

Г.Х. ИСМАЙЛОВ, А.В. ПЕРМИНОВ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева», г. Москва, Российская Федерация

М.А. СМЕРНОВА

Филиал АО «Институт Гидропроект» – «Научно-исследовательский институт энергетических сооружений»,
г. Москва, Российская Федерация

ПРИМЕНЕНИЕ МОДЕЛИ «IMIT-BALANS» ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ВЕРХНЕВОЛЖСКОГО КАСКАДА ВОДОХРАНИЛИЩ

Объект исследований включает: Ивановский, Угличский, Рыбинский, Горьковский и Чебоксарский гидроузлы с водохранилищами. Рассматривается задача нахождения рациональных режимов работы каскада водохранилищ, входящих в состав Верхневолжской водохозяйственной системы, в условиях изменяющихся природно-хозяйственных, экологических и экономических процессов. Для решения этих вопросов предложена имитационная модель «IMIT-BALANS», использующая принципы алгоритма максимального потока. Сделаны анализ и оценка режимов наполнения и сработки водохранилищ гидроузлов. С целью проведения машинно-имитационного эксперимента сформированы и исследованы следующие варианты различной водности: режим работы в условиях высокой водности с обеспеченностью $P=(1-20\%)$, в условиях умеренно высокой водности $P=(20-40\%)$; в условиях средней водности $P=(40-60\%)$, в условиях умеренно низкой водности $P=(60-80\%)$, в условиях низкой водности $P=(80-95\%)$, в условиях аномально низкой водности $P=(95-99\%)$. Исследования показали, что модельный комплекс позволит наиболее полно удовлетворить в годы различной обеспеченности требования основных водопотребителей бассейна реки с учетом особенностей формирования стока в районе Верхней Волги, что будет способствовать улучшению социально-экологических и судоходных условий рассматриваемого бассейна.

Водохранилище, имитационное моделирование, каскад водохранилищ, водность, водопотребители и водопользователи, режим наполнения, холостой сброс.

Введение. Проблема нахождения предпочтительных вариантов функционирования каскадов водохранилищ комплексного назначения заключается в том, что практически невозможно заблаговременно дать точный прогноз притока речных вод к гидроузлам на весь период его регулирования, что обусловлено стохастичностью и неопределенностью протекающих в природной среде процессов. Нельзя также не обратить внимание на тот факт, что в связи со сложившимися в последние десятилетия новыми общественно-политическими и социально-экономическими условиями различные субъекты РФ начинают предъявлять новые требования к объему, качеству и режиму природных вод.

В связи с этим на сегодняшний день весьма актуальной задачей водохозяйственной

научной проблематики становится совершенствование методов управления сложными водохозяйственными системами (ВХС), а также возникает необходимость исследования новых режимов совместного функционирования водохранилищ с целью создания основы для повышения эффективности водопользования с наименьшими потерями для окружающей природной среды.

В настоящей работе такая задача решается при помощи модельного комплекса «IMIT-BALANS» на примере каскада водохранилищ многоцелевого назначения, расположенных на Верхней Волге, дается анализ и оценка режимов наполнения и сработки водохранилищ гидроузлов.

Постановка задачи в общем виде. Система гидроузлов на Верхней Волге имеет

важное значение для экономики России: она обеспечивает устойчивую работу энергосистемы европейской части страны, водоснабжение городов и целых регионов, в том числе г. Москвы, промышленных объектов, используется для осуществления обводнительных попусков и удовлетворения требований природных комплексов.

Объект исследований включает: Ивановский, Угличский, Рыбинский, Горьковский и Чебоксарский гидроузлы с водохранилищами. У каждого гидроузла имеется группа (m) водопотребителей, которые предъявляют свои требования к количеству и качеству используемых водных ресурсов. Период регулирования поделен на несколько (n) равных и неравных интервалов времени (Δt). В настоящей работе водохозяйственный год разделен на 18 отрезков времени (n), т.е. декады и месяцы: период половодья – разбит на 9 декад, период межени – на 9 месяцев. Каждый исследуемый водохозяйственный год увязывается со следующим годом регулирования. С учетом малого объема водопотребления и необходимости бесперебойной подачи воды промышленности и населению, их интересы удовлетворяются полностью, и поэтому эти требования вводятся в модель в форме ограничений.

Таким образом, в соответствии с перечисленными условиями требуется найти наиболее рациональные (субоптимальные) варианты сработки и наполнения водохранилищ с ГЭС Верхневолжской ВХС.

Методы решения поставленной задачи. В математической записи поставленная задача формулируется следующим образом: необходимо минимизировать функционал

$$\Phi(\vec{V}, \vec{U}, t) = \min \max \left| \frac{\sum_{t=1}^{t=T} \vec{U}_t - \vec{U}_{opt}}{\vec{U}_{opt}} \right| \quad (1)$$

при выполнении условий:

$$\vec{V} = A\vec{W} + B\vec{U} \quad (2)$$

$$\underline{\vec{V}} \leq \vec{V} \leq \overline{\vec{V}} \quad (3)$$

$$\vec{U} \geq 0 \quad (4)$$

при $t = 0$, $\vec{V} = \vec{V}_0$, где \vec{V} – вектор наполнения (объем водохранилища); $\underline{\vec{V}}, \overline{\vec{V}}$ – соответственно нижнее и верхнее ограничение объема водохранилища; \vec{U} – вектор попусков из водохранилищ; \vec{U}_t – вектор комплексных попусков в момент времени t , включающий в себя требования всех потребителей нижнего бьефа, в том числе и русла реки; \vec{U}_{opt} – оптимальное значение попусков всех потребителей нижнего бьефа; \vec{W} – вектор притока к водохранилищам; t – текущее время; A и B – матрицы системных условий.

В такой постановке решение задачи управления режимами каскада водохранилищ в единой ВХС требует применения методов стохастического программирования. Учитывая это, для нахождения рациональных режимов функционирования системы водохранилищ с учетом неполноты исходной информации была построена имитационная модель. Отсюда задача управления объемами водных ресурсов каскада сводится к многокритериальной задаче принятия решений. Поскольку строгое решение такого рода задач, в основном по причине большой размерности, отсутствует, при моделировании применяется принцип «справедливых уступок» [1], согласно которому в первую очередь максимально удовлетворяются требования основных водопользователей, но не более, чем это необходимо для их нормальной работы, одновременно контролируется состояние менее приоритетных групп водопотребителей. В случае, если их обеспеченность водными ресурсами становится ниже некоторого технологического минимума (при отсутствии резерва ресурсов в системе), производится их «подтягивание» до этого минимума путем ограничения более приоритетных потребителей, но не более чем на 20-30% от суммарного водопотребления в данный период времени. В случае, если обеспеченность водными ресурсами менее приоритетных потребителей достигает уровня технологического минимума или превышает его, проводится проверка возможности повышения ее до частного оптимума.

Результаты исследований. Для информационного обеспечения имитационной модели были использованы результаты, полученные путем оценки многолетней изменчивости притока речных вод к водохранилищам гидроузлов на Верхней Волге [2, 3]. При анализе разностной интегральной кривой было установлено, что в хронологическом изменении стока рассматриваемого участка р. Волги отмечается последовательная смена периодов различной водности. Сделан вывод, что при определении субоптимальных режимов функционирования рассматриваемого каскада водохранилищ следует учитывать возможность появления не только отдельных крайне маловодных и многоводных лет, но и групп лет с низкой и повышенной приточностью. Учитывая сказанное, представляется наиболее рациональным применять в имитационных экспериментах в качестве модельного годового

стока и его внутригодового распределения фактический приток к гидроузлам системы.

С целью проведения машинно-имитационного эксперимента сформированы и исследованы следующие варианты различной водности: режим работы в условиях высокой водности с обеспеченностью $P = (1-20\%)$, в условиях умеренно высокой водности $P = (20-40\%)$; в условиях средней водности $P = (40-60\%)$, в условиях умеренно низкой

водности $P = (60-80\%)$, в условиях низкой водности $P = (80-95\%)$, в условиях аномально низкой водности $P = (95-99\%)$ (табл.).

Поскольку наибольший интерес для нас представляют годы с низким стоком, т.е. маловодные, для них было исследовано больше вариантов, включающих не только отдельные годы и двухлетки, но и трехлетки, когда велика вероятность затяжного маловодья.

Таблица

Варианты для проведения экспериментов для лет различной водности

Высокая водность $P = (1-20\%)$	Умеренно высокая водность $P = (20-40\%)$	Средняя водность $P = (40-60\%)$	Умеренно низкая водность $P = (60-80\%)$	Низкая водность $P = (80-95\%)$	Аномально низкая водность $P = (95-99\%)$
1955 г. ($P = 8\%$)	1929 г. ($P = 34\%$)	1970 г. ($P = 44\%$)	1948 г. ($P = 78\%$)	1920 г. ($P = 83\%$)	1937 г. ($P = 98\%$)
1952 г. ($P = 11\%$)	1985 г. ($P = 22\%$)	1941 г. ($P = 51\%$)	1950 г. ($P = 74\%$)	1963 г. ($P = 87\%$)	1937 г. ($P = 98\%$)
1953 г. ($P = 13\%$)	1986 г. ($P = 29\%$)	1942 г. ($P = 56\%$)	1951 г. ($P = 75\%$)	1964 г. ($P = 91\%$)	1938 г. ($P = 95\%$)
-	-	-	1965 г. ($P = 71\%$)	1971 г. ($P = 82\%$)	1938 г. ($P = 95\%$)
-	-	-	1968 г. ($P = 64\%$)	1972 г. ($P = 94\%$)	1939 г. ($P = 96\%$)
-	-	-	1969 г. ($P = 67\%$)	1973 г. ($P = 92\%$)	1940 г. ($P = 90\%$)

Величина суммарной регулирующей емкостиИваньковского, Угличского, Рыбинского, Горьковского и Чебоксарского водохранилищ составляет: полная 41,2 км³, полезная – 22,1 км³.Полезная емкость каскада водохранилищ позволяет осуществлять точное, недельное и сезонное регулирование стока, за исключением Рыбинского, которое выполняет многолетнее регулирование.

Основной задачей каскада водохранилищ на Верхней Волге в период половодья является накопление водных ресурсов с целью их использования в меженный период, а также участие системы водохранилищ в формировании дополнительных весенних попусков в НБ Волжской ГЭС для обводнения нерестилищ и сельскохозяйственных угодий.В период летне-осеннеймежени главная функция Верхневолжского каскада гидроузлов заключается в использовании водных ресурсов в интересах судоходствапутем обеспечения гарантированных судоходных глубин в нижних бьефах ГЭС, а также в поддержании в нижних бьефах таких отметок, которые обеспечивали бы нормальную (бесперебойную) работу водозаборных сооружений и подачу санитарных и экологическихпопусковниже по течению реки.

Далее приведены некоторые результаты анализа режима работы Верхневолжского каскада гидроузлов, состоящего из пяти водохранилищ, с использованием модельного комплекса «IMIT-BALANS».

Для анализа результатов моделирования в период *низкой водности* были выбраны маловодные годы: двухлетка 1963/64-1964/65 гг. и трехлетка – 1971/72-1973/74 гг. В эти годы, как видно из рисунка, в весенний период наполнение Иваньковского водохранилища начинается с первой-второй декады апреля (от отметки предполоводнойсработки 119,5 м) до регламентируемой отметки НПУ (124,0 м) на конец первой декады апреля или мая (в зависимости от водности года). Уровень НПУ поддерживается до конца мая – августа. Начиная с этого момента водохранилище начинает свою сработку вплоть до установления к 1 апреля отметок 119,5-122,0 м в соответствии с обеспеченностью половодьяследующего года. Согласно действующим ПИВР максимальная загрузка агрегатов Иваньковской ГЭС приходится на период половодья: наполнение водохранилища должно производиться избыточной частью весеннего притока над полной пропускной

способностью ГЭС. Максимальная пропускная способность ГЭС при нормальном подпорном уровне, полной загрузке агрегатов и отсутствии холостых сбросов составляет для Ивановского гидроузла 300 м³/с. Как показал эксперимент, наибольшие объемы попусков в НБ осуществляются в период

весеннего половодья, максимальный сброс в Угличское водохранилище составил 1470 м³/с в год 90%-й обеспеченности, в период летне-осенней межени в отдельные годы попуски снижаются до 15 м³/с, а затем в зимние месяцы и в период предполоводной сработки увеличиваются до 225 м³/с.

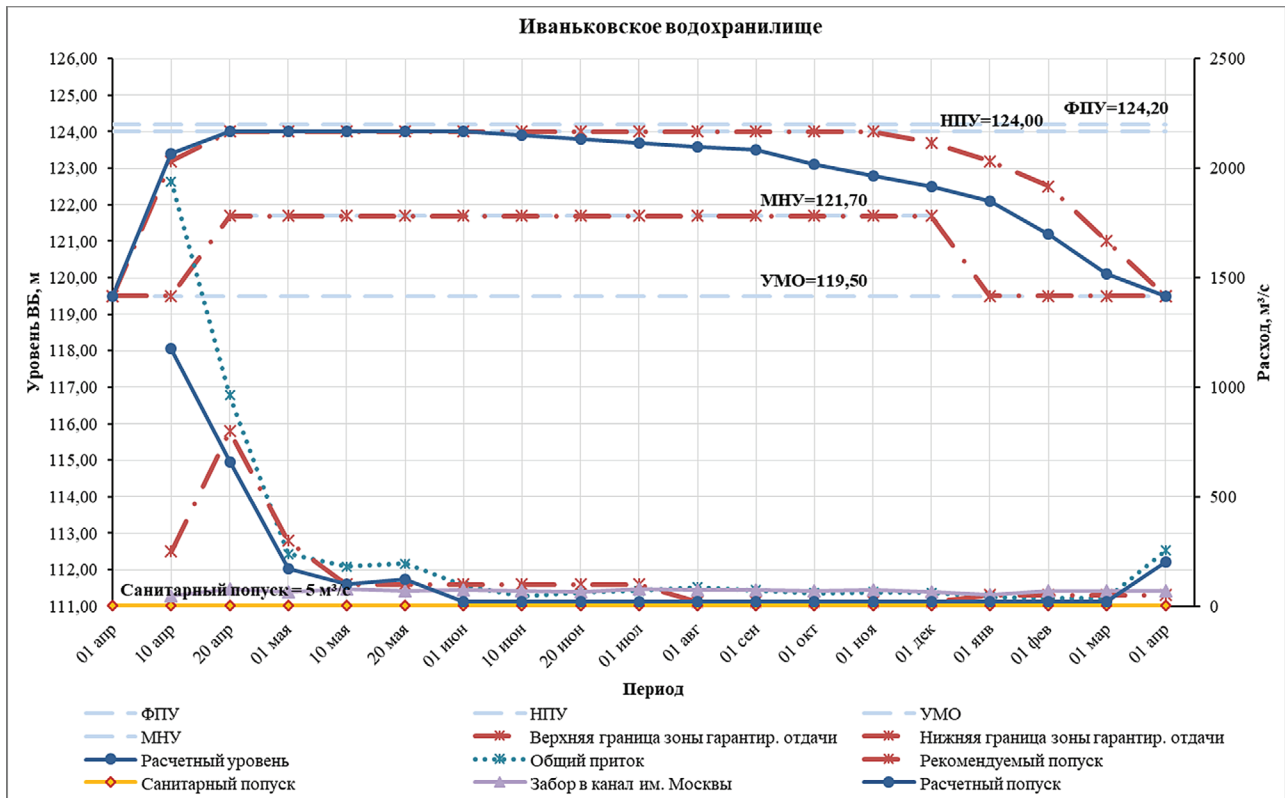


Рис. Результаты имитационного эксперимента в период низкой водности, 1920/21 гг. ($p_{\text{год Волги}} : 83\%$ / $p_{\text{год Верх. Волги}} : 93\%$)

На водохранилище Угличского гидроузла во время половодья отметка НПУ = 113,0 м устанавливается уже ко второй декаде апреля или к 1 декаде мая и с небольшими колебаниями поддерживается вплоть до уровня предполоводной сработки (УПС). К 1 апреля следующего водохозяйственного года уровень верхнего бьефа достигает отметки УПС = 109,0 м. Так же, как и на Ивановском гидроузле, самые высокие среднесуточные расходы подавались в НБ во время половодья, максимальный из них составил 2000 м³/с, что не превышает суммарную пропускную способность гидротурбин Угличской ГЭС. Характер попусков в период межени можно оценить так: наблюдается снижение попусков до 30 м³/с и во время предполоводной сработки емкости водохранилища сбросной расход составляет 300-600 м³/с.

Весеннее наполнение водохранилища Рыбинской ГЭС происходит в апреле-мае, без

достижения форсированного подпорного уровня максимальная отметка наполнения ниже НПУ равна 101,6 м. К наступлению летне-осенней межени водохранилище начинает постепенно срабатываться и уже к началу зимнего периода достигает отметок 100,1-99,3 м. Уровень предполоводной сработки не противоречит ПИВР и составляет при прогнозе маловодного половодья 98,21-98,81 м (в зависимости от режимных зон отдачи). До достижения максимальной отметки уровня ВБ сбросы в НБ назначались минимальными и составляли от 200 до 500 м³/с в зависимости от водности половодья. В течение лета-осени сбросы увеличиваются, а к предполоводной сработке достигают максимума, который составляет 750-1250 м³/с.

Режим работы Горьковского водохранилища в период низкой водности можно описать следующим образом: наполнение во время весеннего половодья аналогично,

как и на Рыбинском водохранилище, происходит в апреле-мае, затем устанавливается отметка НПУ, которая поддерживается в течение всего половодья, а в отдельные годы и до конца летне-осеннего периода, и к концу летней межени – началу декабря начинает снижаться до МНУ = 83,6 м. К 31 марта отметка верхнего бьефа равна 82,0 м, что позволяет подготовить водохранилище к наступлению следующего половодья. Сработки водохранилища ниже МНУ не зафиксировано. Расходы в нижнем бьефе Нижегородской ГЭС составили: в межнавигационный период 640-1100 м³/с, в период навигации – в диапазоне 900-1100 м³/с в зависимости от установившегося уровня воды в Рыбинском водохранилище. Рекомендации ПИВР не нарушались.

В годы с аномально низкой водностью в период судоходства уровни на водохранилищах каскада поддерживались в пределах призмы навигационной сработки, однако, в год с 98%-ной обеспеченностью на Рыбинском водохранилище с августа и до второй декады ноября потребуется сработка ниже МНУ в ВБ (99,10-98,20 м) с целью обеспечения судоходных попусков ниже г. Городца, что составит 640 м³/с. Максимальные сбросы в НБ гидроэлектростанций в период половодья составили: на Ивановском гидроузле – 1665 м³/с, на Угличском – 3142 м³/с, на Рыбинском – 620 м³/с, на Горьковском – 2275 м³/с, на Чебоксарском – 6480 м³/с.

Минимальные среднемесячные расходы в НБ гидроузлов каскада в межень не были ниже допустимых санитарных и минимальных попусков в НБ в межнавигационный период и составили: на Ивановском водохранилище – 12 м³/с, на Угличском – 30 м³/с, на Рыбинском – 400 м³/с, на Горьковском – 630 м³/с, на Чебоксарском – 970 м³/с.

Стоит отметить, что во все исследуемые годы различной водности водопотребление промышленных и коммунальных предприятий, а также водоснабжение канала им. Москвы обеспечиваются полностью без перебоев.

Выводы

На сегодняшний день при решении задач рационального использования водных ресурсов речного бассейна требуется учитывать не только интересы основных участников ВХС, но также необходим учет как нестационарности гидрометеорологических, гидрологических и экономических

процессов, так и сформировавшейся в стране новой общественно-политической ситуации.

В настоящей работе при исследовании новых режимов сработки и наполнения водохранилищ, работающих в каскаде, предлагается использование модельного комплекса «ИМТ-BALANC» с применением принципа «справедливых уступок», который, как показал анализ результатов моделирования, позволяет в годы различной водности наиболее полно удовлетворить требования основных водопользователей бассейна реки с учетом особенностей формирования водных ресурсов в данном районе, тем самым способствуя улучшению социально-экологических и судоходных условий в бассейне реки. В свою очередь, это позволит обеспечить достоверной информацией лиц, принимающих решения при назначении режимов регулирования стока Верхневолжского каскада водохранилищ.

Библиографический список

1. Теория прогнозирования и принятия решений. Под ред. С.А. Саркисяна. – М.: Высшая школа, 1977. – 351 с.
2. Смирнова М.А., Перминов А.В. Имитационное моделирование системы водохранилищ на примере Верхней Волги. / Проблемы управления водными и земельными ресурсами. Мат-лы Международного научного форума. В 3-х ч. Ч. 1. – М.: Изд-во РГАУ-МСХА, 2015. – 482 с.
3. Смирнова М.А. Оценка изменения гидрологических характеристик бассейна Верхней Волги при современном климате. / Проблемы комплексного обустройства техноприродных систем. Мат-лы международной научно-практической конференции ч. V. Мониторинг водных объектов. – М.: МГУП, 2013. – С. 218-225.

Материал поступил в редакцию 24.02.2019 г.

Сведения об авторах

Исмайлов Габил Худушоглы, доктор технических наук, профессор кафедры гидрологии, гидрогеологии и регулирования стока; ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева; 127550, Москва, ул. Прянишникова, д. 19, e-mail: gabil-1937@mail.ru

Смирнова Марина Александровна, ведущий специалист отдела исследований ГТС Аналитического центра; филиал АО «Институт Гидропроект» – «НИИЭС»; 125362, Москва, Строительный проезд, д. 7А, к. 29, e-mail: smirnova.ma-smirnova@ya.ru

Перминов Алексей Васильевич, кандидат технических наук, доцент кафедры гидрологии, гидрогеологии и регулирования стока;

ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева; 127550, Москва, ул. Прянишникова, д. 19, e-mail: alexperminov@gmail.com

G.H. ISMAILOV, A.V. PERMINOV

Federal state budget educational institution of higher education «Russian Timiryazev State Agrarian University», Moscow, Russian Federation

M.A. SMIRNOVA,

Branch of JSC «Institute Hydroproject» – «Research Institute of Energy Constructions», Moscow, Russian Federation

APPLICATION OF THE MODEL «IMIT-BALANS» FOR DETERMINING THE OPERATION MODES OF THE RESERVOIRS CASCADE ON THE UPPER VOLGA

The object of research includes: Ivanjkovsky, Uglichesky, Rybinsky, Gorjkovsky and Cheboxarsky hydraulic units with reservoirs. There is considered a task of finding rational modes of a cascade of reservoirs operation belonging to the Verkhnevolzhskaya water economy system under the conditions of changing natural-economic, ecological and economic processes. With the purpose of fulfillment of the machine-simulation experiment there were formed and investigated the following variants of different water content: regime of operation under the condition of high water content with $P = (1-20\%)$, under the conditions of moderately high water content $P = (20-40\%)$; under the conditions of middle water content $P = (40-60\%)$; under the conditions of moderately low water content $P = (60-80\%)$; under the conditions of low water content $P = (80-95\%)$; under the conditions of low water content $P = (95-99\%)$. To solve these problems the simulation model «IMIT-BALANS» was proposed using the principles of the maximum flow algorithm. There is given an analysis and assessment of filling and emptying modes of reservoirs of hydraulic units. The investigations showed that the model complex makes it possible to mostly fully meet the demands in the years of different water availability of the main water consumers of the river basin taking into account peculiarities of flow formation in the region of the Upper Volga which will contribute to the improvement of the socials, ecological and navigation conditions of the basin in question.

Reservoir, simulation modeling, cascade of reservoirs, water content, water consumers and water users, filling mode, emptying.

References

1. Teoriya prognozirovaniya i prinyatiya reshenij. Pod red. S.A. Sarkisyana. – M.: Vysshaya shkola, 1977. – 351 s.
2. **Smirnova M.A., Perminov A.V.** Imitatsionnoe modelirovanie sistemy vodohranilishch na primere Verhnej Volgi. Problemy upravleniya vodnymi i zemelnymi resursami. Mat-ly Mezhdunarodnogo nauchnogo foruma. V 3-h ch. Ch. 1. – M.: Izd. – vo RGAU-MSHA, 2015. – 482 s.
3. **Smirnova M.A.** Otsenka izmeneniya gidrologicheskikh harakteristik basseina Verhnej Volgi pri sovremennom climate. / Problemy kompleksnogo obustrojstva tehnoprirodnih system: Mat-ly mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferentsii ch. V. Monitoring vodnyh objektov. – M.: MGUP, 2013. – S. 218-225.

Information about the authors

Ismaylov Gabil Khudush, doctor of technical sciences, professor of the department of hydrology, hydrogeology and flow regulation; FSBEI HE RGAU-MSHA named after C.A. Timiryazev; 127550, Moscow, ul. Pryanishnikova, d. 19, e-mail: gabil-1937@mail.ru

Smirnova Marina Alexandrovna, leading specialist of GTS structures research of the Analytical center; AO «Institute Hydroproject» – «NIIES»; 125362, Moscow, Stroitelny proezd, d. 7A, k.29, e-mail: smirnova.ma-smirnova@ya.ru

Perminov Alexej Vasiljevich, candidate of technical sciences, associate professor of the department of hydrology, hydrogeology and flow regulation; FSBEI HE RGAU-MSHA named after C.A. Timiryazev; 127550, Moscow, ul. Pryanishnikova, d. 19, e-mail: alexperminov@gmail.com

The material was received at the editorial office
24.02.19 g.