

УДК 502/504:628.(1-21):628.113

В. В. ИЛЬНИЧ, Е. А. СВЕТЛОВ, А. В. ИЛЬИНКОФедеральное государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования
«Московский государственный университет природообустройства»

ПРОТИВОПАВОДКОВОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ СТОКА ВОДОХРАНИЛИЩЕМ КОМПЛЕКСНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Предлагается технология противопаводкового управления водохранилищем комплексного назначения на основе использования методов линейного программирования с учетом краткосрочного прогноза стока. Технология проверяется с помощью стохастических моделей стока и функционирования водохранилища.

Водохранилище, гидрологический ряд, стохастическая модель, диспетчерский график, линейное программирование.

There is proposed a technology of flood control by the multipurpose reservoir on the basis of usage of the linear programming method taking into consideration a short-term flow forecast. The technology is checked by means of flow stochastic models and reservoir functioning.

Water reservoir, hydrological series, stochastic model, operations schedule, linear programming.

Целью настоящей работы является разработка методики оперативного управления водохранилищем комплексного назначения. Обозначенная цель обусловила необходимость решения следующих задач: а) разработка стохастической модели притока речного стока к Краснодарскому водохранилищу; б) разработка имитационной модели функционирования водохранилища; в) уточнение правил управления водохранилищем комплексного назначения на основе рассмотрения различных сценариев притока и управления.

Объект исследования — Краснодарское водохранилище на реке Кубань, за счет которого летом обеспечивается орошение 95 % рисовых систем Краснодарского края. Возможен дефицит водопользования, есть вероятность появления катастрофических паводков (например, в июле 2002 г. ущерб от паводка составил 8,65 млрд р).

Одним из наиболее удобных способов стохастического моделирования процесса стока является метод фрагментов, суть которого заключается в моделировании сначала искусственного гидрологического ряда из годовых расходов воды, а затем внутригодового рас-

пределения стока [1]. В качестве исходных параметров для моделирования послужили статистические характеристики, определенные по имеющимся рядам водохозяйственных лет. Фрагменты — гидрографы из 72 пентадных (пятисуточных) значений ($i = 1...72$) [2]. Стохастическая модель такого типа применительно к Краснодарскому водохранилищу представлена в работе [3].

Моделировали искусственные 1000-летние ряды значений притока к водохранилищу, которые обеспечивают представление различных сочетаний водности года и различных фазовых интервалов. В результате получили длительный 10-тысячелетний гидрологический ряд пятисуточного притока к Краснодарскому водохранилищу. Анализ соответствия исходного и смоделированных гидрологических рядов проводился на основе сравнения аналитической кривой обеспеченности искусственного ряда с эмпирической кривой обеспеченности исходного ряда наблюдений, оценки степени аналогии внутригодового распределения стока, а также оценки однородности рядов по статистическим критериям [3, 4]. Был сделан следующий вывод: используемый

способ моделирования гидрологических рядов достаточно точен, и имеющиеся отклонения не могут оказать существенного влияния на параметры водохранилища при имитационных расчетах его функционирования. Исходный и смоделированный гидрологические ряды можно отнести к одной генеральной совокупности.

На основе моделирования процесса притока воды к Краснодарскому водохранилищу с учетом особенностей режима притока к водохранилищу и соответствующего возможного прогноза притока была составлена математическая модель его функционирования. Было выявлено, что в пределах пентады суточные расходы воды несущественно отличаются от среднего значения за пентаду. Продолжительность подъема частных паводков обычно не превышает одной декады, а их повторяемость в течение сезона существенно различается от года к году. Одни и те же фазы года могут быть как многоводными, так и маловодными.

Краткосрочный прогноз стока по реке Кубань выдается на 5 сут. Такой прогноз можно считать вполне реальным, так как по предварительным исследованиям время добегания паводковых вод к Краснодарскому водохранилищу с его водосбора составляет от 2 до 5 сут, при этом опасные максимумы формируются от выпадения осадков продолжительностью не менее чем за трое суток. Пятисуточный прогноз притока в модели представлен как достоверный. Приток за последующую пентаду определен с помощью условных функций обеспеченности притока в зависимости от притока в предыдущую пентаду, так как коэффициент корреляции между значениями притока в смежные интервалы составил 0,5...0,9. Поскольку изменчивость условных функций обеспеченности притока незначительная, в качестве прогнозной величины принималось значение 50 % обеспеченности. И полученное таким образом прогнозное значение притока считалось также достоверным.

Максимальный возможный разрешенный сброс из водохранилища за 10 сут составляет 1382 млн м³, т. е. 138,2 млн м³/сут, или 1600 м³/с при величине полезного объема 1606 млн м³. Таким образом, принимая уровень наполнения водохранилища на отметке НПУ за начало расчета, можно опорожнить его практически на 70 % за две пентады, а если заблаговременно (исходя из прогноза) сбросить некоторый объем, то и на все 100 %.

Учитывая тот факт, что максимальный приток воды к водохранилищу, рассчитанный на обеспеченность, равную 0,1 %, составлял 2500 м³/с, т. е. 215 млн м³/сут, или 2150 млн м за декаду, можно говорить о возможности достаточно надежной защиты водохранилища от переполнения за счет заблаговременного (исходя из прогноза) опорожнения водохранилища на величину, равную 0...540 (2150 — 1606 = 540) млн м³.

Основа модели функционирования водохранилища — обычное балансовое уравнение для наполнения водохранилища по пентадным внутригодовым интервалам:

$$V_{i+1} = V_i + W_i - X1_i - X2_i - S_i, \quad (1)$$

где V_{i+1} — наполнение водохранилища к концу расчетного периода (пентады); V_i — наполнение водохранилища к началу расчетного периода (пентады); W_i — объем притока воды к водохранилищу; $X1_i$ — объем фактической водоподачи из верхнего бьефа водохранилища, включая потери на испарение и фильтрацию; $X2_i$ — объем фактической водоподачи из нижнего бьефа водохранилища; S_i — объем холостого сброса в нижний бьеф.

Для условий возможного дефицита воды начальные правила управления водохранилищем выражались традиционным диспетчерскими графиками, рассчитанными методом С. Н. Крицкого, М. Ф. Менкеля:

$$\begin{aligned} &\text{если } V_i < V_{\text{мо}}, \text{ то } U1_i^* = 0 \text{ и } U2_i^* = 0; \\ &\text{если } V_{\text{мо}} \leq V_i < V_{\text{дисп}}^{\text{3i}}, \text{ то } X1_i = K_3 U1_i \\ &\text{и } X2_i = K_3 U2_i; \\ &\text{если } V_{\text{дисп}}^{\text{3i}} \leq V_i < V_{\text{дисп}}^{\text{2i}}, \text{ то } X1_i = \\ &K_2 U1_i \text{ и } X2_i = K_2 U2_i; \\ &\text{если } V_{\text{дисп}}^{\text{2i}} \leq V_i < V_{\text{дисп}}^{\text{1i}}, \text{ то } X1_i = \\ &K_1 U1_i \text{ и } X2_i = K_1 U2_i; \\ &\text{если } V_i > V_{\text{дисп}}^{\text{1i}}, \text{ то } X1_i = U1_i \text{ и } X2_i \\ &= U2_i; \end{aligned}$$

$$V_{\text{мо}} < V_{\text{дисп}}^3 < V_{\text{дисп}}^2 < V_{\text{дисп}}^1 < V_{\text{нпу}};$$

$$0 \leq K_3 < K_2 < K_1 < 1,$$

где $U1_i$ — объем требуемого водозабора из верхнего бьефа водохранилища; $U2_i$ — объем требуемого водозабора из нижнего бьефа водохранилища, включающий санитарно-экологический попуск.

Объемы фактической водоотдачи $X1_i$ и $X2_i$ определялись в зависимости от начального наполнения V_i в соответствии с заданным диспетчерским графиком.

Для противопаводкового регулирования использовались следующие ограничения:

$$\text{если } V_{i+1} \geq V_{\text{нпу}}, \text{ то } X1_i + S_i \leq W_{\text{исб}}^{\text{нпу}};$$

$$\text{если } V_{i+1} \geq V_{\text{мпу}}, \text{ то } X1_i + S_i \leq W_{\text{исб}}^{\text{мпу}};$$

$$\text{если } V_{i+1} \geq V_{\text{фпу}}, \text{ то } X1_i + S_i \leq W_{\text{исб}}^{\text{фпу}},$$

где $W_{\text{исб}}$ — максимальный разрешенный сброс в нижний бьеф.

Опасными с точки зрения затопления территории являются следующие условия:

$$1400 \text{ м}^3 < V_i \leq V_{\text{фпу}};$$

$$W_{i+1} \geq 250 \text{ млн м}^3.$$

При их выполнении для каждого последующих двух интервалов решалась задача линейного программирования, нацеленная на минимизацию затопления территорий. Целевая функция, предназначенная для безопасного пропуска максимального стока через водохранилище, выражалась следующим образом:

$$\min Z = b_i + b_{i+1},$$

где b_i — превышение объема водохранилища над объемом нормального подпорного уровня.

При этом использовались следующие ограничения:

$$b_i \geq 0; i = 1, \dots, n;$$

$$V_{i=1} = \text{const};$$

$$V_{i+1} = V_i + W_i - X1_i - X2_i - S_i;$$

$$X1_i = U1_i;$$

$$X2_i + S_i \geq U2_i;$$

$$X2_i + S_i \leq W_{\text{исб}};$$

$$V_{i+1} \geq V_{\text{умо}};$$

$$V_{i+1} \leq V_{\text{нпу}} + b_i;$$

$$V_{i+2} = V_{i+1} + W_{i+1} - X1_{i+1} - X2_{i+1} - S_{i+1};$$

$$X2_{i+1} + S_{i+1} \geq U2_{i+1};$$

$$X2_{i+1} + S_{i+1} \leq W_{\text{исб}};$$

$$V_{i+2} \geq V_{\text{умо}};$$

$$V_{i+2} \leq V_{\text{нпу}} + b_{i+1}.$$

Технология управления водохранилищем проверялась на исходном и смоделированном стохастическом рядах. При использовании имитационной стохастической модели были получены следующие результаты: вероятность превышения максимального значения форсированного подпорного уровня была понижена с 0,1 до 0,04 %. Для самого многоводного года наблюдений величина форсировки объема была снижена с 709 до 350 млн м³.

Список литературы

1. **Сванидзе, Г. Г.** Основы расчета регулирования речного стока методом Монте—Карло [Текст] / Г. Г. Сванидзе. — Тбилиси : Мецниереба, 1964. — 272 с.

2. **Светлов, Е. А.** Обоснование выбора дискретности при разработке математической модели водохранилища [Текст] / Е. А. Светлов // Роль природообустройства сельских территорий в обеспечении устойчивого развития АПК : материалы Международной научно-практической конференции МГУП, 2007. — С. 277–281.

3. **Светлов, Е. А.** Стохастическая модель водохранилища [Текст] / Е. А. Светлов, В. В. Ильинич // Природообустройство. — 2008. — № 4. — С. 59–64.

4. **Светлов, Е. А.** Оценка однородности годового стока реки Кубань [Текст] / Е. А. Светлов // Мелиорация и водное хозяйство. — 2009. — № 1. — С. 19–20.

Материал поступил в редакцию 20.03.09.

Ильинич Виталий Витальевич, кандидат технических наук, профессор

Тел.8 (495) 976-17-45

E-mail: VV_Ilinitch@mail.ru

Светлов Евгений Александрович, аспирант

Тел.: 8 (495) 907-73-69, 8 (926) 167-15-10

E-mail: Svetlov_EA@mail.ru

Ильинко Атамолий Васильевич, доцент

Тел. 8 (495) 153-97-66