

## ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ОЦЕНКИ ВЕРОЯТНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК РЕЖИМА ПЕРВОНАЧАЛЬНОГО НАПОЛНЕНИЯ ВОДОХРАНИЛИЩ С УЧЕТОМ МЕРТВОГО ОБЪЕМА

В. Д. Красов, П. С. Лысачев, В. Ю. Чернышев

*Воронежский государственный университет, Россия  
Воронежский государственный технический университет, Россия*

*Поступила 9 февраля 2010 г.*

**Аннотация:** В статье освещаются недостаточно разработанные положения вероятностной оценки режима первоначального наполнения водохранилищ с учетом мертвого объема. Предлагается подход, учитывающий дифференциацию отдачи и других элементов баланса водохранилищ не только по годам, но и по внутригодовым интервалам, в зависимости от зоны нахождения начальных и конечных наполнений. Разработаны соотношения для определения фактической отдачи водохранилищ с учетом дефицитов и холостых сбросов.

**Ключевые слова:** водохранилище, мертвый объем, речной сток.

**Abstract:** The article is devoted to the insufficiently developed basics of probabilistic assessment of treatment of the initial filling of reservoirs, according to the dead volume. The article suggests an approach that takes into account the differentiation of impact and other elements of the balance of water reservoirs not only annually, but also depending on intervals within the year, according to the area locating the initial and final filling. The work develops correlations for determining the actual impact of reservoirs in the light of deficits and single discharges.

**Key words:** reservoir, dead volume, river flow.

Мертвый объем водохранилищ  $\beta_M$ , как правило, при энергетическом использовании стока, составляет значительную долю от полного ( $\beta_{пол}$ ), и его заполнение требует длительного времени. Вероятностные характеристики режима первоначального наполнения водохранилищ многолетнего регулирования с учетом мертвого объема могут быть получены на основе моделирования последовательностей объемов  $N_1$  годового стока  $K_{ij}$  ( $i=1, 2, \dots, N$   $j=1, 2, \dots, n$ ,  $N$  – число периодов,  $n$  – число лет в периоде,  $N_1=N_n$ ) с использованием теоретической концепции Д. Я. Ратковича [1, 2, 3]. Ординаты распределения вероятностей наполнений водохранилища, отдачи воды потребителям, дефицитов и холостых сбросов находятся в результате решения уравнения:

$$Y'_{mij} = X'_{mij} + K_{ij} - \alpha', \quad (1)$$

где  $Y'_{mij}$  и  $X'_{mij}$  – наполнения в конце и в начале годовых интервалов,  $\alpha'$  – отдача водохранилища (параметры и элементы баланса водохранилища даются в долях нормы стока).

При учете мертвого объема возникает необходимость в дифференциации отдачи в зависимости от зоны нахождения наполнений  $X'_{mij}$  и  $Y'_{mij}$  в пределах:

– зона «а» с наполнениями  $0 \leq X'_{mij} \leq \beta_M$  и отдачей  $\alpha_0$ ;

– зона «б» с наполнениями  $0 \leq X'_{mij} \leq (\beta_M + \beta_{п})$ , где  $\beta_{п}$  – «емкость перехода» [2]; величина отдачи  $\alpha_p$  в этой зоне определяется степенью заполнения  $X_H$  полезной емкости  $\beta$  по зависимости  $\alpha_p = L(X_H)$  [2];

– зона «в» с диапазоном наполнений  $(\beta_M + \beta_{п}) \leq X_{mij} \leq \beta_{пол}$ , в которой водохранилище при  $X_H \geq \beta_{п}$  переходит на нормальную отдачу  $\alpha$ , соответствующую стационарному режиму [2].

Отметим, что  $\alpha_0 < \alpha_p < \alpha$ , а величина  $\alpha_0$  входит в  $\alpha_p$  и  $\alpha$ .

При достаточно большом притоке нередко ситуации, когда на протяжении года происходит достижение двух, а то и всех трех названных выше зон водохранилища. В этом случае предлагается корректировать отдачу не только по году в целом, но и внутри года, соответственно зонам «а», «б» и «в». Для этой цели определяется длительность

внутригодовых интервалов и наполнения  $Y^{(s)}_{mij}$  в конце каждого интервала ( $s$  – количество интервалов:  $s = 1, 2, 3$ ).

В начале процесса наполнения ( $i = 1, j = 1$ ) имеем исходные условия: зона «а»,  $X'_{m11} = 0$ , приток  $K_{11}$ ,  $\alpha' = \alpha_0$ . Применение уравнения (1) дает возможное значение  $Y'_{mij}$  к концу года.

Далее, в зависимости от величины  $Y'_{mij}$  возможны варианты.

*1-а.*  $Y'_{mij} < \beta_M$ . В этом случае деление на внутригодовые интервалы не производится, наполнение в конце года равно  $Y'_{mij}$ , фактическая годовая отдача  $\alpha_{\phi} = \alpha_0$ .

*1-б.* При  $Y'_{mij} \geq \beta_M$  существует переход из зоны «а» в зону «б». В этом случае  $Y^{(1)}_{mij} = \beta_M$ , а время работы  $t_M$  водохранилища с отдачей  $\alpha_0$  и сама фактическая отдача  $\alpha_{\phi}$  за интервал определяются так:

$$t_{MH} = \frac{\beta_M}{K_{ij} - \alpha_0}, \alpha_{\phi} = t_{MH} \alpha_0. \quad (2)$$

*1-в.* Затем исследуем, какое наполнение водохранилища будет в зоне «б» при отдаче  $\alpha_p = L(X_H)$ . Учитывая, что  $X^{(2)}_{mij} = Y^{(1)}_{mij}$ , величина  $X_H = X^{(2)}_{mij} - \beta_M = 0$ . Тогда наполнение к концу второго интервала будет:

$$Y^{(2)}_{mij} = X^{(2)}_{mij} + (1 - t_{MH})(K_{ij} - \alpha_p). \quad (3)$$

*1-г.* Если  $Y^{(2)}_{mij} < (\beta_M + \beta_{II})$ , то имеют место соотношения:

$$t_p = 1 - t_{MH}, \alpha_{\phi} = t_p \alpha_p. \quad (4)$$

Здесь  $\alpha_p, \alpha_{\phi}$  – годовой и интервальный объемы отдачи в зоне «б».

*1-д.* При  $Y^{(2)}_{mij} \geq (\beta_M + \beta_{II})$  существует переход наполнений в зону «в» и тогда:

$$Y^{(2)}_{mij} \geq (\beta_M + \beta_{II}), t_p = \frac{\beta_{II}}{(K_{ij} - \alpha_p)}, \alpha_{\phi} = t_p \alpha_p, \quad (5)$$

где  $t_p$  – время заполнения «емкости перехода»  $\beta_{II}$  [2].

В зоне «в» водохранилище переходит на нормальную отдачу, соответствующую выбранным параметрам водохранилища. Это означает завершение первоначального наполнения. Его продолжительность будет равна  $t_{PH} = t_{MH} + t_p$ . Но для водохозяйственных и экономических задач представляет интерес время достижения и полной емкости водохранилища ( $\beta_{пол}$ ). С этой целью необходимо установить, в какой части зоны «в» будет находиться наполнение  $Y^{(3)}_{mij}$ . При  $X^{(3)}_{mij} = (\beta_M + \beta_{II})$ :

$$Y^{(3)}_{mij} = (\beta_M + \beta_{II}) + [1 - (t_{MH} + t_p)](K_{ij} - \alpha). \quad (6)$$

*1-е.* Если  $Y^{(3)}_{mij} < \beta_{пол}$ , то:

$$t_{\beta} = \frac{Y'_{mij} - (\beta_M + \beta_{II})}{K_{ij} - \alpha}, \alpha_{\phi} = t_{\beta} \alpha, \quad (7)$$

где  $\alpha_{\phi}$  – фактическая отдача в варианте *1-е*.

*1-жс.* В случае  $Y^{(3)}_{mij} \geq \beta_{пол}$ , то:

$$t_{\beta} = \frac{\beta_{пол} - (\beta_M + \beta_{II})}{K_{ij} - \alpha}, \alpha_{\phi} = t_{\beta} \alpha. \quad (8)$$

В итоге, время заполнения водохранилища до  $\beta_{пол}$  (по уровню – до отметки НПУ) будет равно:

$$t_{\beta H} = t_{MH} + t_p + t_{\beta}. \quad (9)$$

При значительном притоке, когда  $Y^{(3)}_{mij} > \beta_{пол}$ , в последнем (четвертом) сезоне года будут холостые сбросы воды, величина которых равна  $C_{ij} = Y^{(3)}_{mij} - \beta_{пол}$ , а их продолжительность  $t_c = 1 - (t_{MH} + t_p + t_{\beta})$ .

Суммарная фактическая водоотдача за год в случае дробления на интервалы составляет:

$$\alpha_{\phi ij} = t_{MH} \alpha_0 + t_p \alpha_p + t_{\beta} \alpha + C_{ij}. \quad (10)$$

Если наполнение водохранилища в начале года  $X'_{mij}$  находится в зоне «а», а наполнение к концу года  $Y'_{mij}$  в зоне «б», то используются только два первых члена суммы. При нахождении  $X'_{mij}$  в зоне «б», а  $Y'_{mij}$  в зоне «в» величина  $\alpha_{\phi ij}$  определяется тремя последними компонентами.

При нахождении величины  $X'_{mij}$  внутри выделенных зон водохранилища установление необходимых характеристик режима первоначального наполнения при делении года на более короткие отрезки сводится к определению применительно к первой части года времени заполнения фиксированного объема до ближайшей верхней границы  $\Delta_1 = (\beta_M - X'_{mij})$ ,  $\Delta_2 = [(\beta_M + \beta_{II}) - X'_{mij}]$ ,  $\Delta_3 = (\beta_{пол} - X'_{mij})$  с использованием формул (1, 7). Предварительно следует убедиться, достижимы ли верхние границы зон. Для этой цели определяются величины  $Y'_{mij}$  с помощью формул вида (3, 5, 6). В противном случае деление на внутригодовые интервалы не производится. В процессе получения конечных результатов действуют рекомендации, аналогичные сформулированным выше.

При наполнении водохранилищ возможны самые разнообразные сочетания  $X'_{mij}$  и  $Y'_{mij}$ . Во многих случаях величины  $Y'_{mij}$  могут долгое время находиться в пределах одной зоны. В связи с этим процесс наполнения охватывает ряд лет, и длительность достижения мертвого объема и границ других характерных зон водохранилища будет выражаться следующим образом:

$$t_{\text{МН}} = \sum_{i=1}^l \Delta t_{\text{М}i}, \quad t_{\text{РН}} = \sum_{i=1}^{l+n} \Delta t_{\text{Р}i}, \quad t_{\text{ВН}} = \sum_{i=1}^{l+n+u} \Delta t_{\text{В}i}, \quad (11)$$

где  $\Delta t_{\text{М}i}$ ,  $\Delta t_{\text{Р}i}$ ,  $\Delta t_{\text{В}i}$  – годовые приращения времени заполнения соответственно: до  $\beta_{\text{М}}$ , до  $(\beta_{\text{М}} + \beta_{\text{П}})$  и до  $\beta_{\text{ПОЛ}}$ ;

$l, n, u$  – число интервалов нахождения наполнений в пределах характерных зон водохранилища («а», «б», «в»).

В отношении дефицита отдачи ситуация выглядит следующим образом. При заполнении мертвого объема зоны «а» дефицит в водоснабжении может возникнуть с наступлением маловодья (при  $K_{ij} < \alpha_0$ ), поскольку одной из особенностей наполнения  $\beta_{\text{М}}$  ставится условие недопущения расходования накопленной в нем воды ( $Y'_{\text{м}ij} \geq X'_{\text{м}ij}$ ). В случае заполнения призмы  $\beta_{\text{П}}$  (зоны «б») и призмы  $[\beta_{\text{ПОЛ}} - (\beta_{\text{М}} + \beta_{\text{П}})]$  дефицит в маловодный период связан со сработкой водохранилища до  $\beta_{\text{М}}$  и оценивается в первом случае относительно отдачи  $\alpha_{\text{Р}}$ , а во втором – по отношению к отдаче  $\alpha$ .

Отметим, что в большинстве вариантов режима водохранилища каждой зоне свойствен свой вид дефицита. Кроме того, при делении года на более короткие отрезки возникает дефицит, в основном, только одного вида:  $D_{\text{О}ij}^{(1)}$ ,  $D_{\text{Р}ij}^{(2)}$ ,  $D_{\text{В}ij}^{(3)}$ . Тогда этими величинами определяется и годовой объем дефицита  $D_{ij}$ . В редких случаях, при наступлении особо маловодных лет, в течение года возможно появление дефицитов двух видов. Например, при сработке водохранилища до  $\beta_{\text{М}}$  из зоны «б» или из зоны «в». В первом случае возникает дефицит по отношению к  $\alpha_{\text{Р}}$  и  $\alpha_0$ , т.е.  $D_{\text{Р}ij}$  и  $D_{\text{О}ij}$ , во втором –

относительно  $\alpha$  и  $\alpha_0$ , т.е.  $D_{\text{Р}ij}$  и  $D_{\text{О}ij}$ . Отображением подобного явления служат соотношения:

$$(\alpha_{\text{Р}} - K_{ij}) > (\alpha_{\text{Р}} - \alpha_0) \quad \text{и} \quad (12)$$

$$(\alpha - K_{ij}) > (\alpha - \alpha_0).$$

Как видим, из-за маловодности года возможны перебои в водоотдаче  $\alpha_{\text{Р}}$  и  $\alpha$ , в том числе и сокращение обязательного попуска воды в нижний бьеф гидроузлов  $\alpha_0$ .

С учетом дефицита суммарная фактическая отдача за год будет:

$$\alpha_{\text{Ф}ij} = t_{\text{М}} \alpha_0 + t_{\text{Р}} \alpha_{\text{Р}} + t_{\text{В}} \alpha + D_{ij} + C_{ij}. \quad (13)$$

Изложенный подход позволяет получить комплекс разнообразных показателей (наполнений, фактической отдачи потребителям, надежности водоснабжения, объемов дефицита и холостых сбросов), необходимых для оптимизации режима первоначального наполнения водохранилищ.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Красов В. Д. Применение моделированных последовательностей при оценке антропогенного воздействия на сток рек / В. Д. Красов, П. С. Лысачев // Материалы Девятой международной конференции по вопросам информатики. – Воронеж, 2009. – Т. 1. – С. 375-378.
2. Красов В. Д. Управление режимом первоначального наполнения водохранилищ многолетнего регулирования стока / В. Д. Красов, П. С. Лысачев // Вестн. Воронеж. гос. ун-та. Сер. География. Геоэкология. – 2009. – №2. – С. 72-77.
3. Раткович Д. Я. Многолетние колебания речного стока / Д. Я. Раткович. – Л.: Гидрометеоздат, 1976. – 255 с.

Красов Вячеслав Дмитриевич  
кандидат технических наук, доцент кафедры природопользования факультета географии и геоэкологии Воронежского государственного университета, г. Воронеж, т. (4732) 66-56-54, E-mail: [root@geogr.vsu.ru](mailto:root@geogr.vsu.ru)

Лысачев Петр Сергеевич  
старший преподаватель факультета компьютерных наук Воронежского государственного университета, г. Воронеж, т. (4732) 208-470, E-mail: [piit@cs.vsu.ru](mailto:piit@cs.vsu.ru)

Чернышев Валерий Юрьевич  
студент Воронежского государственного технического университета, г. Воронеж, т. (4732) 24-70-71, E-mail: [uacherubv@mail.ru](mailto:uacherubv@mail.ru)

Krasov Vyacheslav Dmitriyevitch  
Candidate of Technical Science, assistant professor of the chair of management of nature of geography and geoecology department of the Voronezh State University, Voronezh, tel. (4732) 66-56-54, E-mail: [root@geogr.vsu.ru](mailto:root@geogr.vsu.ru)

Lysachev Pyotr Sergeyevitch  
Senior lecturer of the computer science department of the Voronezh State University, Voronezh, tel. (4732) 208-470, E-mail: [piit@cs.vsu.ru](mailto:piit@cs.vsu.ru)

Chernyshev Valeriy Yur'yevitch  
Student of the Voronezh State Technical University, Voronezh, tel. (4732) 24-70-71, E-mail: [uacherubv@mail.ru](mailto:uacherubv@mail.ru)