

УДК 502/504:626:627.8

В.И. ВОЛКОВ, В.Л. СНЕЖКО

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

СТАТИСТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ СООРУЖЕНИЙ НИЗКОНАПОРНЫХ ГИДРОУЗЛОВ

Рассмотрены проблемы, связанные с техническим состоянием и уровнем безопасности гидротехнических сооружений (ГТС) низконапорных гидроузлов. Для гидротехнических сооружений IV класса характерно отсутствие службы эксплуатации и низкий уровень технического состояния. Авторами разработана методика разового экспертного обследования сооружений. Материалом исследований стали выборочные данные разового экспертного обследования 823 низконапорных гидроузлов Московской области. В соответствии с разработанной методикой оценка уровня безопасности сооружения выполнялась на основании визуальных наблюдений и проведения инструментальных измерений. Для обработки результатов обследования применялись методы теории надежности и теории случайных процессов, современные информационные технологии анализа данных. Предложено использовать апостериорный анализ показателей надежности, базирующийся на статистической оценке результатов разового обследования. Проверен закон распределения отказов сооружений по ряду статистических критериев. Разработана модель случайного процесса для снижения уровня безопасности сооружения в виде графа состояний системы. Случайный процесс является процессом с дискретным временем, равным возрасту сооружения, и дискретными состояниями, соответствующими уровню безопасности. Разработаны методы разметки графа состояний системы. Доказано, что снижение уровня безопасности сооружения является постепенным отказом, интенсивность которого подчиняющимся экспоненциальному закону. С целью определения технического состояния сооружения в будущем разработана модель прогноза показателей надежности. Работа модели апробирована для случая стационарного потока отказов на примере водосбросного сооружения. Определены вероятности снижения уровня безопасности для каждого последующего за датой обследования года. Авторами составлены подробные практические рекомендации для поэтапного определения и прогноза показателей надежности сооружений.

Гидротехническое сооружение, надежность, обследование, техническое состояние, уровень безопасности.

Введение. По данным Министерства природных ресурсов 40% сооружений различных водохозяйственных объектов России требуют срочного капитального ремонта, большинство сооружений IV класса не имеют службы эксплуатации, проектная документация по ним утрачена. Существующие рекомендации по определению критериев безопасности ориентированы на гидротехнические сооружения I...III классов. В случае отсутствия эксплуатационной службы, что характерно для сооружений IV класса, важным этапом является не только создание методики оценки современного состояния гидроузла и входящих в его состав сооружений, но и способов прогноза снижения уровня безопасности в будущем. Получение части информации по существующим гидроузлам возможно с использованием

геоинформационных систем, в которых содержатся алгоритмы прогноза аварийных разрушений и определение возможных зон затоплений при прорыве напорного фронта, разработана общая методика обработки сечений гиперкубов данных [1].

В теории надежности выделяют два этапа анализа надежности объекта – априорный и апостериорный, базирующийся на статистической обработке экспериментальных данных, полученных в процессе испытаний и эксплуатации. Апостериорные оценки получают в предположении, что отказы подчиняются определенному закону распределения с неизвестными параметрами. Причиной отказа могут быть нарушения норм проектирования, строительства, эксплуатации и естественные процессы старения. Сбор данных по одному низко-

напорному гидротехническому сооружению за весь период эксплуатации не представляется возможным в силу перечисленных выше объективных причин. В основных требованиях государственного стандарта к методам сбора информации предусматриваются, в том числе, и разовые наблюдения за объектами в эксплуатации с применением экспертных оценок, причем сбор информации должен обеспечивать получение данных для типичных условий эксплуатации [2]. Предлагается выяснить закон распределения отказов и оценить показатели надежности по данным о состояниях ряда сооружений различного возраста.

Материал и методы исследований.

Инвентаризация гидротехнических сооружений, проведенная Московским государственным университетом природообустройства совместно с Академией водохозяйственных наук в 1997-2009 гг. по поручению комитета Российской Федерации по водному хозяйству и заданию Министерства природных ресурсов РФ, позволила накопить большой объем сведений по состоянию низконапорных гидроузлов. В соответствии с разработанной методикой оценка уровня безопасности сооружения выполнялась на основании визуальных наблюдений и проведения инструментальных измерений основных параметров в строгой последовательности [3]. Исходными данными для выборочного статистического исследования стали 823 низконапорных гидроузла Московской области в возрасте до 41 года, на долю которых приходится 76% от общего числа обследованных в рамках программы объектов. В неудовлетворительном и опасном состояниях находилось 556 гидроузлов (или 68% от обследованных), причем 94% из них не имели службы эксплуатации.

Результаты исследований. Число обследованных сооружений одного возраста

доходило до ста, поэтому вначале следовало выяснить возможность оценки вероятности p снижения уровня безопасности по частоте p^* . Если по данным экспертов среди 91 водосброса, работающего 35 лет, в неудовлетворительном и опасном состоянии находилось 69 сооружений, частота наступления предельного состояния равна $p^* = 0,7582$. Для оценки приближенного равенства надо найти вероятность того, что ошибка приближения не превышает заданной:

$$P\{|p^* - p| < \varepsilon\} \approx 2\Phi\left(\frac{\varepsilon\sqrt{n}}{\sqrt{p^* \cdot q^*}}\right),$$

где ε – ошибка приближения; Φ – значение функции Лапласа; n – объем наблюдений; $q = 1 - p^*$ – вероятность, обратная наступлению события.

При ошибке, не превышающей 5%, эта вероятность равна 0,087, что крайне мало. Повышение вероятности до 0,9 требует уже 200 наблюдений, снижение ошибки до 2% – более 1000 наблюдений. Получить требуемый объем информации о состоянии гидротехнических сооружений одного возраста крайне затруднительно – в регионе с однотипными природно-климатическими условиями может просто не оказаться такого числа низконапорных гидроузлов. Следовательно, анализ надежности следует базировать на другом методе статистической обработки исходного материала.

Определение показателей надежности при наличии выборочных наблюдений может быть выполнено с использованием аппарата теории случайных процессов [4]. Сооружения низконапорных гидроузлов, не имеющих службы эксплуатации, можно рассматривать как систему (рис. 1), последовательно проходящую четыре состояния, соответствующие градации уровня безопасности, принятой Российским регистром гидротехнических сооружений [5, 6].

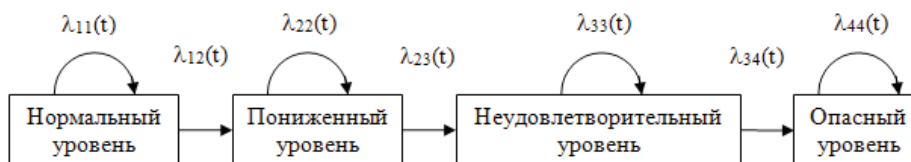


Рис. 1. Граф состояний сооружения

Снижение уровня безопасности является постепенным отказом, при котором сооружение еще работоспособно, но уже не может выполнять свои функции в полном объеме либо в соответствии с проектными

параметрами. Наступление постепенных отказов является случайным процессом, представляющим собой случайные переходы сооружения к более низкому уровню (стрелка на графе), либо сохранение исход-

ного уровня (петля на графе) с течением времени. Система имеет одно конечное (поглощающее) состояние, соответствующее опасному уровню, выход из которого недопустим.

Выбор упрощенной формы графа, в котором сооружение за один переход не может снизить уровень безопасности на два и более порядка, обусловлен несколькими причинами: до сих пор аварийного разрушения бесхозных низконапорных гидроузлов не наблюдалось; разметить звездообразный граф достаточно сложно при наличии разового экспертного осмотра сооружений; принципиально важным является не вычисление вероятности аварии, а прогноз перехода сооружения к пониженному уровню безопасности с целью своевременного принятия предупреждающих мер (согласно ГОСТ допускаемые значения вероятности возникновения аварийно-напорных ГТС IV класса не регламентируются [7]).

Для разметки представленного графа интенсивности перехода $\lambda_{ij}(t)$ как функции возраста могут быть получены из конкретных реализаций случайного процесса, отраженных в базе данных по обследованным гидроузлам. Это процесс с дискретным временем, равным возрасту сооружения, и дискретными состояниями, отражающими уровень его безопасности. Следует отметить, что принятая классификация является несколько условной, так как снижение надежности сооружения может произойти в любое время t (то есть время, в общем случае, непрерывно), но при отсутствии проектной документации и разовом экспертном осмотре состояние сооружения может быть оценено для возраста с точностью до года.

Под потоком событий в данном графе подразумевается количество сооружений, снижающих свою надежность с течением времени. Рассматривается ординарный поток при отсутствии последствия (поток Пуассона), его интенсивность $\lambda(t)$ – это среднее число событий, приходящихся на единицу времени. Поток будет стационарным, если $\lambda(t) = \lambda = const$. Интервал t между соседними событиями в простейшем потоке равен $F(t) = 1 - e^{-\lambda t}$, плотность распределения $f(t) = \lambda \cdot e^{-\lambda t}$, что является в теории вероятностей показательным (экспоненциальным) распределением. Нестационарный поток отказов $\lambda(t)$ может быть сведен к стационарному потоку λ_0 с использованием зависимости, предложенной [8]:

$$\lambda_0 = \frac{\lambda_s \lambda_l (1 - R)}{\lambda_l - \lambda_s R - (\lambda_l - \lambda_s) e^{-\lambda_s \beta}}, \quad (1)$$

где λ_s, λ_l – интенсивности потока в различные чередующиеся периоды времени ($l_s - l_l \neq 0$);

$$R = e^{-[\lambda_l + \beta \cdot (\lambda_s - \lambda_l)]},$$

β – доля периода воздействия на объект потока отказов с меньшей интенсивностью, $0 \leq \beta \leq 1$.

Выяснение закона распределения $F(t)$ и интенсивности потока отказов $\lambda(t)$ было выполнено для данных по 821 водосбросу в возрасте до 41 года. Рассматривался переход от нормального и пониженного уровня безопасности к неудовлетворительному и опасному уровню, цепь Маркова имела два состояния. Проверялось соответствие экспоненциальному распределению, параметр которого $\lambda(1/\text{год})$ был найден методом наименьших квадратов и методом максимального правдоподобия (который регламентируется ГОСТ [9]). Оценки интенсивности потока отказов, вычисленные обоими способами, практически совпали.

Для проверки гипотезы о виде и параметрах неизвестного распределения в теории надежности используется ряд непараметрических критериев – Колмогорова, Смирнова, Крамера-Мизеса-Смирнова, Андерсона-Дарлингга Пирсона [8]. Критерий согласия хи-квадрат универсален при проверке простых гипотез, но при проверке сложных гипотез не является мощным. В расчетах был применен критерий Крамера-Мизеса-Смирнова и вычислено значение статистики по зависимости (2):

$$s_\omega = \frac{1}{12n} + \sum_{i=1}^n \left\{ F(x_i, \Theta) - \frac{2i-1}{2n} \right\}^2, \quad (2)$$

где n – объем выборки; i – ранг; $F(x, \Theta)$ – теоретическая функция распределения.

Распределение статистики критерия аппроксимировано распределением Су-Джонсона с плотностью:

$$f(x) = \frac{\theta_2}{\sqrt{2\pi} \sqrt{(x - \theta_3)^2 + \theta_2^2}} \times \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left[\theta_0 + \theta_1 \ln \left(\frac{x - \theta_3}{\theta_2} + \sqrt{\left(\frac{x - \theta_3}{\theta_2} \right)^2 + 1} \right) \right]^2 \right\} \quad (3)$$

и параметрами $\theta_0 = -1.8734$; $\theta_1 = 1.2118$; $\theta_2 = 0.0223$; $\theta_3 = 0.024$. При найденном значении статистики по распределению Су-

Джонсона вычислена вероятность $P\{S_{\omega} > S_{\omega}^* \} = 0.35$, что больше заданного уровня значимости. Следовательно, интенсивность потока отказов постоянна, а время между отказами подчинено экспоненциальному закону. Работа критерия продемонстрирована на рис. 2.

Экспоненциальное распределение широко используется в промышленном и гражданском строительстве при оценке надежности строительных конструкций зданий и сооружений по внешним признакам. Так, по рекомендациям ЦНИИ Промзданий, величину повреждения строительных конструкций через t лет эксплуатации определяют как $1 - e^{-\lambda t}$, где λ – постоянная износа.



Рис. 2. Функция распределения неудовлетворительных и опасных состояний водосбросов низконапорных гидроузлов

Исследование предложенной цепи Маркова возможно как при стационарном потоке отказов, так и при интенсивности отказов, являющейся функцией возраста сооружения. После составления однородной матрицы переходных вероятностей $p_{ij}(k)$ в случае постоянных интенсивностей (либо ряда матриц для каждого возраста сооружения, в случае нестационарного потока отказов) и вектора начальных вероятностей p_i , в котором «1» будет соответствовать строке состояния сооружения, полученного на основании последней экспертной оценки:

$$P_{ij} = \begin{pmatrix} p_{11} & p_{12} & p_{13} & p_{14} \\ p_{21} & p_{22} & p_{23} & p_{24} \\ p_{31} & p_{32} & p_{33} & p_{34} \\ p_{41} & p_{42} & p_{43} & p_{44} \end{pmatrix} P_i = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (4)$$

задача решается с использованием формулы полной вероятности (формулы Бай-

еса). Расчеты позволят ответить на вопрос: если сегодня, по оценкам экспертов, сооружение конкретного возраста соответствует некоторому уровню безопасности, какова вероятность того, что через несколько лет, при отсутствии службы эксплуатации, этот уровень снизится?

Один из вариантов прогноза вероятностей снижения безопасности при стационарных потоках отказов приведен на рисунке 3.

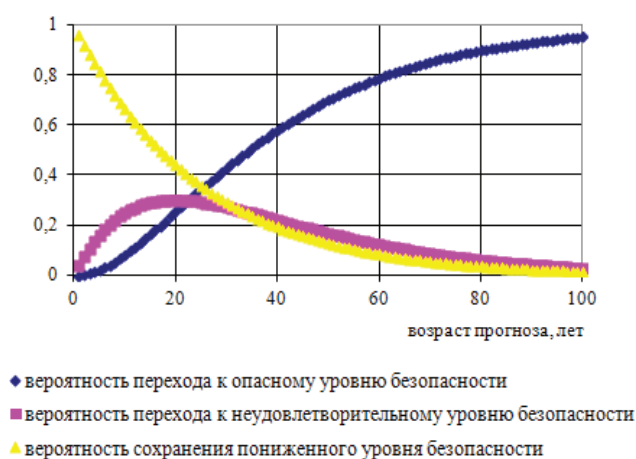


Рис. 3. Прогноз вероятности будущего состояния сооружения, имеющего на момент обследования пониженный уровень безопасности

В момент обследования (начало координат) сооружение соответствовало пониженному уровню. При значении вероятности равном 0.01...0.1 («8» по 10-ти бальной шкале), в ближайшие три года объект без принятия эксплуатационных мер может оставаться в исходном состоянии, в течение следующих 12-ти лет станет неудовлетворительным, а еще через 14 лет вероятность его перехода в опасное состояние крайне велика. Подобные кривые строятся для каждого конкретного сооружения, входящего в состав низконапорного гидроузла, – однородной плотины, водосброса, водовыпуска. Их координаты могут значительно отличаться от приведенных, так как интенсивности потока отказов и исходные состояния сооружений будут различны.

Выводы

Этапы определения показателей надежности, предлагаемые авторами, заключаются в следующем:

1. На основании визуального обследования сооружений гидроузла по разработанной методике им присваивается уровень

надежности согласно Российскому регистру ГТС.

2. Для однотипных сооружений формируется выборка, которая включает ранжированный по возрасту сооружения массив числа объектов, соответствующих каждому из четырех уровней безопасности.

3. Вычисляются относительные частоты состояний как частное от деления числа объектов одного возраста и уровня безопасности к общему числу объектов данного возраста.

4. Методом максимального правдоподобия находятся параметры закона распределения сооружений одного уровня безопасности, как функции возраста.

5. С использованием критерия формулы (2) проверяется сложная гипотеза о принадлежности выборки выбранному теоретическому распределению на принятом уровне значимости – формула (3).

6. Показатели надежности (время безотказной работы, средняя наработка на отказ и т.д.) вычисляются апостериорно для выбранного закона распределения отказов.

7. Для экспоненциального закона распределения времени между отказами в цепи Маркова, включающей четыре возможных состояния сооружения (по числу уровней надежности), размечается граф состояний и составляется матрица переходных вероятностей – формулы (4).

8. В случае двухпараметрического закона распределения отказов, возможны два варианта: цепь Маркова будет неоднородной и составляется ряд матриц переходных вероятностей, зависящих от возраста сооружения; либо интенсивность потока отказов сводится к постоянной с использованием формулы (1) и далее расчет ведется для экспоненциального распределения.

9. Задается вектор начальных вероятностей на основании последней экспертной оценки уровня безопасности сооружения.

10. По формулам полной вероятности для каждого последующего прогнозного года находят распределение вероятностей состояния сооружения в будущем (возможно использование созданной авторами программы, автоматизирующей вычисления).

11. Если в прогнозном году вероятность конкретного состояния ниже 0.1, считают, что сооружение снизит свой уровень безопасности.

Библиографический список

1. Снежко В.Л. Использование геoinформационных систем для получения оценок надежности технического состояния сооружений низконапорных гидроузлов // Естественные и технические науки. 2010. № 6 (50). С. 654-658.

2. ГОСТ 27.001-95. Надежность в технике. Основные положения [Текст]. – Введ. 1997-01-01. М.: ИПК изд-во стандартов, 2002. 8 с.

3. Каганов Г.М., Волков В.И. К оценке состояния низконапорных гидротехнических сооружений при отсутствии проектной документации // Природообустройство. 2008. № 3. С. 41-48.

4. Случайные процессы, математическая статистика и их приложение: [Сб. ст.] / МГУ им. М.В. Ломоносова, Мех. – мат. фак.; Под ред. Б.В. Гнеденко, Ю.А. Розанова. М.: Изд-во МГУ, 1989-72 с.

5. Инструкции о ведении Российского регистра гидротехнических сооружений [Текст]. Утв. приказом МПР России от 29 января 2013 г. № 34. Зарегистрировано в Мин. юст. РФ. 8.05.2013, рег. № 28354.

6. Жарницкий В.Я., Андреев Е.В. Оценка эксплуатационной надёжности и мониторинг технического состояния низконапорных грунтовых плотин, М.: ФГБОУ ВПО РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева. 2014. 154 с.

7. СП 58.13330.2012. Гидротехнические сооружения. Основные положения [Текст] (Актуализированная редакция СНиП 33-01-2003). 2012. http://isvov.ru/SNiP/gidrotekhnicheskie_sooruzhenija.pdf

8. Алексеев М.И. Определение показателей надежности объекта при сезонно изменяющейся интенсивности отказов // Водоснабжение и санитарная техника. 2007. № 5. С. 5-8.

9. ГОСТ Р 50.1.037-2002. Прикладная статистика. Правила проверки опытного согласия с теоретическим. Непараметрические критерии [Текст]. – Введ. 2002-04-23. М.: Изд-во стандартов, 2002. 43 с.

Материал поступил в редакцию 31.05.2017 г.

Сведения об авторах

Волков Владимир Иванович, кандидат технических наук, профессор кафедры «Гидротехнические сооружения» ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева: 127550,

г. Москва, ул. Б. Академическая, д. 44; e-mail: volcov_vi45@mail.ru; тел. +7 (499) 153-86-48

Снежко Вера Леонидовна, доктор технических наук, профессор, заведующая кафедрой «Информационные тех-

нологии в строительстве» ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева: 127550, г. Москва, ул. Б. Академическая, д. 44; e-mail: VL_Snejko@mail.ru; тел. +7 (499) 153-97-66

V.I. VOLKOV, V.L. SNEZHKO

Federal state budgetary educational institution of higher education «Russian state agrarian university – MAA named after C.A. Timiryazev», Moscow, the Russian Federation

STATISTICAL METHODS OF DETERMINATION OF RELIABILITY INDICATORS OF STRUCTURES OF LOW-PRESSURE HYDROSYSTEMS

There are considered the problems connected with the technical state and level of safety of hydraulic structures (HS) of low head hydraulic works. For hydraulic structures of class IV the absence of the operation service and low level of the technical condition is typical. The authors have developed a method of a single expert examination of structures. The investigation material was selective data of a single expert inspection of 823 low pressure hydro units of the Moscow region. In accordance with the developed methodology the safety assessment of the structure was performed on the basis of visual observations and instrumental measurements. For processing the survey results of the applied methods of reliability theory and stochastic processes, modern information technologies for data analysis were applied. It is proposed to use a posteriori analysis of reliability based on the statistical evaluation of the single survey results. The distribution law of failures of structures was checked on a number of statistical criteria. The model of a random process to reduce the level of safety of structures as a graph of states of the system was developed. A random process is a process with a discrete time equal to the age of the structure and discrete states corresponding to the safety level. There are developed methods for laying out a graph of the system states. It is proved that the decrease of the safety level of the structure is a gradual failure, its intensity obeys to the exponential law. With the aim of determining the technical state of the structure in the future there is developed a forecasting model of reliability indices. The model was tested for the case of a stationary flow of failures by the example of a spillway structure. There were determined the probabilities of lowering the safety security for each year following the date of survey. The authors made a detailed practical guidance for the phased determination and prediction of the reliability of structures.

Hydraulic structure, reliability, inspection, technical state, safety level.

References

1. **Snezhko V.L.** Ispol'zovanie geoinformatsionnykh sistem dlya polucheniya otsenok nadezhnosti tehničeskogo sostoyaniya sooruzhenij nizkonapornyykh hydrouzlov // Estestvennye i tehničeskije nauki. 2010. № 6 (50). S. 654-658.
2. GOST 27.001-95. Nadezhnostj v tehnikе. Osnivnye položeniya [Text]. – Vved. 1997-01-01. M.: IPK izd-vo standartov, 2002. 8 s.
3. **Kaganov G.M., Volkov V.I.** K otsenke sostoyaniya nizkonapornyykh hidrotehničeskikh sooruzhenij pri otsutstvii proektnoj dokumentatsii // Prirodobustrojstvo. 2008. № 3. S. 41-48.
4. Sluchajnye protsessy, matematičeskaja statistika i ih prilozhenie: [Sb. st.] / MGU im. M.V. Lomonosova. Meh. – mat. Fak.; Pod red. B.V. Gnrdenko, Yu A. Rozanova. M.: Izd-vo MGU, 1989-72 s.
5. Instruktsii o vedenii Rossijskogo registra hidrotehničeskikh sooruzhenij [Text]. Utv. Prikazom MPR Rossii ot 29 yanvarya 2013 g. № 34. Zaregistrirvano v Min. yust. RF. 8.05.2013, reg. № 28354.
6. **Zharnitsky V.Ya., Andreev E.V.** Otsenka ekspluatatsionnoj nadezhnosti i monitoring tehničeskogo sostoyaniya nizkonapornyykh gruntovykh plotin. M.: FGBOU VPO RGAU – MSHA im. K.A. Timiryazeva. 2014. 154 s.
7. SP 58.13330.2012. Hidrotehničerskie sooruzhenia. Osnovnye položeniya. [Text] (Aktualizirovannaya redactsiya SNIp 33-01-2003). 2012. http://isvov.ru/SNIp/gidrotekhničeskije_sooruzhenija..pdf
8. **Alexeev M.I.** Opredelenie pokazatelej nadezhnosti objekta pri posezonno izmenyayushchejsya intensivnosti otkazov // Vodospobezhenie I sanitarnaya tehnika. 2007. № 5. S. 5-8.
9. GOST R50.1.037-2002. Prikladnaya statistika. Pravila proverki opytного spgласiya s teoreticheskim. Neparаметрические cri-

teria [Text]. – Vved. 2002-04-23. M.: Izd-vo standartov, 2002. 43 s.

The material was received at the editorial office
31.05.2017

Information about the authors

Volkov Vladimir Ivanovich, candidate of technical sciences, professor of the chair «Hydrotechnical structures CHAIR, Russian state agrarian University – MAA named af-

ter C.A. Timiryazev: 127550, Moscow, B. Academic St., 44; E-mail: volcov_vi45@mail.ru; Phone +7 (499) 153-86-48

Snezhko Vera Leonidovna, doctor of technical sciences, professor, head of the chair «Information technologies in construction», Russian state agrarian University – MAA named after C.A. Timiryazev: 127550, Moscow, B. Academic St., 44; E-mail: VL_Snejko@mail.ru; Phone +7 (499) 153-97-66

УДК 502/504: 556.16

Г.Х. ИСМАЙЛОВ

Институт водных проблем Российской академии наук, г. Москва, Российская Федерация

Г.А. ВАГАНОВ

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

МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ КАМСКОГО КАСКАДА ВОДОХРАНИЛИЩ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МОДЕЛИ «IMIT-BALANC»

Разработана комплексная методика анализа и оценка рациональных режимов работы Камского каскада гидроузлов при изменяющихся природно и хозяйственных условиях. Выявлены основные особенности управления водными ресурсами в современных условиях. Для решения задачи поиска оптимальных режимов работы Камского каскада гидроузлов разработан специальный алгоритм, работающий в имитационном режиме и использующий принципы алгоритма максимального потока. Соответственно задача управления объемом и концентрации растворенных веществ речной воды сводится к многокритериальной задаче принятия решений и для этих целей в работе используется принцип так называемых справедливых уступок. Для поиска рациональных режимов функционирования Камских каскадов гидроузлов используется программный комплекс «IMIT-BALANC». В рассматриваемой постановке задача определения рациональных режимов работы Камского каскада гидроузлов является динамической задачей. Для ее описания используются разностные уравнения балансового типа (водного и солевого баланса) и уравнения, описывающие движение воды в русле реки. Состояние системы, описываемое соответствующими уравнениями, на каждом расчетном отрезке времени должно быть оптимальным не только для данного отрезка времени и для данного участка реки, но и для всего периода регулирования с учетом всех участков речной системы. Проведенный имитационный эксперимент со всей очевидностью показал, что модель «IMIT-BALANC» позволяет максимально полно реализовать сложившиеся природно-хозяйственные и эколого-водохозяйственные условия при определении режимов работы Камского каскада гидроузлов и тем самым избежать сколь-либо значимых ошибок и обеспечить информацией ответственных лиц для принятия необходимых управленческих решений

Регулирование речного стока, основные нормативные уровни и емкости водохранилища, имитационная система, многокритериальные методы оптимизации, сработки и наполнения водохранилища, временной ряд.

Введение. Проведенный анализ использования, охраны и воспроизводства водных ресурсов основных рек бассейна Каспийского моря [1] позволил выявить сле-

дующие особенности управления водными ресурсами в современных условиях:

– острота водохозяйственных проблем связана, во-первых, со всё возрастающей