

УДК 502/504:551.48: 626.81:627.81

В.И. КЛЁПОВ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный аграрный университет – МСХА им. К.А. Тимирязева», Институт природообустройства им. А.Н. Костякова, г. Москва

И.В. РАГУЛИНА

Областное государственное бюджетное образовательное учреждение дополнительного профессионального образования «Курский институт развития образования», г. Курск

ГИДРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ ИСКУССТВЕННОГО ПОПУСКА ВОДЫ В БАССЕЙНЕ РЕКИ МОСКВЫ

Речной сток, который служит основным поставщиком пресной воды для различных отраслей хозяйства России, распределен неравномерно как по территории суши, так и внутри годового цикла. Внутригодовая неравномерность стока устраняется, как известно, его регулированием с помощью водохранилищ. Пространственная неравномерность может быть выровнена, в частности, объединением отдельных водохранилищ в водно-ресурсные системы (ВРС). Существенное сглаживание пространственной и временной неравномерности в распределении речного стока позволяет увеличить отдачу естественных водотоков. Следовательно, регулирование речного стока с помощью водохранилищ позволяет в значительной степени повысить водообеспеченность территории. Одной из таких речных систем в России является ВРС Московского региона. Эта система создана и функционирует уже в течение нескольких десятилетий с целью водообеспечения региона, предотвращения возможности его подтопления при катастрофически высоких половодьях и паводках, санитарного обводнения рек в маловодные периоды, обеспечения судоходных глубин и выработки электроэнергии. Особенностью ВРС Московского региона в отличие от многих других сложных систем водохранилищ как в России, так и за ее пределами, следует считать то, что с помощью этой системы одновременно решаются две противоположные задачи регулирования речного стока: первая – повышение минимального расхода воды до установленного уровня; вторая – уменьшение максимальных половодных и паводочных расходов воды. Предметом статьи является гидрологическое обоснование к моделированию формирования в весенний период искусственного расхода воды в нижнем бьефе водохранилищ, расположенных в бассейне реки Москвы, и оценка степени надежности создания такого искусственного половодья.

Речной сток, обводнительные попуски, водохранилище, система водохранилищ, водообеспечение.

Введение. Водно-ресурсные системы (ВРС) Московского региона могут быть условно разделены на три части (подсистемы), каждая из которых функционирует в соответствии со своими, специально разработанными правилами управления. К их числу относятся Верхневолжская, Москворецкая и Вазузская подсистемы водохранилищ. Высокий уровень надежности гарантированной водоотдачи водохранилищ водообеспечения Московского региона (95-97% по числу бесперебойных лет) обуславливает необходимость предвидеть возможные последствия срыва этой отдачи, поскольку такие последствия могут быть весьма значительными. Очевидно, что в крайне маловодных условиях, когда теоретически должен наступить предполагаемый «срыв» отдачи, т.е. её сокращение, и, как следствие, ущерб

в одной из известных форм или их сочетаний, уменьшение по сравнению с гарантированной величиной, негативная нагрузка на природу и человека существенно возрастут, если сравнивать их с обычными благоприятными условиями. Поскольку водообеспечение Московского региона может быть подразделено на такие составляющие, как питьевое, коммунально-бытовое, промышленное и обводнительное водообеспечение, можно предположить, что в условиях недостатка воды все эти составляющие будут подвержены сокращению потребляемых водных ресурсов. Сокращение водных ресурсов для каждой составляющей будет иметь разную степень.

Москворецкая водная система (МВС). В подсистему входят Истринское, Можайское, Рузское и Озернинское водо-

хранилища, расположенные в верхнем течении р. Москвы и ее притоках. Водохранилищами подсистемы практически полностью зарегулирован сток верхней части водосбора. Управление водными ресурсами подсистемы МВС построено так, что из водохранилищ производятся попуски воды в размерах, дополняющих до величины гарантированного расхода сток боковой приточности на участке от этих водохранилищ до створа Рублевского гидроузла (водозабор в г. Москву). Каждое из четырех водохранилищ подсистемы ведет компенсированное регулирование контролируемого им стока.

Таким образом, в результате гидротехнического строительства водный режим верхнего участка р. Москвы до створа Рублевского гидроузла (площадь водосбора – 7300 км²) определяется работой четырех водохранилищ, из которых одно расположено непосредственно на р. Москве – Можайское – с полезным объемом воды 0,22 км³, а остальные – на ее притоках: Истринское на р. Истра – 0,17 км³, Рузское на р. Руза – 0,22 км³, Озернинское на р. Озерна – 0,14 км³. Эти водохранилища изменили распределение речного стока по сезонам года, и отчасти – между смежными годами. В пределах городской черты расположены плотина Рублевской водопроводной станции, а также Карамышевский и Перервинский гидроуз-

лы на р. Москве. В нижнем течении р. Москвы на участке длиной около 150 км от Бесединского моста вплоть до устья возведено 5 гидроузлов транспортного назначения. С помощью этих гидроузлов (Трудкоммуна, Андреевка, Софьино, Фаустово и Северка), построенных в конце XIX в., поддерживаются необходимые судоходные глубины во время речной навигации на р. Москве. Схема Москворецкой водной системы представлена на рисунке 1.

Известно, что половодный сток реки – самый действенный механизм природного самоочищения русла. В этот период речной поток характеризуется большими скоростями и выходит из берегов, вызывая смыв донных отложений и распределение их на пойме. С постройкой в верховьях р. Москвы четырех водохранилищ, аккумулирующих большую часть весеннего стока, пики половодий уменьшились и по высоте, и по продолжительности. Таким образом, повышение гарантированной водоотдачи водохранилищ привело к срезке максимальных расходов воды в весенний период. Следовательно, регулирование режима расходов, уровней и скоростей по всей длине р. Москвы привело, как и можно было ожидать, к снижению самоочищающей способности реки и образованию благоприятных условий для накопления загрязненных донных отложений.



Рис. 1. Схема Москворецкой водной системы

Методы исследований. При обосновании надёжности функционирования водно-ресурсной системы, предназначенной для водообеспечения крупного региона, кроме наиболее изученных экономических показателей возможного ущерба, у водопользователей при недостатке воды могут быть выделены и другие виды ущерба: например, социальный, моральный и экологический (природоохранный) [1]. Наиболее отчётливо проблема надёжности водообеспечения Московского региона проявляется сейчас в отношении обводнительных попусков [2]. Отсутствие нормативов надёжности для этого вида водопользования приводит к тому, что эти попуски являются замыкающими элементами водного баланса водоема.

Сущность исследования, отражённого в статье, состоит в том, чтобы в период прохождения по реке пика естественного весеннего половодья наложить на него искусственную волну сбросов воды из водохранилищ с расчетом обеспечения в течение некоторого времени расхода воды, большего, чем $700 \text{ м}^3/\text{с}$. Как отмечается [3], только при таких значениях расхода воды можно полностью открыть Карамышевскую и Перервинскую плотины в г. Москве и не опустить уровень воды в районе городских промышленных водозаборов до критических отметок, при которых возникает угроза нарушения работы водозаборов и остановки производственных объектов. По мнению авторов, обеспечить такой расход воды можно только в многоводные годы, когда приток воды в водохранилища МВС значительно превышает количество воды, необходимое для их наполнения до проектного уровня.

Хорошо известно, что гидрометеорологические условия для каждого конкретного года складываются под воздействием большого числа различных факторов. Основные из них – значительные запасы воды в снеге и почве перед началом половодья и дружное таяние снега. Следовательно, принятие решения о гидравлической промывке основывается прежде всего на основе долгосрочного прогноза притока воды к водохранилищам и объема естественного весеннего стока.

Весной 1998 г. [3] сложилась благоприятная обстановка для проведения санитарной гидравлической промывки (предыдущая была реализована в 1982 г.) русла р. Москвы. Поэтому было принято решение об использовании последней для улучшения экологического состояния р. Москвы.

Для этой цели 20-24 апреля был организован пропуск весеннего половодья с полным раскрытием Рублевской, Карамышевской и Перервинской плотин. Водопропускные отверстия нижнемоскворецких воднотранспортных гидроузлов были полностью открыты до начала навигации. Промывка проводилась МГУП «Мосводоканал» и ГП «Канал им. Москвы» при взаимодействии с Гидрометцентром РФ и рядом заинтересованных организаций.

Как показывает практика, искусственная промывка русла реки Москвы является очень ответственным делом. Неслучайно авторы и ее организаторы провели эксперимент в естественных условиях с использованием ограниченного расхода воды в течение только 2-3 дней. Соответственно и результат такой промывки оказался не совсем значимым. Для более наглядной картины рассматриваемого процесса следует, по-видимому, значительно расширить эксперимент как по величине диапазона расхода воды, так и по продолжительности его проведения. Кроме того, увеличение гарантированной водоотдачи из водохранилищ (а увеличенные попуски воды следует считать повышением гарантированной водоотдачи) может существенно повлиять на расчетную обеспеченность такой повышенной водоотдачи из москворецких водохранилищ. Это и есть те сложности в управлении, о которых пишут авторы искусственной промывки, выполненной в естественных условиях в бассейне реки Москвы [3].

Результаты исследований и их обсуждение. Хорошо известно, что расчетная обеспеченность гарантированной водоотдачи четырех водохранилищ Москворецкой водной системы составляет $29\text{-}32 \text{ м}^3/\text{с}$ [4] для расчетной обеспеченности $95\text{-}97\%$ (по числу бесперебойных лет). Поэтому при изменении величины гарантированной водоотдачи в результате эксперимента, бесспорно, будет нарушена и расчетная обеспеченность такой водоотдачи. Следовательно, представляется очень важным исследовать и проанализировать весь диапазон возможных значений соотношения величины и расчетной обеспеченности гарантированной водоотдачи водохранилищ Москворецкой водной системы при проведении эксперимента по искусственной промывке русла р. Москвы.

В статье представлены результаты имитационного эксперимента, направленного на определение соотношения величин

ны гарантированной водоотдачи из водохранилищ Москворецкой водной системы, выявления дефицита гарантированной водоотдачи с увеличением значений промывочного попуска и различной длительности такого попуска. Были рассмотрены значения промывочного попуска в диапазоне от 600 до 1000 м³/с в течение соответственно одной декады, двух декад и трех декад апреля. Для анализа был выбран год 95%-ной обеспеченности, который соответствует водохозяйственному году 1920/21 г. из многолетней выборки гидрологических данных в бассейне р. Москвы. Этот год по своим гидрологическим показателям близок к году, в котором проводился эксперимент в натуральных условиях.

В качестве исходной гидрологической информации рассмотрены притоки воды к Можайскому водохранилищу в створе Можайского гидроузла, к Истринскому водохранилищу в створе Истринского гидроузла, к Рузскому водохранилищу в створе Рузского гидроузла, к Озернинскому водохранилищу в створе Озернинского гидроузла, боковой приток от перечисленных водохранилищ до створа Рублевского гидроузла на р. Москве. Естественный режим рассматриваемых рек изменен в результате хозяйственной деятельности человека, и прежде всего – вследствие регулирования стока водохранилищами. В связи с этим, начиная с момента ввода в эксплуатацию водохранилищ, он был ретрансформирован, т.е. приведен к естественным условиям. В настоящей работе использованы материалы ретрансформации стока по методике Гидропроекта.

Общий – вид уравнения водного баланса при решении задачи формирования искусственного попуска представлен таким образом:

$$B = W_m \pm \Delta V_m + W_{ис} \pm \Delta V_{ис} + W_p \pm \Delta V_p + W_{оз} \pm \Delta V_{оз} + W_6,$$

где W_m – приток воды к Можайскому водохранилищу; $W_{ис}$ – приток воды к Истринскому водохранилищу; W_p – приток воды к Рузскому водохранилищу; $W_{оз}$ – приток воды к Озернинскому водохранилищу; W_6 – боковой приток к Рублевскому водозабору; ΔV_m – изменение объема воды в Можайском водохранилище; $\Delta V_{ис}$ – изменение объема воды в Истринском водохранилище; ΔV_p – изменение объема воды в Рузском водохранилище; $\Delta V_{оз}$ – изменение объема воды в Озернинском водохранилище; B – результирующая составляющая (избыток или дефицит водных ресурсов).

Знак (+) в уравнении соответствует сработке водохранилища, знак (–) – наполнению водохранилища.

Результаты водного баланса фиксируют величину дефицита гарантированной водоотдачи системы водохранилищ D или резерв воды $W_{рез}$.

При $B \geq 0$ резерв водных ресурсов равен балансу $W_{рез} = B$, а дефицит гарантированной водоотдачи – $D = 0$. При $B < 0$ резерв водных ресурсов равен нулю $W_{рез} = 0$, а дефицит гарантированной водоотдачи – $D = -B$.

В таблице 1 представлены результаты имитационного эксперимента по определению зависимости дефицита гарантированной водоотдачи МВС при разной величине промывочного расхода воды в створе Рублевского гидроузла на р. Москве и переменном числе декад, при которых происходит такая подача воды.

Таблица 1

Зависимость дефицита гарантированной водоотдачи МВС при разном расходе искусственного попуска и переменном числе декад

Год 1920/21 Апрель	Дефицит гарантированной водоотдачи, млн м ³ , при значении искусственного попуска воды, м ³ /с				
	600	700	800	900	1000
1 декада	0	0	0	0	295
2 декады	220	470	565	825	915
3 декады	715	990	1235	1580	1750

Как следует из таблицы, суммарный дефицит гарантированной водоотдачи водохранилищ МВС при формировании искусственного попуска воды существенно отличается в зависимости от длительности временного интервала и при разном расходе искусственного попуска. Для всех значений

такого искусственного попуска, сформированного в течение двух и трех декад апреля, при расходе воды от 600 м³/с до 1000 м³/с имеет место дефицит гарантированной водоотдачи. Этот дефицит монотонно возрастает с увеличением значения расхода воды для искусственной промывки.

Минимальный дефицит гарантированной водоотдачи наблюдается для одной декады апреля и при расходе воды в течение этой декады, равном $1000 \text{ м}^3/\text{с}$, составляет 295 млн м^3 . Следовательно, подавая в створ Рублевского водозабора расход воды в количестве от $600 \text{ м}^3/\text{с}$ до $900 \text{ м}^3/\text{с}$ в течение одной декады апреля маловодного 1920/21 водохозяйственного года, можно не опасаться нарушения действующих правил управления ВРС в бассейне р. Москвы. Во всех остальных случаях дефицит гарантированной водоотдачи будет монотонно возрастать.

Выводы

1. Результаты исследования, представленные в статье, направлены на решение важной народнохозяйственной проблемы: повышение качества управления водными ресурсами сложных систем водохранилищ в условиях неопределенности исходной гидрологической информации. Полученные в процессе работы оценки гидрологического обоснования соотношения величины и обеспеченности гарантированной водоотдачи предназначены для совершенствования правил управления режимом работы. Результаты работы могут быть использованы в проектных разработках и лицами, ответственными за принятие решения (ЛПР).

2. Как показала практика, гидравлическая промывка русла р. Москвы, выполненная в естественных условиях, оказала определенное благотворное влияние на санитарно-экологическое состояние водотока. Прежде всего это касается верховьев реки, и отчасти – городского бьефа. Эффективность данного мероприятия могла быть и выше, но из-за сложностей в управлении искусственной промывкой при относительно невысоком расходе воды ($700 \text{ м}^3/\text{с}$) ее характер не отвечал в полной мере оптимальным условиям. Следует отметить, что комплексный подход к научному обоснованию такой промывки в конечном счете позволил обеспечить ее безаварийное проведение, не допустить возникновения чрезвычайных ситуаций, получить объективную характеристику экологического состояния реки.

3. В статье представлены результаты имитационного эксперимента, направленного на определение соотношения величины гарантированной водоотдачи из водохранилищ Москворецкой водной системы, выявление дефицита гарантированной водоотдачи для различных значений промывочного

попуска и различной длительности такого попуска. Рассмотрены значения искусственного попуска воды в диапазоне от $600 \text{ м}^3/\text{с}$ до $1000 \text{ м}^3/\text{с}$ в течение соответственно одной декады, двух декад и трех декад апреля. Получены значения дефицита гарантированной водоотдачи четырех водохранилищ Москворецкой водной системы.

4. Формирование и проведение искусственной промывки русла р. Москвы – по своей сути оперативный способ управления качеством воды, обладающий сегодня наибольшей доступностью. Поэтому при благоприятных гидрометеорологических условиях его будут повторять с использованием – всех современных средств, включающих в себя компьютерное моделирование, позволяющее оптимизировать условия ее осуществления.

Библиографический список

1. Клёпов В.И., Рагулина И.В. Обводнительные попуски в Московском регионе как элемент водохозяйственного баланса территории // Использование и охрана природных ресурсов в России. – 2015. – № 2. – С. 11-16.
2. Исмаилов Г.Х., Клёпов В.И. Разработка методики определения рациональных объемов обводнительных попусков в Московском регионе // Природообустройство. – 2014. – № 5. – С. 70-75.
3. Колесников Ю.М., Храменков С.В., Волков В.З., Медведев Л.И. Промывка русла р. Москвы и ее воздействие на экологическую обстановку // Водные ресурсы. – 2000. – Т. 27. № 4. – С. 449-456.
4. Основные положения правил использования водных ресурсов водохранилищ Москворецкой водной системы. – М.: Минводхоз, 1968. – 58 с.

Материал поступил в редакцию 08.06.2016 г.

Сведения об авторах

Клёпов Владимир Ильич, доктор технических наук, доцент кафедры «Гидрология, гидрогеология и регулирование стока» ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева; 127550, Москва, ул. Прянишникова, д. 19, e-mail: viklepov@rambler.ru

Рагулина Ирина Васильевна, старший преподаватель кафедры естественно-математического образования ОГБОУ ДПО «Курский институт развития образования», 305004; Курская область, г. Курск, ул. Садовая, д. 31; e-mail: irinkin@mail.ru

V.I. KLEPOV

Federal state budget educational institution of higher education Russian state agrarian university – MAA named after C.A. Timiryazev, Moscow

I.V. RAGULINA

Regional state budget educational institution of additional vocational education «Kurskiy institute of education development», Kursk

HYDROLOGICAL SUBSTANTIATION OF FORMATION OF THE ARTIFICIAL WATER FLOW IN THE MOSCOW RIVER BASIN

River flow which is the main supplier of fresh water for various sectors of the economy of Russia is unevenly distributed on the land area and within the annual cycle. The intra-annual flow unevenness is eliminated as it is well known by its regulation by reservoirs. Spatial irregularity can be leveled, in particular, by uniting separate reservoirs into water resource systems (VRS). Significant smoothing of spatial and temporal uneven distribution of river flow allows increasing returns of natural watercourses. Therefore regulation of river flow by means of reservoirs allows significantly increasing water supply to the territory. One of such river systems in Russia is VRS in the Moscow region. This system has been established and functioned for several decades with the aim of water supply to the region, prevention from flooding during catastrophic high water and floods, sanitary watering of rivers in dry periods, provision of navigable depths and power generation. A special feature of VRS in the Moscow region differing from many other complex systems of reservoirs both in Russia and abroad is the fact that using this system it is possible to solve simultaneously two opposite tasks of the river flow regulation: the first one is increasing of the minimum water consumption up to the established level; the second one is decreasing of the maximum high water and flood consumptions of water. The subject of the article is hydrological substantiation of formation simulation in the spring time of an artificial water flow downstream the reservoirs in the basin of the Moscow region and assessment of the reliability degree of establishing such artificial floods.

River runoff, water flows, reservoir, system of reservoirs, water supply.

References

1. **Klepov V.I., Ragulina I.V.** Obvodnitelnyye popuski v Moskovskom regione kak element vodohozyaistvennogo balansa territorii // Ispol'zovanie i ohrana prirodnykh resursov v Rossi. – 2015. – № 2. – S. 11-16.

2. **Ismaylov G.H., Klepov V.I.** Razrabotka metodiki opredeleniya ratsionalnykh ob'emov obvodnitelnykh popuskov v Moskovskom regione // Prirodoobustroistvo. 2014. – № 5. – S. 70-75.

3. **Kolesnikov Yu. M., Hramenkov S.V., Volkov V.Z., Medvedev L.I.** Promyvka rusla r. Moskvy i ee vozdejstvie na ekologicheskuyu obstanovku // Vodnye resursy. – 2000. – T. 27. № 4. – S. 449-456.

4. Osnovnye polozheniya pravil ispol'zovaniya vodnykh resursov vodohranilishch Mosk-

voretsoj vodnoj sistemy. – M.: Minvodhoz, 1968. – 58 s.

The material was received at the editorial office on 08.06.2016.

Information about the authors

Klepov Vladimir Iljich, doctor of technical sciences, associate professor of the chair «Hydrology, hydrogeology and flow regulation» FSBEI HE RSAU-MAA named after C.A. Timiryazev; 127550, Moscow, ul. Rryanishnikova, d. 19; e-mail: viklepov@rambler.ru

Ragulina Irina Vasiljevna, senior lecturer of the chair of natural-mathematical education RSBEI AVE «Kurskiy institute of education development», 305004; Kurskaya region, Kursk, ul. Sadovaya, d. 31; e-mail: irinkin@mail.ru