

УДК 556.552

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ СТОКА И ПРОЦЕССОВ ВНЕШНЕГО ВОДООБМЕНА В ВОТКИНСКОМ ВОДОХРАНИЛИЩЕ ЗА РАЗЛИЧНЫЕ ПО ВОДНОСТИ ГОДЫ

Китаев А.Б., Кобелев Н.А.

*ФГБОУ ВО Пермский государственный национальный исследовательский университет,
Пермь, E-mail: kitaevab1953@gmail.com*

DISTRIBUTION OF RUNOFF AND EXTERNAL WATER EXCHANGE PROCESSES IN THE VOTKINSK RESERVOIR FOR YEARS OF DIFFERENT WATER AFFAIRS

Kitaev A.B., Kobelev N. A.

Perm State University, Perm

Аннотация. Дана оценка водности лет для водосборного бассейна Воткинского водохранилища за многолетний период (1965-2022 гг.). Расчеты выполнены согласно СП 33-101-2003 (Свод правил по проектированию и строительству). Представлена характеристика обмена вод по наиболее часто используемым показателям с использованием величины притока в водохранилище по основной реке и боковым притокам, а также величины сброса вод через водопропускные отверстия гидроузла. При этом оценка дана относительно полезного объема вод изучаемого водоема, непосредственно участвующего в регулировании речного стока. Для анализа внутригодового распределения стока использовалась схема деления стока по сезонам: весна IV-VI, лето-осень VII-X, зима XI-III. При расчете коэффициентов водообмена использовалось 2 значения величины полезного объема водохранилища. Первое – это значение, взятое из утвержденных ПИВР 2016 г., второе значение получено в результате проведения работ по уточнению топографических характеристик водохранилищ. В результате исследования установлено, что годы, находящиеся по показателям приточности и сбросам воды, в разных по водности группах – редкость, чаще всего значения лет располагаются в одной группе. Для Камского водохранилища вышеописанные несоответствия преимущественно встречаются в серединах группы (распределения), тогда как для Воткинского водохранилища такие нестыковки присущи чаще всего на пограничных частях групп водности. Такое явление может объясняться большей неравномерностью поступающего стока к створу Камского гидроузла, связанного с каскадным расположением водохранилищ.

Ключевые слова: водохранилище, морфометрия, полезный объем водоема, обмен вод, многоводные и маловодные годы.

Annotation. An assessment of the water content of years for the drainage basin of the Votkinsk reservoir for a long-term period (1965-2022) is given. Calculations were performed in accordance with SP 33-101-2003 (Code of rules for design and construction). The characteristics of water exchange are presented according to the most commonly used indicators using the inflow into the reservoir along the main river and side tributaries, as well as the amount of water discharge through the culverts of the hydroelectric complex. In this case, the assessment is given in relation to the useful volume of water of the studied reservoir, which is directly involved in the regulation of river flow. To analyze the intra-annual distribution of runoff, a scheme was used to divide the runoff by season: spring IV-VI, summer-autumn VII-X, winter XI-III. When calculating water exchange coefficients, 2 values of the useful volume of the reservoir were used. The first is a value taken from the approved PIVR 2016, the second value was obtained as a result of work to clarify the topographic characteristics of reservoirs. As a result of the study, it was established that years that, in terms of water inflow and discharge indicators, are in groups of different water content are rare; most often, the values of years are located in the same group. For the Kama Reservoir, the above-described inconsistencies are predominantly found in the middle of the group (distribution), while for the Votkinsk Reservoir such inconsistencies are most often inherent in the

border parts of water content groups. This phenomenon can be explained by the greater unevenness of the incoming flow to the site of the Kama hydroelectric complex, associated with the cascade arrangement of reservoirs.

Key words: reservoir, morphometry, useful volume of the reservoir, water exchange, high-water and low-water years.

Введение. В 2016 г. была завершена разработка и опубликованы очередные Правила использования водных ресурсов (ПИВР) камских водохранилищ [1]. В этот документ вошли материалы с момента начала функционирования Камского и Воткинского гидроузлов и по 2014 г. Однако в связи с постоянным изменением морфометрических показателей водоемов, а также климатическими подвижками на изучаемых водосборах этот документ должен, несомненно, дополняться и уточняться. Этому вопросу и посвящено настоящее исследование. Объектом исследования является Воткинское водохранилище. **Цель** работы – оценка обмена вод в водоеме по материалам многолетних наблюдений.

Материалы и методы. Исходными материалами для такого дополнения послужили величины среднесуточных расходов воды притекающих с водосбора исследуемого водного объекта и сбрасываемых через плотину гидроэлектростанции. Поскольку объектом изучения явилось Воткинское водохранилище, то был использован материал всего периода эксплуатации водоема (1965-2022 гг.). Материалы 1962-1964 гг. не были рассмотрены, так как в это время происходило промежуточное наполнение водоема. При анализе временного распределения стока использована стандартная методика, содержание которой представлено в СП 33-101-2003 [2]. Для водохранилища была определена расчетная обеспеченность среди ранжированных рядов значений объемов стока в программе Excel. Единственным упрощением было слияние в одну группу очень многоводных и многоводных лет. Для анализа внутригодового распределения стока использовалась схема деления стока по сезонам: весна IV-VI, лето-осень VII-X, зима XI-III [3].

Результаты и их обсуждение. При характеристике обмена вод в исследуемом водном объекте, т.е. Воткинском водохранилище нами использован не весь объем вод, а исключительно его полезная составляющая. Такой подход определялся тем фактом, что именно эта часть водного объема используется при регулировании речного стока водохранилищем. Обмен вод полезного объема (K_v) по [3] выражается зависимостями:

$$K_g = \frac{W_{пр.}}{V_{п.}} \quad (1); \quad K_g = \frac{W_{ст.}}{V_{п.}} \quad (2); \quad K_g = \frac{W_{пр.} + W_{ст.}}{2V_{п.}}, \quad (3)$$

где $W_{пр.}$ – объем притока к гидроузлу, $W_{ст.}$ – объем стока через гидроузел, $V_{п.}$ – полезный объем.

Выбор приведенных зависимостей определялся их наиболее частым использованием в практике. При расчете кратности обмена вод с использованием полезного объема водоема использованы два значения – по материалам из ПИВР 2016 г. и по уточненным величинам

топографических характеристик водоема [4, 5, 6]. Разница между указанными величинами объемов вод составила 2,02 %. В последующих расчетах и анализе обмена вод в многолетнем аспекте использованы материалы наблюдений за речным стоком и величиной сброса вод через гидроузел за период 1965-2022 гг., то есть за больший период, чем в материалах утвержденного ПИВРа.

Для оценки обмена вод в Воткинском водохранилище за многолетний период (за все время эксплуатации водоема) был использован ранжированный ряд величины сброса вод через створ гидроузла. Такая оценка была дана отдельно для группы многоводных, средних по водности и маловодных лет.

Для первой группы лет следует отметить, что наибольшее значение поступающего в водоем расхода воды (по основной реке и боковым притокам) отмечалось в 1994 г. и составило величину объема вод равную $77,5 \text{ км}^3$ (формула 1). При этом показатели внешнего обмена вод по ПИВРу и по уточненным нами топографическим характеристикам были равны – 17,4 и 17,8. Наименьшее значение поступающего расхода воды в водохранилище составило $63,4 \text{ км}^3$ объема воды. Показатели обмена вод были 14,2 и 14,5. Отмечалось это в 2001 г. Среднее значение поступающего объема воды за рассматриваемый интервал времени составило $68,9 \text{ км}^3$, при величинах показателей обмена вод в 15,5 и 15,8. При этом разница между средними величинами обмена вод составила 0,3 (табл. 1).

При использовании формулы (2) ситуация отмечалась следующая. Наибольшее значение сбрасываемого объема воды через створ гидроузла отмечалось также в 1994 г., как и с использованием показателей обмена вод по формуле (1). Величина сбросного объема воды составила $77,0 \text{ км}^3$, при этом показатели обмена вод по двум вариантам были равны 17,3 и 17,6. Минимальный объем сбрасываемой воды был в 1972 г. и равнялся $61,9 \text{ км}^3$, при этом показатели обмена вод составили 13,9 и 14,2. Средняя величина объема сбрасываемых вод составила $67,9 \text{ км}^3$. При этом показатели обмена вод были равны соответственно – 15,3 и 15,6. Разница в их величинах, как и предыдущем варианте, то есть с использованием формулы (1) была 0,3 (табл. 2).

Использование формулы (3), учитывающей как объем притока воды в водохранилище, так и величину сброса из него дало следующий результат. Наибольшее значение объема также как и выше указанных двух вариантах, отмечалось в 1994 г. При этом показатели обмена вод были равны 17,4 и 17,7. Наименьшие значения отмечались в 1995 г. и составили соответственно – 13,9 и 14,2. Разница в их величинах составила те же 0,3.

Таблица 1

Расчет коэффициентов водообмена по приточности к Воткинскому гидроузлу

Воткинское водохранилище					
Год	W _{стока} , км ³	Кв _{пивр 2016г.}	Кв _{уточн.}	Тип года по водности	
1994	77,5	17,4	17,8	Очень многоводные годы (P<16,7%)	Многоводные годы
2019	77,0	17,3	17,7		
1190	75,2	16,9	17,3		
2020	72,8	16,4	16,7		
2007	70,9	15,9	16,3		
1979	70,5	15,9	16,2		
2002	70,2	15,8	16,1		
2017	69,9	15,7	16,0		
1993	69,3	15,6	15,9		
2015	69,3	15,6	15,9		
1978	66,9	15,0	15,3		
1986	66,7	15,0	15,3		
1999	66,5	14,9	15,2		
1984	65,2	14,7	15,0		
1991	64,9	14,6	14,9		
2016	64,6	14,5	14,8		
1974	64,6	14,5	14,8		
1995	64,4	14,3	14,5		
2001	63,4	14,2	14,5		

Анализ материалов для группы «средних по водности лет» проведен по той же схеме, что и для многоводных лет. Дана оценка обмена вод в изучаемом водном объекте по трем формулам (1-3) с учетом материалов ПИВР и уточненным характеристикам (использован весь период эксплуатации водоема).

Наибольшее поступление вод в водохранилище для рассматриваемой группы лет наблюдалось в 1997 г. и составляло 63,2 км³. При этом показатели обмена вод составили 14,2 и 14,5. Минимальное значение поступающих в водоем вод составило 55,3 км³ и было отмечено в 1996 г. Показатели обмена вод при этом равнялись 12,4 и 12,7. Средний объем вод, поступивших в водоем составил 59,2 км³, а показатели обмена вод изменялись от 13,3 до 13,6.

Таблица 2

Расчет коэффициентов водообмена по сбросам через Воткинский гидроузел

Воткинское водохранилище				
Год	W _{стока} , км ³	КВ _{пивр 2016г.}	КВ _{уточн.}	Тип года по водности
1994	77,0	17,3	17,6	Очень многоводные годы (P<16,7%)
2019	75,6	17,0	17,3	
1190	74,0	16,6	17,0	
2020	72,5	16,3	16,6	
1979	71,3	16,0	16,3	
2007	70,3	15,8	16,1	
2002	67,5	15,2	15,5	
2017	67,4	15,1	15,5	
2015	67,2	15,1	15,4	
1984	66,4	14,9	15,2	
1993	66,4	14,9	15,2	
1991	65,8	14,8	15,1	
1974	65,6	14,7	15,0	
1978	65,3	14,7	15,0	
2016	65,0	14,6	14,9	
1999	64,8	14,6	14,9	
1986	64,6	14,5	14,8	
1965	62,4	14,3	14,3	
2075	61,9	13,9	14,2	

Второй вариант расчета (формула 2) дал следующий результат. Наибольшее значение стока сбрасываемого через створ Воткинского гидроузла наблюдался в 1971 и 2008 гг. и был равен 61,1 км³. При этом показатели обмена вод были равны 13,7 и 14,0. Наименьший объем сбрасываемых вод отмечался в 2005 г. и был 53,8 км³. Показатели обмена вод составили 12,1 и 12,3. Среднее значение сбрасываемого объема вод в рассматриваемый период времени был 58,3 км³. Обмен вод в водоеме происходил при этом 13,1 и 13,4 раза.

Оценка обмена вод с использованием величин притока и сброса вод в водоем показала следующий результат. Наиболее интенсивный обмен вод наблюдался в 2001 г., при этом показатели водообмена составляли 13,9 и 14,2. Наименее интенсивный обмен вод был в 2013 г., обмен вод при этом составил 12,2 и 12,5. Средние величины обмена вод по формуле (3) составили 13,2 и 13,5. По всем трем формулам разница между величинами обмена вод по ПИВР и уточненному варианту была одинакова и составляла 0,3.

Анализ материалов для группы маловодных лет показал следующую картину. Наибольшие величины поступающего в водохранилище объема стока наблюдались в 1970 г. и составили 54,6 км³. Показатели обмена вод при этом были 12,3 и 12,5. Наименьшее значение поступающего объема вод в водоем было зафиксировано в 1967 г. (самый маловодный год за весь период эксплуатации водохранилища) и равнялось 36,1 км³, а показатели обмена вод были самыми минимальными за все годы наблюдений за состоянием водного объекта и равнялись 8,11 и 8,28. Разница между величинами обмена вод в условиях максимального и минимального поступления вод в водоем составила 4,15 и 4,23. Среднее значение объема притока было 47,5 км³. Показатели интенсивности обмена вод были 10,7 и 10,9.

Наименьшая величина сбрасываемого через плотину ГЭС объема вод отмечалась в 1996 г. и было 53,1 км³. Показатели обмена вод были 11,9 и 12,2. Наименьший объем вод сброшенных в нижний бьеф гидроузла был отмечен, как и в предыдущем варианте (то есть по притоку) в 1967 г. и составил 36,0 км³. Обмен вод при этом был 8,09 и 8,26 (это также минимальные значения за весь период). Среднее значение объема вод для рассматриваемой группы лет составило 46,7 км³ при обмене вод – 10,5 и 10,7.

Использование формулы (3), учитывающей объемы как притока вод в водохранилище, так и величину сброса вод через створ гидроузла показало следующее. Наибольшая величина среднего стока зафиксирована в 1996 г., наименьшая в 1967 г. Величины обмена вод при этом были в 1996 г. – 12, и 12,4, в 1967 г. – 8,10 и 8,27. Интервал между значениями обмена вод составил 4,08 и 4,16. Среднее значение обмена вод было 10,6 и 10,8. Разница между величинами обмена вод с использованием материалов ПИВР и более длинного периода наблюдений составило для всех трех вариантов формул 0,22.

Выводы. Оценка обмена вод с использованием показателей по притоку вод в водоем и стока из него свидетельствуют, что эти показатели могут находиться в разных группах лет по водности. Это говорит об азональности водохранилищ, как водных объектов, то есть по мере продвижения вод от верховьев водоема к плотине гидроузла происходит временное перераспределение водных объемов. Так, для Камского водохранилища – 1957, 1985, 1992, 2008 гг. и для Воткинского водохранилища – 1995, 2001 гг. по показателю притока располагаются в группе «многоводные годы», а по показателю сброса воды в группе «средние по водности годы». Но встречается и иная картина. Так для Камского водохранилища – 1974, 1999, 2016 гг., для Воткинского водохранилища – 1965, 1972 гг. по показателю притока располагаются в группе «средние по водности годы», а по показателю сброса воды в группе «многоводные годы». Интересен для Камского водохранилища 1997 г., располагающийся по показателю притока в группе «маловодные годы», а по показателю сброса воды в группе «многоводные годы». Согласно расчетам, сброс воды в этом году превысил приток на 9,20

км³. А коэффициенты обмена вод по сбросу превысили аналогичные значения по притоку на 0,93/1,01.

Годы, находящиеся по показателям приточности и сбросам воды, в разных по водности группах – редкость, чаще всего значения лет располагаются в одной группе. Для Камского водохранилища вышеописанные несоответствия преимущественно встречаются в серединах группы (распределения), тогда как для Воткинского водохранилища такие нестыковки присущи чаще всего на пограничных частях групп водности. Такое явление может объясняться большей неравномерностью поступающего стока к створу Камского гидроузла, связанного с каскадным расположением водохранилищ. Воткинское водохранилище является 2 ступенью камского каскада, получая ~95 % стока через попуски Камской ГЭС. Так, для Камского водохранилища наибольший размах среди значений объемов стока и внешнего водообмена выявлен по показателю приточности для группы «многоводные годы» и составил 20,1 км³ или 2,04/2,22. Для Воткинского водохранилища ситуация обратная, наибольший размах зафиксирован в группе «маловодные годы» и составил 18,5 км³ или 4,15/4,23, это говорит о неравномерности стока, связанного как, уже отмечалось выше с каскадным расположением водохранилищ.

Рассматривая статистический аспект исследования можно констатировать, что ряды разной водности для Воткинского водохранилища не равнозначны – средние по водности годы превосходят многоводные и маловодные на одно значение, что, однако не является препятствием для анализа полученных материалов.

Анализ многолетней динамики годового стока воды через гидроузел Воткинской ГЭС показал положительный тренд. Аналогичный вывод можно сделать и по значениям коэффициентов обмена вод. Так в створе гидроузла сток вырос с 53,7 км³ до 57,6 км³. Величина обмена вод увеличилась с 12,1 до 12,9 по материалам ПИВР и с 12,3 до 13,2 по уточненным характеристикам. Таким образом, увеличение объема вод составило 3,79 км³ или 6,59 %.

Для оценки протекания динамических процессов в водных объектах требуются расчеты показателей обмена вод, которые зависят от объема воды находящегося в данный конкретный момент времени в водоемах (естественных или искусственных). Такие характеристики получены нами с использованием полезного объема вод сосредоточенного в чаше Воткинского водохранилища по материалам официального источника (ПИВР 2016 г.) и по материалам уточненных топографических характеристик. Для всех трех групп водности лет (и по притоку и по стоку) они составили: многоводные годы – 0,32; средние по водности годы – 0,27; маловодные – 0,22. С увеличением водности лет происходит рост разницы в значениях показателя обмена вод по притоку и стоку.

Для водохранилищ приходная часть их водного баланса (приточность вод по основной реке и ее притокам, атмосферные осадки на зеркало водоема и др.) практически всегда превышает расходную (сбросы воды через створ гидроузла, испарение, забор воды на хозяйственные нужды и др.). Этим сохраняется ресурс воды необходимый потребления различными водопользователями.

Литература

1. Правила использования водных ресурсов Камского и Воткинского водохранилищ на р. Каме. Утв. приказом Федерального агентства водных ресурсов от 7 ноября 2016 г. № 225. М.: Росводресурсы, 2017.

2. СП 33-101-2003. Свод правил по проектированию и строительству. Определение основных расчетных гидрологических характеристик (одобрен постановлением Госстроя РФ от 26 декабря 2003 г., №218). М., 2004. 73с.

3. *Китаев А.Б.* Внешний водообмен // Гидрологический режим Камского водохранилища (по материалам XX и начала XXI столетия). Пермь, 2020. С.159-187.

4. *Калинин В.Г. Перевощикова О.А.* Гидролого-морфологическое районирование водохранилища с использованием ГИС-технологий // Гидрологический режим Камского водохранилища (по материалам XX и начала XXI столетия). Пермь, 2020. С.31-44.

5. *Михалев В.В., Мацкевич И.К., Белобородов А.В.* Современная морфометрия Воткинского водохранилища // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2011. №1. С.23-33.

6. *Солодунов А. А., Бандурин М. А., Сидиков А. А.* Поиск вариантов изменения эксплуатации Краснодарского водохранилища учитывая возрастающий дефицит водных ресурсов в бассейне реки Кубани //International agricultural journal. 2021.№. 1. С.75-86.