

Оригинальная статья

УДК 502/504: 556.18:627.8

DOI: 10.26897/1997-6011-2022-1-54-62

ЗАВИСИМОСТЬ КОМПЛЕКСНОЙ ГАРАНТИРОВАННОЙ ВОДООТДАЧИ ОТ РЕГУЛИРУЮЩЕГО ОБЪЕМА ВОДОХРАНИЛИЩА

РАТКОВИЧ ЛЕВ ДАНИЛОВИЧ^{1✉}, *д-р техн. наук, профессор*
levkivr@mail.ru

ИВАНОВ АНДРЕЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ², *инженер*
conquest3@mail.ru

ИСМАЙЫЛОВА ИРИНА ГАБИЛОВНА¹, *зав. лабораторией*
igism37@mail.ru

РАТКОВИЧ ЕВГЕНИЙ ЛЬВОВИЧ², *младший научный сотрудник*
piromantum@gmail.com

¹ Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; 127434, г. Москва, ул. Прянишникова, 19, Россия

² ВНИИГиМ им. А.Н. Костякова; 127434, г. Москва, ул. Большая Академическая, 44, корп. 2, Россия

Цель исследования – обобщение методики решения одной из распространенных инженерных задач, решаемых при разработке бассейновых схем и водохозяйственных проектов, оценке параметров водохранилищ комплексного назначения. Анализируется методика построения и практического использования зависимости комплексной гарантированной отдачи водохранилища от расчетных гидрологических характеристик, полезного объема водохранилища и обеспеченности покрытия требований к водным ресурсам. Показана роль водохранилищ в разработке схем комплексного использования и правил использования водных ресурсов водохранилищ для решения важнейших водохозяйственных проблем. Формулируется инженерная и математическая постановка задачи. Анализируется репрезентативность многолетних гидрологических рядов по их продолжительности, когда относительные ошибки параметров ставятся в соответствие длине рядов. Показано, что учет внутрирядной связи (коэффициент автокорреляции) и увеличение изменчивости на 30% приводят к увеличению минимальной требуемой продолжительности в несколько раз. На примере конкретных водных объектов, Цимлянского гидроузла и каскада водохранилищ верхнего Тобола рассматривается практическое применение обобщенного метода и имитационного моделирования многолетнего водохозяйственного баланса. Представлен вариант схемы водоподачи в дефицитные районы Донбасса с привлечением ресурсов Северского Донца для их многолетнего регулирования в Краснопавловском водохранилище (в настоящее время не используется в качестве регулирующей емкости). На основании анализирующей зависимости «Емкость-отдача» получена оценка дополнительных гарантированных водных ресурсов. Применительно к трансграничному створу на реке Тобол оценка реальной водоотдачи получена путем имитационного моделирования по методике авторов. Обсуждается целесообразность применения имитационного и оптимизационного моделирования. Отмечается актуальность тематики в связи с меняющейся на протяжении десятилетий топологией створов и регулирующей способности водохранилищ.

Ключевые слова: *репрезентативность гидрологических рядов, имитационное моделирование, трансграничный створ, анализирующая зависимость «Емкость-отдача»*

Формат цитирования: *Раткович Л.Д., Иванов А.А., Исмайылова И.Г., Раткович Е.Л. Зависимость комплексной гарантированной водоотдачи от регулирующего объема водохранилища // Природообустройство. – 2022. – № 1. – С. 54-62. DOI: 10.26897/1997-6011-2022-1-54-62.*

© Раткович Л.Д., Иванов А.А., Исмайылова И.Г., Раткович Е.Л., 2022

Original article

THE DEPENDENCE OF COMPLEX GUARANTEED WATER YIELD ON THE RESERVOIR VOLUME

RATKOVICH LEV DANILOVICH^{1✉}, *doctor of technical sciences, professor*
levkivr@mail.ru

IVANOV ANDREY ALEXANDROVICH², *engineer*
conquest3@mail.ru

ISMAYLOVA IRINA GABILOVNA¹, *head of the laboratory*
igism37@mail.ru

RATKOVICH EVGENY LVOVICH², *junior researcher*
piromantum@gmail.com

¹ Russian state agrarian university – MAA named after C.A. Timiryazev; 127434 Moscow, ul. Pryanishnikova, 19. Russian Federation

² VNIIGiM named after A.N. Kostyakov; 127434, Moscow, Bolshaya Academicheskaya, 44, korpus 2. Russia

The purpose of the study is to generalize the methodology for solving one of the common engineering problems solved in the development of basin schemes and water management projects, assessment of the parameters of reservoirs of complex purpose. The article analyzes the methodology of construction and practical use of the dependence of the complex reservoir guaranteed output on the calculated hydrological characteristics, the reservoir usable storage and water resources provision for requirements coverage. The role of reservoirs for the development of the integrated use schemes and reservoir water resources using rules to solve the most important water management problems is shown. The engineering and mathematical statement of the problem is formulated. The representativeness of long-term hydrological series by their duration is analyzed, when the relative errors of parameters are put in accordance with the series length. It is shown that consideration of the in-series connection (coefficient of autocorrelation) and an increase in changeability by 30% lead to the increase in the minimum required duration by several times. On the example of specific water objects, the Tsimlyanskiy hydroelectric complex and the cascade of reservoirs of the upper Tobol, the practical application of the generalized method and simulation modeling of the long-term water balance is considered. A variant of water supply scheme to the deficient areas of Donbass with the involvement of the Severskiy Donets resources for their long-term regulation in the Krasnopavlovsky reservoir (currently not used as a regulating capacity) is presented. Based on the analyzing dependence «capacity-yield», an assessment of additional guaranteed water resources was obtained. With regard to the transboundary section line on the Tobol River, the assessment of the real water yield was obtained by simulation modeling according to the authors' methodology. The expediency of using simulation and optimization modeling is discussed. The relevance of the topic is noted in connection with the cross-sections topology and the reservoirs regulating capacity that have been changing for decades. It is recommended to discuss the raised issues at conferences and in publications.

Keywords: *representativeness of long-term hydrological series, simulation modeling, transboundary cross-section, analyzing dependence «capacity-output»*

Format of citation: *Ratkovich L.D., Ivanov A.A., Izmailova I.G., Ratkevich E.L. Dependence of complex guaranteed water yield on the reservoir volume // Prirodoobustrojstvo. – 2022. – № 1. – S. 54-62. DOI: 10.26897/1997-6011-2022-1-54-62.*

Введение. Водохозяйственные системы включают в себя различные виды сооружений и конструкций. Это гидротехнические сооружения – такие, как плотины, водохранилища, каналы, туннели и водоводы, насосные станции. Параметры этих объектов определяются из условий обеспечения целевых проектных показателей, реализующих начальный замысел.

Водоохранилища во многих случаях представляют собой центральное звено водохозяйственной системы. Они привлекают к себе наибольшее внимание, поскольку,

помимо основной направленности, существенно влияют на ландшафт территории своего размещения. Теме водохранилищ посвящено множество научных трудов [1, 2].

Один из ключевых вопросов заключается в определении параметров водохранилищ. Классическая методика разработана более полувека назад С.Н. Крещким и М.Ф. Менкелем [3], хотя решением проблемы занимались и другие ученые [4-6]. Методика в теоретическом плане практически не изменилась, однако с развитием имитационного моделирования

ее практическое использование изменилось и в основном применяется для получения экспертных оценок. Полный объем водохранилища и его составляющих зависит от многих факторов, и прежде всего – от функциональной принадлежности. Функциональная классификация водохранилищ приводится в работе [4].

Цель исследований: обобщение методики решения одной из распространенных инженерных задач при разработке бассейновых схем и водохозяйственных проектов, при оценке параметров водохранилищ комплексного назначения.

Материалы и методы исследований. Корректное обоснование параметров водохранилищ должно быть максимально ориентировано на будущие правила управления водными ресурсами в период эксплуатации [7]. К сожалению, по разным причинам реализованные проекты нередко значительно отходят от проектных замыслов, как произошло, например, с Цимлянским водохранилищем на реке Дон (рис. 1).

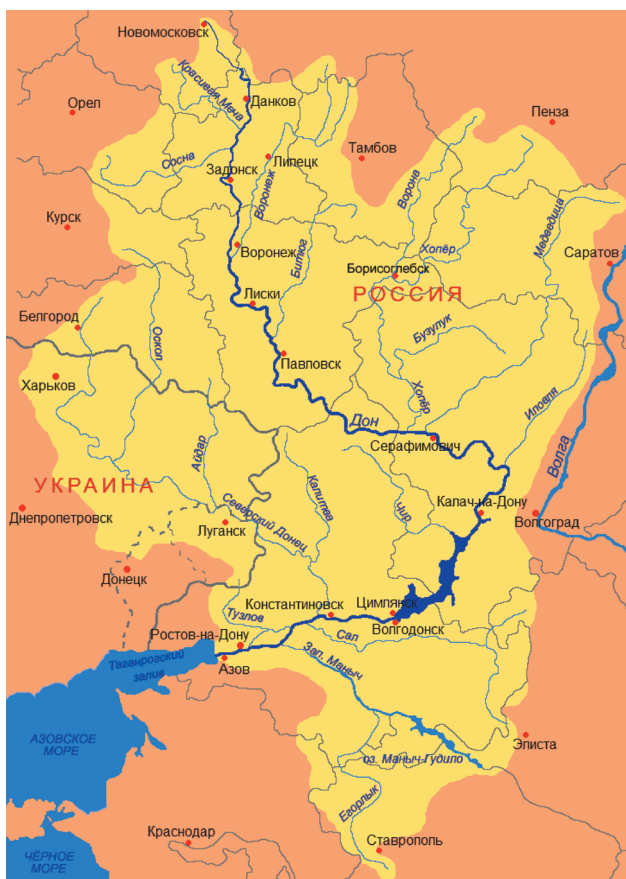


Рис. 1. Схема бассейна реки Дон в нижнем течении

Fig. 1. Scheme of the Don River basin in the downstream

Цимлянский гидроузел играет огромную роль в экономике региона и страны. Хозпитеьево

водоснабжение более 3 млн людей, орошение около 200 тыс. га земли, масштабное транспортное судоходство, место обитания для разнообразного рыбного стада, обводнение рек Сал и Маныч входят в список функций водохранилища, введенного в эксплуатацию в 1953 г. За время эксплуатации произошло загрязнение воды водохранилища сточными водами, вызвавшее интенсивное развитие сине-зеленых водорослей в акватории водохранилища. Происходит разрушение берегов Цимлянского водохранилища, наблюдаются снижение рыбопродуктивности водоема и его интенсивное обмеление, сокращается полезная емкость водохранилища, происходит заиление ложа водохранилища, просадка уровня воды Нижнего Дона вследствие дноуглубительных работ. Регулирование водохранилищем, по сути, выполняется согласно правилам, не соответствующим проектным показателям.

В настоящее время водохранилище фактически выполняет сезонное регулирование стока, хотя в проектом варианте предусматривался режим многолетний. Очевидно, при обосновании режима регулирования стока следует рассматривать несколько вариантов развития ситуации как по динамике водопотребления, так и по вероятным сценариям изменения параметров водохранилищ.

В общем случае инженерная постановка задачи формулируется как определение водохозяйственного эффекта, как функции параметров водохозяйственной системы – гарантированное количество воды и энергии, отдаваемое потребителям. Обычно прямая задача направлена на оценку параметров водохранилища при заданных показателях водохозяйственного комплекса, обратная задача определяет объем и режим водопользования при известных значениях регулирующей емкости, мертвого объема и объема форсировки.

Детальность обосновывающих расчетов зависит от стадии проектирования. Основной документ, задающий направление развития водного хозяйства в речном бассейне, – это схемы КИОВО, которые по завершении открывают титулы проектов, ТЭО и первоочередных водохозяйственных мероприятий [8].

Разумеется, водохозяйственное обоснование не ограничено параметрами водохранилища, поскольку решается масса сопутствующих вопросов и задач. Это батиграфические и объемные кривые в расчетных створах, материалы метеорологических, геологических и гидрологических наблюдений, позволяющие оценить потенциальные потери на дополнительное испарение и фильтрацию из водохранилища,

гидравлическую взаимосвязь поверхностных и подземных вод для определения ущерба поверхностному стоку вследствие подземного водозабора, и т.п.

Представленные в статье исследования посвящены конкретной задаче: анализу зависимости параметров водохранилища с водохозяйственными показателями.

Формально задача может быть записана [9] как зависимость:

$$A = F(R_p, K_r, V, \mathcal{E}, U) \quad (1),$$

где R_p – территориальный потенциал водных ресурсов в естественном состоянии либо с наложенным антропогенным влиянием (R_p является функцией времени, в частном случае представленная многолетним гидрологическим рядом стока, который рассматривается в качестве прототипа будущего водного режима); K_r – система критериев удовлетворения требований к водным ресурсам; V – параметры водохранилища (в более сложном случае – системы); \mathcal{E} – совокупность санитарно-экологических требований; U – функция управления водными ресурсами.

Для случая многолетнего регулирования наиболее обоснованным в теории методов является метод отдельного определения многолетней и сезонной составляющей емкости водохранилища. В классической методике многолетняя составляющая определяется по номограммам, разрешающим уравнение:

$$\beta_{\text{мн}} = f(\alpha, C_v, r_a, P). \quad (2)$$

Известны несколько графических или табличных номограмм для решения уравнения (1) [10]. Разница в результатах связана с принимаемой стохастической моделью годового стока. Поскольку в данной постановке задачи используется только один критерий удовлетворения требований, многоцелевое использование водных ресурсов учитывается так называемой приведенной обеспеченностью:

$$P_{\text{пр}} = \frac{\sum_1^n A_i \cdot P_i}{\sum_1^n A_i}. \quad (3)$$

В формализованном виде в относительных величинах методика описывается следующими уравнениями:

$$A = \alpha \cdot \bar{S}; V = V_{\text{мн}} + V_{\text{сез}} \rightarrow V = \beta \cdot \bar{S} = (\beta_{\text{мн}} + \beta_{\text{сез}}) \cdot \bar{S}, \quad (4)$$

где α – относительная отдача; β – коэффициент емкости водохранилища.

В практике водохозяйственных расчетов распространена формула С.Н. Крицкого и М.Ф. Менкеля [10]. При многолетнем регулировании теоретически максимальный объем требований к стоку A равен среднемноголетнему

стоку реки S ($\alpha = 1$). В реальности это невозможно при проектных значениях расчетной обеспеченности ($P = (75-95)\%$). Минимальная отдача равна стоку S_p расчетной обеспеченности P – это годовое регулирование, предельный случай сезонного регулирования стока. Сезонная емкость определяется по разнице отдачи межени A_m и стока межени S_m , причем в первом случае сток увеличивается за счет многолетней сработки, а во втором случае приток к водохранилищу соответствует расчетной обеспеченности. В итоге путем линейной интерполяции и деления членов уравнения на среднемноголетний сток выводятся окончательные выражения (5, 6):

$$V_{\text{сез}} = A_m - \bar{S}_m + \frac{\bar{S}_m - S_{\text{мп}}}{\bar{S} - S_p} \cdot (\bar{S} - A); \quad (5)$$

$$\beta_{\text{сез}} = \alpha \cdot d_{A_m} - d_{S_m} + d_{S_m} \cdot \frac{1 - K_{\text{мп}}}{1 - K_p} \cdot (1 - \alpha), \quad (6)$$

где $d_{A_m} = A_m/A$ – доля отдачи межени в объеме годовой отдачи; $d_{S_m} = \frac{\bar{S}_m}{\bar{S}}$ – отношение стока средней межени к среднему стоку; $K_{\text{мп}} = \frac{S_{\text{мп}}}{\bar{S}_m}$ – отношение стока межени расчетной обеспеченности к среднему стоку межени; $K_p = \frac{S_p}{\bar{S}}$ – отношение годового стока расчетной обеспеченности к норме годового стока (при известном распределении – модульный коэффициент при обеспеченности P).

Наиболее корректным способом является построение зависимости «Емкость-отдача», которая может служить основой как для прямой, так и обратной задач. В таком формализованном виде методика может использоваться только для получения экспертных оценок. Тем не менее такие оценки практически необходимы, так как являются опорным решением.

Более серьезные расчеты выполняются с использованием имитационных водно-балансовых моделей по многолетним гидрологическим рядам стока, в которых можно учесть множество деталей, затруднительных для обобщенного метода. Имеются ввиду определение потерь на фильтрацию и испарение внутри расчетного интервала времени, распределение располагаемых водных ресурсов между потребителями в разные по водности годы и сезоны года, другие нюансы.

Какой же должна быть длина стокового ряда исходя, разумеется, из предположения о том, что генетические параметры стока неизменны, сохраняются эргодичность и стационарность геофизических процессов? В условиях современной реальности, когда изменение климата признается большинством исследователей,

названные предположения не выдерживаются. Однако корректной методики учета временных трендов в процессах стока пока нет в силу недостаточности статистического материала. Поэтому будем считать репрезентативным гидрологический ряд, в котором относительные ошибки выборочных оценок математического ожидания и коэффициента вариации не превышают заданных ограничений, а ряд содержит примерно одинаковое число маловодных и многоводных циклов. Так, допуская 5%-ную ошибку среднегогодового стока при $C_v = 0,3$ и автокорреляции $r_0 = 0,3$, имеем:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{cp} &= \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \cdot \sqrt{\frac{1+r_0}{1-r_0}} \rightarrow \varepsilon_{cp} = \frac{S_{cp} \cdot C_v}{\sqrt{n}} \cdot \sqrt{\frac{1+r_0}{1-r_0}} \rightarrow \\ &\rightarrow 0,05 = \frac{C_v}{\sqrt{n}} \cdot \sqrt{\frac{1+r_0}{1-r_0}} \rightarrow \sqrt{n} \geq 20 \cdot C_v \cdot \sqrt{\frac{1+r_0}{1-r_0}} \rightarrow \\ &\rightarrow n \geq 67 \text{ лет.} \end{aligned} \quad (7)$$

Если игнорировать внутрирядную корреляцию, требуемая продолжительность снижается до 36 лет. С другой стороны, увеличение C_v до 0,4 повышает длину ряда до 119 лет. При высокой многолетней вариации водности ($C_v \geq 0,6$) и значениях модуля стока менее 4-5 л/(с·км²), целесообразно выполнять расчеты по замоделированным гидрологическим рядам продолжительностью 1000 лет и более.

Результаты и их обсуждение. Пример применения обобщенного метода расчета хорошо иллюстрируется на примере реки Северский Донец. В работе [11] рассмотрен один из вариантов повышения водообеспеченности Донбасса путем перерегулирования стока Северского Донца в Краснопавловском водохранилище (рис. 2). Схема работает следующим

образом: располагаемые ресурсы Краснопавловского водохранилища формируются как сумма притока со стороны первого трансграничного створа из Северского Донца (за вычетом минимального транзита по реке), водоподачи из канала Днепр – Донбасс и дотации части стока. Балансовое уравнение имеет вид (8):

$$F_{сд} - F_{тр} + F_{кан} + \Delta F \pm \Delta V - L_{дер} - L_{в-ща} = A_{плз} \quad (8)$$

где $F_{сд}$ – приток Северского Донца на территорию Украины с верхнего трансграничного створа за вычетом отбора в Харьковскую область; $F_{тр}$ – минимальный транзит стока по Северскому Донцу после изъятия стока для Краснопавловского водохранилища; $F_{кан}$ – водоподача по каналу Днепр – Донбасс; ΔF – расчетная многолетняя сработка в остро-маловодном году; $\pm \Delta V$ – регулирование стока в Краснопавловском водохранилище; $A_{плз}$ – полезная водоотдача Краснопавловского водохранилища; $L_{дер}$ – потери воды при переброске из Северского Донца; $L_{в-ща}$ – потери из Краснопавловского водохранилища.

По номограммам многолетней составляющей емкости установлена многолетняя сработка Краснопавловского водохранилища (ΔF) в году – 95% обеспеченности, которая составила 139,88 млн м³. На основании данной информации рассчитан водохозяйственный баланс, отражающий функционирование водохозяйственной системы (табл. 1). Прогноз объема и режима всех составляющих притока получен в результате предварительных исследований. Как следует из баланса, предварительная оценка водохозяйственной эффективности рассматриваемого варианта показывает, что регулирование в Краснопавловском водохранилище водоподачи из Северского Донца и канала Днепр – Донбасс гарантирует 18,2 м³/с для районов Донбасса*.

* Приведенные цифры использованы для иллюстрации методики, являются частной оценкой и не могут быть использованы в практических целях (примеч. авт.).

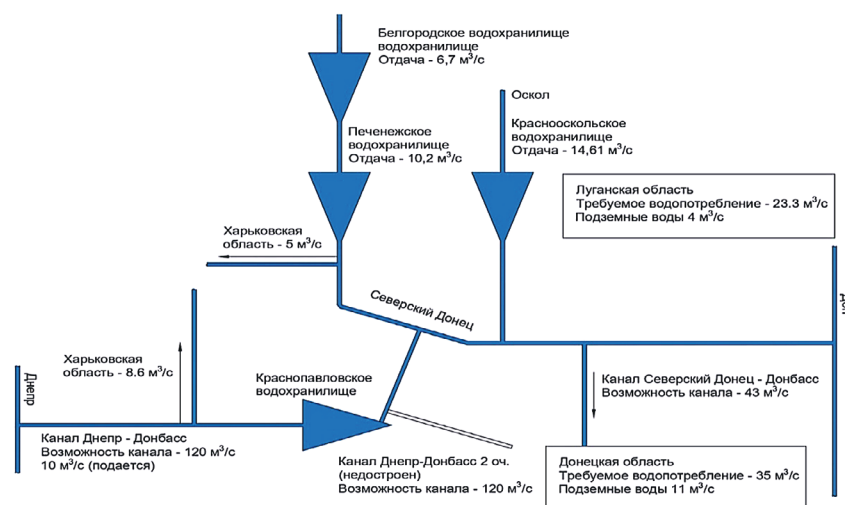


Рис. 2. Схема размещения водопотребителей в бассейне Северского Донца

Fig. 2. Scheme of location of water consumers in the Seversky Donets basin

Таблица 1
Водохозяйственный баланс северского донца в створе гидроузла Краснопапавловского водохранилища в год 95% обеспеченности, млн м³

Table 1
Water economy balance of the severisky donets in the range of the Krasnopavlovsky hydraulic unit per year of 95% provision

	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	I	II	ГОД
Составляющие водохозяйственного баланса <i>Components of the water economic balance</i>													
Прогнозный приток Северского Донца на территорию Украины с верхнего транзитного створа за вычетом отбора в Харьковскую область, F_{сн} <i>The forecasted inflow of the Severisky Donets to the Ukraine territory from the upper transboundary range less the water withdrawal to the Kharkov region, F_{сн}</i>	56,17	40,62	26,34	20,95	15,87	18,72	23,17	30,47	26,66	15,23	19,36	23,80	317,37
Минимальный транзит стока, F_{тр} <i>Minimal transit of the flow, F_{тр}</i>	27,13	19,62	12,72	10,12	7,66	9,04	11,19	14,71	12,87	7,36	9,35	11,49	153,27
Водозабор в Краснопапавловское в-ще из Северского Донца, F_{кпр} <i>Water in-take to the Krasnopavlovsky reservoir from the Seversky Donets, F_{кпр}</i>	29,04	21,00	13,62	10,83	8,21	9,68	11,98	15,76	13,79	7,87	10,01	12,31	164,10
Водоподача по каналу Днепр-Донбасс, F_{кан} <i>Water supply by the canal Dnieper -Donbass, F_{кан}</i>	26,30	26,30	26,30	26,30	26,30	26,30	26,30	26,30	26,30	26,30	26,30	26,30	315,60
Расчетный резерв за счет многолетнего регулирования, ΔF <i>Estimated reserve due to the long-term regulation, ΔF</i>	139,88												139,88
Внутригодовое регулирование, ΔV <i>Intra-annual regulation, ΔV</i>	-2,87	3,73	13,41	15,04	19,37	17,97	13,32	10,34	9,95	16,81	14,78	8,07	139,88
Наполнение В-щнына конец месяца <i>Filling V_{кнн} at the end of the month</i>	156,75	153,02	139,61	124,58	105,21	87,25	73,93	63,59	53,65	36,84	22,07	14,00	14,00
ИТОГО приходная часть <i>TOTAL the inflow part</i>	52,47	51,03	53,33	52,17	53,88	53,95	51,60	52,40	50,04	50,98	51,09	46,68	619,58
Потери деривации, L_{дер} <i>Loss of the derivation, L_{дер}</i>	2,77	2,37	2	1,86	1,73	1,8	1,91	2,1	2	1,71	1,82	1,93	24,00
Потери из водохранилища, L_{вх} <i>Loss from the reservoir, L_{вх}</i>	0,82	1,44	2,47	3,09	3,29	3,29	2,47	1,44	0,82	0,41	0,41	0,62	20,57
Достигаемая полезная отдача Краснопапавловского в-ща, млн м³ <i>The achieved useful output of the Krasnopavlovsky reservoir, mln m³</i>	48,88	47,22	48,86	47,22	48,86	48,86	47,22	48,86	47,22	48,86	48,86	44,13	575,01
Достигаемая полезная отдача Краснопапавловского в-ща, м³/с <i>The achieved useful output of the Krasnopavlovsky reservoir, m³ / s</i>	18,24	18,23	18,23	18,23	18,23	18,23	18,23	18,23	18,23	18,23	18,23	18,24	18,23
ИТОГО расходная часть <i>TOTAL water resources output</i>	52,47	51,03	53,33	52,17	53,88	53,95	51,60	52,40	50,04	50,98	51,09	46,68	619,58
Дефицит <i>Deficit</i>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Зависимость «Емкость-отдача» может быть получена с помощью водно-балансовой модели (авторская разработка), использующей встроенную модель годового стока, совмещенную с расчетом водохозяйственного баланса. Гидрологический ряд в модели представляет собой авторегрессию первого порядка между обеспеченностями стока смежных лет, а переход к величинам стока F_{i-20} года при математическом ожидании \bar{F} производится через трехпараметрическое гамма-распределение:

$$F_i = f(p_i, \bar{F}, c_v). \quad (9)$$

Внутригодовое распределение воспроизводится в модели по методу фрагментов Г.Г. Свицидзе. В качестве примера рассмотрен верхний Тобол выше трансграничного створа, отделяющего Кустанайскую область от РФ (рис. 3).

Сток реки выше створа полностью контролируется двумя водохранилищами многолетнего регулирования – Верхнетобольским и Каратомарским. Моделирование проведено для условного водохранилища, имитирующего каскад.

Имитационные расчеты приводят к результатам, сведенным в таблицу 2. Искомая зависимость иллюстрируется графиком (рис. 4).

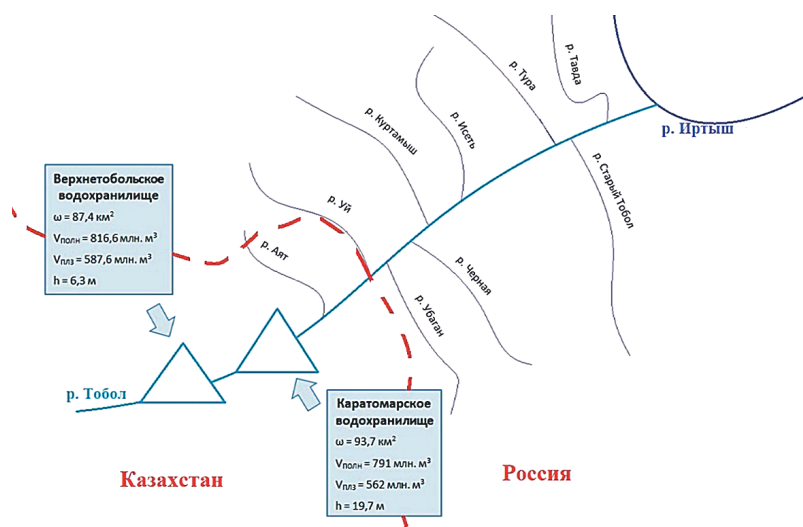


Рис. 3. Схема бассейна реки Тобол
 Fig. 3. Scheme of the Tobol River Basin

Таблица 2

Расчетная зависимость гарантированной водоотдачи от объема условного водохранилища

Table 2

Estimated dependence of guaranteed water output on the volume of the conditional reservoir

№	$V_{\text{плз}}$	$V_{\text{полн}}$	$A_{\text{плз}}$	$A_{\text{бр}}$
1	300,27	460,37	92,91	119,90
2	369,14	556,79	108,19	138,05
3	438,43	653,80	124,07	156,75
4	505,20	741,76	136,99	172,15
5	570,71	823,01	148,52	185,90
6	636,22	895,80	160,38	199,65
7	701,73	973,68	171,75	213,40
8	767,23	1066,44	181,95	227,15
9	832,74	1159,20	191,91	240,90
10	898,25	1251,95	201,49	254,65
11	1029,27	1437,47	219,96	282,15
12	1094,78	1530,22	228,94	295,90
13	1225,79	1715,74	246,91	323,40
14	1291,30	1808,49	255,89	337,15
15	1353,87	1897,08	261,23	347,05
16	1413,49	1981,51	262,94	353,10
17	1529,38	2145,59	262,21	360,80

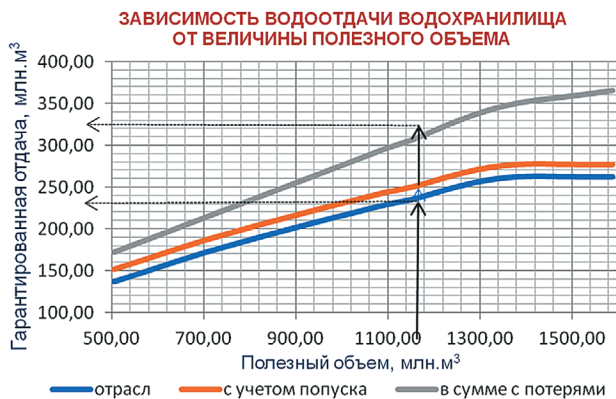


Рис. 4. Анализирующая зависимость
«Емкость-отдача»

Fig. 4. Analyzing dependence
«capacity-output»

По факту суммарный полезный объем Верхнетобольского и Каратомарского водохранилищ составляет 1150 млн м³. Согласно графику расчетной зависимости (рис. 4) он соответствует примерно 235 млн м³ полезной отраслевой водоотдачи (в сумме с согласованным пуском – порядка 250 млн м³). Реальные требования по транзиту стока через трансграничный створ существенно выше, поскольку должны быть учтены требования по качеству водных ресурсов. Дефицит пуска оценивается примерно в 120-150 млн м³. Результаты нуждаются в уточнении в части гидрологической информации, тем не менее отражают суть проблемы.

Результаты и обсуждение. Ряд классических задач инженерной гидрологии, связанных с обоснованием объема водохранилищ комплексного использования, нуждается

Библиографический список

1. Водоохранилища и их воздействие на окружающую среду / А.Б. Авакян, Ю.М. Матарзин, В.П. Салтанкин и др.; Отв. ред. Г.В. Воропаев, А.Б. Авакян / АН СССР, Секция хим. – технол. и биол. наук, Секция наук о Земле по программе ЮНЕСКО «Человек и биосфера». – М.: Наука, 1986. – 366 с.

2. Александровский А.Ю., Хасянов С.В. Управление режимами работы водохранилищ гидроэлектростанций в соответствии с требованиями по обеспечению безопасной эксплуатации гидротехнических сооружений // Труды Всероссийской научной конференции, посвященной памяти выдающегося ученого гидролога, профессора А.В. Рождественского. – М.: РАН, 2012. – С. 219-226.

3. Крицкий С.Н., Менкель М.Ф. Гидрологические основы управления водохозяйственными системами. – М.: Наука, 1982. – 271 с.

в совершенствовании в связи с более широким использованием имитационного и оптимизационного моделирования. В то же время отказ от традиционных методов, базирующихся на фундаментальных динамико-стохастических представлениях, является нерациональным. Важность и актуальность поднимаемой темы обусловлены высоким ущербом вследствие ошибок расчетного определения параметров водохранилищ. Выбор методик, по-видимому, должен строиться на сочетании методов, адекватном постановке инженерной задачи. В этом случае большое значение приобретает квалификация специалистов, принимающих решение. Соответственно было бы полезным обсуждение проблемы в различных публикациях и на научных конференциях.

Выводы

Определение параметров водохранилищ комплексного назначения (в особенности обратная задача – оценка объема и режима гарантированной водоотдачи по заданным параметрам) во многих случаях является определяющим для принятия принципиальных решений о распределении водных ресурсов между участниками водохозяйственного комплекса, между странами-участниками (трансграничные створы). Многие водохранилища претерпели существенные изменения с момента ввода в эксплуатацию (ЦГУ), в связи с чем их режимные характеристики должны существенно меняться. Соответственно с годами растет актуальность решения задачи настоящего исследования в целях надежного и эффективного управления водными ресурсами.

References

1. Avakyan A.B. Vodohranilishcha i ih vozdejstvie na okruzhayushchuyu sredyu / [A.B. Avakyan Yu.M. Matarzin, V.P. Saltankin i dr.]; otv. red. G.V. Voropaev, A.B. Avakyan; AN SSSR, Sektsiya him. – tekhnol. i biol. nauk, Sektsiya nauk o Zemle po programme YUNESKO “Chelovek i biosfera”. – Moskva: Nauka, 1986. – 366 s.

2. Aleksandrovskij A.Yu. Upravlenie rezhimami raboty vodohranilishch gidroelektrostantsij v sootvetstvii s trebovaniyami po obespecheniyu bezopasnoj ekspluatatsii gidrotekhnicheskikh sooruzhenij / A.Yu. Aleksandrovskij S.V. Hasyanov // Trudy Vserossijskoj nauchnoj konferentsii, posvyashchennoj pamyati vydavushchegosya uchenogo gidrologa, professora A.V. Rozhdestvenskogo. – 2012. – S. 219-226.

3. Kritskij S.N., Menkel M.F. Hidrologicheskie osnovy upravleniya vodohozyajstvennymi sistemami. – M.: Nauka, 1982. – S. 271.

4. Водохозяйственные системы и водопользование: учебник / Под общ. ред. Л.Д. Ратковича, В.Н. Маркина. – М.: ИНФРА-М, 2019. – 452 с.

5. **Картвелишвили Н.А.** Теория вероятностных процессов в гидрологии и регулировании речного стока. – 2-е изд., доп. и перераб. – Л.: Гидрометеиздат, 1985. – 192 с.

6. **Сванидзе Г.Г.** Математическое моделирование гидрологических рядов. – Л.: Гидрометеиздат, 1977. – 296 с.

7. Методические указания по разработке правил использования водохранилищ: утв. приказом Минприроды России от 26 января 2011 г. № 17. – URL: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/2074575/>.

8. Методические указания по разработке схем комплексного использования и охраны водных объектов: утв. приказом МПР РФ от 4 июля 2007 г. № 169. – URL: <https://base.garant.ru/12155160/>

9. **Раткович Л.Д.** Развитие теории и методов гидролого-водохозяйственного анализа трансграничных рек с использованием имитационного и стохастического моделирования: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. – М., 2020. – 44 с.

10. **Асарин А.Е.** Водохозяйственные расчеты: Учебное пособие / А.Е. Асарин, К.Н. Бестужева, А.В. Христофоров и др. – М.: Географический факультет МГУ 2012. – 144 с.

11. **Раткович Л.Д.** Развитие методологии трансграничного водопользования применительно к условиям ограниченного контроля внешнего притока / И.Ж. Атабиев, А.А. Иванов, Ю.А. Бовина // Природобустройство. – 2019. – № 5. – С. 98-106.

4. Vodohozyajstvennyye sistemy i vodopolzovanie. Uchebnik. / Pod obshchej redaktsiej L.D. Ratkovicha, V.N. Markina. – Moskva, nauchno-izdatelskij tsentr INFRA-M, Moskva, 2019, 452 s., 17 p.l., ISBN: 978-5-16-014286-9

5. **Kartvelishvili N.A.** Teoriya veroyatnostnyh protsessov v gidrologii i regulirovani rechnogo stoka / N.A. Kartvelishvili. – 2-e izd., dop. i pererab. – L.: Gidrometeoizdat, 1985. – 192 s.

6. **Svanidze G.G.** Matematicheskoe modelirovanie gidrologicheskikh ryadov. – L.: Gidrometeoizdat, 1977. – 296 s.

7. Metodicheskie ukazaniya po razrabotke pravil ispolzovaniya vodohranilishch (utv. Prikazom Minprirody Rossii ot 26 yanvarya 2011 g. № 17). URL: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/2074575/>.

8. Metodicheskie ukazaniya po razrabotke skhem kompleksnogo ispolzovaniya i ohrany vodnykh objektov (utv. prikazom MPR RF ot 4 iyulya 2007 g. N169). <https://base.garant.ru/12155160/>

9. **Ratkovich L.D.** Razvitie teorii metodov gidrologo-vodohozyajstvennogo analiza transgranichnykh rek s ispolzovaniem imitatsionnogo i stohasticheskogo modelirovaniya: avtoreferat dissertatsii na soiskanie uchenoj stepeni doktora tekhnicheskikh nauk / Rossijskij gosudarstvennyj agrarnyj universitet-Moskovskaya selskohozyajstvennaya akademiya im. K.A. Timiryazeva. – Moskva, 2020. – 44 s.

10. **Asarin A.E.** Vodohozyajstvennyye rascheti: uchebnoe posobie / A.E. Asarin, K.N. Bestuzheva, A.V. Hristoforov, S.R. Chalov. – Moskva: Geograficheskij fakultet MGU, 2012. – 144 s. ISBN: 978-5-89575-199-2

11. **Ratkovich L.D.** Razvitie metodologii transgranichnogo vodopolzovaniya primenitelno k usloviyam ogranichennogo kontrolya vneshnego pritoka / L.D. Ratkovich, Atabiev I.Zh., Ivanov A.A., Bovina Yu.A. – Prirodoobustrojstvo. – 2019. – № 5. – S. 98-106.

Критерии авторства

Раткович Л.Д., Иванов А.А., Исмайллова И.Г., Раткович Е.Л. выполнили теоретические исследования, на основании которых провели обобщение и написали рукопись. Раткович Л.Д., Иванов А.А., Исмайллова И.Г., Раткович Е.Л. имеют на статью авторское право и несут ответственность за плагиат.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликтов интересов

Статья поступила в редакцию: 25.12.2021 г.

Одобрена после рецензирования 21.01.2022 г.

Принята к публикации 09.02.2022 г.

Criteria of authorship

Ratkovich L.D., Ivanov A.A., Ismayilova I.G., Ratkovich E.L. carried out theoretical studies, on the basis of which they generalized and wrote the manuscript. Ratkovich L.D., Ivanov A.A., Ismayilova I.G., Ratkovich E.L. have a copyright on the article and are responsible for plagiarism.

Conflict of interests

The authors state that there are no conflicts of interests

The article was submitted to the editorial office 25.12.2021

Approved after reviewing 21.01.2022

Accepted for publication 09.02.2022