия функционирования русловой части ВРС Амударьи. Для численной реализации машинных имитационных экспериментов кроме проверки адекватности модели была подготовлена гидролого-водохозяйственная информация для различных уровней развития ВРС. Развитие водопотребления рассматривалось для двух вариантов развития ("максимум" и "стоп"). Первый вариант соответствует требованиям суверенных государств и предусматривает дальнейшее развитие орошаемого земледелия в бассейне, второй – предусматривает прекращение роста орошаемых земель (площадь орошения примерно соответствует 1990 г.). Удельное водопотребление в обоих вариантах определялось с учетом водосберегающих мероприятий, реализация которых приурочена к определенному уровню развития. Принято четыре уровня развития; I и II - середина и конец 90-х годов, III и IV – начало и первое десятилетие нового века. Результаты проведенных численных машинных экспериментов свидетельствуют о том, что дальнейшее развитие орошаемого земледелия в бассейне за счет ввода новых площадей орошения усугубит и без того напряженную водохозяйственную и экологическую обстановку в среднем и особенно нижнем течении Амударьи. Поэтому экологически допустимым вариантом дальнейшего развития водопользования и улучшения социально-экологической обстановки в бассейне является сочетание комплекса ресурсосберегающих и средозащитных мероприятий с управлением объемами и качеством речной воды.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1 Воропаев Г.В., Исмайлов Г.Х., Федоров В.М. Проблемы управления водными ресурсами Арало-Каспийского региона. М: Наука, 2003. 427 с.