

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

дефицитностью водных ресурсов и ухудшением их качества и, во-вторых, с новой общественно-политической ситуацией, в результате которой предъявляются новые требования к водным ресурсам со стороны как независимых государств, так и различных субъектов этих государств;

– в новых общественно-политических условиях противоречия между социально-экономической и экологической системами речного бассейна усугубились вследствие несовпадения интересов независимых государств и их субъектов к объему, режиму и качеству использования водных ресурсов;

– усиление антропогенного воздействия на водные ресурсы в зоне формирования, транспортировки и использования изменяет объем, режим и качество природных вод, что противоречит условиям функционирования околородных и водных экосистем и часто сопряжено с огромным ущербом, наносимым окружающей природной среде;

– водные ресурсы, одни из немногих, транспортировка которых в нужных количествах чрезвычайно затруднена, а иногда и невозможна. Поэтому при определении стратегии социально-экономического развития региона и обеспечения его экологического благополучия управление водными ресурсами должно рассматриваться как одна из ключевых задач.

В этих условиях, наряду с необходимостью разработки новых организационно-правовых аспектов использования и охраны водных ресурсов, возникает острая необходимость усовершенствования методики анализа и оценки эффективности управления водными ресурсами рассматриваемого региона и речного бассейна. Для обоснования стратегии рационального использования и охраны водных ресурсов региона и речного бассейна требуется рассмотрение большого числа вариантов, различающихся своими социально-экономическими, гидролого-водохозяйственными и экологическими параметрами. Кроме того, необходим учет воздействия развивающейся экономики, особенно водохозяйственные системы (ВХС), на природную среду и, прежде всего, на экологические условия региона и речного бассейна. Немаловажным, а в настоящее время и главным в этих условиях является переход от изучения взаимовлияния отдельных локальных систем и процессов к системному анализу функционирования этих систем в целом

на основе применения современных информационно-советующих систем поддержки принятия решений по оптимальному управлению водными ресурсами.

Наряду с отмеченными особенностями управления водными ресурсами имеют место и трудности в методическом плане. Мировой опыт показывает, что наиболее распространенным и эффективным средством управления водными ресурсами и решения многих водных проблем является управление водохозяйственными системами (ВХС) многоцелевого водопользования. Для управления водными ресурсами основными средствами управления выступает ВХС, поведение которых определяется огромным числом взаимосвязанных параметров, управляемых прямо или косвенно. Одновременно приходится учитывать как быстро изменяющиеся, так и медленные процессы, эффект которых сказывается только через ряд лет. Эффекты внешнего воздействия на такие объекты часто оказываются непредсказуемыми. Таким образом, и для XXI века задачи исследования и оценка эффективности функционирования ВХС в изменяющихся природно хозяйственных условиях остается одной из фундаментальных и актуальных задач управления водными ресурсами речного бассейна.

В связи с этим в настоящей работе, используя модельный комплекс «ИМИТ-ВАН-АНС», анализируется режим работы Камского каскада водохранилищ и дается оценка эффективности функционирования Камской водохозяйственной системы.

**Общая постановка задачи.** Камский каскад водохранилищ ГЭС многоцелевого водопользования, существенно увеличивает доступные к использованию водные ресурсы этого бассейна в результате перераспределения воды из многоводных сезонов и периодов в маловодные. При этом, гарантируются все виды водопользования и создаются условия для эффективного использования гидроэнергетического потенциала реки Камы, а также улучшается санитарное состояние реки в нижних и верхних бьефах и позволяет перейти на единые транспортные глубоководные пути.

Общая постановка задачи функционирования каскада водохранилищ на р. Каме формулируется следующим образом. Рассматривается водохозяйственная система р. Камы, которая состоит из каскада трех водохранилищ с ГЭС, расположенных

на основном стволе реки Камы. Каждое водохранилище имеет  $m$  участников (водопользователей). В качестве участников принимается: ирригация, гидроэнергетика, промышленное и коммунальное водоснабжение, санитарные попуски в нижний бьеф и требования природных комплексов. Период регулирования разбивается на  $n$  равных (или неравных) отрезков времени. Выбор расчетного отрезка времени зависит от вида регулирования речного стока в пределах одного водохозяйственного года с увязкой его со следующим годом, а продолжительность расчетного интервала полагается равной одному месяцу, декаде или пентаде. В данной постановке  $n = 20$ . Учитывая важность водоснабжения населения, а также малую долю промышленного водоснабжения, в рамках данной постановки предусматриваются их полное обеспечение и соответственно их требования в модель включаются в виде ограничения. Предполагается также, что все потребители воды, расположенные вдоль реки, формируют загрязненные сбросные воды и стоки возвратных вод. Сброс этих вод в русло реки ухудшает показатели качества речной воды, а также это сопряжено с ухудшением почвенно-мелиоративных условий в ирригационных системах региона и, как следствие этого, со снижением продуктивности сельскохозяйственных земель. В связи с этим предполагается, что каждый водопользователь на выходе имеет накопители (искусственные или естественные), позволяющие в зависимости от ассимилирующей способности реки перераспределять во времени и в пространстве условные чистые воды и сток возвратных вод, и тем самым сохранять нормативы показателей качества речной воды. Основным требованием к накопителям является максимум их опорожнения в конце водохозяйственного года (в зависимости от водности года) при сохранении в контрольных створах водотока, расположенных ниже по течению, концентрации загрязняющих веществ (ЗВ) в речной воде, не превышающей предельно допустимое значение (ПДК).

В соответствии с принятыми условиями требуется определить оптимальные режимы работы Камского каскада водохранилищ с ГЭС, с учетом оптимального управления сброса сточных вод и стока возвратных вод с целью сохранения ПДК речной воды.

**Методы решения.** Математическая постановка рассматриваемой задачи

такова: требуется минимизировать функционал

$$\Phi(\bar{V}, \bar{U}, t) = \min_{\bar{U}} M \left[ \sum_{t=0}^T \left| \frac{\bar{U}_t - \bar{U}_{opt}}{\bar{U}_{opt}} \right| \right] \quad (1)$$

при ограничениях

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

$$\bar{V} \leq \bar{V} \leq \bar{\bar{V}} \quad (3)$$

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

при  $t = 0$ ,  $\bar{V} = \bar{V}_0$ , где  $\bar{V}$  – вектор наполнения,  $\bar{U}$  – вектор попусков из водохранилищ,  $\bar{U}_{opt}$  – оптимальные значения попусков,  $\bar{W}$  – вектор водных ресурсов,  $t$  – текущее время,  $A$  и  $B$  – матрицы системных условий.

В постановке (1)-(4) рассматриваемая задача является динамической. Для ее описания используются разностные уравнения балансового типа (водного и солевого баланса) и уравнения, описывающие движение воды в русле реки. Состояние системы, описываемое векторами (2) и (3), на каждом расчетном отрезке времени должно быть оптимальным не только для данного отрезка времени и для данного участка, но и для всего периода регулирования с учетом всех участков речной системы.

Для решения задачи поиска оптимальных режимов работы Камского каскада водохранилищ в постановке (1) – (4) создан 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. Учитывая, что строгое решение такого рода задач отсутствует, прежде всего, из-за большой размерности, в рамках настоящей работы используется принцип так называемых справедливых уступок [2].

Согласно этому принципу сначала выполняются требования более приоритетных водопользователей, но не более чем необходимо для нормального их функционирования в сложившихся условиях. При этом просматривается состояние других, менее приоритетных водопользователей. Если их водообеспеченности ниже некоторого технологического минимума (в случае отсутствия внутреннего резерва в системе), осуществ-

вляется максимальное «подтягивание» их до этого минимума за счет заблаговременного ограничения более приоритетных водопользователей, но не более чем на 20-30% общего требования этих водопользователей на данном отрезке времени.

Для обеспечения норматива концентрации растворенных веществ речной воды в узлах управления проверяется условие допустимой предельной концентрации (ПДК), в случае нарушения ПДК по данному ингредиенту, либо формируется специальный попуск из водохранилища для снижения концентрации растворенных веществ речной воды, либо ограничивается сброс условно очищенных вод в русло, либо то и другое одновременно. Здесь еще раз следует отметить, что ограничение поступления условно очищенных вод в русло рек из частных водосборов может достигаться разными путями.

**Результаты исследований. Информационное обеспечение моделирования режима работы Камского каскада водохранилищ.** При подготовке гидрологической информации для моделирования режимов Камского каскада водохранилищ водохранилища были использованы результаты исследования закономерностей межгодовой и внутригодовой изменчивости притока речных вод из частных водосборов Камского, Воткинского и Нижнекамского гидроузлов [3]. Анализ сокращенных разностных кривых притоков с частных водосборов Камских гидроузлов показывает, что в хронологическом изменении стока р. Кама отмечается последовательное чередование периодов различной водности. Так, период от начала наблюдений до 1921 г. характеризовался средней водностью. Начиная, с 1921 по 1929 года наблюдаются повышенные водности. С 1929 по 1950 гг. в камском бассейне наблюдалось затяжное маловодье. В 1951-1958 гг. вновь наступила фаза повышенной водности. 1959-1975 гг. – фаза маловодья, 1976-2010 гг. – многоводная фаза. Внутри выделенных периодов режим водности р. Кама также неустойчив. Режим характеризуется чередованием группировок лет с пониженным, средним и повышенным стоком. Внутри этих группировок, как правило, и находятся годы с исключительно низкой и с очень высокой водностью. Самыми маловодными за имеющийся период наблюдений были годы 1936, 1937, 1938 с величиной стока 56,2, 60,4, 60,6 км<sup>3</sup> соответ-

ственно. В свою очередь наиболее многоводными в этот период были зафиксированы 1926, 1927 и 1994 годы. Величина стока за данные годы составляла 153, 138 и 137 км<sup>3</sup> соответственно. Намного реже в ходе водности р. Кама встречаются затяжные группировки с повышенным и пониженным стоком, охватывающие 5 лет и более. Из изложенного можно сделать вывод, что при решении задач рационального использования водных ресурсов в бассейне р. Кама нужно учитывать возможность наступления не только отдельных исключительно маловодных лет, но и серий лет с низким стоком. В связи с этим, для численных машинных экспериментов представляется целесообразным, прежде всего, в качестве модели годового стока и его внутригодового распределения использовать фактические данные по притоку к гидроузлам Камского каскада водохранилищ.

**Анализ результатов машинно-имитационного эксперимента.** В данном разделе приводятся некоторые результаты применения, описанного выше алгоритма управления, применительно к Камскому каскаду водохранилищ в зависимости от сложившегося гидрологического режима р. Камы. Для анализа имитационного эксперимента организованы следующие варианты режима работы Камского каскада водохранилищ в зависимости от сложившейся водности р. Камы. 1. Вариант режима работы на высокой водности (P = 1-20)%; 2. Вариант режима работы в умеренно высокой водности (P = 20-40)%; 3. Вариант режима работы в средней водности (P = 40-60)%; 4. Вариант режима работы в умеренно низкой водности (P = 60-80)%; 5. Вариант режима работы в низкой водности (P = 80-90)%; 6. Аномально низкая водность (P = 90-99)%.

В таблице 1 приведены распределения отдельных лет наблюдений по водности в бассейне р. Камы.

Основным назначением Камского каскада гидроузлов с водохранилищами являются: выработка электроэнергии и участие в покрытии нагрузки энергосистемы, с учетом ее суточной и сезонной неравномерности; улучшение судоходных и лесосплавных условий на р. Каме; соблюденные условия, обеспечивающие бесперебойную работу водозаборных сооружений; сохранение и воспроизводство рыбных запасов (особенно ниже Волгоградского г/у, включая Волго-Ахтубинскую пойму); возможная срезка пиков паводков.

## Распределения отдельных лет наблюдений по водности в бассейне р. Камы

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 = (80-90)%	Аномально низкая водность P = (90-99)%
1925/26-19%	1997/98-24%	2003/04-52%	1944/45-68%	1934/35-86%	1933/34-91%
1926/27-1%	1998/99-31%	2004/05-59%	1945/46-76%	1935/36-87%	1936/37-99%
1927/28-2%	1999/00-30%	2005/06-60%	1988/89-77%		1937/38-98%
1928/29-18%	2000/01-34%		1989/90-72%		1938/39-96%

Суммарная, регулирующая емкость Камского, Воткинского и Нижнекамского водохранилищ составляет: полная – 35,2 км<sup>3</sup>, полезная – 18,9 км<sup>3</sup>. Она позволяет осуществлять сезонное, недельное и суточное регулирование стока р. Камы. Отметка нормального подпорного уровня (НПУ) – Камского г/у – 108,50 м БС, Воткинского г/у – 89,0 м БС и Нижнекамского г/у – 63,3 м БС (проектный НПУ – 68, м БС). Уровень мертвого объема (УМО) – Камского г/у – 100 м БС, Воткинского г/у – 84,0 м БС, Нижнекамского г/у – 62,70 м БС. Минимальный навигационный уровень (МНУ) – Камского г/у – 106 м БС, Воткинского г/у – 87,0 м БС, Нижнекамского г/у – 63 м БС. Отношения полезного объема водохранилищ к среднемугодовому годовому стоку – Камского – 0,18, Воткинского – 0,07 и Нижнекамского – 0,008 (проектный – 0,12). Форсированный подпорный уровень (ФПУ) верхнего бьефа в половодье обеспеченности P=0,01% – Камского г/у – 110,2 м, Воткинского г/у – 90,0 м, Нижнекамского г/у – 68,99 м (проектный). Уровень верхнего бьефа в начале навигации – Камского г/у – 104 м, Воткинского г/у – 86 м, Нижнекамского г/у – 63 м. Уровень максимальной навигационной сработки верхнего бьефа – Камского г/у – 106 м, Воткинского г/у – 87,0, Нижнекамского – 63,0 м. Уровень нормальной предполоводной сработки верхнего бьефа водохранилищ – Камского – 101,0 м, Воткинского – 85,0 м, Нижнекамского – 63,0 м. Уровень предельной предполоводной сработки – Камского г/у – 100,0 м, Воткинского г/у – 84,0 м, Нижнекамского г/у – 62,7 м. Максимальные уровни нижнего бьефа в половодье обеспеченности P=0,1% – Камского г/у – 98,0 м, (с гарантийной поправкой) и 97,8 м (без гарантийной поправки), Воткинского г/у – 76,7 м (с гарантийной поправкой) и 76,5 м (без гарантийной поправки), при обеспеченности P=1% – Камского г/у – 97,1 м, Воткинского г/у – 75,8 м, при обеспеченности P=5% – Камского г/у – 95,0 м, Воткинского г/у – 75,1 м.

**Режим наполнения и сработки водохранилищ Камского каскада..** При ис-

следовании режимов работы Камского каскада водохранилищ очень большое значение имеет анализ и оценка эффективности работы этого каскада в период половодья и период межени. В период половодья основными задачами являются создание запасов воды для использования в последующие периоды межени и участие Камского каскада водохранилищ в формировании ежегодного специального весеннего попуска в низовьях р. Волги. В период межени главной задачей водохранилищ Камского каскада г/у является обеспечение гарантированных судоходных глубин по всей длине реки Камы и бесперебойной работы водозаборных сооружений, обеспечивающих водоснабжение населения и отрасли экономики, а также поддержание санитарных и обводнительных попусков в нижних бьефах гидроузлов.

Как видно из таблицы 1, к высокой водности относится период с 1925/1926 по 1928/1929 годы. Результаты имитационных экспериментов показывают, что в эти годы сработка Камского водохранилища перед половодьем колеблется в пределах от 103,5 м по 102,9 м, Воткинского г/у – 86,4 м и Нижнекамского г/у – 63,5 м, что не противоречит правилам использования водных ресурсов (ПИВР) этих гидроузлов (рис.).

С началом половодья, в первую очередь, обеспечивается наполнение Камского водохранилища и в первую декаду мая водохранилище Камского г/у достигает отметки 105,0 м., Воткинского г/у – 87,0 м и Нижнекамского – 63,5 м. При этом обеспечивается среднесуточные расходы не менее 1000 м<sup>3</sup>/с через Камского г/у, 2000 м<sup>3</sup>/с через Воткинский г/у, 2200 м<sup>3</sup>/с через Нижнекамский г/у. В течении весеннего половодья все три водохранилища Камского каскада достигают отметки НПУ и соответственно составляют 108,5 м, 89,0 м и 63,5 м. До конца ноября Камское водохранилище находится на отметке 108,0-108,5 м, Воткинское – 88,5-89,0 м и Нижнекамское – 63,5 м. Максимальный расход воды через Камский г/у при наполнении водохранилища от отметки 104 м до отметки 108,5 м в весеннее полово-

дье не превышает 10000 м<sup>3</sup>/с (по ПИВР Камского г/у при обеспеченности Р = 1-5% допускается сброс максимального расхода в нижний бьеф свыше 10500 м<sup>3</sup>/с) и колеблется в пределах 1200-10000 м<sup>3</sup>/с в зависимости от водности года. Максимальный расход воды через Воткинский г/у в период весеннего половодья колеблется в пределах 1400-9500 м<sup>3</sup>/с, в Нижнекамский г/у – 2100-9500 м<sup>3</sup>/с. Среднесуточный навигационный расход 1000 м<sup>3</sup>/с в нижнем бьефе Воткинского и Нижнекамского г/у поддерживается при уровне верхнего бьефа Камского г/у в пределах отметок 107,25-108,5 м. Воткинское и Нижнекамское водохранилища

при этом не срабатываются. При достижении на Воткинском водохранилище отметки 86,0 м обеспечивается минимальный среднесуточный расход через этот гидроузел, не менее 1000 м<sup>3</sup>/с. При этом в зависимости от водности года и периода выполнения подготовительных землечерпательных работ в начальный период навигации в нижний бьеф Воткинского г/у осуществляются повышенные среднесуточные попуски воды в пределах 1400-2200 м<sup>3</sup>/с. На спаде половодья попуски через Камский г/у осуществляются не менее 1600 м<sup>3</sup>/с, через Воткинский г/у – 1700 м<sup>3</sup>/с и через Нижнекамский г/у – 3000 м<sup>3</sup>/с.

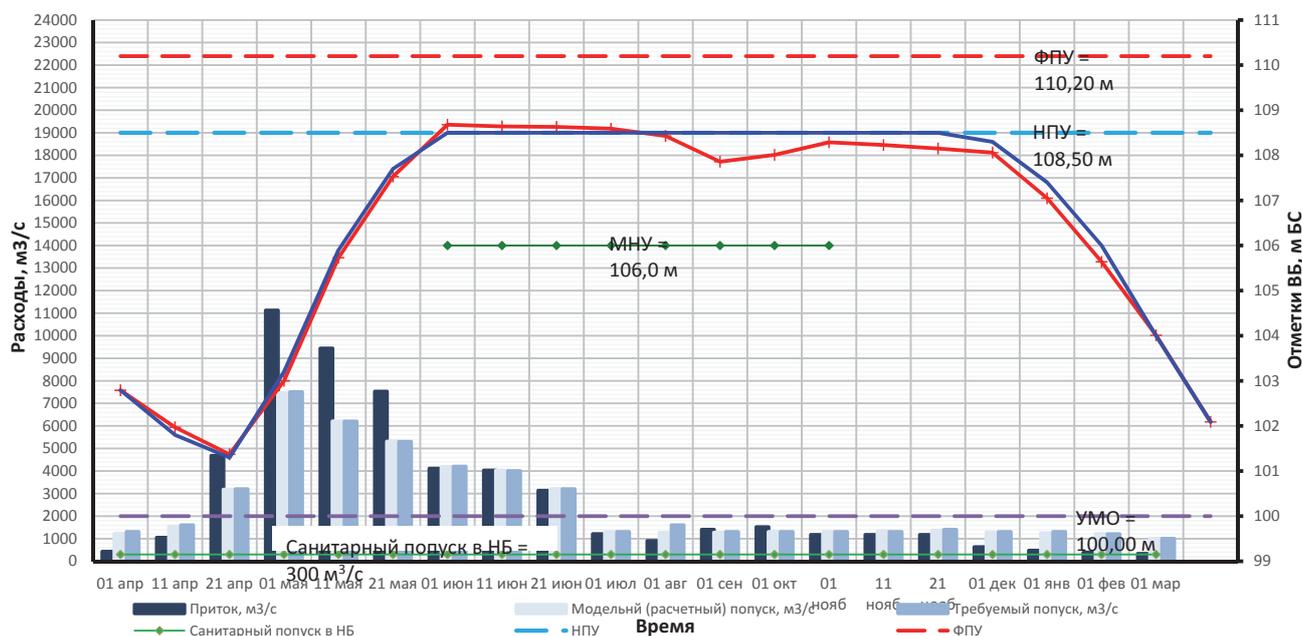


Рис. 1 Сравнение режимов работы Камского вдхр 1925-26г, Рр. Камы=19% / Рвдхр=24%

Для плавного нарастания уровней воды верхних бьефов придерживается суточная интенсивность подъема уровня в диапазоне 104,0-108,0 м для Камского г/у и 85,0-88,0 м для Воткинского г/у, она не превышает 0,4-0,5 м/сут., а в диапазоне отметок 108,0-108,5 м для Камского г/у и 88,0-89,0 м для Воткинского г/у и 62,7-63,5 м для Нижнекамского г/у – 0,20-0,25 м/сут. Интенсивность увеличения среднесуточных сбросных расходов воды через водослив Камского г/у в нормальных условиях не превышает 1500-2000 м<sup>3</sup>/с в сутки и при наступлении исключительно высоких половодий 3000-3500 м<sup>3</sup>/с. Для Воткинского и Нижнекамского гидроузлов интенсивность увеличения среднесуточных сбросных расходов воды в нормальных условиях достигает 2000-2500 м<sup>3</sup>/с в сутки и при наступлении исключительно высоких половодий 3500-4000 м<sup>3</sup>/с в сутки.

Сработка Камского водохранилища в период навигации производится для обеспечения гарантированного навигационного попуска в нижний бьеф Воткинского и Нижнекамского гидроузлов. А также при авариях в энергетической системе, вызывающих необходимость использования аварийного резерва Камской, Воткинской и Нижнекамской ГЭС. Как показывает имитационный эксперимент за весь навигационный период попуски в нижний бьеф Камского г/у осуществляются не менее 1300 м<sup>3</sup>/с, нижний бьеф Воткинского г/у – 1400 м<sup>3</sup>/с и нижний бьеф Нижнекамского г/у – 2000 м<sup>3</sup>/с. Среднесуточный навигационный расход в период июнь-август 1300 м<sup>3</sup>/с в нижней бьеф Воткинского г/у и 2000 м<sup>3</sup>/с в нижний бьеф Нижнекамского г/у поддерживается при уровне верхнего бьефа Камского г/у в пределах отметок 108,0-108,5 м. Воткинское водохранилище

лище при этом находится в пределе отметок 88,0-89,0 м, а Нижнекамское водохранилище на весь период навигации находится на отметке 63,5 м и не срабатывает. Зимние периоды (декабрь-март) все три водохранилища Камского каскада срабатывают и с первого апреля отметки Камского г/у достигают 101,9-103,5 м, Воткинского г/у – 85,9-86,6 м и Нижнекамского г/у – 62,7 м. При этом попуски в нижний бьеф Камского г/у снижаются до 1000 м<sup>3</sup>/с, Воткинского г/у – 1400 м<sup>3</sup>/с и Нижнекамского г/у – 1800 м<sup>3</sup>/с.

Наряду с исследованием режима работы Камского каскада водохранилищ в период высокой водности, также исследованы режимы работы этого каскада в периоды с низкой и аномально-низкой водностью. Как видно из табл. 1 в качестве модели низкой водности принят период 1933/1934-1938/1939 гг., т.е. шестилетний период, когда в бассейне р. Камы устанавливается исключительно натяжной маловодный период. Результаты имитационного эксперимента показывают, что Камское водохранилище начинает наполняться с третьей декады апреля (предположительная отметка 101,0 м) и наполняется до НПУ (108,5 м) в конце первой декады июня. На этой отметке остается до конца июля. Начиная, с конца июля Камское водохранилище начинает срабатываться и к концу апреля доходит до отметки 102,0 м. Попуски через Камский г/у в первую декаду апреля устанавливаются 600-800 м<sup>3</sup>/с, в зависимости от водности, а далее начинают повышаться и в конце апреля достигают 1800-2400 м<sup>3</sup>/с. Повышенный объем попусков держится до конца второй половины июня. С первого июля начинается снижение попусков через Камской г/у и на начало сентября составляет 1000-1200 м<sup>3</sup>/с. В осенне-зимнее месяцы через Камский г/у устанавливаются минимальные попуски. Если в октябрь-ноябрь месяцы через Камский г/у устанавливаются попуски в размере 1000 м<sup>3</sup>/с, то в зимние месяцы они снижаются до 700 м<sup>3</sup>/с.

Воткинский г/у перед половодьем (01 Апреля) находится на отметке 85,43 м. Далее за вторую и третью декады апреля немного срабатывается и устанавливается на отметке 85,23 м. Далее водохранилище Воткинского г/у начинает наполняться и в конце июля достигает отметки 89,0 м (НПУ). Достигая НПУ, Воткинский г/у начинает постепенно срабатываться, сначала держится на отметке 88,7 м до конца ноября, и затем до конца марта снижается до отметки

85,4 м. С началом половодья попуски через Воткинский г/у составили 1100 м<sup>3</sup>/с и далее они начали расти, и в середине июня достигли 2400 м<sup>3</sup>/с, а затем началось снижение попусков через Воткинский г/у и до конца ноября установились в пределах 1300-1100 м<sup>3</sup>/с.

В исключительно маловодные годы (P=97-99%) с целью обеспечения гарантированных навигационных попусков требуется сработка Камского водохранилища в навигационный период до отметки 107,5 м с середины июня до конца июля, и до отметки 106 м начиная с первого августа до конца ноября. При всех условиях водности отметки предельной сработки Камского водохранилища в навигационный период не опускается ниже 106,0 м, за исключением аномального года при обеспеченности P=99%, начиная с середины ноября отметка водохранилища Камского г/у снизились до 105,5 м. В это время Воткинское водохранилище находится в пределах отметок 88,5-87,0 м, а Нижнекамское водохранилище срабатывается с отметки 63,0 м до отметки 62,7 м. Следует отметить, что не зависимо от водности года во всех имитационных экспериментах изменения расходов воды в нижних бьефах гидроэлектростанций при суточном и недельном регулировании допускаются в пределах от базисного расхода до полной пропускной способности всех турбин. Минимальный уровень нижнего бьефа в летний период Камского г/у – 87,0 м, Воткинского г/у – 66,0 м и Нижнекамского г/у – 60,0 м. Минимальный уровень нижнего бьефа в зимний период Камского г/у – 86,5 м, Воткинского г/у – 65,8 м и Нижнекамского г/у – 59,5 м

### Выводы

1. В сложившейся водохозяйственной практике не разработаны единые (унифицированные) подходы для определения эффективного алгоритма режима работы каскада водохранилищ. В нашем подходе основным критерием для поиска эффективного алгоритма определения рациональных режимов работы каскада гидроузлов предлагается минимизации максимальных отклонений требований каждого участника водохозяйственного комплекса от их оптимальных значений.

2. При исследовании режимов работы Камского каскада гидроузлов большое значение имеет анализ и оценка эффективности работы этого каскада в период половодья и в период межени. При этом, период

половодья для Камского каскада гидроузлов является наиболее ответственным периодом связанным не только с пропуском весеннего половодья, когда к водохранилищам каскада приходит до 2/3 годового стока р. Камы, и создания запасов воды для использования в последующую межень, но и с необходимостью участия Камского каскада гидроузлов в формировании ежегодного специального весеннего попуска в низовья р. Волги по специальному графику.

3. Проведенный имитационный эксперимент со всей очевидностью показал, что модель «IMIT-BALANS» позволяет максимально полно реализовать сложившиеся природно-хозяйственные и эколого-водохозяйственные условия при определении режимов работы Камского гидроузла и тем самым избежать сколь либо значимых ошибок и обеспечить информацией ответственных лиц для принятия необходимых управленческих решений.

#### Библиографический список

1. Воропаев Г.В., Исмаилов Г.Х., Федоров В.М. Проблемы управления водными

ресурсами Арало-Каспийского региона. / Отв. ред. В.Г. Пряженская. М.: Наука, 203.427 с.

2. Теория прогнозирования и принятия решений. М.: Высшая школа, 1977. 351 с.

3. Исмаилов Г.Х., Ваганов Г.А. Оценка притока воды к гидроузлам Камского каскада водохранилищ. // Природообустройство. 2014. № 5. С. 66-70

Материал поступил в редакцию 21.03.2017 г.

#### Сведения об авторах

**Исмаилов Габил Худуш оглы**, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник, ИВП РАН, Институт водных проблем Российской академии наук; 119333, г. Москва, ул. Губкина, д. 3; e-mail: gabil-1937@mail.ru; тел. 8(963)633-2329.

**Ваганов Георгий Андреевич**, инженер проектировщик 1 категории Информационно-аналитический центр регистра кадастра; ФГБОУ ВО РГАУ. – МСХА имени К.А. Тимирязева), 127550, Москва, ул. Прянишниковая, д. 19; e-mail: gavaganov@yandex.ru; тел. 8(916)654-64-79.

#### G.H. ISMAIYLOV

Institute of water problems of the Russian academy of sciences, Moscow, the Russian Federation

#### G.A. VAGANOV

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

## SIMULATION OF MODES OF OPERATION OF THE KAMA RESERVOIRS CASCADE USING THE MODEL «IMIT-BALANS»

*There is developed a complex methodology of analysis and assessment of rational modes of operations of the Kama cascade of hydraulic works under changing natural and economic conditions. For solving the task of searching optimal modes of the Kama cascade of hydraulic works a special algorithm is developed working in the simulation regime and using principles of the algorithm of maximal flow.*

*Accordingly the management task of volume and solutes concentration of river water is reduced to the multi criterion task of making decision and for these purposes in the work there is used a principle of the so-called fair concessions. For the search of the functioning rational regimes of the Kama cascades of hydraulic works a software complex «IMIT-BALANS» is used. In the examined problem stating the task of determination of the rational modes of operations of the Kama cascade of the waterworks is a dynamic task. For its description there are used difference equalizations of a balance type (water and salt balance) and equalizations describing water movement in the river channel. The state of the system described by the corresponding equalizations on every rated period of time must be optimal not only for this period of time and for this river reach but also for the whole period of regulation taking into account all reaches of the river system. The conducted simulation experiment showed with all evidence that the model «IMIT-BALANS» allows maximally realize the established natural-economic and ecological-water management conditions at determination of operation modes of the Kama cascades of the hydraulic units and thus to avoid any significant errors and to inform responsible persons for making necessary management decisions.*

*Regulation of river flow, basic normative levels and capacities of reservoirs, simulation system, multi-criteria methods of optimization, reservoir emptying and filling, time series.*

## References

1. Voropaev G.V., Ismaiyllov G.H., Fedorov V.M. Problemy upravleniya vodnymi resursami Aralo – Kaspijskogo regiona. / Otv. red. V.G. Pryazhenskaya. M.: Nauka, 2003. 427 s.
2. Teoriya prognozirovaniya i prinyatiya reshenij. M.: Vysshaya shkola 1977. 351 s.
3. Ismajylov G.H., Vaganov G.A. Otsenka pritoka vody k hydrouzlam Kamskogo kaskada vodohranilishch. // Prirodoobustrojstvo. 2014. № 5. S. 66-70

The material was received at the editorial office  
21.03.2017

## Information about the authors

**Ismajylov Gabil Khudush ogly**, doctor of technical sciences, professor, Chief researcher, Institute of water problems of the Russian academy of sciences; 119333, Moscow, ul. Gubkina, d.3; e-mail: gabil-1937@mail.ru; тел. 8(963)633-2329.

**Vaganov Georgij Andreevich**, engineer-designer of the 1<sup>st</sup> category, Information-analytical center of register and cadastre; FSBEI HE RGAU-MAA named after C.A. Timiryazev, 127550, Moscow, ul. Pryanishnikova, d.19; e-mail: gavaganov@yandex.ru; тел. 8(916)654-64-79.

УДК 502/504:626.823.91:532.5

**Ю.М. КОСИЧЕНКО, А.Ю. ГАРБУЗ**

Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Российский научно-исследовательский институт проблем мелиорации» (ФГБНУ «РосНИИПМ», г. Новочеркасск, Российская Федерация)

## РАСЧЕТНАЯ ОЦЕНКА ВОДОПРОНИЦАЕМОСТИ ТРЕЩИН БЕТОННЫХ ОБЛИЦОВОК КАНАЛОВ НА ОСНОВЕ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ МЕТОДОВ

*Целью исследований является получение расчетных зависимостей для определения водопроницаемости облицовки при наличии трещин, с использованием гидравлических методов. Рассмотрены две схемы движения воды через трещину: истечение в атмосферу и грунт основания при ламинарном режиме. Приведены выводы теоретических формул для расчета водопроницаемости трещин бетонных облицовок с использованием гидравлических методов. Используя уравнение Бернулли, получены расчетные зависимости удельного расхода через трещины при истечении в атмосферу и в грунт основания. На основе методов теории фильтрации даны расчетные формулы удельного расхода через закольматированные трещины при истечении в грунт основания. Найденные расчетные формулы сопоставлены с известными зависимостями Г.М. Ломизе для гладких и шероховатых трещин, а также А.Д. Альтицуля при истечении через прямоугольное отверстие. Проведенными расчетами установлено, что при кольматации трещин облицовок каналов удельный расход через трещины существенно снижается до 8 и более раз. В связи с этим самокольматацию трещин можно рассматривать как естественное противofiltrационное мероприятие.*

*Уравнение Бернулли, бетонная облицовка, водопроницаемость облицовки, гладкие и шероховатые трещины, кольматация, удельный фильтрационный расход.*

**Введение.** Бетонные облицовки каналов и лотки оросительных систем, находящиеся в эксплуатации более 30 лет, имеют значительные повреждения вследствие воздействия на бетон атмосферных факторов, перехода температуры через 0°C, когда многократно наблюдаются циклы замораживания-оттаивания, а также происходит неравномерная просадка основания. Это часто приводит к образованию и раскрытию трещин в облицовке. Длина и ширина значительных трещин, возникших в ходе строи-

тельства, после 100 циклов замораживания и оттаивания возрастает соответственно в 2-5 и 10-30 раз[1]. При этом наиболее уязвимым элементом облицовки являются швы, которые часто разрушаются через 10-15 лет.

Особенно подвержены нарушению стыковых соединений лотковые конструкции – акведуки, консольные водосбросы (их концевая часть), лотковые оросительные каналы. В лотке в результате воздействия солнца, воды и ветра образуются волосяные трещины, которые с течением времени расширяются.