

УДК 502/504:628.1

Л. Д. РАТКОВИЧ, В. А. НЕЕЗЖАЛОВ

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

КРИТЕРИИ ПОКРЫТИЯ ТРЕБОВАНИЙ ВОДОПОЛЬЗОВАТЕЛЕЙ. МЕТОДИКА ОБОСНОВАНИЯ

В статье исследуется проблема обоснования критериев по удовлетворению требований водопользователей. Значения критериев, таких как обеспеченность по числу бесперебойных лет и максимальная глубина дефицитов, являются определяющими при обосновании параметров водохранилищ для регулирования стока, а соответственно и других сооружений водохозяйственной системы. Формулируется постановка задачи и предлагается ее аналитическое решение. Намечено направление дальнейших исследований в части апробации предложенной методики на конкретных примерах.

Критерии удовлетворения требований водопользователей, регулирование стока, водохозяйственная система.

There is studied a problem of criteria substantiation of meeting water consumers requirements in the article. Criteria values such as an insurance of a number of non-failure operations and maximal depth of deficiencies are the determining ones when substantiating parameters of water reservoirs for flow regulation and correspondingly of other structures of the water management system. There is formulated a set of the problem and proposed its analytical decision. The direction of further researches in the part of approbation of the proposed method is outlined on the concrete examples.

Criteria of meeting water consumers requirements, flow regulation, water management system.

Водопользователи – это участники водохозяйственного комплекса (далее ВХК), представленного отраслями экономики и природными водными объектами. К числу участников ВХК относятся города и сельские населенные пункты, промышленность, орошение, энергетика, рекреация, водный транспорт, рыбное хозяйство, лесосплав, природные комплексы (внутренние моря, озера, поймы, дельты и т.д.) [1].

Различие режимов водопотребления требует оптимизации при распределении ресурсов между водопользователями и естественными водными объектами как в многолетии, так и в течение года. Следствие просчетов при проектировании и в процессе управления водными ресурсами и водохозяйственными системами – истощение и загрязнение водотоков и водоемов, деградация водных и околотоводных экологических систем.

Для современных водохозяйственных систем характерно сочетание

проблем водообеспечения, качества водных ресурсов, сохранения и поддержания водных и околотоводных экосистем, компенсации и предупреждения последствий негативного действия вод. Водообеспечение по-прежнему остается одной из наиболее приоритетных задач экономики, поэтому развитие теории и практики водохозяйственных расчетов является актуальным направлением научных исследований как для проектирования новых водохозяйственных объектов, включая реконструкцию, так и для обоснования рациональных режимов водохозяйственных установок и ГЭС в период эксплуатации [2].

Режим водопользования в условиях регулирования стока определяется проектными параметрами водохозяйственной системы и установленными правилами управления водными ресурсами, в частности диспетчерскими графиками [3]. И то и другое в значительной степени зависит от принятой

системы удовлетворения требований к воде со стороны водопользователей. В отечественной практике система критериев удовлетворения водопользователей ориентирована в основном на расчетную обеспеченность по числу бесперебойных лет $P_{\text{чбл}}$, показывающую процентное (долевое) отношение числа бесперебойных лет к продолжительности расчетного многолетнего ряда:

$$P_{\text{чбл}} = \frac{N - m}{N + 1} \cdot 100, \quad (1)$$

где N – продолжительность многолетнего расчетного ряда, принимаемого за прототип будущего водного режима, лет; m – число перебойных лет.

Учитывая особенности режима таких составляющих суммарного водопотребления, как энерготранспортные или санитарно-экологические попуски, целесообразно оценивать сумму бесперебойных интервалов (месяцев, декад, пентад) многолетнего расчетного периода. Для этого определяют обеспеченность по продолжительности:

$$P_{\text{пр}} = \frac{M}{Nn} \cdot 100, \quad (2)$$

где M – суммарная продолжительность бесперебойных периодов времени в расчетном ряду; n – суммарная продолжительность рассматриваемых периодов в году.

Это менее жесткий критерий, чем обеспеченность по числу бесперебойных лет ($P_{\text{пр}} > P_{\text{чбл}}$).

Другим критерием, не менее значимым, чем обеспеченность, является глубина перебоев в перебойные годы. Таким образом, два данных показателя вместе с объемом водопотребления должны характеризовать многолетний режим требований к водным ресурсам.

Расчетная обеспеченность, как и максимальная глубина перебоев, не является нормативным показателем, а принимается в соответствии со сложившейся практикой водохозяйственных расчетов (таблица).

Описанный подход базируется на использовании необоснованных критериев покрытия водопотребления, а именно эти критерии определяют параметры сооружений. Кроме того, оценка водообеспеченности должна охватывать весь спектр водности, а не

Отраслевое водопотребление		Обеспеченность по числу бесперебойных лет, %	Глубина перебоев, %
Хозяйственное питьевое и коммунально-бытовое водоснабжение		95...97	10
Промышленность		95	10
Регулярное орошение	гумидная зона	75	15...50
	аридная зона		
Водный транспорт и рыбное хозяйство		50...75	–
Энергетические попуски		80...90	–
Санитарно-экологические (ступенчатые)* попуски		75...95	–

*Назначение объема и режима таких попусков в водохозяйственных расчетах производится в зависимости от текущего наполнения водохранилища на начало водохозяйственного года и прогноза объема стока многоводного периода (половодья) в соответствии с правилами использования водных ресурсов водохранилищ (бассейны Дона, Волги).

отдельные фрагменты проектной кривой обеспеченности стока. Данное обстоятельство приводит к неопределенности в ходе обоснования емкости водохранилищ или гарантированной водоотдачи и, как следствие, других параметров водохозяйственной системы. При этом интервал возможных значений параметра может быть достаточно большим (во многом это зависит от субъективных суждений проектировщиков). Оговоримся сразу, что речь идет о годовых дефицитах. Что касается внутригодовых дефицитов, то их сглаживание, причем сопровождающееся падением обеспеченности – задача диспетчерских графиков. Мы же исследуем многолетнюю водообеспеченность с целью назначения критериев удовлетворения требований.

Ранее предпринимались попытки разрешить данное противоречие. Даже в методических указаниях к разработке схем КИОВР примерно 30-летней давности содержалось требование к обоснованию обеспеченности покрытия. Однако конкретных рекомендаций на

уровне готовой методики не существует. Связано это с такими причинами, как необходимость аналитического описания функции ущерба разных водопользователей, отсутствие аргументированной мотивации увеличения расчетной обеспеченности отдачи, сложность совместного учета стохастической природы колебаний стока и режима предъявляемых требований к водным ресурсам.

В статье предложен один из возможных подходов к решению задачи, основанный на статистическом анализе проектной кривой обеспеченности водоотдачи. Интегральной характеристикой покрытия требований водопользователей является кривая обеспеченности проектной водоотдачи (рис. 1). Эта кривая представляет собой конечный результат водно-балансовых расчетов и соответствует принятому варианту регулирования стока, режима водопотребления и системы критериев удовлетворения требований водопользователей. На графике показана расчетная обеспеченность p и некоторая функция дефицитов за пределами p . Для удобства дальнейшие выкладки выполнены в относительных величинах.

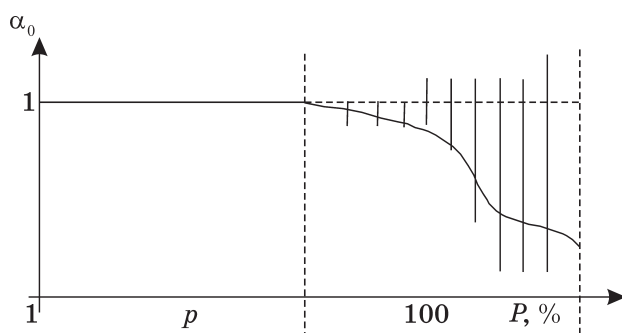


Рис. 1. **Кривая обеспеченности проектной водоотдачи:** α_0 – фактическая гарантированная отдача в долях относительной гарантированной водоотдачи, определяемой отношением проектной заявки к среднемуголетнему стоку $A_{\text{пр}}/S$

Очевидно, вид функции плотности распределения должен быть таким, чтобы корреспондирующая ей функция продолжительности дефицитов (защтрихованная область на графике) изме-

нялась от некоторой константы C (при нулевом дефиците) до конечного минимума (при максимальном дефиците, равном единице).

В общем виде сформулируем задачу следующим образом:

установить обеспеченность покрытия водопотребления P и найти функцию распределения (продолжительности) дефицита $F(x)$, приводящих к наименьшей за многолетие сумме ущербов при заданных уровне надежности водоотдачи R и функции экономического ущерба от недодачи $u(x)$:

$$R = \frac{\sum_{i=1}^N (A_{\text{пр}} - D_i)}{A_{\text{пр}} N} \cdot 100 \% = \left(1 - \frac{D_{\text{ср}}}{A_{\text{пр}}}\right) \cdot 100 \%, \quad (3)$$

где R – суммарный за многолетие объем гарантированной воды [4]; D_i – дефицит водных ресурсов в i -м году; $A_{\text{пр}}$ – проектный объем водопотребления; $D_{\text{ср}}$ – среднемуголетний дефицит.

Пусть $\rho(x)$ – плотность распределения относительных дефицитов x для функции распределения дефицитов $F(x)$. Выразим величину гарантированного объема воды за многолетний период. Сначала установим математическое ожидание M_d дефицита x за период $(1 - p)$ (см. рис. 1):

$$M_d = (1 - p) \int_0^1 x \rho(x) dx. \quad (4)$$

Суммарное количество воды в относительных единицах как раз равно величине R :

$$p + (1 - p) \cdot \left(1 - \int_0^1 x \rho(x) dx\right) = R, \quad \text{где } 0 \leq p = \frac{P}{100} \leq 1; \quad (5)$$

$$1 - R = (1 - p) \int_0^1 x \rho(x) dx.$$

Запишем математическую постановку задачи (*):

$$\begin{cases} 0 \leq x \leq 1, R = \text{const}, 0 < R \leq 1, 0 < p \leq R - \\ \text{ограничения, накладываемые на переменные;} \\ 1 - R = (1 - p) \cdot \int_0^1 x \rho(x) dx - \\ \text{ограничение по водным ресурсам;} \\ \Phi = (1 - p) \cdot \int_0^1 u(x) \rho(x) dx \Rightarrow \min, \end{cases} \quad (6)$$

где Φ – относительный суммарный за многолетний экономический ущерб.

Несложным преобразованием системы (6) получаем выражение для функционала Φ , зависящего от двух функций $u(x)$, $\rho(x)$, а также выражение для обеспеченности p :

$$\Phi = \frac{\int_0^1 u(x)\rho(x)dx}{\int_0^1 x\rho(x)dx} \cdot (1 - R); \quad (7)$$

$$p = 1 - \frac{1 - R}{\int_0^1 x\rho(x)dx}. \quad (8)$$

Функционал (7) может рассматриваться как подход к аналитическому решению математической задачи. Однако применительно к водохозяйственной практике выражение (7) вряд ли приемлемо. Обеспеченность недостаточно сопоставлена с дефицитом за пределами p . Эти параметры следуют друг за другом, но их «альтернативность», по-видимому, может быть корректно обоснована с помощью теории рисков.

На данном этапе исследования будем искать решение в предположении, что обеспеченность p – заданный параметр. Что касается величины R , то она легко может быть установлена в ходе предварительных водохозяйственных балансов путем суммирования объемов гарантированной водоотдачи за расчетный период при рассматриваемых показателях гарантированной отдачи.

Для выполнения дальнейших действий зададим вид функции плотности – $\rho(x)$ распределения дефицитов и функции ущерба $u(x)$. Структура функции $\rho(x)$ выбрана таким образом, чтобы область наибольших значений плотности приходилась на большие по величине дефициты, ограничивая только максимальное значение d . Смысл такого подхода заключается в том, чтобы с помощью больших дефицитов уменьшить их максимальное значение d и сдвинуть обеспеченность p в меньшую сторону, поскольку именно она «вытягивает» стоимость сооружений

для регулирования стока. Пусть плотность распределения – управляющий алгоритм – описывается экспонентой $\rho(x) = c \cdot e^{kx}$ (рис. 2). Коэффициент k задает кривизну функции плотности.

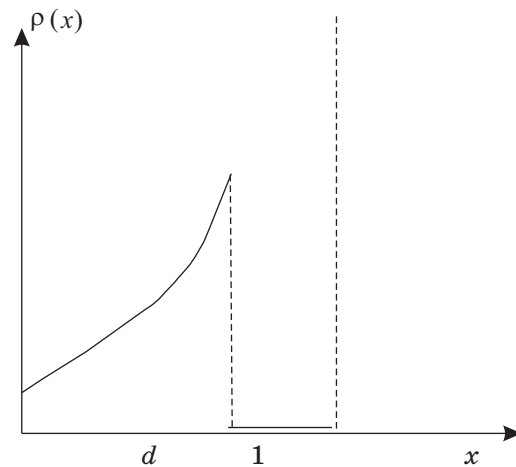


Рис. 2. Плотность распределения годовых дефицитов в многолетнем ряду

Значение множителя $c > 0$ определяем, исходя из основного свойства плотности распределения:

$$\int_0^d \rho(x)dx = c \int_0^d e^{kx} dx = 1;$$

$$c \frac{e^{kx}}{k} \Big|_0^d = 1; \quad \frac{c}{k} (e^{kd} - 1) = 1; \quad c = \frac{k}{e^{kd} - 1};$$

$$\rho(x) = \begin{cases} \frac{ke^{kx}}{e^{kd} - 1} & \text{при } x \in (0; d]; \\ 0 & \text{при } x \in (d; 1]. \end{cases} \quad k > 0, c > 0.$$

Параметры k и d подлежат определению в результате решения задачи оптимизации.

Располагая плотностью распределения, несложно получить функцию распределения $F(x)$ – вероятности непревышения дефицита x :

$$F(x) = \int_0^x \rho(x)dx = \frac{k}{e^{kd} - 1} \int_0^x e^{kx} dx = \frac{e^{kx} - 1}{e^{kd} - 1};$$

$$x \in (0; d).$$

Функция распределения $F(x)$ фактически отвечает на вопрос, каков должен быть максимальный дефицит в 70, 75, 85 % и т.д. лет. Тем самым мы задаем требования к водным ресурсам по всему спектру водности.

Теперь рассмотрим функцию плотности ущерба $u(x)$, которая также может быть описана с помощью экспоненты таким образом, чтобы нулевому дефициту соответствовал нулевой ущерб, а максимальному дефициту – максимальный ущерб, принятый за единицу (рис. 3). С точки зрения оценки функционала (7) абсолютное значение ущерба несущественно, значимым фактором является только динамика изменения ущерба с ростом дефицита. Поэтому величину ущерба целесообразно рассматривать в долях его максимального значения при $x = 1$:

$$u(x) = d(e^{mx} - 1), \quad u(0) = 0,$$

где параметр m характеризует интенсивность нарастания ущерба с ростом дефицита, а d задает максимальное значение ущерба.

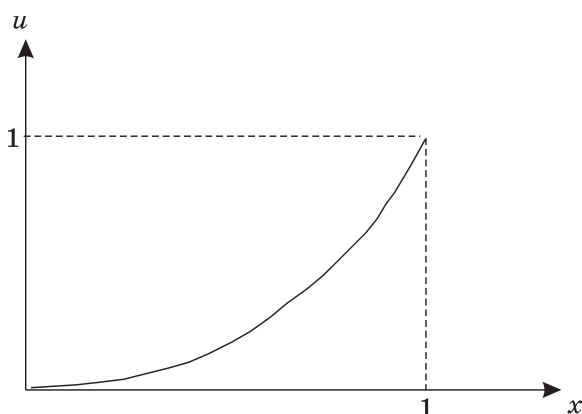


Рис. 3. Функция изменения относительного ущерба в зависимости от величины относительного дефицита

Положительные значения параметра m соответствуют выпуклой кривой графика, отрицательные – вогнутой вниз:

$$u(1) = d(e^m - 1) = 1 \Rightarrow d = \frac{1}{e^m - 1};$$

$$u(x) = \frac{e^{mx} - 1}{e^m - 1}.$$

Функции $\rho(x)$ и $u(x)$ непрерывны, они монотонно возрастают на отрезке от нуля до d . При фиксированном значении обеспеченности p следует ожидать локального минимума функционала:

$$\begin{cases} \Phi = (1 - p) \int_0^d u(x) \rho(x) dx \Rightarrow \min; \\ M_d = \int_0^d x \rho(x) dx = \frac{1 - R}{1 - p} - \\ \text{ограничение по ресурсам.} \end{cases} \quad (8)$$

Найдем значение интеграла в выражении функционала:

$$\begin{aligned} \int_0^d u(x) \rho(x) dx &= \frac{k}{(e^m - 1)(e^{kd} - 1)} \int_0^d (e^{mx} - 1) e^{kx} dx = \\ &= A \int_0^d [e^{(m+k)x} - e^{kx}] dx = A \left[\frac{e^{(m+k)x}}{m+k} - \frac{e^{kx}}{k} \right] \Big|_0^d = \\ &= A \left[\frac{e^{(m+k)d}}{m+k} - \frac{e^{kd}}{k} - \left(\frac{1}{m+k} - \frac{1}{k} \right) \right] = \\ &= A \left[\frac{e^{(m+k)d} - 1}{m+k} - \frac{e^{kd} - 1}{k} \right] \times \\ &\times \frac{k}{(e^m - 1) \cdot (e^{kd} - 1)} \cdot \left[\frac{e^{(m+k)d} - 1}{m+k} - \frac{e^{kd} - 1}{k} \right]; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \int_0^d u(x) \rho(x) dx &= \frac{k}{(e^m - 1)(e^{kd} - 1)} \times \\ &\times \left[\frac{e^{(m+k)d} - 1}{m+k} - \frac{e^{kd} - 1}{k} \right]. \end{aligned}$$

Теперь определим математическое ожидание дефицита M_d , используя интегрирование по частям:

$$\int U dV = UV - \int V dU; \quad U = x, \quad dV = e^{kx} dx; \quad V = \frac{e^{kx}}{k};$$

$$M_d = \int_0^d x \rho(x) dx = \frac{k}{e^{kd} - 1} \int_0^d x e^{kx} dx = \frac{k}{e^{kd} - 1} I;$$

$$\begin{aligned} I &= \frac{x e^{kx}}{k} - \int_0^d \frac{e^{kx}}{k} dx = \left(\frac{x e^{kx}}{k} - \frac{e^{kx}}{k^2} \right) \Big|_0^d = \\ &= \frac{d e^{kd}}{k} - \frac{e^{kd}}{k^2} - \left(-\frac{1}{k^2} \right); \end{aligned}$$

$$I = \frac{(kd - 1)e^{kd} + 1}{k^2};$$

$$M_d = \frac{k}{e^{kd} - 1} \cdot \frac{(kd - 1)e^{kd} + 1}{k^2};$$

$$M_d = \frac{(kd - 1)e^{kd} + 1}{k(e^{kd} - 1)}.$$

Окончательно система (8) приобретает вид классической задачи динамического программирования:

$$\begin{cases} \frac{(kd - 1)e^{kd} + 1}{k(e^{kd} - 1)} = \frac{1-R}{1-p}; \\ \Phi(k, d) = \frac{k(1-p)}{(e^m - 1)(e^{kd} - 1)} \left[\frac{e^{(m+k)d} - 1}{m+k} - \frac{e^{kd} - 1}{k} \right] \Rightarrow \min; \\ p = \text{const}; R = \text{const}. \end{cases}$$

Выводы

Предложенная методика является попыткой дать теоретическое обоснование критериев удовлетворения требований. Предложено аналитическое решение, экспериментальная апробация которого, включая конкретные примеры использования, является предметом ближайших исследований. В числе способов решения предполагается применение метода множителей Лагранжа наряду с численными методами.

1. **Асарин А. Е.** Современные проблемы и перспективы развития гидроэнергетики России: Стратегические проблемы

водопользования России: сб. науч. трудов. – Москва – Новочеркасск: НОК, 2008. – С. 133–138.

2. **Исмайлов Г. Х., Прошляков И. В., Раткович Л. Д.** Методология управления большими водохозяйственными системами на примере Волжско-Камского каскада водохранилищ // Мелиорация и водное хозяйство. – 2006. – № 4. – С. 16–21.

3. **Раткович Д. Я.** Актуальные проблемы водообеспечения. – М.: Наука, 2003. – 352 с.

4. **Раткович Л. Д.** Методология обосновывающих водохозяйственных расчетов // Мелиорация и водное хозяйство. – 2007. – № 6. – С. 32–34.

Материал поступил в редакцию 18.06.10.

Раткович Лев Данилович, кандидат технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Комплексное использование водных ресурсов»

Тел. 8 (495)-976-21-56

E-mail: levkivr@mail.ru

Неезжалов Владимир Александрович, аспирант

E-mail: neezhalov_va@mail.ru