

УДК 502/504:556.16

Г. Х. ИСМАЙЛОВ, А. В. ПЕРМИНОВ, Л. Д. РАТКОВИЧ

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

ВОПРОСЫ МЕТОДОЛОГИИ УПРАВЛЕНИЯ РЕЖИМОМ РАБОТЫ СИСТЕМЫ ВОДОХРАНИЛИЩ НА ПРИМЕРЕ МОСКОВСКОГО РЕГИОНА

Рассматривается методический подход построения математической модели функционирования водохозяйственной системы Московского региона с целью определения рациональных обводнительных попусков. Для решения поставленной задачи формируется модель оптимального управления.

Водохозяйственные системы, водохранилище, поток в сети, узел управления, дуги.

There is considered a methodical approach of building a mathematical model of the hydrological system functioning of the Moscow region for the purpose of finding rational supply releases. For the solution of the assigned problem there is formed a model of the optimal control.

Hydrological systems, reservoir, flow in the network, control center, arches.

Водохозяйственная система Московского региона развивалась поэтапно. На ранних стадиях потребности в воде удовлетворялись естественным режимом рек, отбор и сброс воды друг на друга не влияли и имели локальный характер. Изменение стока под воздействием хозяйственной деятельности не выходило за пределы точности гидрометрических данных.

По мере роста численности населения Московского региона, в первую очередь города Москвы, развития промышленности и сельского хозяйства коммунально-бытовое, питьевое и промышленное водоснабжение увеличивается, а это в свою очередь создает условия для перераспределения водных ресурсов данного региона. Одновременно возрастают объемы сточных вод, поступающие в естественные водные объекты. В силу связанности водных ресурсов в пределах речных бассейнов существенно усиливается гидравлическая и технологическая взаимозависимость различных локальных воздействий на водный режим. При

этом вновь вводимые водохозяйственные объекты формируют на отдельных участках бассейнов водохозяйственные комплексы, относительно самостоятельные, но еще не образующие единства в рамках всего бассейна. На этом же этапе начинают возникать не только вопросы обеспечения водой отраслей экономики соответствующего качества в требуемом объеме и режиме, но и вопросы охраны водных объектов. Кроме того, возникает новая проблема – формирование и управление качеством природоохранных и обводнительных попусков Московского региона на основе создания и функционирования вновь вводимых водохранилищ совместно с береговыми водоохранными комплексами.

На третьем, заключительном этапе развития водохозяйственной системы Московского региона общий объем водопотребления с учетом сточных и коллекторно-дренажных вод становится сопоставимым с водными ресурсами бассейнов рек этого региона, а в отдельные маловодные

периоды и превышает их. Воздействие хозяйственной деятельности на сток в этих условиях проявляется весьма ощутимо. В большинстве речных бассейнов данного региона эта стадия наступила в конце 60-х – начале 70-х годов прошлого столетия. В этот период создается система водохранилищ, работающих как в виде каскада водохранилищ на одной реке (Верхняя Волга), так и в виде системы водохранилищ, работающих в компенсированном режиме (бассейны рек Москвы и Вазузы). При такой схеме регулирования каждое водохранилище обеспечивает отдачу для удовлетворения своих собственных потребителей и одновременно помогает потребителям других водохранилищ, расположенных ниже по течению. Водоохранилища-компенсаторы, организующие основу водохозяйственной системы Московского региона, способны осуществлять частичное или полное многолетнее регулирование стока рек данного региона. Благодаря этому в бассейнах всех рек региона сформировалась единая водохозяйственная система (ВХС) со сложными взаимоотношениями между участниками и элементами водохозяйственной системы, с одной стороны, и окружающей природной средой, с другой. В этих условиях все большее значение приобретает необходимость сохранения существующего экологического

равновесия природы как важнейшее условие сохранения жизни в рассматриваемом регионе. Поэтому основная функция водохозяйственной системы на этом этапе сводится не только к обеспечению водой отраслей экономики и населения, но и к защите природной среды, прежде всего водных объектов, прилегающих территорий, ландшафтов и экологических систем.

Наиболее крупные водохранилища в Московском регионе появились в 30–60-е годы XX века. Задача водоснабжения многомиллионного мегаполиса была полностью решена. Водоснабжение Москвы обеспечивалось двумя системами: Волжской и Москворецкой.

И в наши дни волжская вода поступает в город из Ивановьковского водохранилища по каналу имени Москвы, проходя путь через Икшиское, Пестовское, Учинское, Пяловское, Клязьминское и Химкинское водохранилища. Москворецкая (Вазузско-Москворецкая) система включает Можайское, Верхнерузское, Рузское, Озернинское, Истринское и Рублевское водохранилища на Москве-реке и ее притоках, а также Яузское и Вазузское водохранилища в Тверской области (схема расположения водохранилищ Верхне-Волжской и Москворецкой систем приведена на рис. 1).

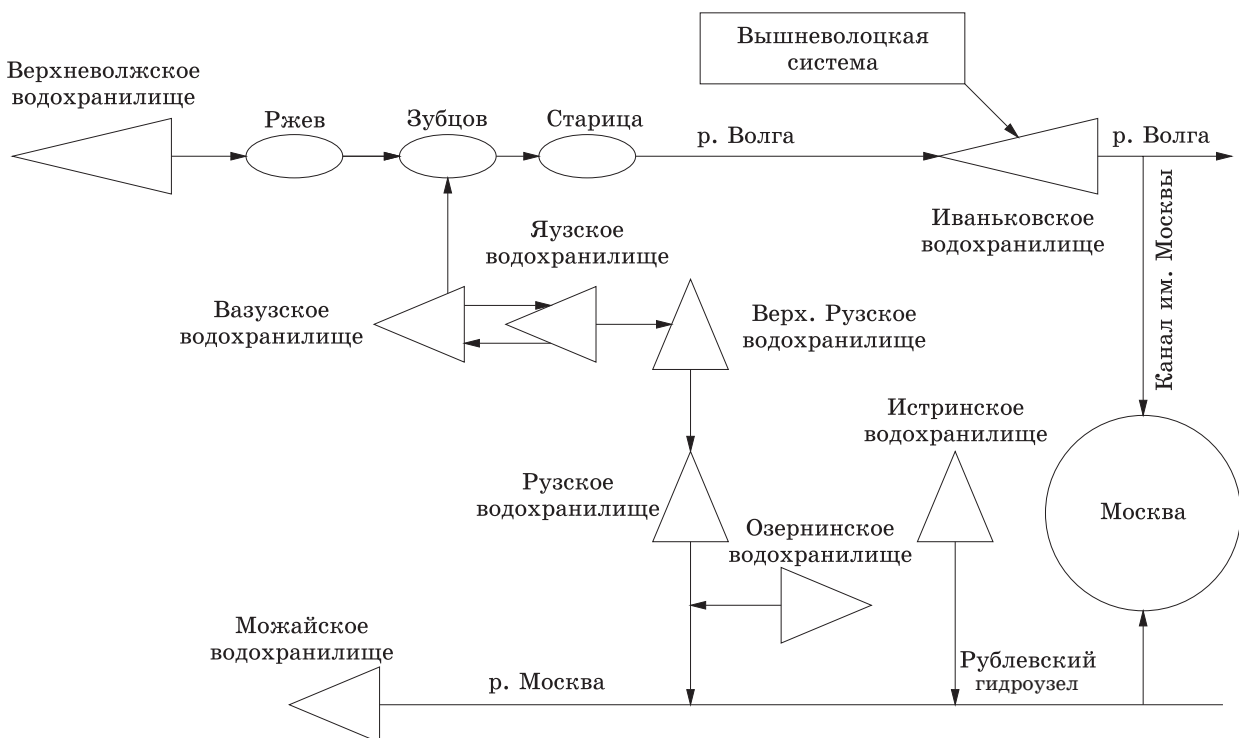


Рис. 1. Линейно-узловая схема водохозяйственной системы Московского региона

Управление водными ресурсами речных бассейнов – многокритериальная и многофакторная задача. Однако на различных этапах развития водохозяйственных систем применялись и различные подходы (упрощенные и сложные), включающие в себя решения определения режима работы с отдельных изолированных водохранилищ, вплоть до каскадного регулирования.

На ранних этапах развития водохозяйственных систем, с небольшим масштабом освоения водных ресурсов речных бассейнов, методика водохозяйственных расчетов находилась на низком уровне и рассматривала лишь элементарные случаи использования водных ресурсов речных бассейнов. С развитием водохозяйственных систем и применением схемы комплексного и каскадного регулирования использование водных ресурсов усложнялось и, как следствие, повышались требования к методическим подходам для решения сложных водохозяйственных задач. Методические подходы водохозяйственных расчетов развивались параллельно развитию водохозяйственных систем. Отдельные элементы водохозяйственной системы работали несвязанно, осуществлялось в основном суточное, недельное и сезонное регулирование. В соответствии с этим водохозяйственные расчеты выполнялись простейшими способами на основе сопоставления в хронологическом порядке расходов притока в водохранилище с расходами потребления и вычисления избытков и недостатков воды. Так возникли методы балансовых расчетов. При этом первоначально расчеты выполнялись аналитически – в таблицах, а в последующее время начали применяться графоаналитические и графические приемы расчета. Примерно в тот же период за рубежом стали решать задачи многолетнего регулирования. Аналогичные задачи в области стали решать и в СССР. Основанием для этого стало широкое развитие гидротехнического строительства. Благодаря работам С. Н. Крицкого, М. Ф. Менкеля, А. Д. Саваренского, С. И. Рыбкина и других начали развиваться вероятностные методы определения сезонной и многолетней емкости водохранилищ одноцелевого и многоцелевого назначения.

Параллельно с методикой расчетов регулирования совершенствовались и другие направления водохозяйственных расчетов. В первую очередь к ним следует отнести методику установления эксплуатационных режимов водохранилищ, на основе которой разрабатывались правила управления рабо-

той водохранилищ (диспетчерские правила управления водохранилищ). Надо отметить также и последовательное развитие методики водноэнергетических расчетов, значительную роль в котором сыграли С. Н. Никитин, С. Н. Крицкий, М. Ф. Менкель, А. М. Резниковский, А. Е. Асарин, В. Н. Обрезков, Е. В. Цветков, А. Л. Великанов и др.

Развитие компьютерной и информационной технологии в области водохозяйственных расчетов дало новый толчок развитию методических подходов к управлению водными ресурсами в таких сложных случаях, как каскадное (зависимое и независимое) и компенсирующее регулирование. Необходимым условием получения обоснованных решений в области функционирования водохозяйственных систем (ВХС) является создание надежных алгоритмов, учитывающих основные особенности исследуемого водохозяйственного комплекса. Многообразие типов математических моделей обусловлено следующими факторами: масштабами объекта и степенью агрегатирования локальных звеньев; способом учета фактора времени (статические и динамические модели); характером описания информации, природных процессов и процессов управления (стохастические и детерминированные модели); алгоритмом воспроизведения состояния системы в заданном временном интервале и получения конечного результата (имитационные и оптимизационные модели); наличием временных трендов (стационарные и нестационарные модели в зависимости от учета антропогенного либо климатического тренда в природных процессах, а также применительно к вопросам учета руслового и берегового регулирования в расчетах трансформации стока по длине реки). В основе всех классификаций лежит деление на имитационные и оптимизационные алгоритмы.

Необходимость имитационного моделирования обозначена в работах многих известных ученых [1–8]. Определяющей чертой оптимального моделирования является отыскание набора переменных, обеспечивающего оптимальное значение функционала. Принимая во внимание многокритериальность и малую эффективность локальных оптимумов, предпочтительным является поиск решения по закону распределения доходов Парето.

Имитационные модели ориентированы на анализ вариантов по принципу «что, если?». В имитационных моделях критерии оценки более прозрачны, анализ результатов

имеет более осмысленный характер, нежели в «черном ящике» алгоритмов оптимизации.

Развитие компьютерных технологий позволяет использовать сочетание оптимизационных и имитационных методов. В основе модели должен быть имитационный алгоритм, в полной мере описывающий структуру водохозяйственной системы и особенности ее функционирования. Очевидно, внедрение отдельных блоков оптимизации в имитационную модель водохозяйственной системы является наиболее рациональным подходом.

Разработка модели предусматривает систему критериев удовлетворения требований потребителей, режим регулирования стока существующими и проектируемыми водохранилищами, необходимость обеспечения отраслевых и режимных попусков, вариантность принципиальной схемы водохозяйственных мероприятий и конкретного экономического и водохозяйственного эффекта в пределах возможностей принятой схемы.

Основой управления водными ресурсами водохранилищ являются соответствующие правила – правила пользования водными ресурсами водохранилищ, ядром которых являются диспетчерские графики, устанавливающие порядок сработки и наполнения водохранилищ в различных по водности условиях.

В каждом конкретном объекте можно выделить определяющие свойства для построения индивидуальных моделей. Одна из самых сложных схем регулирования стока – это Москворецкая водохозяйственная система (МВС) в сочетании с Вазузской ГТС с целью водообеспечения Московского региона (см. рис. 1). Концептуальная модель выглядит следующим образом.

Для нахождения оптимальных (субоптимальных) режимов совместного функционирования водохранилищ в единой системе водоснабжения становится актуальной разработка моделей, работающих в оптимизационном и имитационном режимах. Главным преимуществом данного подхода является более эффективное согласование режимов работы всех водохранилищ, входящих в объединенную водохозяйственную систему, с гарантированными требованиями всех участников системы, включая объемы и сроки обводнительных попусков. Сущность такого подхода – создание единого центра управления, который должен осуществлять компенсированное регулирование в зависимости от состояния каждого элемента такой системы.

Работа по построению модели начина-

ется с изучения структурных элементов, а также тех гидролого-водохозяйственных и эколого-экономических процессов, которые свойственны водохозяйственной системе Московского региона. Затем формируется общая задача, решаемая с помощью данной оптимизационно-имитационной модели. После того как будет сформулирована задача, а в данной работе речь идет о проблеме нахождения оптимальных режимов совместного функционирования водохранилищ в единой системе водоснабжения, выделяются те процессы, которые являются существенными при ответе на вопросы, поставленные перед моделью.

Далее осуществляется формализация моделируемого объекта. Основа формализации – принцип эквивалентирования рассматриваемой водохозяйственной системы. В процессе эквивалентирования укрупняются (разукрупняются) как территориальные единицы, так и природные водохозяйственные объекты, используются основные положения теории многомерной объектной классификации. В результате рассматриваемая система, в пределах которой совместно функционирует система водохранилищ, представляется в виде совокупности агрегированных, водохозяйственных и производственных объектов. Каждый агрегированный объект, независимо от степени детализации, со своими процессами организует первичный элемент в структуре имитационной модели, носящий название «камера». Эти «камеры» и организуют структурную схему объекта моделирования. При этом различаются «камеры» сухопутные и водные. Первые связаны в основном с водопотребителями (крупными промышленными и агропромышленными комплексами, оросительными системами, населенными пунктами и др.), вторые – с водными объектами (водохранилищами, участками рек, окраинными морями, заливами и т. д.).

Таким образом, можно сформулировать задачу моделирования совместного функционирования системы водохранилищ Московского региона при долгосрочном планировании (год и более). Рассмотрим водохозяйственную систему, состоящую из систем N водохранилищ, расположенных на основных и боковых притоках реки ($i = \overline{1, N}$). Каждое водохранилище имеет m участников. В качестве участников принимаются: сельское хозяйство, гидроэнергетика, промышленное и коммунальное водоснабжение, обводнительные попуски (санитарные и экологические 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 : $t_0 = 0$; $t_1 = t_0 + \Delta t, \dots; t_n = T$ (или $t_0 = 0$; $t_1 = t_0 + \Delta t, \dots; t_n = t_{n-1} + \Delta t_n = T$). Выбор Δt зависит от вида регулирования речного стока в пределах одного водохозяйственного года с увязкой его со следующим годом. Продолжительность расчетного интервала Δt равна одному месяцу, декаде или пентаде. Предполагается, что все потребители ($j = 1, J$), 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 качества воды систем водоснабжения и увеличением эвтрофирования водохранилищ.

Считается, что каждая система водоотведения на выходе имеет накопители (искусственные), позволяющие в зависимости от самоочищающей способности реки перераспределять во времени и в пространстве объемасточные и возвратные воды и тем самым сохранять нормативы показателей качества речной воды. Основное требование к накопителям – максимальное опорожнение в конце водохозяйственного года (в зависимости от водности года) при сохранении в некоторых контрольных створах, расположенных ниже по течению, концентрации загрязняющих веществ, не превышающей предельно допустимой нормы.

Формализация структуры моделируемого объекта в виде линейно-узловой схемы водохозяйственной системы водоснабжения Московского региона хорошо реализуется как сетевая потоковая задача, описанная топологической структурой, состоящей из взаимосвязанных между собой узлов и дуг (рис.2).

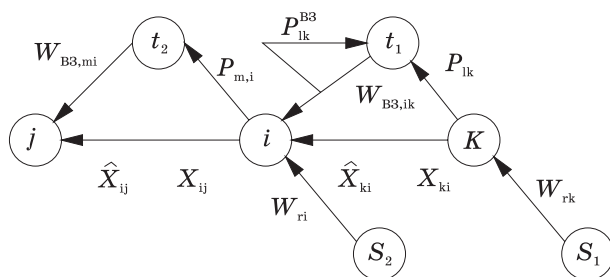


Рис. 2. Потоковая схема водохозяйственной системы речного бассейна: K, i, j – промежуточные узлы управления; $S_1; S_2$ – водоисточники; $t_1; t_2$ – водопотребители

В соответствии с принятыми условиями требуется определить оптимальные

режимы работы совместного функционирования водохранилищ в единой системе водоснабжения Московского региона.

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

$$\bar{V} = A \bar{W} \pm B \bar{U}; \quad (2)$$

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

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

при $t = 0, \bar{V} = \bar{V}_0$,

где \bar{V} – вектор наполнения (объем водохранилища); \bar{V}, \bar{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} – оптимальные значения 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. Учитывая неполноту характеристики исходной информации, исключительную трудоемкость расчетов (особенно при динамической постановке), для решения задачи (1)...(4) строим имитационную модель функционирования совместного функционирования водохранилищ в единой системе водоснабжения многоцелевого назначения.

Такая постановка относится к классу динамико-стохастических задач. Для решения подобных задач требуется знание вероятностных характеристик системных условий, а применительно к управлению системами водохранилищ – знание вероятностных характеристик главного ресурса – речного стока. Природа речного стока наилучшим образом соответствует представлению его в виде непрерывного вероятностного процесса. Авторы используют вероятностные описания речного стока в виде процесса Маркова с дискретным временем, а также в виде длинного стокового ряда, полученного по данным наблюдений или статистическим моделированием. Данная постановка задачи реализована применительно к водохозяйственной системе Московского региона.

Водно-энергетические расчеты. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 223 с.

2. Бусалаев И. В. Сложные водохозяйственные системы. – Алма-Ата: Наука, 1980. – 232 с.

3. Великанов А. Л., Коробова Д. Н., Пойзнер В. И. Моделирование процессов функционирования водохозяйственных систем. – М.: Наука, 1983. – 106 с.

4. Брик И. Ван, Лаукс П. Планирование и управление водохозяйственными системами. Введение в методы, модели и приложения. – М.: ФАВР, 2009. – 660 с.

5. Исмайылов Г. Х., Прошляков И. В., Перминов А. В. Математическая модель распределения водных ресурсов трансграничных рек // Природообустройство. – 2013. – № 1. – С. 77–82.

6. Пряжинская В. Г., Ярошевский Д. М., Левит-Гуревич Л. К. Компьютерное моделирование в управлении водными ресурсами. – М.: Физматлит, 2002. – 496 с.

7. Проблемы надежности при много-

целевом использовании водных ресурсов / А. Л. Великанов [и др.]. – М.: Наука, 1994. – 223 с.

8. Хранович И. Л. Управление водно-ресурсными системами: потоковые модели. – М.: Научный мир, 2001. – 295 с.

Материал поступил в редакцию 16.05.13.

Исмайылов Габил Худуш оглы, доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой «Гидрология, метеорология и регулирование стока»

Тел. 8 (495) 976-23-68

E-mail: gabil-1937@mail.ru

Перминов Алексей Васильевич, кандидат технических наук, доцент

E-mail: alexperminov@gmail.com

Раткович Лев Данилович, кандидат технических наук, доцент, зав. кафедрой «Комплексное использование водных ресурсов»

E-mail: levkivr@mail.ru

УДК 502/504:556.18

**Н. И. АЛЕКСЕЕВСКИЙ, Н. Л. ФРОЛОВА, М. Г. ГРЕЧУШНИКОВА,
О. М. ПАХОМОВА**

Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова

ОЦЕНКА НЕГАТИВНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ МАЛОВОДЬЯ 2010 ГОДА НА СОЦИАЛЬНО-ХОЗЯЙСТВЕННЫЙ КОМПЛЕКС СТРАНЫ*

На основе информационно-аналитических материалов всех бассейновых водных управлений (БВУ) страны, а также статистических данных проведен анализ влияния маловодья 2010 года на условия работы социально-хозяйственного комплекса Российской Федерации.

Маловодье, безопасность водопользования.

The influence of the low water level in 2010 on the social-economic complex of the Russian Federation was analyzed on the basis of the information – analytical data received from all water basin administrations of the country as well as different statistical sources.

Low water level, water use safety.

Увеличивающиеся потребности в воде демонстрируют все большую уязвимость населения и хозяйства от малово-

дий и засух [1]. Из 64 случаев учтенного ущерба из-за дефицита воды в 1991–2007 годах 50 приходится на 2001–2007 годы. Частота ущербов по причине дефицита воды в текущем столетии увеличилась почти в 5 раз по сравнению с последним десятилетием прошлого века [2]. Маловодье 2010 года сформировалось в условиях рекордно жаркого лета и аномально

* Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Московско-Окского БВУ (госконтракт № 12), РФФИ (проект № 10-05-00252), гранта Правительства РФ (№11.Г.34.31.00077) для государственной поддержки научных исследований, проводимых под руководством ведущих ученых в российских вузах.