

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2022-21-6-480-489>

УДК 627.81:626.81/84

Методика расчета подачи воды на орошение из водохранилищ многофункционального назначения (на примере Китая и Беларуси)

Докт. техн. наук, проф. Э. И. Михневич¹⁾, асп. Ли Цзэмин¹⁾

¹⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2022
Belarusian National Technical University, 2022

Реферат. В качестве источников воды на орошение наиболее часто используются водохранилища, имеющие многофункциональное назначение. В Китае создано большое количество водохранилищ, предназначенных для предотвращения наводнений, орошения, промышленного и сельскохозяйственного водоснабжения. В Беларуси для орошения используют водохранилища Солигорское, Любанское, Петровичское, Погостское и др. Полезный (регулирующий) объем водохранилища многофункционального назначения рассчитывается с учетом каждого потребителя на основе гидрологического и технико-экономического обоснования. Для каждого потребителя назначается требуемая расчетная обеспеченность и используется соответствующая методика определения водопотребления. Так, полезный объем воды, предназначенный для подачи на орошение, должен обеспечить требуемую оросительную способность и мощность оросительной системы. Водоохранилища, предназначенные для водоснабжения, рассчитывают на 95–97%-ю обеспеченность стока, а для целей орошения – на 75–80%-ю обеспеченность в зонах умеренного и избыточного увлажнения. В засушливых, пустынных и полупустынных регионах Китая, где недостаток воды в засушливые годы может привести к большим потерям урожая, водохранилища для целей орошения рассчитывают на 90–95%-ю обеспеченность. Объемы и расходы воды в водохранилище для целей орошения должны покрывать потребности растений в воде в установленные сроки для года расчетной обеспеченности. В статье приведена формула для определения средневзвешенной оросительной нормы и объема воды, необходимого для орошения. Излагается методика по вычислению полезного объема водохранилища, предназначенного для промышленного водоснабжения и орошения, для которого регулирование стока рассчитывается на две обеспеченности водопотребления. Предложен метод определения расхода влекомых наносов для различных стадий их движения. Представлена формула для суммарного объема поступающих в водохранилище взвешенных и донных наносов.

Ключевые слова: системы орошения, водохранилища, регулирование стока, водопотребление, наносы

Для цитирования: Михневич, Э. И. Методика расчета подачи воды на орошение из водохранилищ многофункционального назначения (на примере Китая и Беларуси) / Э. И. Михневич, Ли Цзэмин // *Наука и техника*. 2022. Т. 21, № 6. С. 480–489. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2022-21-6-480-489>

Methodology for Calculating Water Supply for Irrigation from Reservoirs of Multifunctional Purpose (on the Example of China and Belarus)

E. I. Mikhnevich¹⁾, Li Ziming¹⁾

¹⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. Reservoirs with multifunctional purposes are the most widely used as sources of water for irrigation. In China, a large number of irrigation systems have been created using reservoirs as sources for flood prevention, irrigation, industrial and agricultural water supply. In Belarus, the Soligorsk, Lyuban, Petrovich, Pogost and other multifunctional reservoirs are

Адрес для переписки

Михневич Эдуард Иванович
Белорусский национальный технический университет
ул. Б. Хмельницкого, 9,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 293-92-10
fes@bntu.by

Address for correspondence

Mikhnevich Eduard I.
Belarusian National Technical University
9, B. Hmelnitzkogo str.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 293-92-10
fes@bntu.by

used for irrigation. The useful (regulating) volume of a multifunctional reservoir consists of separate components calculated for each consumer in the basis of a hydrological and feasibility study. Thus, the useful volume of water intended for irrigation should provide the required irrigation capacity and capacity of the irrigation system. When determining the useful (regulating) volume of a multifunctional reservoir, the total water requirements for various purposes (water supply, irrigation, hydropower, etc.) are calculated. For each consumer, the required design supply is assigned and the appropriate method for determining water consumption is used. Reservoirs intended for water supply count on 95–97 % availability of runoff, and for irrigation purposes – on 75–80 % availability in zones of moderate and excessive moisture. In arid, desert and semi-desert regions of China, where lack of water in dry years can lead to large crop losses, irrigation reservoirs are expected to be 90–95 % secure. The volumes and costs of water in the reservoir for irrigation purposes must cover the needs of plants in water within the established time frame for the year of estimated availability. The paper provides a formula for determining the weighted average irrigation rate and the volume of water required for irrigation. A methodology is presented for calculating the useful volume of a reservoir intended for industrial water supply and irrigation, for which flow regulation is calculated for two supply of water consumption. A method is proposed for determining the flow rate of entrained sediments for various stages of their movement. A formula is presented for the total volume of suspended and bottom sediments entering the reservoir.

Keywords: irrigation systems, reservoirs, flow regulation, water consumption, sediments

For citation: Mikhnevich E. I., Li Ziming (2022) Methodology for Calculating Water Supply for Irrigation from Reservoirs of Multifunctional Purpose (on the Example of China and Belarus). *Science and Technique*. 21 (6), 480–489. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2022-21-6-480-489> (in Russian)

Введение

Обширные территории Китая, предназначенные для сельскохозяйственного использования, испытывают недостаток влаги. Особенно это характерно для засушливых, пустынных и полупустынных регионов, где, несмотря на обилие теплоты и света, очень трудно возделывать сельскохозяйственные культуры из-за дефицита влаги. Поэтому для таких земель орошение имеет исключительно важное значение. Китай – страна с самой большой площадью орошаемых земель в мире, которая превышает 1 млрд му (му – китайская единица измерения площади), или 70 млн га. В Беларуси также недостаток влаги испытывают многие влаголюбивые культуры даже в средние по водности годы, особенно в западных и южных регионах. В засушливые периоды (обеспеченность 80 % и более) дефицит влаги резко возрастает и орошение становится необходимым практически для всех сельскохозяйственных культур [1, 2].

Основной источник воды для орошения – реки. Для небольших участков орошения может использоваться незарегулированный речной сток. Однако его применение крайне ограничено в связи с низкой водностью рек в летний, самый напряженный, период орошения. На малых реках такого стока просто недостаточно, а забор воды на орошение в летнее время из больших рек может ухудшить условия для судоходства и нарушить экологическую обстановку. Поэтому в качестве источников воды на орошение наиболее широкое распространение

получили водохранилища, созданные только для орошения или имеющие многофункциональное назначение в разном сочетании: орошение, гидроэнергетика, водоснабжение, обводнение, рыбоводство, судоходство, борьба с наводнениями, рекреация [3].

На территории Беларуси построено около 160 водохранилищ различного хозяйственного назначения. Многие из них используются для орошения. Так, из Солигорского водохранилища подается вода на орошение земель площадью 3,5 тыс. га, из Любанского орошаются 600 га, из Петровичского – 5 тыс. га. Всего площадь орошения в 2020 г. составила 30,3 тыс. га, что почти в пять раз меньше по сравнению с 1990 г. (148,9 тыс. га). В связи с потеплением климата и развитием овощеводства в Беларуси уже в ближайшей перспективе потребуется значительное увеличение площадей орошаемых земель.

В Китае более 98000 водохранилищ, в том числе 4700 больших и средних и около 94000 малых. Большие водоемы имеют общую вместимость более 100 млн м³, водоемы среднего размера – 10–100 млн м³, малые водоемы – 1–10 млн м³, пруды – 100 тыс.–1 млн м³. Роль водохранилищ в основном отражается в пяти аспектах: борьба с наводнениями, водоснабжение, сельскохозяйственное орошение, рыбоводство, улучшение экологической обстановки. В настоящее время Китай в течение года на различные нужды поставляет более 270 млрд м³ воды из крупных и средних водохранилищ. Многие небольшие водохранилища стали важными источниками

воды для орошения в сельских районах и сыграли активную роль в борьбе с засухой и обеспечении питьевой водой сельского населения. Порядка 19 % от общего объема воды, подаваемого на орошение, поступает из подземных источников.

Орошение земель в Китае из поверхностных источников

Располагаясь на огромной территории, сельскохозяйственные земли в КНР значительно различаются по климатическим и почвенно-мелиоративным условиям. Соответственно различны по своим целям и размерам оросительные системы (ОС) Китая, которые делятся на четыре категории: очень крупные ОС – более 500000 му (33333 га), крупные – 300000–500000 му (20000–33333 га), средние – 10000–300000 му (667–20000 га), малые – менее 10000 му (667 га). Некоторые ОС имеют огромные размеры. Так, зона орошения Хэтао в среднем течении реки Хуанхэ – это одна из крупнейших ирригационных систем в Китае. Площадь орошения составляет: планируемая – 680 тыс. га, фактическая – 574 тыс. га. В 2021 г. суммарный объем водозабора оросительной зоны Хэтао составил 4,77 млрд м³.

Общая протяженность главного магистрального канала, подающего воду из реки Хуанхэ на ирригационную систему Хэтао, 188,6 км; от главного канала воду в зону орошения отводят 16 магистральных каналов. Расход воды на входе в главный канал составляет 565 м³/с, а в конце канала – 9 м³/с. При отдаче воды по трассе главного канала в отводящие магистральные каналы происходит ступенчатое снижение расхода по длине русла и соответственно уменьшается его поперечное сечение.

В зоне орошения Хэтао расположено семь водохранилищ среднего размера и девять небольших. В основном водохранилища предназначены для предотвращения наводнений. Из-за нестабильного количества воды их только частично используют в качестве источников сезонного орошения сельскохозяйственных угодий. Общая емкость водохранилищ среднего размера в зоне орошения на конец 2020 г. составляла 276,6 млн м³.

Зона орошения из водохранилища Сяохайцзы. Крупный ирригационный район Сяохайцзы расположен в пустыне Такла-Макан в нижнем течении бассейна реки Ерцян (Северо-Западный регион Китая). Сельское хозяйство в данном регионе является основной отраслью экономики и соответственно главным источником дохода населения. Этот район имеет теплый, умеренно континентальный, сухой ветреный климат с большим количеством света, скудными осадками, сильным испарением, а также с очень хрупкой экологической средой. Сельскохозяйственное производство здесь полностью зависит от орошения. Единственный регулируемый источник орошения – водохранилище Сяохайцзы емкостью 700 млн м³ и площадью водной поверхности 155 км² (рис. 1).



Рис. 1. Водохранилище Сяохайцзы для орошения земель в Северо-Западном регионе Китая

Fig. 1. Xiaohaizi Reservoir for land irrigation in the Northwest region of China

Водохранилище окружено пустынными холмами, в отдельных местах – со скудными лесополосами. В настоящее время в зоне мелиорации планируемая площадь орошения составляет 83,3 тыс. га, из которых 60 тыс. га приходится на пахотные земли.

В Китае также создано большое количество сравнительно небольших систем орошения с использованием в качестве источников водохранилищ многофункционального назначения среднего и малого размеров: для предотвращения наводнений, орошения, промышленного и сельскохозяйственного водоснабжения. Для примера приведем сведения о среднем водохранилище Меншань и малых водохранилищах в округе Чжанву.

Зона орошения из водохранилища Меншань. Водоохранилище Меншань (рис. 2) расположено в среднем течении реки Фаньян – притока первого порядка реки Сену (бассейн реки Хуанхэ), имеет площадь водосбора 288 км². Реализация проекта по орошению территории завершена в 1975 г. На системе имеется шесть магистральных каналов протяженностью 43,8 км, 31 распределительный канал протяженностью 93,3 км и многочисленные сооружения различных типов, основными из которых являются плотина, водосброс и водовыпуск для подачи воды потребителям. Водоохранилище общей емкостью 90,25 млн м³ обеспечивает площадь орошения 6453,3 га, на которую подается вода в объеме 5,1 млн м³.

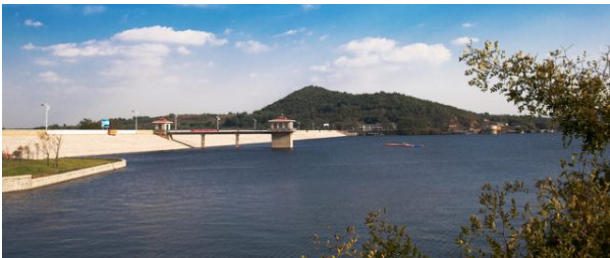


Рис. 2. Водоохранилище Меншань, Китай

Fig. 2. Mengshan Reservoir, China

Зона орошения из водохранилищ в округе Чжанву. В округе Чжанву орошение осуществляется из ряда малых водохранилищ. Орошаемая площадь 3593 га. Среднегодовое количество осадков в округе Чжанву 488 мм, распределение их по территории и во времени крайне неравномерно. Так, в самый влажный год (1998) максимальное количество осадков составило 909 мм, в сухой (1982) их минимальное количество было 183 мм.

Регулирование стока для создания водохранилищ комплексного использования

Для комплексного использования водохранилища рассчитывают баланс водных ресурсов бассейна реки, на которой оно создается, и суммарное водопотребление, в соответствии с которым определяют требуемый расход воды. Приток воды находят гидрологическим расчетом. По данным многолетнего ряда наблюдений за стоком реки строят кривую обеспеченности и на основании технико-экономических

показателей выбирают расчетную обеспеченность. Наиболее напряженными периодами по снабжению водой орошаемых земель являются в многолетнем разрезе маловодные годы, а в течение года – летняя межень. Поэтому гидрологические расчеты выполняют для многолетнего и внутригодового распределения стока. При расчете регулирования стока выбирается маловодный год с высокой обеспеченностью.

Кроме того, проверяется возможность осуществления в годы малой обеспеченности сброса максимальных паводковых расходов. В многоводные годы объем стока больше емкости водохранилища, поэтому часть стока сбрасывают через водосбросное сооружение. Уровень подъема воды в водохранилище над нормальным подпорным уровнем (НПУ) обычно принимается в пределах 0,5–1,0 м [4]. Размеры водосбросного сооружения определяют гидравлическим расчетом на пропуск расчетного максимального расхода 5%-й обеспеченности (нормальные условия эксплуатации) и проверяют на пропуск расхода 1%-й обеспеченности (чрезвычайные условия эксплуатации) [5].

Определение емкости водохранилища

Полный объем водохранилища $V_{\text{плн}}$ складывается из полезного (регулирующего) $V_{\text{плз}}$ и мертвого $V_{\text{мо}}$ объемов, из потерь воды на испарение $V_{\text{исп}}$ и фильтрацию $V_{\text{ф}}$ за расчетный период [6, 7]

$$V_{\text{плн}} = V_{\text{плз}} + V_{\text{мо}} + V_{\text{исп}} + V_{\text{ф}}. \quad (1)$$

Мертвый объем не участвует в регулировании стока, глубину и объем $V_{\text{мо}}$ назначают исходя из санитарно-технических требований (обычно глубину принимают не менее 2 м) и проверяют по условиям заиления (срок заиления порядка 50 лет), а также увязывают с требованиями рыбного хозяйства и судоходства. В отличие от полезного объема, значения $V_{\text{мо}}$ и его глубина в меньшей степени зависят от вида потребителей. При назначении величин из санитарно-технических требований во многих случаях соблюдаются и другие условия.

Более сложной задачей является определение полезного объема водохранилища многофункционального назначения, который со-

стоит из отдельных составляющих, рассчитываемых для каждого потребителя на основе гидрологического и технико-экономического обоснования. При определении полезного (регулирующего) объема водохранилища многофункционального назначения рассчитывают суммарные потребности в воде для различных целей (водоснабжение, орошение и др.). Для каждого потребителя назначается требуемая расчетная обеспеченность и используется соответствующая методика определения водопотребления. Так, объем воды, предназначенный для водоснабжения, определяют для года 95–97%-й обеспеченности, а для целей орошения – 75–80%-й обеспеченности в зонах умеренного и избыточного увлажнения (к этим зонам можно отнести Беларусь, восточные и юго-восточные регионы Китая) и 90–95%-й – в засушливых, пустынных и полупустынных регионах Китая, где недостаток воды в засушливые годы может привести к большим потерям урожая.

Более 70 % общего объема воды на техническое (промышленное) водоснабжение в Беларуси подается из водохранилищ. Часто создаются водохранилища комплексного назначения – для целей ирригации и промышленного водоснабжения. Рассмотрим методику расчета таких водохранилищ. Для подачи воды на орошение примем обеспеченность $p = 80\%$, а для промышленного водоснабжения $p = 95\%$. Следовательно, регулирование стока необходимо рассчитывать на две обеспеченности водопотребления. Особенностью такой задачи является то, что подача воды на орошение будет полностью обеспечена при $p \leq 80\%$. При $p > 80\%$ подача воды на орошение уменьшается и достигает максимального снижения для засушливого года обеспеченностью $p = 95\%$. Степень уменьшения подачи воды на орошение можно оценить по кривой зависимости модульных коэффициентов K_i от обеспеченности стока p_i , которую строят по данным многолетнего ряда наблюдений о средних значениях расходов воды, представленных в виде статистического ряда, размещая значения годовых расходов воды в убывающем порядке от наибольшего к наименьшему [8, 9]. По полученным данным p_i и K_i наносят точки эмпирической кривой (рис. 3).

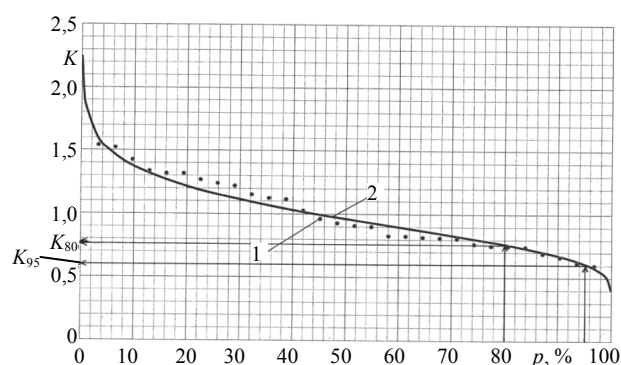


Рис. 3. Кривая связи модульных коэффициентов и обеспеченности годового стока:

1 – точки эмпирической кривой; 2 – аналитическая кривая

Fig. 3. Modular coefficients relationship curve and security of annual runoff:

1 – empirical curve points; 2 – analytical curve

При недостаточной продолжительности ряда наблюдений для определения значения расхода с обеспеченностью, выходящей за пределы экспериментальной кривой, используют теоретические (аналитические) кривые трехпараметрического гамма-распределения. Параметры аналитической кривой обеспеченности – коэффициенты вариации C_v и асимметрии C_s – находят с помощью метода наибольшего правдоподобия [6, 10]. Зная значение модульного коэффициента K_p , можно вычислить расход воды расчетной обеспеченностью $Q_p = K_p \bar{Q}$ (\bar{Q} – среднееголетний расход воды).

Степень снижения подачи воды на орошение при расчетной обеспеченности промышленного водоснабжения $p = 95\%$ можно оценить отношением модульных коэффициентов K_{95}/K_{80} , которое для речных бассейнов Беларуси близко к 0,8. Аналогично определяется снижение подачи и в другие годы в диапазоне обеспеченностей $p = 80–95\%$. На рис. 3 показаны значения K_{95} и K_{80} .

Потребность в воде для целей орошения

Полезный объем воды, предназначенной для подачи на орошение, должен обеспечить требуемую оросительную способность (необходимую площадь орошения при расчетном режиме орошения сельскохозяйственных культур), а также мощность оросительной системы (потребность в оросительной воде в критические периоды вегетации растений) [1, 2]. При этом рассчитывают суммарное количество

воды, которое может дать источник (за месяц (декаду), оросительный период, год), и его колебания во времени.

Объем воды $V_{ор}$, необходимый для орошения, рассчитывают по формуле [1, 2]

$$V_{ор} = \frac{M_{ср} F}{\eta}, \quad (2)$$

где $M_{ср}$ – средневзвешенная оросительная норма брутто, м³/га; F – площадь орошения нетто, га; η – КПД оросительной системы,

$$\eta = \frac{W_{п}}{W_{в}}, \quad (3)$$

$W_{п}$ – объем воды, поступившей на поля ОС; $W_{в}$ – то же, забранной в ОС из водоисточника.

Для расчета средневзвешенной оросительной нормы $M_{ср}$ предварительно определяется оросительная норма M_i для каждой культуры, занимающей заданную площадь F_i [1, 11]:

$$M_i = E - P - \Delta W - Q_{к.п}, \quad (4)$$

где E – максимальная эвапотранспирация (водопотребление культуры при оптимальном водном режиме) за весь период вегетации; P – атмосферные осадки за этот же период за вычетом потерь на сток; ΔW – используемые запасы влаги в расчетном слое почвы: $\Delta W = W_{н} - W_{ни}$; $W_{н}$ – влагозапасы в расчетном слое почвы на начало вегетации; $W_{ни}$ – нижний предел заданного увлажнения почвы на день биологической спелости; $Q_{к.п}$ – капиллярная подпитка корнеобитаемого слоя от грунтовых вод.

Тогда

$$M_{ср} = \frac{\sum M_i F_i}{\sum F_i}. \quad (5)$$

Следует отметить, что потребности воды на орошение тесно связаны с метеорологическими характеристиками. В более влажные годы эти потребности уменьшаются, а в засушливые – значительно увеличиваются. В то же время некоторые потребители воды не зависят от показателя влажности в году. Так, потребности воды на техническое водоснабжение опре-

деляются главным образом технологией производства.

Потребности в воде на промышленное водоснабжение состоят из хозяйственно-бытового водопотребления рабочими и потребления воды на технологические нужды [12]. Дополнительно предусматривается запас воды на пожаротушение. Водоснабжение является практически постоянным по годам и может приниматься равномерным в течение года.

Суммарные необходимые для потребителей расходы и объемы воды определяют для каждого месяца маловодного года и всего года. Используя внутригодовое распределение стока для данного речного бассейна, находят приток воды в каждом месяце. Сопоставление величины притока с суммарными потребностями в воде показывает возможность обеспечения их водными ресурсами.

Если суммарные потребности U меньше стока расчетного маловодного года $W_{год.95}$, то регулирование стока обеспечивают созданием водохранилища сезонного регулирования, при $U > W_{год.95}$ применяют многолетнее регулирование. При многолетнем регулировании объем водохранилища увеличивают на сумму дефицитов стока в маловодные годы.

Чтобы определить, при каких отметках водного зеркала водохранилище будет заполнено необходимым объемом воды, на основании топографической характеристики речной долины, представляющей зависимость площади горизонталей Ω от уровня H , строят морфометрические характеристики водохранилища: кривую площадей водной поверхности $\Omega = f(H)$ и кривую объемов водохранилища $V = f(H)$ [7, 8, 13].

Полезный объем водохранилища без учета потерь определяют на основе балансовых расчетов таблично-цифровым способом: сопоставляют помесечно сток и отдачу и вычисляют избытки и дефициты [6, 13]. Объем воды, представляющий наибольшую сумму дефицитов, является полезным объемом водохранилища $V_{плз}$.

Расчет объема наносов, поступающих в водохранилище

Среднемноголетний объем наносов V_n реки, на которой создано водохранилище, представ-

ляет сумму объемов взвешенных $V_{взв}$ и влекомых (донных) наносов $V_{вл}$: $V_n = V_{взв} + V_{вл}$ [6, 7, 13]. Среднегодовой расход взвешенных наносов R_n определяют по формуле [6, 7]

$$R_n = S \bar{Q}_{год}, \quad (6)$$

где S – среднесуточная мутность воды, $кг/м^3$; $\bar{Q}_{год}$ – среднесуточный расход воды, $м^3/с$.

Транзитная часть взвешенных наносов, выносимых в нижний бьеф, принимается в среднем $\delta = 0,20-0,30$, соответственно $(1 - \delta)$ – та часть наносов, которая отложится в водохранилище.

Принимая нормативный срок службы водохранилища $t_{сл}$ (обычно 50 лет), можно определить отложившийся в водохранилище за этот срок объем взвешенных наносов

$$V_{взв} = 31,54 S \bar{Q}_{год} t_{сл} \frac{1 - \delta}{\rho_{взв}}, \quad (7)$$

где 31,54 – продолжительность года, млн с; $\rho_{взв}$ – плотность взвешенных наносов, в среднем 1000–1500 $кг/м^3$.

Для определения мутности воды S существуют надежные способы и приборы, поэтому можно с достаточной степенью точности по (6) рассчитать расход взвешенных наносов. Более сложная задача – определение расхода влекомых (донных) наносов, которые зависят от физико-механических характеристик грунта, слагающего дно русла реки, и соотношения фактической и неразмывающей скоростей течения воды в русле [14, 15]. Надежных способов и приборов определения расхода влекомых наносов не имеется. В практических расчетах используют эмпирические и полуэмпирические зависимости, полученные на основе обобщения опытных данных [16, 17]. Исходя из их анализа, авторы статьи для определения расхода влекомых наносов предлагают следующую методику.

Вначале определяется стадия движения донных наносов в русле с помощью полученной ранее формулы для различных стадий движения наносов [15]

$$v_{доп} = a \left(\frac{R}{d} \right)^x \sqrt{\frac{n_y}{\rho_b} P_s}, \quad (8)$$

где $v_{доп}$ – допускаемая средняя скорость потока, $м/с$; a, x – коэффициент и показатель степени соответственно, принимается в зависимости от стадии движения наносов: $a = 2,06, x = 0,167$ – для начала влечения отдельных зерен грунта; $a = 3,18, x = 0,14$ – для начала образования гряд; $a = 5,96, x = 0,10$ – для начала взвешивания грунта; d – расчетный диаметр грунта, $м$, в однородных грунтах (коэффициент неоднородности $\eta = d_{85}/d_{10} \leq 4$) принимается равным среднему диаметру, т. е. $d = d_{50}$, в неоднородных ($\eta > 4$) $d = d_{85}$ – диаметр крупной фракции, образующей естественную отмостку; n_y – коэффициент условий работы, который при мутности потока $S < 0,1$ $кг/м^3$ принимается $n_y = 1$, а при $S \geq 0,1$ $кг/м^3$ $n_y = 1 + 2S$; P_s – показатель прочности (размывоустойчивости) грунта, Па, определяется по формуле

$$P_s = \gamma_1 df + c_p = g \rho_1 df + c_p; \quad (9)$$

c_p – удельное структурное сцепление грунта, Па; g – ускорение силы тяжести, $м/с^2$; f – коэффициент внутреннего трения грунта в воде; γ_1, ρ_1 – соответственно удельный вес, $Н/м^3$, и плотность, $кг/м^3$, грунта, взвешенного водой,

$$\rho_1 = (\rho_s - \rho_b)(1 - n_s); \quad (10)$$

ρ_s, ρ_b – плотность частиц грунта и воды, $кг/м^3$; n_s – пористость грунта, доли ед.

Скорость, которая соответствует стадии начала влечения грунта на дне, называют допускаемой неразмывающей $v_{н.доп}$. Формула для ее определения с учетом приведенных значений a и x имеет вид

$$v_{н.доп} = 2,06 \left(\frac{R}{d} \right)^{0,167} \sqrt{\frac{n_y}{\rho_b} P_s}. \quad (11)$$

Далее проводится сравнение фактической скорости течения воды v и допускаемой $v_{доп}$ по (8), принимая значения $a = 3,18, x = 0,14$ – для стадии грядообразования. Если окажется, что $v < v_{доп}$, то в русле гряды отсутствуют

и передвижение по дну наносов происходит путем перекачивания, скольжения и сальтации за счет скорости $(v - v_{н.доп})$. В этом случае расход влекомых наносов $q_{вл}$, кг/(с·м), небольшой (порядка 2–5 % от взвешенных) и может быть определен по формуле И. И. Леви (приведена в [16]). То есть расход наносов на единицу ширины русла

$$q_{вл} = 2,0 \left(\frac{v}{\sqrt{gd}} \right)^3 d (v - v_{н.доп}) \left(\frac{d}{h} \right)^{0,25}, \quad (12)$$

где d – средний диаметр частиц грунта, м; h – глубина потока, м; $v_{н.доп}$ – допускаемая неразмывающая скорость, определяемая по (11), м/с.

Расход влекомых наносов для всего русла будет определяться произведением $q_{вл}B$ (где B – ширина русла, соответствующая среднемноголетнему годовому расходу $\bar{Q}_{год}$).

Если $v > v_{доп}$ ($v_{доп}$ – для стадии грядообразования), то в русле образуются гряды и расход влекомых наносов можно определять исходя из скорости их движения C_r . Значения C_r можно рассчитывать по формуле Г. В. Железнякова и В. К. Дебольского (приведена в [16]) или Б. Ф. Снисченко и З. Д. Копалиани (приведена в [17]) соответственно:

$$C_r = 0,001 \sqrt{gh} \left(\frac{v}{v_{н.доп}} \frac{h}{h_r} \sqrt{\frac{u}{v_{н.доп}}} \right)^2; \quad (13)$$

$$C_r = 0,032 (v - v_{н.доп}) \left(\frac{v}{v_{н.доп}} \right) \left(\frac{d}{h_r} \right)^{0,7}, \quad (14)$$

где u – гидравлическая крупность наносов, м/с; h_r – высота гряд, м.

Элементарный расход донных наносов на единицу ширины русла $q_{вл}$, перемещаемых в виде гряд, с учетом коэффициента полноты профиля гряды, равного 0,6, определяется по формуле

$$q_{вл} = 0,6 C_r h_r. \quad (15)$$

Высоту гряд в [17] рекомендуется принимать $h_r = 0,25h$ при глубине потока $h < 1$ м и $h_r = 0,20 + 0,1h$ при $h \geq 1$ м.

Если $v > v_{доп}$ ($v_{доп}$ – для стадии начала взвешивания грунта, для которой $a = 5,96$,

$x = 0,10$), то в русле формируются большие гряды и могут наблюдаться другие макроформы; скорость потока может в 1,6–1,8 раза и более превышать $v_{н.доп}$. В этом случае имеют место интенсивное влечение грунта и начало его взвешивания. При этом скорость смещения гряд в меньшей степени зависит от допускаемой неразмывающей скорости, а является главным образом функцией скорости потока v и числа Фруда Fr . Для такой стадии на основании обобщения натуральных и лабораторных опытов в [17] получена зависимость

$$C_r = 0,019 v Fr^{2,9}, \quad (16)$$

$$\text{где } Fr = \frac{v}{\sqrt{gh}}.$$

Соответственно элементарный расход донных наносов

$$q_{вл} = 0,011 h_r \frac{v^{3,9}}{(gh)^{1,45}}. \quad (17)$$

Отношение массы влекомых наносов к массе взвешенных наносов β при таком режиме руслового процесса увеличивается и для равнинных рек Беларуси достигает $\beta = 0,10–0,15$.

Объем влекомых наносов, поступающих в водохранилище в течение срока его службы:

$$V_{вл} = 31,54 q_{вл} B t_{сл} / \rho_{вл}, \quad (18)$$

где $\rho_{вл}$ – плотность влекомых (донных) наносов, в среднем $\rho_{вл} = 1500–1600$ кг/м³.

Помимо взвешенных и влекомых наносов, поступающих в водохранилище с речным потоком, в водоем дополнительно поступают наносы за счет разрушения берегов, а также склоновой и ветровой эрозии. Как показывают натурные наблюдения, это количество наносов можно учесть с помощью коэффициента $\varphi = 1,10–1,20$ [6], на который умножают суммарный объем взвешенных и влекомых наносов ($V_{взв} + V_{вл}$). Тогда объем V_n заиливания водохранилища за период его эксплуатации с учетом (7) и (18) можно выразить формулой

$$V_n = 31,54 t_{сл} \left(S \bar{Q}_{год} \frac{1-\delta}{\rho_{взв}} + \frac{q_{вл} B}{\rho_{вл}} \right) \varphi. \quad (19)$$

В течение срока службы водохранилища наносами заполняется большая часть мертвого

объема $V_{\text{мо}}$, но при этом обеспечивается необходимая подача воды потребителям из регулирующей емкости. Из условия заиления водохранилища принимают $V_{\text{мо}} \geq V_{\text{н}}$. Исходя из санитарно-технических требований, необходимый мертвый объем водохранилища (с учетом опыта эксплуатации водоемов в Беларуси) принимается $V_{\text{мо}} \geq 0,25V_{\text{плз}}$ [6, 13]. Окончательно за объем $V_{\text{мо}}$ берут большее значение, рассчитанное согласно указанным условиям и требованиям.

Располагая данными о полезном объеме водохранилища, рассчитанном без учета потерь воды, и принятом мертвом объеме, определяют потери на испарение с водной поверхности и фильтрацию [6, 13] и полезный объем водохранилища с учетом потерь балансовым таблично-цифровым способом, описанным выше, с тем отличием, что находят значения избытков и дефицитов воды, суммируя помесечное потребление (отдачу) воды и потери. Диспетчерский график работы водохранилища строится по данным таблично-цифрового расчета, на котором отмечаются зоны использования объемов воды для водоснабжения и орошения.

ВЫВОДЫ

1. В качестве источников воды на орошение земель в Китае и Беларуси наиболее широкое распространение получили водохранилища, которые чаще всего имеют многофункциональное назначение для целей промышленного и сельскохозяйственного водоснабжения, орошения, гидроэнергетики, предотвращения наводнений.

2. При определении суммарных потребностей в воде для каждого потребителя назначается требуемая расчетная обеспеченность и используется соответствующая методика определения водопотребления. Так, объем воды для целей водоснабжения следует рассчитывать на сток 95–97%-й обеспеченности, а для орошения – 75–80%-й обеспеченности в зонах умеренного и избыточного увлажнения, в которых находится Беларусь, восточные и юго-восточные регионы Китая, и 90–95%-й обеспеченности – в засушливых, пустынных и полупустынных регионах Китая, где недостаток воды в засушливые годы может привести к большим

потерям урожая. Приведена формула для определения средневзвешенной оросительной нормы и объема воды, необходимого для орошения.

3. Представлена методика расчета регулирования стока на две обеспеченности для определения полезного объема водохранилища, создаваемого для целей промышленного водоснабжения и орошения.

4. Предложены методика определения расхода донных наносов, учитывающая стадии их движения, и формула для расчета суммарного объема заиления водохранилища взвешенными и донными наносами.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лихацевич, А. П. Сельскохозяйственные мелиорации / А. П. Лихацевич, М. Г. Голченко, Г. И. Михайлов; под ред. А. П. Лихацевича. Минск: ИВЦ Минфина, 2010. 464 с.
2. Мелиорация и водное хозяйство: справочник в 8 т. / под ред. Б. Б. Шумакова. М.: Агропромиздат, 1990. Т. 6: Орошение. 415 с.
3. Гидрологический мониторинг Республики Беларусь / под общ. ред. А. И. Полищука, Г. С. Чекана. Минск: Книгосбор, 2009. 268 с.
4. Богославчик, П. М. Проектирование и расчеты гидротехнических сооружений / П. М. Богославчик, Г. Г. Круглов. Минск: Вышэйш. шк., 2018. 366 с.
5. Мелиоративные системы и сооружения. Нормы проектирования: ТКП 45-3.04-8–2005 (02250). Введ. 01.07.2006. Минск: Минстройархитектуры, 2006. 130 с.
6. Михневич, Э. И. Гидрология / Э. И. Михневич. Минск: БНТУ, 2021. 151 с.
7. Железняков, Г. В. Гидрология, гидрометрия и регулирование стока / Г. В. Железняков, Т. А. Неговская, Е. Е. Овчаров; под ред. Г. В. Железнякова. М.: Колос, 1984. 205 с.
8. Парахневич, В. Т. Гидравлика, гидрология, гидрометрия водотоков / В. Т. Парахневич. Минск: Новое знание; М.: ИНФРА-М, 2016. 368 с.
9. Расчетные гидрологические характеристики. Порядок определения: ТКП 45-3.04-168–2009 (02250). Введ. 01.07.2010. Минск: Минстройархитектуры, 2010. 64 с.
10. Определение расчетных гидрологических характеристик: ПИ-98 к СНиП 2.01.14–83. Минск: Минстройархитектуры, 1998. 174 с.
11. Оросительные системы. Правила проектирования: ТКП 45-3.04-178–2009 (02250). Введ. 01.07.2010. Минск: Минстройархитектуры, 2010. 76 с.
12. Михневич, Э. И. Водопроводные сети / Э. И. Михневич, С. В. Андреев. Минск: ИВЦ Минфина, 2021. 256 с.
13. Михневич, Э. И. Расчет водохранилища сезонного регулирования / Э. И. Михневич. Минск: БНТУ, 2021. 55 с.

14. Копалиани, З. Д. Проблема предельных условий для начала движения донных частиц в водных потоках / З. Д. Копалиани, О. А. Петровская // Водные пути и русловые процессы. Гидротехнические сооружения водных путей: сб. науч. тр. / под ред. Г. Л. Гладкова, К. П. Моргунова. СПб.: ГУМРФ им. адмирала С. О. Макарова, 2019. Вып. 4. С. 80–122.
15. Михневич, Э. И. Открытые водотоки: пропускная способность и устойчивость / Э. И. Михневич. Минск: БНТУ, 2021. 311 с.
16. Барышников, Н. Б. Динамика русловых потоков / Н. Б. Барышников. Изд. 2-е, перераб. и доп. СПб.: РГГМУ, 2016. 342 с.
17. Кондратьев, Н. Е. Основы гидроморфологической теории руслового процесса / Н. Е. Кондратьев, И. В. Попов, Б. Ф. Смищенко. Л.: Гидрометеиздат, 1982. 271 с.
8. Parakhnevich V. T. (2016) *Hydraulics, Hydrology, Hydrometry of Watercourses*. Minsk, Novoye Znanie Publ.; Moscow, INFRA-M Publ. 368 (in Russian).
9. ТКР [Technical Code of Common Practice] 45-3.04-168–2009 (02250). *Estimated Hydrological Characteristics*. Minsk, Publishing House of Ministry of Architecture and Construction, 2010. 64 (in Russian).
10. П1-98 for SNiP [Construction Standards and Regulations] 2.01.14–83. *Determination of Calculated Hydrological Characteristics*. Minsk: Publishing House of Ministry of Architecture and Construction, 1998. 174 (in Russian).
11. ТКР [Technical Code of Common Practice] 45-3.04-178–2009 (02250). *Irrigation Systems. Design Rules*. Minsk, Publishing House of Ministry of Architecture and Construction, 2010. 76 (in Russian).
12. Mikhnevich E. I., Andreyuk S. V. (2021) *Water Networks*. Minsk, Publishing House of Information and Computing Center of Ministry of Finance, 2021. 256 (in Russian).
13. Mikhnevich E. I. (2021) *Calculation of the Reservoir of Seasonal Regulation*. Minsk, Belarusian National Technical University. 55 (in Russian).
14. Kopaliani Z. D., Petrovskaya O. A. (2019) Problem of Limiting Conditions for the Beginning of the Movement of Bottom Particles in Water Flows. *Vodnye Puti i Ruslovye Protsessy. Gidrotekhnicheskie Sooruzheniya Vodnykh Putei: Sb. Nauch. Tr.* [Waterways and Riverbed Processes. Hydraulic Structures of Waterways: Collection of Research Papers]. Saint-Petersburg, Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, Iss. 4, 80–122 (in Russian).
15. Mikhnevich E. I. (2021) *Open Watercourses: Carrying Capacity and Sustainability*. Minsk, Belarusian National Technical University. 311 (in Russian).
16. Baryshnikov N. B. (2016) *Channel Flow Dynamics*. 2nd ed. Saint-Petersburg, Russian Hydrometeorological University. 342 (in Russian).
17. Kondratiev N. E., Popov I. V., Snishchenko B. F. (1982) *Fundamentals of the Hydromorphological Theory of the Channel Process*. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ. 271 (in Russian).

Поступила 11.08.2022
Подписана в печать 18.10.2022
Опубликована онлайн 30.11.2022

REFERENCES

Received: 11.08.2022
Accepted: 18.10.2022
Published online: 30.11.2022