

УДК 502/504:627.8

С.Е. БЕДНАРУК, Н.А. ДИЛЬМАН, Е.М. КЛЕНОВ, В.В. ЧУКАНОВ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева»; Информационно-аналитический центр регистра и кадастра, г. Москва

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НОМОГРАММ ДИНАМИЧЕСКИХ ОБЪЕМОВ В ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ ВОЛЖСКО-КАМСКОГО КАСКАДА ВОДОХРАНИЛИЩ

Приведена информация о разработанной имитационной модели функционирования водохранилищ Волжско-Камского каскада, учитывающей динамику движения водных масс. Указанная модель предназначена для получения более детальных результатов расчетов по сравнению с программным комплексом VOLPOW, который используется на протяжении последних 25 лет при планировании режимов работы крупнейших в России каскадов водохранилищ. Принцип действия модели основан на решении уравнения водного баланса на отдельных участках водохранилищ, для расчета уровней и расходов воды на границах участков используются номограммы динамических объемов. В настоящее время имитационная модель реализована в виде компьютерной программы, созданной на алгоритмическом языке FORTRAN. В дальнейшем планируется её интеграция с программным комплексом VOLPOW. В статье приведены результаты тестовых расчетов ежедневных уровней воды в Ивановском и Угличском водохранилищах. Выполнено сравнение расчетных уровней воды по длине водохранилищ с фактическими уровнями, а также с уровнями воды, рассчитанными с помощью «строгой» гидродинамической модели, основанной на решении системы уравнений Сен-Венана. По всем показателям качества моделирования разработанная имитационная модель оказалась не хуже, чем «строгая» гидродинамическая модель, а по некоторым показателям, например, быстродействию, существенно её превзошла. Модель может быть использована для выполнения водохозяйственных, водноэнергетических и гидравлических расчетов при оперативном планировании режимов работы гидроузлов водохранилищ и их каскадов, а также при разработке правил использования водохранилищ. Высокое быстродействие и устойчивость созданной модели позволяют использовать её для решения различных оптимизационных задач, например, обратной задачи расчета притока воды в водохранилище по известным сбросным расходам и уровням воды на водпостах.

Номограммы динамических объемов, водохранилище, Волжско-Камский каскад водохранилищ, имитационная модель, гидродинамическая модель, водохозяйственные расчеты, водноэнергетические расчеты, режимы работы водохранилищ.

Введение. На протяжении 25 последних лет для планирования режимов работы Волжско-Камского каскада водохранилищ используется программный комплекс VOLPOW, который представляет собой универсальную имитационную модель функционирования каскадов водохранилищ и водохозяйственных систем. Модель основана на решении уравнения водного баланса, для учета динамика движения воды в водохранилище используются характеристики $z_{cp} = f(Q_{сбр.}, z_{с.б.})$, где $z_{с.б.}$ – уровень воды у плотины; $Q_{сбр.}$ – сброс через гидроузел; z_{cp} – средневзвешенный уровень воды в водохранилище.

Такой подход позволяет успешно решать многие водохозяйственные задачи, в том числе такие сложные, как планирование ежегодного специального весеннего по-

пуска в низовья р. Волги. Однако существует ряд проблем, решение которых с помощью имеющейся модели сопряжено с определенными сложностями. Например, для оперативных водохозяйственных и водноэнергетических расчетов используется полезный приток в водохранилища каскада, рассчитанный по балансу по среднему уровню водохранилища, который часто имеет существенную невязку относительно притока, рассчитанного подразделениями Росгидромета по стоку впадающих в водохранилище рек. Указанная невязка может достигать весьма существенных величин как по отдельным водохранилищам (до $\pm 30\%$ расхода бокового притока), так и по каскаду в целом (до $\pm 20\%$ расхода суммарного притока). Например, в период маловодного половодья 2015 г. невязка суммарного притока воды в водохра-

нилица каскада по отдельным пентадам достигала величин от +1500 до -6200 м³/с, а по одному Чебоксарскому водохранилищу – от +300 до -1200 м³/с. В целом за период половодья 2015 г. в объеме невязка составила -12 км³, или -10% объема стока весеннего половодья (второй квартал). Естественно, что указанные величины невязок не могут быть обоснованы физически и противоречат здравому смыслу. Поскольку достоверно неизвестно, что является источником невязки (ошибки в определении среднего уровня, притока или сброса через гидроузлы), то при оперативном ведении режимов работы гидроузлов каскада приходится корректировать расходы притока и сбросов, так, чтобы расчетный режим работы гидроузлов в максимально возможной степени соответствовал фактическим показателям.

Эту задачу можно решать более корректно, если иметь модель, позволяющую рассчитывать уровни воды в заданных створах по длине водохранилища, и подбирать расходы притока к каждому из участков, заключенному между створами. Для этой цели может быть использована гидродинамическая модель с распределенными параметрами, реализующая численное решение системы уравнений Сен-Венана. Такие мо-

дели обладают высокой детализацией результатов расчетов в части уровней и расходов воды по длине водохранилища. Однако их разработка достаточно трудозатратна и требует большого объема морфометрической и гидравлической информации. Кроме того, существующие программные комплексы, например, MIKE11 и HEC-RAS, не позволяют задавать режим работы водохранилища в виде диспетчерского графика и рассчитывать энергетические показатели работы ГЭС. Недостаточное быстродействие этих программ даже на современных персональных ЭВМ ограничивает возможность их использования в оптимизационных процедурах.

Альтернативой моделям с распределенными параметрами является имитационная модель, где водохранилище разбивается на несколько участков. Границы участков проходят в створах, в которых требуется рассчитать уровень или расход воды. Для каждого участка строится номограмма динамических объемов, под которой понимается семейство кривых, связывающих объем воды на участке водохранилища с расходом и уровнем воды в замыкающем створе $W=f(Q, z)$. Пример такой номограммы показан на рисунке 1.

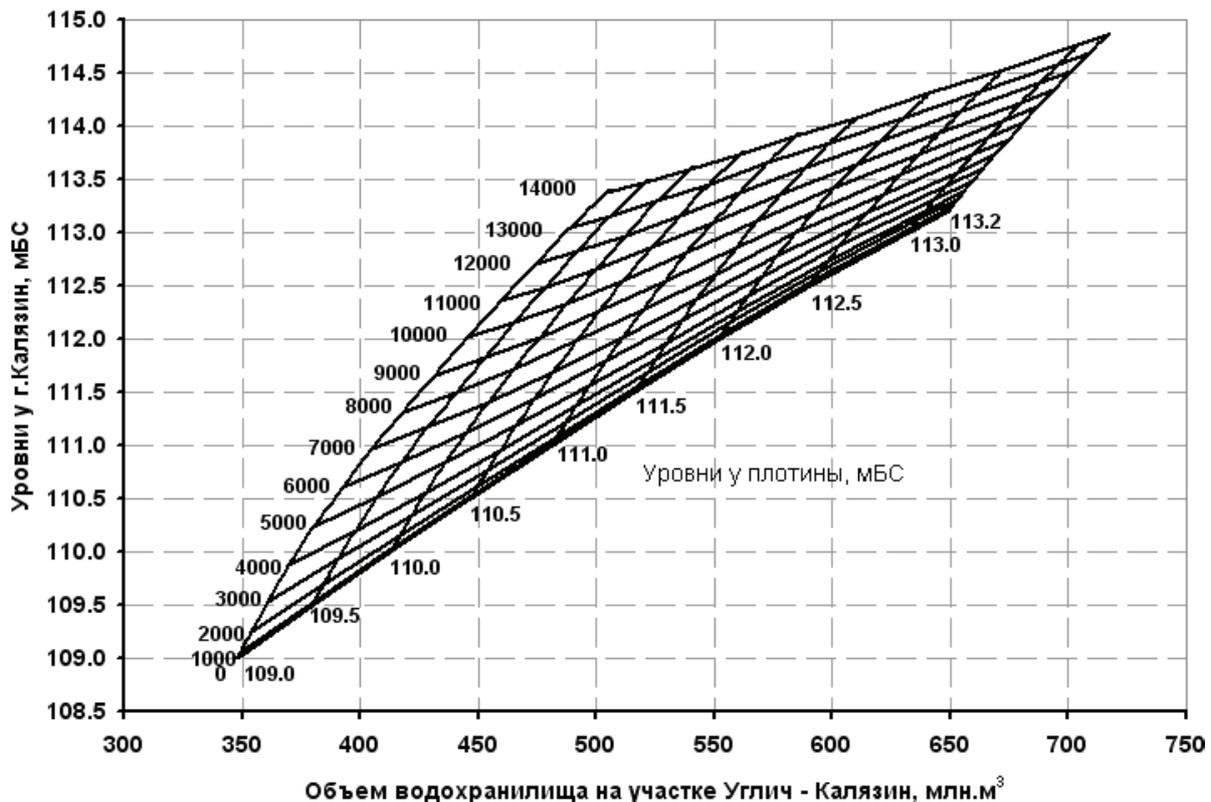


Рис. 1. Номограмма динамических объемов Угличского водохранилища на участке г. Углич – г. Калязин

Материалы и методы. В 2015 г. Информационно-аналитическим центром регистра и кадастра ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева в рамках работ по созданию информационной системы «Диспетчерский центр» для нужд ПАО «РусГидро» была начата модернизация гидравлического блока программного комплекса VOLPOW для возможности выполнения водохозяйственных и водноэнергетических расчетов на основе номограмм динамических объемов. Далее дается краткое описание принципов работы модернизированного программного обеспечения (далее – модель) и результатов его тестирования.

Использование кривых $W = f(Q, z)$ в виде, представленном на рисунке 1, потребу-

ет применения специальных интерполяционных процедур, что, очевидно, существенно сократит быстродействие модели. Многомерное представление кривых затрудняет их корректировку при калибровке модели. Для увеличения быстродействия модели и упрощения её калибровки номограммы вида $W = f(Q, z)$ преобразуются в кривую статических объемов воды на участке $W = f(z)$ и серию кривых связи между расходом воды и превышением уровня воды во входном створе $Dz' = f(Q')$ и падения в замыкающем створе $Dz'' = f(Q'')$ относительно среднего уровня на участке при $W = const$. Пример такой серии кривых для участка Иваньковского водохранилища от устья р. Шоши до плотины представлен на рисунке 2.

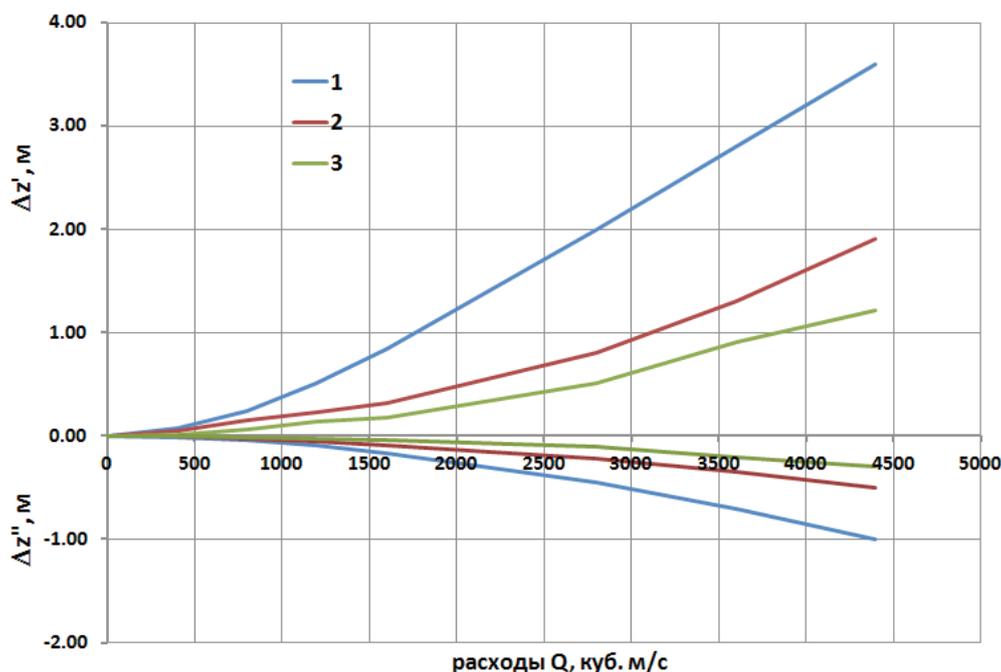


Рис. 2. Кривые превышения Dz' и падения Dz'' уровня воды относительно среднего уровня на участке Иваньковского водохранилища от устья р. Шоши до плотины для объемов воды на участке: 1-300 млн м³, 2-400 млн м³, 3-600 млн м³

В основе алгоритма лежит решение уравнения водного баланса для каждого из участков, на которые разбито водохранилище, при условии, что на границах участков (в узлах модели) сумма притекающих расходов должна быть равна сумме вытекающих расходов.

Верхними граничными условиям являются гидрографы притока на верхней границе первого участка $Q'_i(t)$ сосредоточенного бокового притока в i -й узел $Q'_i(t)$, распределенного бокового притока к i -му участку $Q^{бок}_i(t)$. В качестве нижнего граничного

условия может использоваться кривая расходов $Q = f(z)$ или диспетчерский график работы гидроузла $Q = f(z, t)$. На всех границах участков должны быть заданы начальные уровни (объемы) и расходы воды.

Расход воды в нижнем сечении i -го участка в j -й интервал времени Q''_{ij} рассчитывается по уравнению водного баланса:

$$Q''_{ij} = Q'_{ij} + Q^{бок}_{ij} \pm DW/Dt \pm SDQ_{ij} \quad (1)$$

где $Q^{бок}_{ij}$ – боковой приток на участке; $DW = W^k_{ij} - W^n_{ij}$ – изменение объема на участке за интервал регулирования Dt ; SDQ_{ij} – сумма потерь воды.

Зная расходы в верхнем Q'_{ij} и нижнем Q''_{ij} створе участка, по кривым $Dz' = f(Q')$ и $Dz'' = f(Q'')$ рассчитываются превышение и падение уровня воды относительно среднего уровня на участке. Уровни воды на верхней z'_{ij} и нижней z''_{ij} границе участка рассчитываются по формулам:

$$z'_{ij} = z^{cp}_{ij} + Dz'_{ij}, \quad (2)$$

$$z''_{ij} = z^{cp}_{ij} - Dz''_{ij}, \quad (3)$$

где z^{cp}_{ij} – средний уровень воды на участке, вычисленный по статической кривой объемов $W = f(z)$ и известному конечному объему воды на участке; Dz'_{ij} – превышение уровня воды на верхней границе относительно среднего; Dz''_{ij} – падение уровня воды на нижней границе относительного среднего.

Для обеспечения равенства уровней воды на соседних границах участков и выполнения баланса расходов в узлах модели разработан оригинальный итерационный алгоритм, основанный на двойной прогонке.

Результаты и обсуждение. Описанная модель реализована в виде компьютерной программы, созданной на алгоритмическом языке FORTRAN. С целью её дальнейшей интеграции с программным комплексом VOLPOW основной расчетный модуль выполнен в виде статической библиотеки.

В настоящее время разработаны и откалиброваны модели 10 водохранилищ Волж-

ско-Камского каскада (Иваньковского, Угличского, Горьковского, Чебоксарского, Куйбышевского, Саратовского, Волгоградского, Камского, Воткинского, Нижнекамского).

Номограммы динамических объемов Иваньковского, Угличского Камского, Воткинского и Нижнекамского водохранилищ разрабатывались с использованием гидродинамической модели в соответствии с предложенной ранее методикой [1]. Также методика построения номограмм динамических объемов имеется в известной монографии [2]. Для остальных водохранилищ использовались номограммы, разработанные генеральными проектировщиками.

Тестирование моделей и калибровка их параметров осуществлялись для периодов весеннего половодья и осенних паводков. Для водохранилищ на р. Волге были выполнены расчеты по данным 2005, 2009, 2012 и 2013 гг. Камские водохранилища калибровались по данным 2002, 2007, 2015 гг.

На рисунке 3 показаны результаты верификационного расчета для Иваньковского, выполненного за период апрель-май 2009 г. На рисунке 3 даны результаты расчета для Угличского водохранилища за тот же период. Там же показаны расчетные уровни воды, полученные с помощью гидродинамической модели, разработанной в программе НЕС-RAS Корпуса военных инженеров Армии США.

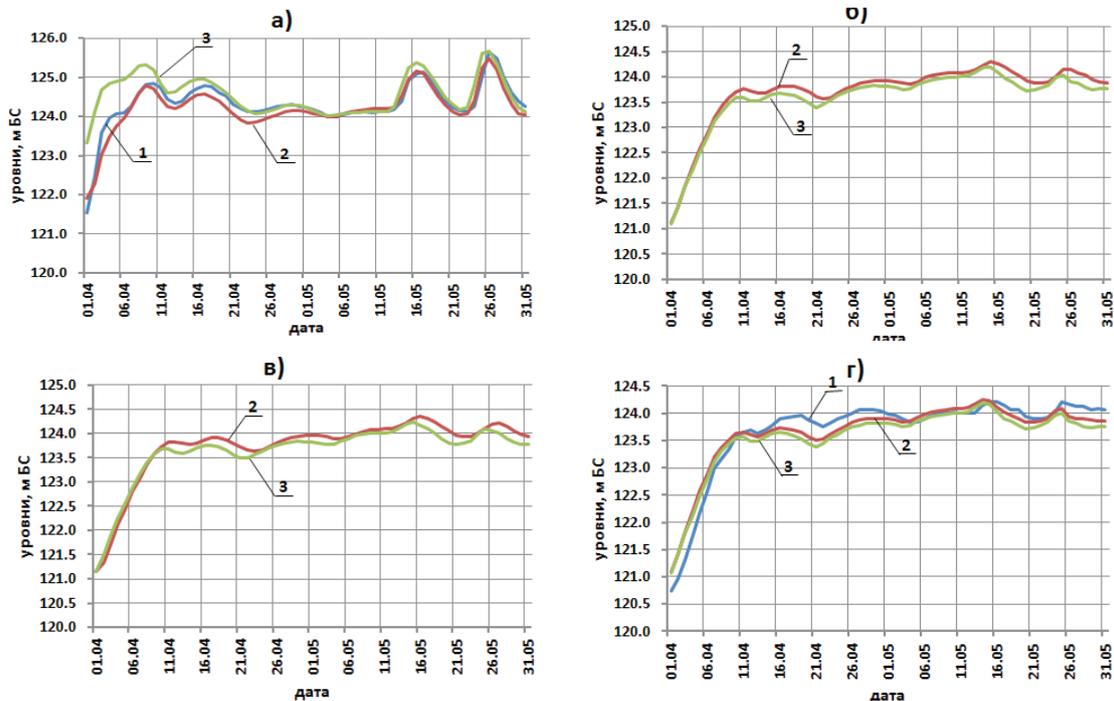


Рис. 3. Уровни воды в Иваньковском водохранилище в апреле-мае 2009 года: 1 – фактические; 2 – рассчитанные на имитационной модели; 3 – рассчитанные в НЕС-RAS, в створах: а) – г. Тверь, б) – г. Конаково, в) – с. Безбородово, г) Иваньковской ГЭС, в.б.

Граничные условия для обеих моделей были приняты одинаковыми. Приток воды в Ивановское и боковой приток Угличское водохранилище задавался из условия равенства его объема полезному притоку, рассчитанному по уравнению водного баланса.

На нижних границах моделей задавались соответствующие фактические сбросы.

На рисунках 3 и 4 видим, что расчетные уровни воды, полученные как на гидродинамической модели, так и на имитационной модели, очень хорошо совпадают с измеренными.

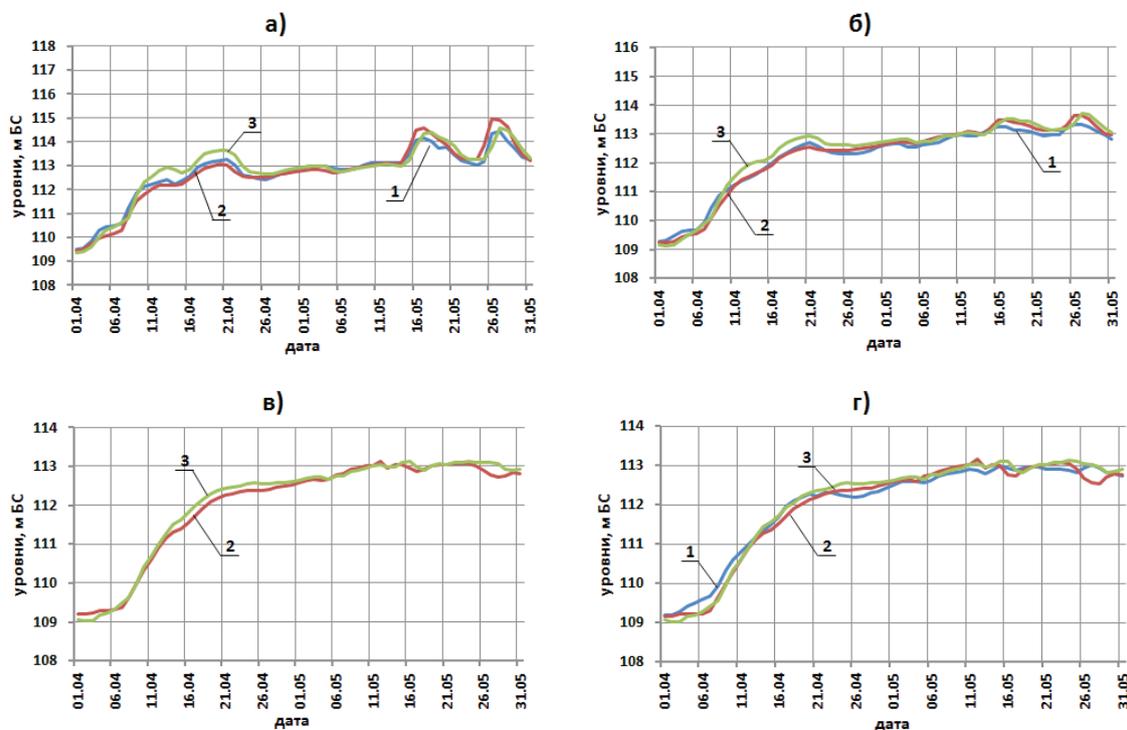


Рис. 4. Уровни воды в Угличском водохранилище в апреле-мае 2009 года: 1 – фактические, 2 – рассчитанные на имитационной модели, 3 – рассчитанные в HEC-RAS, в створах: а) – Ивановская ГЭС, н.б., б) г. Кимры, в) г. Калязин, г) Угличская ГЭС, в.б.

Значения формальных критериев, характеризующих качество разработанной модели, критерия Нэша-Сатклиффа (R^{N-S}), коэффициента детерминации (R^2) и среднего абсолютного отклонения ($D\bar{y}$), приведены в таблице. Анализ критериев показывает, что только в нижнем бьефе Ивановского гидроузла (Дубна (н.б.)) гидродинамическая

модель имеет однозначно лучшие величины R^{N-S} и R^2 . В остальных створах критерии R^{N-S} и R^2 выше для расчетов, выполненных с помощью имитационной модели. Среднее абсолютное отклонение, которое имеет большее практическое значение, чем критерии R^{N-S} и R^2 , по модулю во всех створах меньше для имитационных расчетов.

Таблица
Показатели качества расчета уровней воды в створах Ивановского и Угличского водохранилищ

Показатель	Ивановское вдхр.		Угличское вдхр.		
	Тверь	Дубна (в.б.)	Дубна (н.б.)	Кимры	Углич
Расчет, выполненный на имитационной модели					
R^{N-S} , о.е.	0,882	0,947	0,873	0,973	0,981
R^2 , о.е.	0,960	0,985	0,943	0,990	0,994
$D\bar{y}$, м	0,11	0,05	-0,15	-0,07	0,01
Расчет, выполненный на гидродинамической модели					
R^{N-S} , о.е.	0,392	0,869	0,944	0,952	0,976
R^2 , о.е.	0,741	0,977	0,984	0,992	0,996
$D\bar{y}$, м	-0,23	0,18	-0,18	-0,16	-0,04

Выводы

1. Разработана и реализована в виде компьютерной программы имитационная модель функционирования водохранилища, позволяющая рассчитывать уровни воды в створах, расположенных по длине водохранилища, с помощью номограмм динамических объемов. Созданная модель по быстродействию и точности расчетов не уступает гидродинамической модели водохранилища, разработанной в программном комплексе HEC-RAS. В настоящее время модель адаптирована (подобраны параметры и разработаны рекомендации по порядку задания граничных условий) для 10 водохранилищ Волжско-Камского каскада (Иваньковского, Угличского, Горьковского, Чебоксарского, Куйбышевского, Саратовского, Волгоградского, Камского, Воткинского, Нижнекамского).

2. Модель может быть использована для выполнения водохозяйственных, водноэнергетических и гидравлических расчетов при оперативном планировании режимов работы гидроузлов водохранилищ и их каскадов, а также при разработке правил использования водохранилищ. Более детальный учет динамики водных масс по сравнению с моделью, используемой для указанных целей в настоящее время, позволит повысить качество таких расчетов.

3. Высокое быстродействие и устойчивость созданной модели позволяют использовать её для решения различных оптимизационных задач, например, обратной задачи расчета притока воды в водохранилище по известным сбросным расходам и уровням воды на водпостах.

Библиографический список

1. Дильман Н.А., Мاستрюкова А.В., Беднарк С.Е., Чуканов В.В. Построение номограмм динамического объема с использованием гидродинамического моделирования на примере Угличского водохранилища // Природообустройство. – 2015. – № 2. – С. 69-73.

2. Асарин А.Е., Бестужева К.Н. Водноэнергетические расчеты. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 224 с.

Материал поступил в редакцию 04.09.2016 г.

Сведения об авторах

Беднарк Сергей Евстафьевич, начальник Информационно-аналитического центра регистра и кадастра; Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева»; 127550, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49; тел.: 8(495)651-95-8; e-mail: sebed@vodinfo.ru

Чуканов Виталий Викторович, кандидат технических наук, заместитель начальника Информационно-аналитического центра регистра и кадастра; Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева»; 127550, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49; тел.: 8(495) 651-95-98; e-mail: 4yk@vodinfo.ru

Дильман Наталья Александровна, главный инженер проекта, Информационно-аналитический центр регистра и кадастра; Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева»; 127550, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49; тел.: 8(495) 651-95-97.

Кленов Евгений Михайлович, инженер-исследователь, Информационно-аналитический центр регистра и кадастра; Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева»; 127550, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49; тел.: 8(495) 651-95-98.

S.E. BADNARUK, N.A. DILJMAN, E.M. KLENOV, V.V. CHUKANOV

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

USAGE OF NOMOGRAMS OF DYNAMIC VOLUMES IN THE SIMULATION MODEL OF THE VOLGA-KAMA CASCADE OF WATER RESERVOIRS

There is given information of the innovation model of reservoirs functioning of the Volga-Kama cascade taking into consideration dynamics of water masses movement. The indicated model is tended for receiving more detailed results of calculations in comparison with the software

complex VOLPOW which is used during last 25 years when planning regimes of operation of the largest reservoirs cascades in Russia. The principle of the model operation is based on the decision of the equation of water balance on separate parts of reservoirs, nomograms of dynamic volumes are used for calculation of levels and water consumption on the borders of parts. At present the simulation model is realized in the way of a computer program created on the algorithmic language FORTRAN. In future its integration is planned with a software complex VOLPOW. The article gives the results of test calculations of annual levels of water in Ivanjkovsky and Uglichesky reservoirs. Comparison of calculated water levels is fulfilled on the length of reservoirs with factual levels as well as with the water levels calculated by means of «strict» hydrodynamic model based on the decision of the Saint-Venant equation system. According to all indicators of simulation quality the developed model appeared to be not worse than «strict» hydrodynamic model, and on some indices, for example, speed performance, significantly excelled it. The model can be used for fulfillment of water economic, water energetic and hydraulic calculations at operative planning of operation regimes the of reservoir hydraulic units and their cascades, as well as when developing rules of reservoirs usage. High speed performance and stability of the created model allow using it for solving various optimized problems, for example, an inverse problem of water inflow calculation in the reservoir according to the known discharge consumptions and water levels on water posts.

Nomograms of dynamic volumes, water reservoir, Volga-Kama cascade, simulation model, hydrodynamic model, water economic calculations, water energetic calculations, regimes of reservoir operation.

Reference

1. Diljman N.A., Mastryukova A.V., Bednaruk S.E., Chukanov V.V. Postroenie nomogram dinamicheskogo objema s ispolzovaniem gidrodinamicheskogo modelirovaniya na primere Uglichsckogo vodohranilishcha // Prirodobustrojstvo. – 2015. – № 2. – S. 69-73.
2. Asarin A.E., Bestuzheva K.N. Vodoenergeticheskie raschety. – M.: Energoatomizdat, 1986. – 224 s.

The material was received at the editorial office
04.09.2016

Information about the authors

Bednaruk Cergej Evstafjevich, head of the Information-analytical center of register and cadaster; FSBEI HE «Russian state agrarian university – MAA named after C.A. Timiryazev» 127550, Moscow, ul. Timiryazevskaya, 49, tel.: +7 (495) 651-95-98; e-mail: sebed@vodinfo.ru

Chukanov Vitalij Victorovich, candidate of technical sciences, deputy head of the Information-analytical center of register and cadaster; FSBEI HE «Russian state agrarian university – MAA named after C.A. Timiryazev» 127550, Moscow, ul. Timiryazevskaya, 49, tel.: +7 (495) 651-95-98; e-mail: 4yk@vodinfo.ru

Diljman Natalya Alexandrovna, chief engineer of the project. Information-analytical center of register and cadaster; FSBEI HE «Russian state agrarian university – MAA named after C.A. Timiryazev» 127550, Moscow, ul. Timiryazevskaya, 49, tel.: +7 (495) 651-95-97;

Klenov Yevgenij Mikhailovich, engineer-researcher, Information-analytical center of register and cadaster; FSBEI HE «Russian state agrarian university – MAA named after C.A. Timiryazev» 127550, Moscow, ul. Timiryazevskaya, 49, tel.: +7 (495) 651-95-98.