

Гидравлика и инженерная гидрология

УДК 502.173:556

Г.Х. Исмайылов, доктор техн. наук, профессор

Федеральное государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования
«Московский государственный университет природообустройства»

М.В. Болгов, доктор техн. наук

В.М. Федоров, канд. техн. наук

Институт водных проблем РАН

МОДЕЛЬ УПРАВЛЕНИЯ ВОДНЫМИ РЕСУРСАМИ РЕЧНОГО БАСЕЙНА С УЧЕТОМ КАЧЕСТВА ВОДЫ*

Рассмотрено построение имитационной модели 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.

Construction of the simulation model of management of river water volume and mineralization for river basins with primary development of irrigated agriculture is under consideration in the current work. For the first time requirements channel and extra-channel consumers are taken in structure of simulation model into account in view of interests of the natural environment. General formulation and methods of the problem decision of water resources management is discussed. Variants of water resources management in the basin, improving hydrological, water economic and ecological conditions of water use are proposed.

Отличительные черты современного подхода к решению задачи рационального использования водных ресурсов — это учет влияния природной среды на характер и масштабы использования водных ресурсов, учет воздействия развивающейся водно-ресурсной системы и в целом экономики на природную среду, прежде всего на экологические условия региона.

Немаловажным, а в настоящее время зачастую и главным, является переход от изучения взаимного влияния отдельных локальных систем и процессов, связанных с использованием водных ресурсов, к системному анализу функционирования этих систем в целом на основе применения современных компьютерных и информационных технологий.

В связи с этим одна из центральных задач при исследовании закономерностей функционирования водно-ресурсной систе-

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант 07-05-00121).

мы — взаимное согласование требований водопотребителей и менеджеров производственных водоохранных комплексов к режиму речного стока и стоку возвратных вод. Основным инструментом решения этой задачи может стать имитационная модель функционирования водно-ресурсной системы, учитывающая режим работы водоохранных комплексов. Ядро модели — система функционирования каскада водохранилищ многоцелевого назначения.

При построении модели синтеза оптимального управления каскадом водохранилищ с учетом водоохранной деятельности следует различать две взаимосвязанные задачи: первая — оптимальное планирование и создание регулируемых водоохранных комплексов, гарантирующих выполнение заданной надежности снабжения потребителей водой требуемого качества; вторая — непосредственно задача оптимального управления водно-ресурсной системой, включающей каскад водохранилищ и водоохранных комплексов.

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

Водно-ресурсная система состоит из каскада N водохранилищ с ГЭС, расположенных на основных и боковых притоках реки. Каждое водохранилище имеет m участников — это ирригация, гидроэнергетика, промышленное и коммунальное водоснабжение, санитарные природные комплексы. Период регулирования $[0, T]$ разбит на n равных (или неравных) отрезков $\Delta t = T/n$ с помощью $n + 1$ моментов времени t_0, t_1, \dots, t_n , таких, при которых $t_0 = 0, t_1 = t_0 + \Delta t, \dots, t_n = T$. Выбор Δt зависит от вида регулирования речного стока в пределах одного водохозяйственного года «с увязкой» его со стоком следующего года, продолжительность расчетного интервала Δt равна одному месяцу, декаде или пентаде. Учитывая значимость водоснабжения населения, сравнительно небольшую долю промышленного водоснабжения (не более 5 % от общего водопотребления), в рамках данной задачи авторы предусмотрели полное обеспечение и населения, и промышленных объектов (соответственные их требования включены в модель в виде ограничения). Учтено и то, 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 снижает показатели качества речной воды, из-за чего ухудшаются почвенно-мелиоративные условия и, как следствие, снижается продуктивность орошаемых земель. В связи с этим авторы предусматривают следующее: 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. Основное требование к накопителям, расположенным ниже по течению, — максимальное их опорожнение в конце водохозяйственного года (при сохранении в некоторых контрольных створах водотока), концентрация загрязняющих веществ в речной воде, не превышающая предельно допустимый уровень.

В соответствии с принятыми условиями требуется определить оптимальные режимы работы каскада водохранилищ с ГЭС, учитывая оптимальное регулирование сброса сточных и возвратных вод с целью сохранения предельно допустимой концентрации загрязняющих веществ в речной воде.

Математическая постановка рассматриваемой задачи такова: требуется минимизировать функционал

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

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

$$\underline{\vec{V}} \leq \vec{V} \leq \overline{\vec{V}}; \quad (3)$$

$$\vec{U} \geq 0 \text{ (при } t = 0, \vec{V} = \vec{V}_0), \quad (4)$$

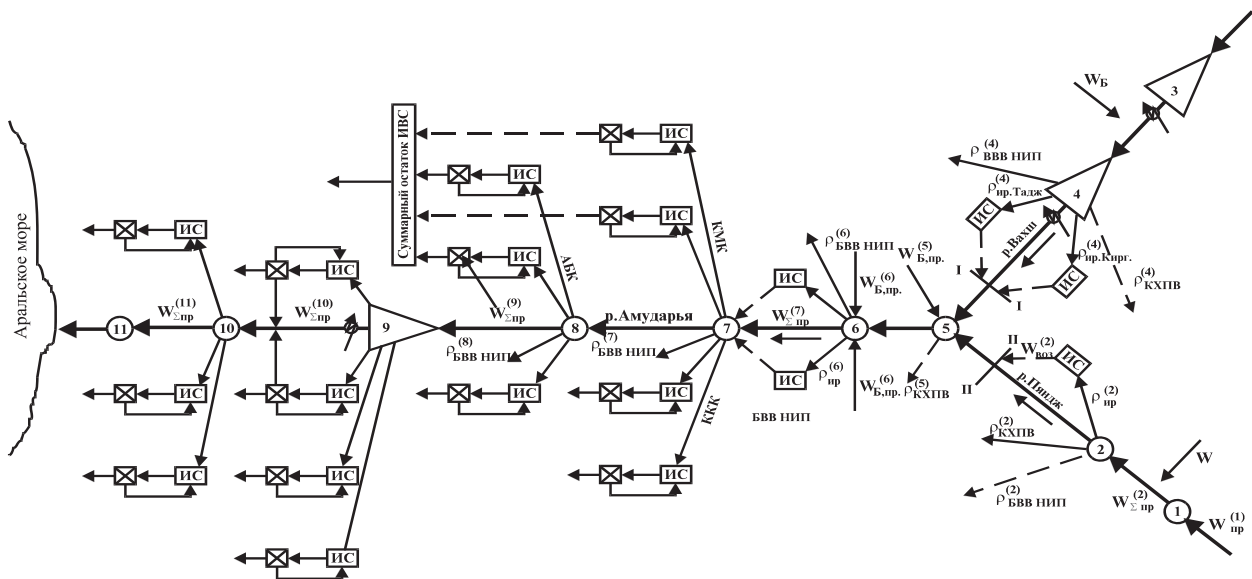
где \vec{V} — вектор наполнения; \vec{U} — вектор попусков из водохранилищ; \vec{U}_{opt} — оптимальное значение попусков; \vec{W} — вектор водных ресурсов; t — текущее время; A и B — матрицы системных условий.

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 была пост-

роена имитационная модель функционирования каскада водохранилищ многоцелевого назначения, приведенная в работах [1–3]. Численная реализация данной модели осуществлена применительно к водно-ресурсной системе бассейна реки Амударьи. На рисунке приведена расчетная схема водно-ресурсной системы бассейна реки Амударьи и обслуживаемой ею агроэкосистемы, которая и легла в основу имитационной модели данного бассейна. Русловая часть системы: водохранилища с ГЭС (основное средство управления объемами и минерализацией речной воды — 3, 4, 9); распределительные узлы — 1, 2, 5...8, 10 и 11; основные и боковые притоки (со стоком возвратных вод); водозаборы на нужды народного хозяйства и населения. Агроэкосистема включает в себя орошаемые и богарные земли, ирригационные системы, места формирования и использования ирригационного возвратного стока.

С учетом гидрологической и водохозяйственной обособленности территория рассматриваемого бассейна разделена на три участка (верхний, средний и нижний). Верхний участок (до створа Керки) в гидрологическом плане — основная стокоформирующая зона бассейна. Здесь имеются благоприятные условия для развития гидроэнергетики путем создания водохранилищ с высоконапорными плотинами. В настоящее время на этом участке функционирует Нурекское водохранилище и строится Рогунское на Вахше. По своему назначению они ирригационно-энергетические со стохастическим характером управления.

Режим работы Нурекского и Рогунского водохранилищ определяется потребностями водопользователей всего бассейна Амударьи. Размеры попусков для обеспечения заданного водопотребления (объема и режима), санитарного и экологического состояния на нижеследующем



Линейно-узловая схема водно-ресурсной системы бассейна реки Амударьи: ИС — ирригационная система; X — накопитель ирригационного возвратного стока; 1 — верхний створ Пянджа; 2 — створ в 32 км выше нижнего Пянджа; 5 — слияние Вахша и Пянджа; 6 — Термез; 7 — Керки; 8 — Чарджоу; 10 — Тахиаташ; 11 — Кзыл-Джар); ▷ (3 — Рогунское водохранилище; 4 — Нурекское водохранилище; 9 — Тюямуюнское водохранилище); $W_{\text{пр}}^{(i)}$ — приток к узлу управления ($i = 1...11$); $W_{\text{Б.пр.}}^{(i)}$ — боковой приток между узлами управления ($i = 2, 4, 5, 6$); $W_{\Sigma\text{пр}}^{(i)}$ — суммарный приток к узлу управления ($i = 1...11$); $\rho_{\text{ир}}^{(i)}$ — ирригационный водозабор из узла управления ($i = 2, 4, 6, 7...10$); $\rho_{\text{БВВНИП}}^{(i)}$ — безвозвратное водопотребление ирригационных водопотребителей из узла управления; $\rho_{\text{КХТПВ}}^{(i)}$ — коммунально-хозяйственное и питьевое водоснабжение из узла управления ($i = 2, 4, 5$); $W_{\text{Б.пр}}^{(5)}$ — боковой приток Кафирнигана; $W_{\text{Б.пр}}^{(6)}$ — боковой приток Кундуза; $\widehat{W}_{\text{Б.пр}}^{(6)}$ — боковой приток Сурхандарьи; Тигровая балка (I–I); Нижний Пяндж (II–II)

участке — не более минимально необходимых. Весь приток сверх требуемого попуска аккумулируется в пределах полезной емкости этих водохранилищ. Сбросы допускаются только после наполнения водохранилищ до нормального подпорного уровня. Режим работы подчинен правилу обеспечения компенсационных попусков для ирригационных потребителей среднего и нижнего течения, а также санитарным и экологическим условиям. Водоохранилища срабатывают не одновременно, а последовательно, начиная с Нурекского. На этом участке бассейна расположены потребители пяти государств, нужды которых удовлетворяются полностью суммарным стоком рек Вахша, Пянджа, Кафирнигана, Сурхандарьи и рек Северного Афганистана, а также возвратным стоком с ирригационных систем. Внутриконтурное использование собственного ирригационного возвратного стока в силу особенностей рельефа затруднено, поэтому применяют прямоточную схему водозабора на орошение.

Средний участок бассейна (от створа Керки до теснины Тюямуюн) — зона использования речного стока. Здесь расположены потребители двух суверенных государств. На этом участке река — приемник высокого минерализованного ирригационного возвратного стока, формирующегося на ирригационной системе левого и правого берегов реки. Наличие такого стока и благоприятные условия рельефа создают возможность покрывать потребности ирригации за счет речного («свежая вода») и возвратного стоков. Следовательно, на этом участке реки наряду с прямоточной можно применять оборотную схему использования водных ресурсов в орошаемой земледелии. При этом минерализация оросительной воды не должна превышать предельно допустимую минерализацию 1,5 г/л. Исходя из этого условия, определяют соотношение применяемых для орошения речных и возвратных вод. Неиспользуемый ирригационный возвратный сток с правобережья частично сбрасывается в Амударью (при этом минерализация речной воды не должна превышать 1 г/л), а частично отводится магистральным коллектором в бессточные понижения; неиспользуемый ирригационный возвратный

сток левобережья полностью направляется в последние. Неирригационное потребление, особенно коммунально-питьевое, удовлетворяется «свежей» речной водой.

Нижний участок реки, как и средний, — зона использования стока. Однако сильное развитие водопотребления в верхнем и среднем течениях, сопровождающееся формированием больших объемов ирригационного возвратного стока, создает условия для количественного и качественного истощения водных ресурсов на этом участке. Для смягчения напряженной водохозяйственной обстановки создано Тюямуюнское водохранилище. Роль и значение его определяются требованиями потребителей низовья к амударьинской воде. При этом водохранилище выполняет функции буферной емкости и, соответственно, перераспределяет сток, поступающий с верхнего и среднего участков реки. Тюямуюнская емкость состоит из руслового и трех наливных (Капарас, Султансанджар и Капбулак) водохранилищ. Для регулирования минерализации речной воды, а также частичного удовлетворения требований орошения на этом участке реки осуществляется повторное внутриконтурное использование ирригационного возвратного стока. По аналогии со средним течением потребность орошения на этом участке удовлетворяется из двух источников (свежая речная вода и возвратные воды). Учитывая, что в реальных условиях нельзя полностью исключить поступление в реку возвратных и сточных вод, рассматривают возможность забора воды на хозяйственно-питьевые нужды (особенно для нижнего течения) из Вахша и Пянджа.

По всей длине Амударьи предусмотрены санитарные, а в нижнем течении и экологические попуски. Кроме того, с учетом напряженности водохозяйственного баланса Амударьи в отдельные периоды года устанавливают специальные энергетические попуски. Они также обеспечивают нормальную работу водозаборов ирригационных систем Вахша.

С учетом изложенных гидролого-водохозяйственных особенностей бассейна Амударьи задача управления объемом и минерализацией речной воды формулируется следующим образом: при заданной структуре русловой части водно-ресурсной

системы и орошаемой агроэкосистемы найти такие объемы и режимы речного и ирригационно-возвратного стоков, при которых возможно полноценное снабжение водой пользователей и надлежащая 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 водно-ресурсной системы бассейна реки Амударьи была осуществлена проверка адекватности принятой имитационной модели применительно к природно-хозяйственным особенностям этого бассейна. С этой целью проведена серия водно-балансовых расчетов для периода с 1981/82 по 1985/86 гг., характеризующего реальные условия функционирования русловой части водно-ресурсной системы Амударьи.

Чтобы реализовать машинные имитационные эксперименты в полном объеме, кроме проверки адекватности модели необходимо было подготовить гидролого-водохозяйственную информацию для различных уровней развития водно-ресурсной системы. Развитие водопотребления рассматривали для двух вариантов развития — «максимум» и «стоп». Первый вариант соответствовал требованиям суверенных государств и предусматривал дальнейшее развитие орошаемого земледелия в бассейне, второй — прекращал рост орошаемых земель (площадь орошения примерно соответствует данному показателю 1990 г.). Удельное водопотребление в обоих вариантах определяли с учетом проведения водосберегающих мероприятий, которые приурочивали к определенному уровню развития: первый и второй уровни — середина и конец 90-х гг. XX века, третий и четвертый — начало и первое десятилетие XXI века.

По варианту «стоп» предусматривается непрерывное снижение водопотребления с 55,1 до 49,0 км³/год (современное водопотребление на уровне 1990 г. составляло 56,6 км³/год), по варианту «максимум» — рост водопотребления с 57,9 до 60 км³/год. Во всех этих вариантах основной потребитель амударьинской воды — орошаемое земледелие (92...94 % суммарного водопотребления). Такая значительная его доля свидетельствует о том, что и

в перспективе большую роль в русловом балансе будет играть ирригационный возвратный сток. Следовательно, его сброс в реку также будет приводить к повышению минерализации воды в среднем и нижнем течении.

Для численного машинного эксперимента отобраны три варианта: «регулируемая река» (регулируется объем и минерализация речной воды), «чистая река» (полностью прекращается сброс в реку ирригационного возвратного стока), «грязная река» (регулируется только объем речного стока). Последний вариант по схеме использования ирригационного возвратного стока близок к современному. Кроме того, начиная с третьего уровня вводится новая схема коммунального хозяйственно-питьевого водоснабжения населения Узбекистана, предусматривающая отбор воды из верховьев Амударьи (предполагаемые варианты мест водозабора из Вахша — нижний бьеф Нурекского водохранилища, из Пянджа — 32 км выше города Пяндж и из Амударьи — город Термез) в размере 1 679 (третий уровень) и 2 187 млн м³ (четвертый уровень). На основе численного машинного эксперимента проведен анализ более 100 вариантов, различающихся по уровню и развитию водопотребления, по схеме использования водных ресурсов в орошаемом земледелии и по месту водозабора.

Для анализа и выбора предпочтительных вариантов управления водными ресурсами бассейна Амударьи с учетом сохранения чистоты речной воды (минерализация менее 1 г/л) проведена серия расчетов для различных гидрологических и водохозяйственных условий. Исходя из необходимости обеспечения гарантированной водоподдачи потребителям ($P = 90$ % — ирригация; $P \approx 100$ % — коммунальное хозяйственно-питьевое водоснабжение), все расчеты проводились для водности реки обеспеченностью 90 %.

В качестве примера в таблице приведены результаты расчета для варианта «стоп».

Анализ результатов водно-балансовых расчетов для всех рассматриваемых расчетных уровней показывает преимущество варианта «регулируемая река» по сравнению с вариантами «чистая река» и «грязная река», поскольку последние

Использование водных ресурсов реки Амударьи для варианта «стоп»

Показатель	«Регулируемая река»		«Грязная река»	«Чистая река»	
	Сброс с территории Республики Каракалпакстан			Сброс с территории Республики Каракалпакстан	
	в русло	в бессточные понижения		в русло	в бессточные понижения
На третьем расчетном уровне					
Полное водопотребление, км ³ /год	49,6	49,6	49,6	49,6	49,6
В том числе:					
на орошение, км ³ /год	44,4	44,4	44,4	44,4	44,4
на хозяйственно-питьевые нужды, км ³ /год	1,68	1,68	1,68	1,68	1,68
Дефицит водопотребления, км ³ /год	0,0	0,0	0,0	0,45	0,67
Суммарный ирригационный возвратный сток, км ³ /год	13,41	13,41	13,41	13,41	13,41
Минерализация суммарного ирригационного возвратного стока, г/л	5,72	5,72	5,72	5,72	5,72
Суммарный используемый ирригационный возвратный сток, км ³ /год	4,78	5,40	–	–	–
Суммарное отведение ирригационного возвратного стока в понижения, км ³ /год	5,76	5,30	3,31	11,37	11,91
Суммарный ирригационный возвратный сток, сбрасываемый в реку, км ³ /год	2,87	2,71	10,10	2,04	1,50
Приток к створу Кызыл-Джар, км ³ /год	11,92	11,37	12,99	7,05	6,81
Минерализация притока, г/л	1,07	0,97	2,76	0,91	0,74
Объем поступления солей к створу Кызыл-Джар, тыс.т/год	12,74	10,98	35,82	6,45	5,03
Санитарный и экологический попуски в створе Кызыл-Джар, км ³ /год	5,28	5,28	5,28	5,28	5,28

по своим гидролого-водохозяйственным показателям в значительной степени проигрывают первому. Достаточно отметить, что в случае реализации варианта «чистая река» необходимо строительство магистральных коллекторов для отвода ирригационного возвратного стока в бессточные понижения, мощность которых в 2 раза превышает таковую в варианте «регулируемая река».

Аналогичные выводы получаются и при рассмотрении варианта «максимум» развития водопотребления. Однако в этом случае наблюдается напряженность в водохозяйственном балансе на всех расчетных уровнях, особенно на третьем и четвертом, где дефицит достигает 7-8 («чистая река») и 2-3 км³/год («регулируемая река» и «гряз-

ная река»), тогда как в варианте «стоп» дефицита нет.

Таким образом, при реализации варианта «стоп» в случае регулирования объема и минерализации речной воды («регулируемая река») получают глобальный экологический оптимум с точки зрения сохранения чистоты речной воды с одновременным гарантированным обеспечением пользователей свежей водой. При этом приток в дельту Амударьи в маловодные годы ($P = 90\%$) составляет более 11 км³/год, тогда как в последние 20 лет лишь в одном случае он превысил эту величину (16,8 км³/год в 1988 г.).

Анализ результатов руслового водно-го баланса показал, что осуществление

сосредоточенного отбора воды для нужд хозяйственно-питьевого водоснабжения Республики Узбекистан в верхнем течении Амударьи в объемах 1,68 (третий уровень) и 2,19 км³/год (четвертый уровень) допустимо. Это обосновывается тем, что минерализация воды Вахша и Пянджа, а также Амударьи в районе Термеза менее 0,5 г/л, и отбор такого количества воды (при реализации варианта «стоп» по схеме «регулируемая река») не влияет на надежность снабжения водой потребителей, в частности при орошении. Кроме того, не ухудшается качество речных вод в среднем и нижнем течении.

Выводы

Результаты анализа варианта «максимум» 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 («регулируемая река»).

Результаты численных машинных экспериментов дают основание полагать, что использование имитационных моделей позволит провести более углубленное гидролого-водохозяйственное обоснование проводимого комплекса мероприятий, способствующих дальнейшей интенсификации водо- и землепользования в бассейне Аральского моря и улучшению социально-экологической обстановки в этом регионе.

Ключевые слова: водоохраный комплекс, надежность, управление вводно-ресурсной системой, водохранилище, русловая часть системы, агроэкосистема, водный баланс.

Список литературы

1. **Воропаев, Г. В.** Проблемы управления водными ресурсами Арало-Каспийского региона [Текст] / Г. В. Воропаев, Г. Х. Исмаилов, В. М. Федоров. – М.: Наука, 2003. – 427 с.
2. **Воропаев, Г. В.** Развитие водохозяйственных систем. Методы анализа и оценки эффективности их функционирования [Текст] / Г. В. Воропаев, Г. Х. Исмаилов, В. М. Федоров. – М.: Наука, 1989. – 295 с.
3. **Воропаев, Г. В.** Моделирование водохозяйственных систем аридной зоны СССР [Текст] / Г. В. Воропаев, Г. Х. Исмаилов, В. М. Федоров. – М.: Наука, 1984. – 312 с.