

осадки уменьшились на 23 мм, испарение увеличилось на 29 мм и бассейновые влагозапасы, которые участвуют в компенсации как испарения, так и речного стока, увеличились на 38 мм.

1. Г. Х. Исмайылов, В. М. Федоров. Межгодовая изменчивость и взаимосвязь элементов водного баланса реки Волги // Водные ресурсы. – 2008. – Т. 35. – № 3. – 2008. – С. 259–276.

2. Водные ресурсы России и их использование: монография / Под ред. И. А. Шикломанова. – СПб: Гос. гидрол. институт, 2008. – 600 с.

Материал поступил в редакцию 10.07.14.

*Исмайылов Габил Худуш оглы, доктор технических наук, профессор*

*E-mail: Ism37@mail.ru*

*Кун Сянцзюань, аспирантка*

*E-mail: kethy123@yandex.ru*

УДК 502/504:556.16

**Г. Х. ИСМАЙЫЛОВ, А. В. ПЕРМИНОВ**

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К. А. Тимирязева»  
Институт природообустройства имени А. Н. Костякова

## **АЛГОРИТМ РЕЖИМА РАБОТЫ СИСТЕМ ВОДОХРАНИЛИЩ СЕЗОННОГО И МНОГОЛЕТНЕГО РЕГУЛИРОВАНИЯ РЕЧНОГО СТОКА**

*Рассматриваются вопросы построения алгоритма определения режима эксплуатации водохранилища и системы водохранилищ, работающих при сезонном и многолетнем регулировании речного стока. Особенности данного алгоритма в том, что он учитывает многокритериальный аспект задачи управления водными ресурсами и наличие многолетней составляющей при регулировании речного стока. Структура алгоритма позволяет использовать хорошо зарекомендовавшие принципы потоковых задач.*

*Стационарные процессы, имитационная модель, алгоритм максимального потока, водохранилище, система водохранилищ, водопользователи.*

*The paper deals with the construction of the algorithm for determining the mode of operation of the reservoir (reservoir system) working in seasonal and long-term regulation of the river flow. Features of this algorithm are that it takes into account the multi-criteria aspect of the problem of water management and availability of long-term component of the regulation of the river flow. The structure of the algorithm allows using of well-established principles of flow problems.*

*Stationary processes, simulation model, algorithm of maximum flow, reservoir, system of reservoirs, water users.*

Одной из центральных задач при исследовании закономерностей функционирования водно-ресурсной системы (ВРС) является взаимосогласование требований водопотребителей и производительности водоохраных комплексов с режимом речного стока и стока возвратных вод. Основной инструмент решения этой задачи – имитационная модель функционирования ВРС с учетом режима работы водоохраных комплексов. Ядро этой модели – модель функционирования каскада

водохранилищ многоцелевого назначения.

Актуальным на сегодняшний день является усовершенствование модели функционирования систем водохранилищ в части включения в нее блока, учитывающего изменения показателей качества воды в реке и водохранилище и на этой основе управление одновременно режимом и качеством воды (под управлением качеством воды понимается комплекс мероприятий, включая ассимилирующую (саморегулирующую и самоочищающую)

способность реки, направленных на поддержание в расчетных створах предельно допустимых концентраций).

Прежде чем рассмотреть основные развернутые уравнения, формирующие собственно структуру имитационной модели функционирования водно-ресурсной системы речного бассейна, введем следующие обозначения:  $X_{ij}^{\tau}$  – объем (расход) воды, поступающей из  $i$ -го узла в  $j$ -й (попуск из  $i$ -го узла);  $\hat{X}_{ki}^{\tau}$  – объем (расход) воды, полученный нижележащим  $i$ -м узлом из вышележащего  $k$ -го узла;  $X_m^{\tau}$  – объем воды, поступающий в устьевой участок реки и водоем;  $W_i^{\tau}$  – объем естественного агрегированного притока воды по основному руслу и боковая приточность к  $i$ -му узлу, расположенному на входе системы;  $W_{BO,ij}^{\tau}$  – водоотведение (ВО) к  $j$ -му узлу от  $k$ -го внеруслового водопользователя (ВНВ), который получает воду от  $i$ -го вышележащего узла;  $U_{c,i}^{\tau}, U_{ГЭС,i}^{\tau}, U_{a,i}^{\tau}, V_i^{\tau}$  – соответственно санитарный, энергетический, экологический и необходимый обводнительный попуск в нижний бьеф гидроузла;  $\rho_i^{\tau}, \rho_i^{\tau}, \bar{\rho}_i^{\tau}$  – суммарное водопотребление и его минимальное и максимальное значения соответственно;  $\rho_{ВНВ,i}^{\tau}$  – водопотребление внерусловым водопользователем;  $\rho_{ВНВ,mi}^{P,\tau}, \rho_{ВНВ,mi}^{ПВВ,\tau}$  – забор воды внерусловым водопользователем из узла реки и объем повторно используемой воды (ПВВ) в системе;  $\rho_{ВНВ}^{P,\tau}$  – забор воды из русла реки для внеруслового водопользователя;  $\gamma_i$  – коэффициент, учитывающий предел наполнения водохранилища на последнем отрезке времени периода регулирования в зависимости от водности года;  $V_i^{\tau}, V_i^{\tau(-1)}$  – соответственно конечное и начальное наполнение водохранилища  $i$ -го узла;  $R_i^{\tau}$  – потери на испарение и фильтрацию из водохранилища  $i$ -го узла (определяются по связи  $R_i = R_i(V_i^{\tau}, \tau)$ );  $\underline{V}_i^{\tau}, \bar{V}_i^{\tau}$  – минимально и максимально допустимые объемы наполнения водохранилища  $i$ -го узла;  $C_w^{\tau}, C_x^{\tau}, C_p^{\tau}, C_{BO}^{\tau}, C_{V_k}^{\tau}, C_v^{\tau}, C_{V_n}^{\tau}$  – минерализация соответственно притока, попуска из узла, притока к узлу, водопотребления, водоотведения и водохранилища при конечном, текущем и начальном наполнениях;  $D$  – совокупность всех узлов управления;  $L$  – совокупность всех узлов управления с водохранилищами;  $J_1(i)$  – совокупность узлов, получающих воду из  $i$ -го узла;  $J_2(i)$  – совокупность узлов, дающих воду  $i$ -му узлу;  $S(i)$  – совокупность агрегированных

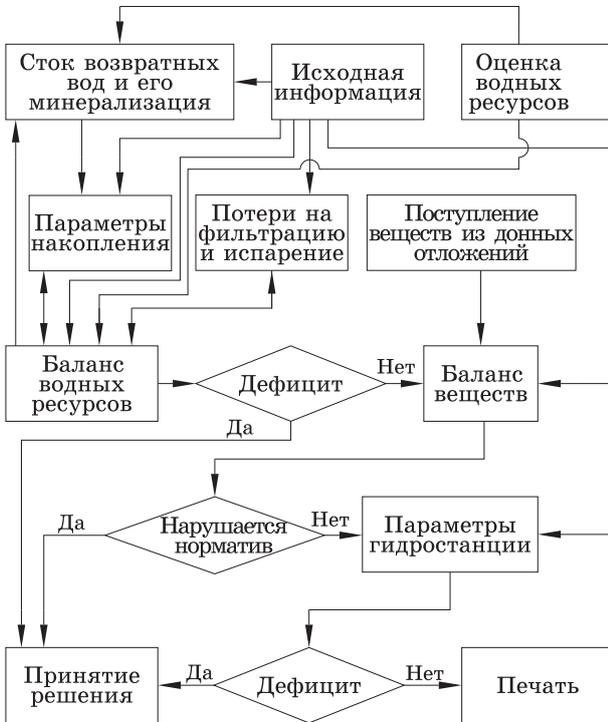
притоков воды к  $i$ -му узлу;  $A(i)$  – совокупность водопользователей, возвращающих воду  $i$ -му узлу;  $B(i)$  – совокупность водопользователей, получающих воду из  $i$ -го узла;  $\tau$  – расчетный интервал времени (сутки, пентада, декада, месяц);  $U_{opt}^{(k)}$  – оптимальный попуск для  $k$ -го руслового водопользователя (РВ), включая экологический, природоохранный и обводнительный;  $C_{Н,Р}, C_{Н,ВНВ}$  – нормативные значения речной и внерусловой минерализации водопользователя;  $\rho_{устье}^{(t)}$  – требования устьевого участка реки.

Рассмотрим водно-ресурсную систему, состоящую из каскада  $N$  водохранилищ с ГЭС, расположенных на основных и боковых притоках реки ( $i = \overline{1, N}$ ). Каждое водохранилище имеет  $m$  участников. В качестве участников принимаются: промышленное и коммунальное водоснабжение, ирригация, гидроэнергетика, обводнительные 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  $t_0, t_1, \dots, t_n$ , при которых  $t_0 = 0, t_1 = t_0 + \Delta t, \dots, t_n = T$ . Выбор  $\Delta t$  зависит от вида регулирования речного стока в пределах одного водохозяйственного года сувязкой его с последующим годом, а продолжительность расчетного интервала  $\Delta t$  полагается равной одному месяцу, декаде или пентаде. В соответствии с принятыми условиями требуется определить оптимальные режимы работы системы водохранилищ с ГЭС с учетом регулирования сброса сточных и возвратных вод для сохранения предельно допустимой концентрации (ПДК) речной воды.

При описании функционирования речной части водно-ресурсной системы необходимо различать участок реки, где построены и функционируют водохранилища сезонного и многолетнего регулирования и нерегулируемые участки. При этом как водоем, так и речной поток, представляющие по своим размерам интерес с точки зрения приема стока возвратных и сточных вод, имеют турбулентный режим. Динамика таких процессов хорошо описывается при помощи дифференциальных уравнений и подчиняется обобщенному закону сохранения.

С учетом многокомпонентности задачи функционирования системы водохранилищ для изучения данной системы наиболее подходящим является метод

машинной имитации с использованием блочной структуры. Имитационную модель функционирования каскада водохранилищ можно представить в виде блочно-структурной схемы (рисунок).



**Блок-схема имитационной модели функционирования каскада водохранилищ речного бассейна**

В соответствии с принятыми условиями требуется определить оптимальные режимы работы совместного функционирования системы водохранилищ, осуществляющие сезонное и многолетнее регулирование речного стока. Математическая постановка рассматриваемой задачи такова: требуется минимизировать функционал

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

при ограничениях

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

$$\bar{V} \leq \bar{V} \leq \bar{\bar{V}}, \quad (3)$$

$$\bar{U} \geq 0 \quad (4)$$

при  $t = 0, \bar{V} = \bar{V}_0,$

где  $\bar{V}$  – вектор наполнения (объем водохранилища);  $\bar{V}, \bar{\bar{V}}$  – соответственно нижнее и верхнее ограничения объема водохранилища;  $\bar{U}$  – вектор попусков из водохранилищ;  $\bar{U}_t$  – вектор обводнительных попусков из водохранилищ в момент времени  $t$ ;  $\bar{U}_{opt}$

– оптимальное значение специальных попусков;  $\bar{W}$  – вектор водных ресурсов;  $t$  – текущее время;  $A$  и  $B$  – матрицы системных условий.

Решение задачи управления режимом совместного функционирования водохранилищ в единой системе водоснабжения в постановке (1)...(4) требует использования прямых методов стохастического программирования. С учетом неполноты характеристики исходной информации, исключительной трудоемкости расчетов (особенно при динамической постановке) для решения задачи (1)...(4) была построена имитационная модель функционирования совместного функционирования водохранилищ в единой системе водоснабжения многоцелевого назначения.

Такая постановка относится к классу динамико-стохастических задач. Для их решения необходимо знание вероятностных характеристик системных условий. Применительно к управлению системами водохранилищ требуется знание вероятностных характеристик главного ресурса – речного стока. Природа речного стока наилучшим образом соответствует представлению его в виде непрерывного вероятностного процесса. Автор использует вероятностные описания речного стока в виде процесса Маркова с дискретным временем, а также стоковые ряды достаточно длительного периода наблюдений или искусственные ряды, полученные методом Монте-Карло.

Постановка (1)...(4) применительно к задаче управления объемами и минерализацией речной воды требует последовательного выполнения критериев:

$$J_1 = \sum_{\tau=1}^T \sum_{i \in R} \sum_{m_i \in B(i)} \rho_{m_i} \rightarrow \max; \quad (5)$$

$$J_2 = \max_{m_i} \left| \frac{\rho_{m_i}^\tau - \bar{\rho}_{m_i}^\tau}{\bar{\rho}_{m_i}^\tau} \right| \rightarrow \min; \quad (6)$$

$$J_3 = \sum_{j \in L} V_j^T \rightarrow \max; \quad (7)$$

$$J_4 = \max_i \left| \frac{X_{ij}^\tau - U_{opt,i}^{(k)}}{U_{opt,i}^{(k)}} \right| \rightarrow \min; \quad (8)$$

$$J_5 = \max_i \left| \frac{C_{X,i}^\tau - C_H^p}{C_H^p} \right| \rightarrow \min \quad (9)$$

при следующих ограничениях:

уравнения водного баланса и баланса растворенных веществ –

$$V_i^{(\tau-1)} + \sum_{r_i \in S(i)} W_{r_i}^\tau + \sum_{k_i \in J_2(i)} \hat{X}_{k_i}^\tau \tau + \sum_{l_i \in A(i)} [W_{BO,l_i}^\tau - \rho_{ВНВ,l_i}^{ПВВ,\tau}] - \sum_{j \in J_1(i)} X_{ij}^\tau \tau - R_i^\tau - \sum_{m_i \in B(i)} \rho_{ВНВ,m_i}^{P,\tau} - \rho_{ВНВ,i}^{P,\tau} = V_i^\tau; \quad (10)$$

$$C_{V,i}^\tau V_i^{(\tau-1)} + \sum_{r_i \in S(i)} C_{W,r_i}^\tau W_{r_i}^\tau + \sum_{k_i \in J_2(i)} C_{\hat{X},k_i}^\tau \hat{X}_{k_i}^\tau + \sum_{l_i \in A(i)} C_{BO,l_i}^\tau [W_{BO,l_i}^\tau - \rho_{ВНВ,l_i}^{ПВВ,\tau}] - \sum_{j \in J_1(i)} C_{X,i}^\tau X_{ij}^\tau - \sum_{m_i \in B(i)} C_{X,i}^\tau \rho_{ВНВ,m_i}^{P,\tau} - C_{X,i}^\tau \rho_{ВНВ,i}^{P,\tau} = C_{V,k,i}^\tau V_i^\tau; \quad (11)$$

концентрация растворенных веществ во внеусловной водопользователей из  $i$ -го узла –

$$C_{\rho,m_i}^\tau = C_{X,i}^\tau = \frac{C_{V,k,i}^\tau V_i^\tau + C_{Vн,i}^\tau V_i^{(\tau-1)}}{V_i^\tau + V_i^{(\tau-1)}}; \quad (12)$$

концентрация веществ в воде в  $i$ -м водохранилище в конце  $\tau$ -го расчетного отрезка времени –

$$C_{V,k,i}^\tau V_i^\tau = \left\{ \left( C_{Vн,i}^\tau V_i^{(\tau-1)} + \sum_{r_i \in S(i)} C_{W,r_i}^\tau W_{r_i}^\tau + \sum_{k_i \in J_2(i)} C_{\hat{X},k_i}^\tau \hat{X}_{k_i}^\tau + \sum_{l_i \in A(i)} C_{BO,l_i}^\tau [W_{BO,l_i}^\tau - \rho_{ВНВ,l_i}^{ПВВ,\tau}] \right) \times (V_i^\tau + V_i^{(\tau-1)}) - C_{Vн,i}^\tau V_i^{(\tau-1)} \times \left[ \frac{\sum_{j \in J_1(i)} X_{ij}^\tau + \sum_{m_i \in B(i)} \rho_{ВНВ,m_i}^{P,\tau} + \rho_{ВНВ,i}^{P,\tau}}{V_i^\tau + V_i^{(\tau-1)} + \sum_{j \in J_1(i)} X_{ij}^\tau + \sum_{m_i \in B(i)} \rho_{ВНВ,m_i}^{P,\tau} + \rho_{ВНВ,i}^{P,\tau}} \right] \right\}; \quad (13)$$

конечное наполнение водохранилища –

$$\underline{V}_i \leq V_i^\tau \leq \bar{V}_i; \quad (14)$$

конечное наполнение водохранилища на последнем отрезке времени периода регулирования –

$$V_i^\tau \geq \gamma_i \bar{V}_i, \quad i \in L. \quad (15)$$

Кроме того, для узлов управления с водохранилищем выполняются ограничения (16)...(20):

концентрация растворенных веществ в воде, подаваемой внеусловным водопользователям (16), концентрация растворенных веществ в речной воде (17), в суммарном водопотреблении (18), попуске из  $i$ -го узла управления (19) и в обводнительном попуске (20):

$$C_{ВНВ,i}^\tau \leq C_{н,ВНВ}; \quad (16)$$

$$C_{X,i}^\tau \leq C_H^P; \quad (17)$$

$$\rho_{m_i}^\tau \leq \rho_{m_i}^\tau \leq \bar{\rho}_{m_i}^\tau; \quad (18)$$

$$\hat{X}_{ij}^\tau \geq \max\{U_{C,i}^\tau, U_{ГЭС,i}^\tau\}; \quad (19)$$

$$X_{обв}^\tau \geq \max\{U_{обв}^\tau, U_{C,n}^\tau + U_{Э,n}^\tau\}. \quad (20)$$

Для решения задач (5)...(20) разработан специальный алгоритм, работающий в имитационном режиме и использующий принципы алгоритма максимального потока [1].

Как видно из (5)...(20), задача управления объемом и концентрацией растворенных веществ речной воды сводится к многокритериальной задаче принятия решений. Учитывая, что строгое решение такого рода задач отсутствует, прежде всего из-за большой размерности, в рамках настоящей работы используется принцип так называемых справедливых уступок [2]. Благодаря этому последовательно реализуется выполнение критерия (5)...(9) с соблюдением условий (16)...(20). Согласно этому принципу, сначала максимизируется суммарное водопотребление более приоритетных групп водопотребителей, но не более чем необходимо для нормального их функционирования в сложившихся условиях. При этом просматривается состояние других, менее приоритетных потребителей. В том случае, когда их водообеспеченность ниже некоторого технологического минимума (отсутствие резерва в системе), осуществляется максимальное «подтягивание» их до этого минимума за счет заблаговременного ограничения более приоритетных водопотребителей, но не более чем на 20...30 % общего объема водопотребления на данном отрезке времени. В случае, когда водообеспеченность менее приоритетных потребителей оказывается на уровне технологического минимума или выше его, проверяется возможность его повышения до частного оптимума, для чего используется условие (8).

С целью обеспечения норматива концентрации растворенных веществ речной воды в узлах управления проверяется условие (9), в случае нарушения которого либо формируется специальный попуск из водохранилища для снижения концентрации растворенных веществ речной воды, либо ограничивается сброс условно очищенных вод в русло, либо то и другое одновременно. Здесь еще раз следует отметить, что ограничение поступления условно очищенных вод в русло рек из частных водосборов может достигаться разными путями.

После того как выполнены критерии (5)...(9), проверяется наполнение всех водохранилищ на последнем отрезке периода регулирования. В случае

невыполнения ограничения (15) вступает в силу критерий (7). При этом наполнение водохранилища выступает как самостоятельный потребитель воды с определенным приоритетом и соревнуется со всеми другими водопотребителями.

В условиях дефицита водных ресурсов, когда не имеется возможности удовлетворить всех водопользователей в требуемом объеме, управляющее воздействие осуществляется путем снижения требований русловых и внерусловых водопользователей в приоритетной последовательности с учетом выполнения критерия (5)...(9) и условий (10)...(20):

$$\left\{ \begin{array}{l} U_i(t) \geq \{U_i^{\text{сан}}(t), U_{i,\text{min}}^{\text{компл}}(t), U_{i,\text{min}}^{\text{ГЭС}}(t), U_{i,\text{min}}^{\text{рыб}}, U_{i,\text{min}}^{\text{транс}}\}; \\ \rho_i(t) \leq \underline{\rho}_i(t) \leq \bar{\rho}_i(t), i \in R, t = t_0, t_1, \dots, T; \\ V_i(t) \geq \gamma_i \cdot \bar{V}_i, i \in L; \\ U_N(t) \geq \rho_{\text{устье}}^{(t)}, t = t_0, t_1, \dots, T. \end{array} \right. \quad (21)$$

Разработанная имитационная модель функционирования водно-ресурсной системы речного бассейна реализована применительно к среднему течению реки Волги (Куйбышевское, Саратовское и Волгоградское водохранилища).

#### Выводы

Задача функционирования систем (каскада) водохранилищ является многокритериальной задачей принятия решения. Учитывая тот факт, что ведущими

водопользователями являются питьевое, бытовое, промышленное водоснабжение и обводнительные попуски в нижние бьефы гидроузлов, в алгоритме определения режима работ систем водохранилищ прежде всего должны быть учтены с наибольшей детализацией их интересы, включая интересы охраны природных комплексов. По существу, задача определения режимов работы системы водохранилищ сводится к задаче рационального распределения водных ресурсов между отдельными участниками водно-ресурсных систем во времени и в пространстве с учетом ограничений требований приоритетных участников.

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

2. Теория прогнозирования и принятия решений / С. А. Саркисян [и др.]. – М.: Высшая школа, 1977. – 351 с.

Материал поступил в редакцию 07.08.14.

*Исмаилов Габил Худуш оглы, доктор технических наук, профессор*  
E-mail: Ism37@mail.ru,  
*Перминов Алексей Васильевич, кандидат технических наук, доцент*  
Тел. 8 (499) 976-23-68

УДК 502/504:628.147:628.882:557.4

### С. Н. КАРАМБИРОВ, Л. Б. БЕКИШЕВА

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К. А. Тимирязева»  
Институт природообустройства имени А. Н. Костякова

## СРАВНЕНИЕ МЕТОДОВ ОПТИМАЛЬНОГО СИНТЕЗА ТРУБОПРОВОДНЫХ СИСТЕМ

*Рассмотрены вопросы адаптации генетического алгоритма к задачам комплексной оптимизации систем подачи и распределения воды. Генетический алгоритм сравнивается с методом случайного поиска и линейного программирования.*

*Оптимизация, система подачи и распределения воды, генетический алгоритм, целевая функция, система ограничений, функция принадлежности.*

*There are considered questions of the genetic algorithm adaptation to the problems of complex optimization of water supply and distribution systems. The genetic algorithm is compared with the method of random search and linear programming.*

*Optimization, water supply and distribution system, genetic algorithm, objective function, set of constraints, membership function.*