

МОРСКИЕ И ВНУТРЕННИЕ ВОДНЫЕ ПУТИ, ГИДРОТЕХНИЧЕСКИЕ СООРУЖЕНИЯ И ПОРТЫ

УДК 656.627.3

М. А. Колосов,
д-р техн. наук, профессор,
ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова;

С. Ю. Ладенко,
канд. техн. наук,
ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова

О НЕОБХОДИМОСТИ ПОДГОТОВКИ ПАВЛОВСКОГО ШЛЮЗА К ПРОПУСКУ ПАВОДКОВЫХ ВОД

ON THE PREPARATION OF THE PAVLOVSK GATEWAY FOR PASSAGE OF HIGH WATERS

В статье приводятся результаты оценки технического состояния шлюза Павловской ГЭС по данным обследования. Показано, что пропуск паводковых вод через шлюз может привести к значительным разрушениям его камеры. По данным наблюдений уточняются максимальные расходы притока половодья обеспеченностью 1 и 0,1 %, моделируется гидрограф пропуска половодья 0,1 % обеспеченности, рассчитывается динамика отметок поверхности воды верхнего и нижнего бьефов Павловской ГЭС. Показано, что пропуск половодья можно осуществить без открытия отверстий шлюза для сброса воды.

The article presents the results of evaluation of technical condition gateway of Pavlovskaya HPP. It is shown that the pass of flood waters through the gateway can lead to significant destruction of his camera. The calculation of the maximum flow through the waterworks showed that flood passage may be effected without opening holes gateway.

Ключевые слова: камера шлюза, пропуск половодья, гидрологический режим, максимальный расход, норма стока, половодье, гидроузел, водопропускные сооружения.

Key words: gateway, the dam, flood, hydrological regime, the maximum runoff, flooding, hydro-technical constructions.



ПАВЛОВСКИЙ высоконапорный шлюз предназначен как для пропуска судов, так и для пропуска воды в период катастрофических паводков. Однако за весь период эксплуатации с 1958 г. через шлюз проходят только суда, пропуск паводковых вод через его камеру не проводился. Все паводковые воды сбрасываются через отверстия водосброса водосливной плотины.

Обследование конструкций камеры шлюза (2006–2008) показало, что поверхности лицевых стен камеры имеют значительные выколы, трещины, обнажения арматуры. Особенно интенсивные разрушения происходят в зоне колебаний нижнего бьефа, а также в зоне межсекционных температурно-осадочных швов.

Гидродинамические нагрузки, возникающие при пропуске паводковых вод через верхнюю голову шлюза, могут привести к интенсивному разрушению бетона в стенах и днище камеры, а их воздействие на переливную стенку верхней головы может вызвать дальнейшее разрушение ее бетона.

Проводимые Управлением Комводпути текущие преддекларационные обследования (2008, 2013) не дают оценку возможных последствий для технического состояния камеры и механического оборудования шлюза при пропуске паводка. В декларациях безопасности не приводится и вероятность наступления подобных событий.

В настоящей работе представлены результаты анализа гидрологических условий р. Уфы в створе Павловкой ГЭС, дается оценка величины максимальных расходов притока половодья, а также оценивается возможность осуществить пропуск половодья расчетной обеспеченности без открытия камеры шлюза для сброса воды.

Цель проведенных исследований — моделирование пропуска половодья расчетной обеспеченности через водопропускные сооружения Павловской ГЭС с учетом изменения гидрологического режима р. Уфы за период эксплуатации ГЭС. В работе были использованы проектные данные института «Энергосетьпроект» (Москва, 1970 г.), АО «Самарагидропроект» (Самара, 1995 г.), а также данные наблюдений службы эксплуатации Павловской ГЭС (за период 1959–2013 гг.).

Изучению изменений количественных характеристик стока уделяется большое внимание в отечественной и зарубежной литературе. Фундаментальные исследования проведены А. И. Чеботаревым [1]. И. А. Шикломановым [2] рассматривается современное состояние проблемы, методы учета и оценки влияния хозяйственной деятельности на гидрологический режим и водные ресурсы для различных физико-географических условий. Для р. Уфы были проведены исследования изменения водности рек в связи с климатическими условиями и антропогенными изменениями на водосборе бассейна р. Белой в период 1936–2006 гг. [3, с. 20–26].

Река Уфа берет начало в Уральских горах и впадает в р. Белую справа у г. Уфы. Длина водотока — 918 км, площадь водосбора — 53 100 км². Бассейн р. Уфы охватывает Уральские горы и их западное предгорье, лесную зону. Речная сеть хорошо развита, сравнительно небольшие, но многочисленные притоки впадают в основном справа. Река имеет отчетливо выраженное продолжительное весеннее половодье, неустойчивую летне-осеннюю межень, часто с дождевыми паводками и длительную низкую зимнюю межень. Питание водотока по характеру смешанное и происходит главным образом за счет снеготаяния и отчасти — летних и осенних осадков. Территория водосбора р. Уфы относится к районам с высоким уровнем развития хозяйства, в то же время основные ландшафтные переформирования здесь произошли еще до начала инструментальных наблюдений за гидрологическим режимом реки, поэтому существующая база данных в основном учитывает их последствия.

Павловское водохранилище расположено в нижнем течении реки на 177 км от ее устья. Площадь водосбора р. Уфы, замыкаемая створом Павловского гидроузла, составляет 47 100 км². Наполнение водохранилища началось в 1958 г., в апреле 1960 г. была достигнута отметка НПУ. Назначение гидроузла — энергетика, водный транспорт, водоснабжение г. Уфы и населенных пунктов, расположенных ниже, рыбное хозяйство, рекреация. Длина водохранилища при НПУ 150 км, наибольшая ширина 1,8 км (средняя — 0,8 км), наибольшая глубина 35 м (средняя — 11,7 м), площадь зеркала при НПУ 115,9 км², площадь зеркала при УМО 57,5 км², полный объем 1,41 км³, полезный — 0,895 км³, мертвый объем 0,46 км³, НПУ = 140,00 м, ФПУ = 142,00 м, УМО = 128,50 м. Водохранилище обеспечивает сезонное, недельное и суточное регулирование, аккумулируя до 16 % притока половодья. Весеннее наполнение происходит с середины апреля в течение от одного до полутора месяцев в соответствии с диспетчерским графиком. В зимний сезон водохранилище подвергается интенсивной сработке. Резкое понижение уровня происходит в среднем в первой декаде января. Заканчивается сработка в первой половине апреля. Пропуск воды на Павловской ГЭС осуществляется через гидротурбины, водослив, шлюз. Общая пропускная способность сооружений гидроузла по проекту при НПУ составляет 6640 м³/с, при ФПУ — 8150 м³/с.

Изучение гидрологических условий в бассейне р. Уфы ведется с 1912 г. с открытия водомерных постов у с. Караидель и пос. Красный Ключ. В 1914–1916 гг. сеть водомерных постов была расширена. Накопленные материалы наблюдений позволили при проектировании оценить водохозяйственные условия в створе Павловской ГЭС по восстановленным рядам продолжительностью 44 года. Проектные гидрологические характеристики были получены с 1913 по 1941 г. по связи среднемесячных расходов воды р. Уфа у пос. Красный Ключ и у с. Караидель, а за период с 1942 по 1958 г. — приняты равными расходам воды у пос. Красный Ключ, расположенного 10 км ниже.

Приток в Павловское водохранилище за период эксплуатации рассчитывается суммированием расходов воды, поступающих через входные створы в водохранилище (р. Уфа — с. Янбай, р. Юрюзань — с. Ятияш, р. Туй — с. Гумбино и р. Сарс — с. Султанбеково), контролирующее поступление воды с 90 % площади его водосбора. Приводка к устью производится введением коэффициента 1,04, учитывающего разницы площадей водосбора в контрольном створе и устье р. Юрюзань. Приемлемость такого способа расчета обоснована институтом «Энергосетьпроект».

Норма и изменчивость годового притока к створу ГЭС

Известно, что при создании водохранилищ основные количественные изменения годового стока рек происходят в результате дополнительного испарения с водного зеркала, аккумуляции в чаше водохранилища и водозабора на различные нужды. Согласно [1] влияние испарения с водохранилищ на годовой сток в зоне избыточного и достаточного увлажнения не превышает 1 %, что находится в пределах погрешности расчетов. Водный баланс Павловского водохранилища, рассчитанный за период наблюдений 1961–1967 гг., приведен в [4]. По опубликованным данным, испарение с водного зеркала, водопотребление и аккумуляция в чаше водохранилища составляют незначительную долю баланса, а само водохранилище мало влияет на величину годового стока — нормы стока в п. г. т. Павловка (верхний бьеф, створ гидроузла) и Павловской ГЭС (нижний бьеф) практически не отличаются.

На рис. 1 приводится график динамики среднегодового расхода притока по проектному ряду, приведенному по аналогу р. Уфа — п. г. т. Красный Ключ (45 лет) и наблюдениям за притоком воды в створе ГЭС периода эксплуатации (54 года). Статистические параметры рядов приведены в табл. 1. Относительные средние квадратические погрешности расчетных значений среднегодового расхода не превышают 10 %, следовательно, ряды являются репрезентативными [5].

Оценка однородности (стационарности) рядов годового расхода притока проведена в соответствии с [5; 6]. Расчетные значения статистик Стьюдента и Фишера соответственно равны: $F = 1,63$, $t = 0,53$. Критические значения определены по таблицам [6] при уровне значимости 5 %: $F^* = 1,82$ и $t^* = 2,82$, что больше расчетных значений и позволяет принять гипотезу о стационарности ряда. Таким образом, можно сделать вывод о том, что наличие хозяйственной деятельности в данном случае не оказывает существенного влияния на статистическую однородность ряда, а изменение параметров распределения годового стока р. Уфы в створе Павловской ГЭС под влиянием хозяйственной деятельности значительно меньше изменений, происходящих в результате естественных колебаний водности. Поэтому гидрологические расчеты можно осуществлять по всему ряду наблюдений. Приведенный ряд с количеством членов $n = 99$ представлен на рис. 1. Тенденции изменения среднегодового расхода притока к створу ГЭС по этому ряду не выявлено.

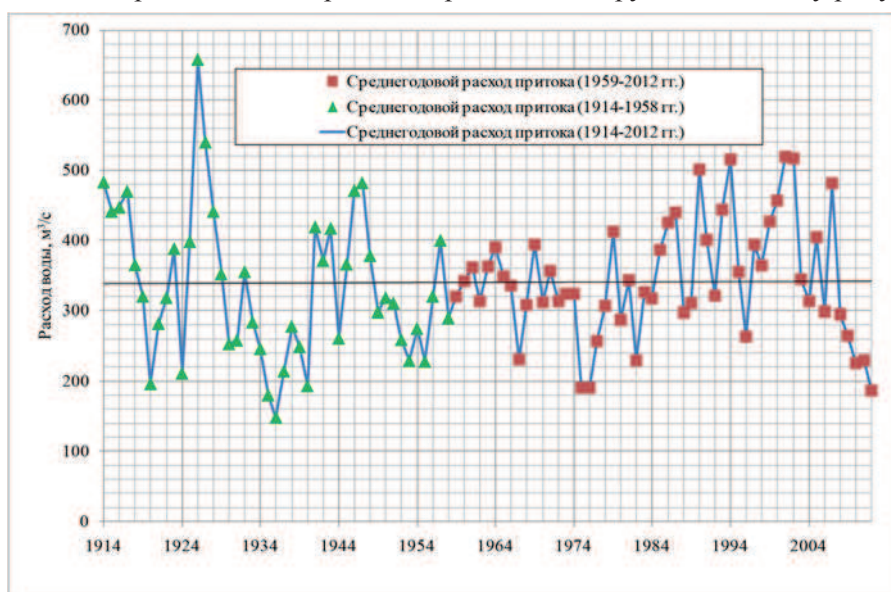


Рис. 1. Среднегодовые значения расхода воды р. Уфа — Павловская ГЭС

Таблица 1

Характеристики рядов среднегодового расхода притока р. Уфа — Павловская ГЭС

№ п/п	Наименование показателя	Проект 1914–1958 гг. (45 лет)	Ряд наблюдений 1959–2012 гг. (54 года)	Приведенный ряд 1914–2012 гг. (99 лет)
1	Средний многолетний расход, м³/с	334	344	340
2	Среднеквадратическое отклонение, σ , м³/с	106	84	94
3	Коэффициент автокорреляции, r	0,58	0,43	0,52
4	Коэффициент вариации, C_v	0,32	0,24	0,27
5	C_s/C_v	2	2	2
	Относительная средняя квадратическая погрешность, %	9,3	5,2	5,0
6	Среднегодовой расход, м³/с			
	75 %	254	285	272
	95 %	195	215	199

Большие значения коэффициентов автокорреляции рядов среднегодового притока расхода р. Уфы в створе Павловской ГЭС свидетельствуют о цикличности колебаний, заключающейся в смене периодов маловодных и многоводных лет (с пониженной или повышенной по сравнению с нормой водностью). Такая цикличность характерна для большинства рек континентальных областей в естественных условиях [2].

Максимальный приток половодья к створу Павловской ГЭС

Для р. Уфы максимальные расходы наблюдаются в период весеннего половодья [4]. К основным факторам весеннего половодья относятся запасы воды в снежном покрове, интенсивность и продолжительность снеготаяния, наличие или отсутствие дождей.

Максимальные расходы притока воды по проектным данным и данным наблюдений 1960–2013 гг. представлены на рис. 2, объема притока половодья — на рис. 3. Ряды были признаны однородными по критериям Фишера и Стьюдента, что дало возможность рассчитать гидрологические характеристики по рядам продолжительностью 101 год для максимального расхода притока (1913–2013) и 79 лет для объема притока половодья (1913–2013).

На графиках отмечается тенденция к уменьшению величины среднесуточных максимальных расходов. Проверка гипотезы наличия статистически значимого тренда в ходе многолетних колебаний максимального расхода притока выполняется в соответствии с [6]. Уравнение линейного тренда и величина достоверности аппроксимации приведены на рис. 2. Средняя квадратическая ошибка коэффициента корреляции:

$$\sigma_R = \frac{(1-R)}{\sqrt{(n-1)}} = 0,098.$$

При уровне значимости 5 % получается значение 0,196, что больше коэффициента корреляции $R = 0,144$, следовательно, гипотеза неоднородности ряда во времени не признается. Также не выявлено тенденции изменения объема притока половодья и его продолжительности (рис. 3 и 4).

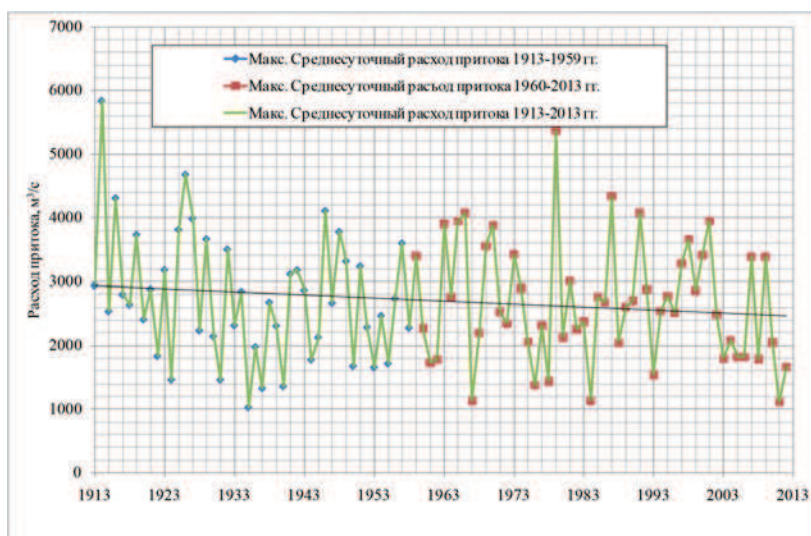


Рис. 2. Динамика максимального расхода притока воды р. Уфа — Павловская ГЭС

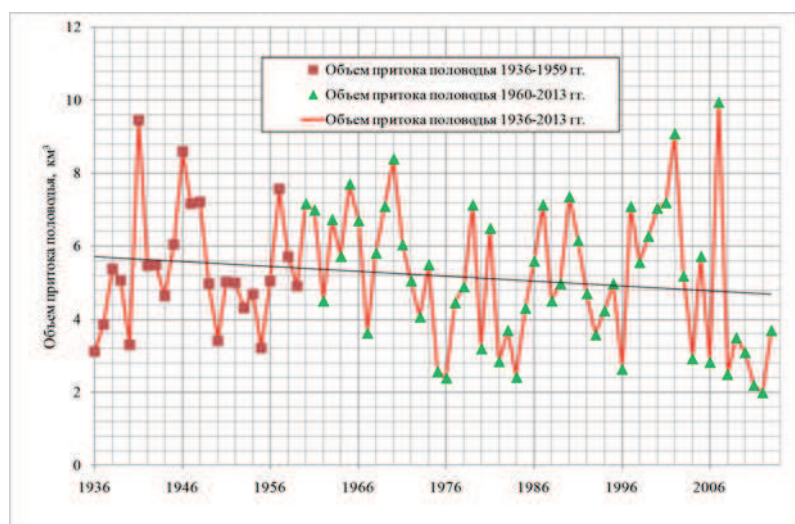


Рис. 3. Динамика объема притока половодья р. Уфа — Павловская ГЭС

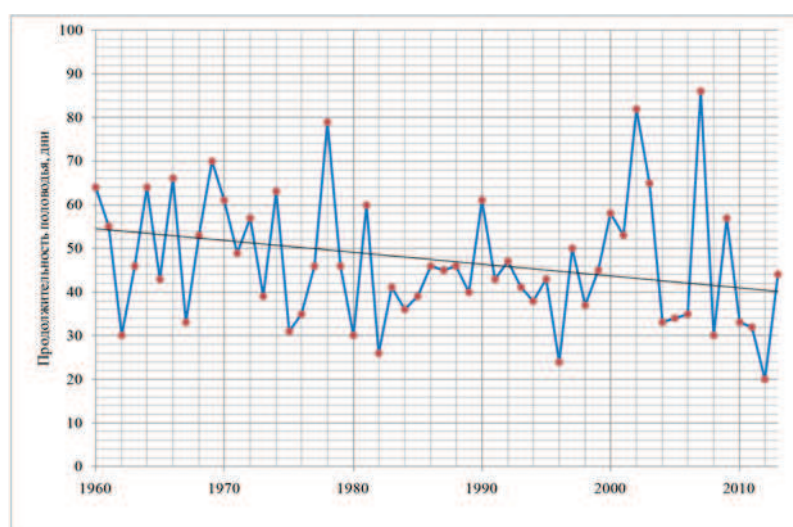


Рис. 4. Динамика продолжительности половодья (количество дней с наблюдаемыми среднесуточными расходами воды больше $500 \text{ м}^3/\text{с}$) р. Уфа — Павловская ГЭС, 1960–2012 гг.

В табл. 2 приведены некоторые статистические характеристики максимального притока половодья по ряду 1913–2013 гг. Расчетные значения получены с учетом современной нормативной базы СП 33-101-2003 [5].

В результате проведенного анализа можно сделать вывод, что тенденции к изменению величины максимального расхода, объема половодья и его продолжительности не выявлено, а относительная средняя квадратическая погрешность расчетного значения не превышает допустимую (20 % для максимального расхода) [5].

Таблица 2

Характеристики максимального притока половодья р. Уфа — Павловская ГЭС

	Наименование показателя	Значение показателя	Значение показателя
		Объем притока половодья	Среднесуточный максимальный расход половодья
1	Продолжительность ряда	1936–2013 гг. (78 лет)	1913–2013 гг. (101 год)
2	Среднее значение	5,20 км ³	2690 м ³ /с
3	Коэффициент вариации, C_v	0,35	0,35
4	Среднеквадратическое отклонение, σ	1,83 км ³	949 м ³ /с
5	Относительная средняя квадратическая погрешность, %	4,0	5,3
6	Коэффициент автокорреляции, k	0,19	0,02
7	C_s/C_v	3	3
8	Расчетные характеристики		
	0,1 %	14,0 км ³	7170 м ³ /с
	1 %	10,8 км ³	5950 м ³ /с

Расчет пропуска половодья расчетной обеспеченности в современных условиях

Расчет пропуска половодья проводился по модельному гидрографу притока воды к створу Павловской ГЭС, построенному по статистическим характеристикам ряда наблюдений с учетом диспетчерского графика и опыта эксплуатации ГЭС.

Основные этапы расчета:

- 1) обоснование выбора гидрографа-модели;
- 2) обоснование модели работы водопропускных сооружений гидроузла в соответствии с диспетчерским графиком и опытом эксплуатации;
- 3) проведение водно-балансовых расчетов пропуска половодья через водопропускные сооружения;
- 4) построение модели пропуска половодья через гидроузел;
- 5) определение максимальных расчетных расходов и уровней.

При регулирующем влиянии водохранилищ гидрограф половодья трансформируется в гидрограф сброса, максимальные расходы при этом уменьшаются. Гидрографы половодий формируются природными факторами и не зависят от размеров сооружений и водохранилища. На сбросные расходы оказывают влияние ограничения максимальных расходов воды, допускаемых к пропуску в нижний бьеф, порядок открытия водопропускных и судопропускных сооружений в период наполнения водохранилища, требования гидроэнергетики, уровень сработки к началу половодья и другие факторы.

Для оценки возможности пропуска расчетного половодья 0,1 %-ной обеспеченности через водопропускные отверстия расчетный гидрограф половодья 0,1 %-ной обеспеченности моделируется в соответствии с действующим нормативным документом СП 33-101-2003 [5].

Необходимым условием корректного расчета является правильный выбор модели гидрографа. В [5] устанавливаются основные требования к расчетной модели по максимальному расходу и объему притока. Анализ экстремальных значений этих параметров за период эксплуатации позволил определить их расчетные значения.

За период наблюдений 1959–2012 гг. наибольшие расходы весеннего половодья наблюдались в 1965 г. (3944 м³/с); 1966 г. (4070 м³/с); 1979 г. (5370 м³/с); 1987 г. (4337 м³/с); 1991 г. (4080 м³/с); 2001 г. (3948 м³/с).

Наибольшие объемы половодья наблюдались в 1979 г. (7,14 км³); 2001 г. (7,20 км³); 2002 г. (9,09 км³); 2007 г. (9,95 км³).

Из сопоставления характеристик выдающихся половодий наибольший объем и максимальный расход воды наблюдался в 1979 и 2001 гг. Продолжительность половодья в 2001 г. составила 53 дня, а в 1979 г. — 46 дней. Для моделирования наиболее неблагоприятных условий пропуска половодья целесообразно использовать в качестве модели гидрограф более длительного половодья 2001 г. (рис. 5) при уточненных расчетных значениях максимального расхода и объема притока половодья.

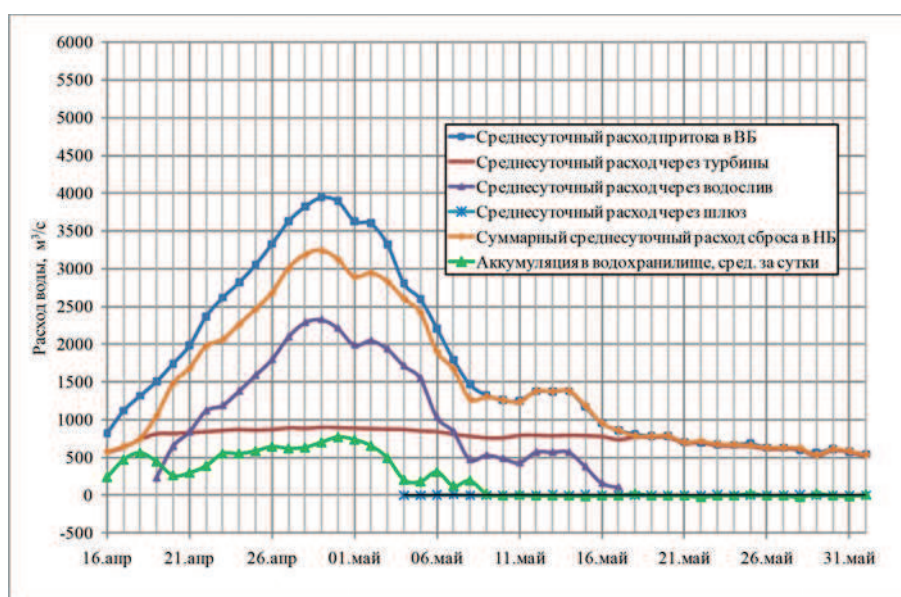


Рис. 5. Гидрограф пропуска половодья 2001 г. через водопропускные сооружения Павловской ГЭС (шлюз был открыт для пропуска судов с 4 мая)

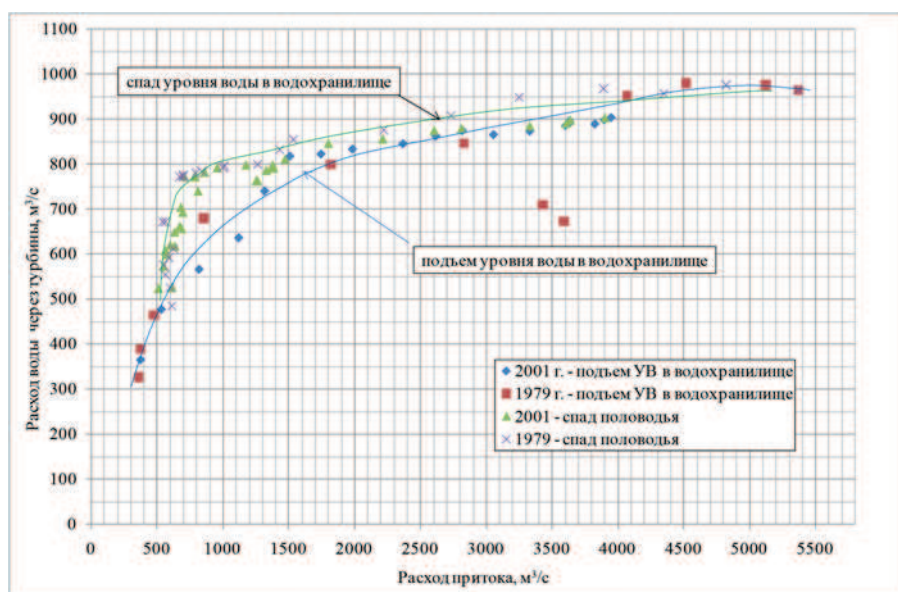


Рис. 6. Расход воды через турбины ГЭС в зависимости от расхода притока на подъеме и спаде половодья за 1979 и 2001 гг.

Условия пропуска половодья (через турбины ГЭС, водослив, шлюз) моделируются с учетом диспетчерского графика, а также опыта пропуска экстремальных расходов воды в 1979 и 2001 гг. В эти годы водохранилище к началу весеннего половодья было сработано в соответствии с диспетчерским графиком и прогнозом половодья до минимального уровня 128,50 м, расход воды через турбины назначался в зависимости от притока (рис. 6).

Моделирование пропуска расчетного половодья обеспеченности 1 % (основной расчетный случай) и 0,1 % (поверочный расчетный случай) выполнялось водно-балансовым методом. Полученные результаты показали, что осуществить пропуск половодья расчетной обеспеченности можно без открытия отверстий шлюза для сброса воды (рис. 7). Расчетные уровни верхнего и нижнего бьефов представлены на рис. 8.

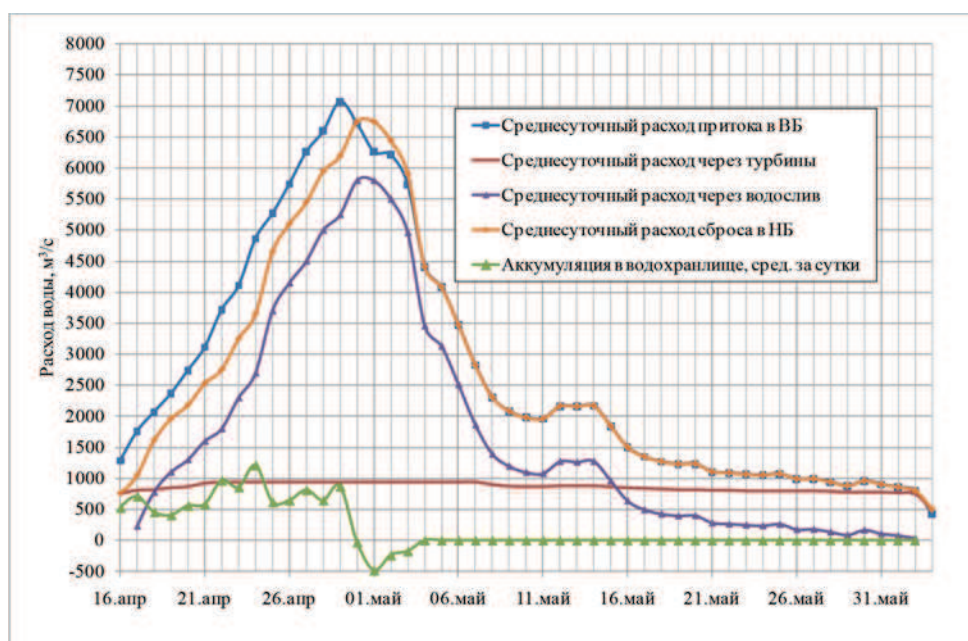


Рис. 7. Модель пропуска половодья 0,1 %-ной обеспеченности через водопропускные сооружения Павловской ГЭС

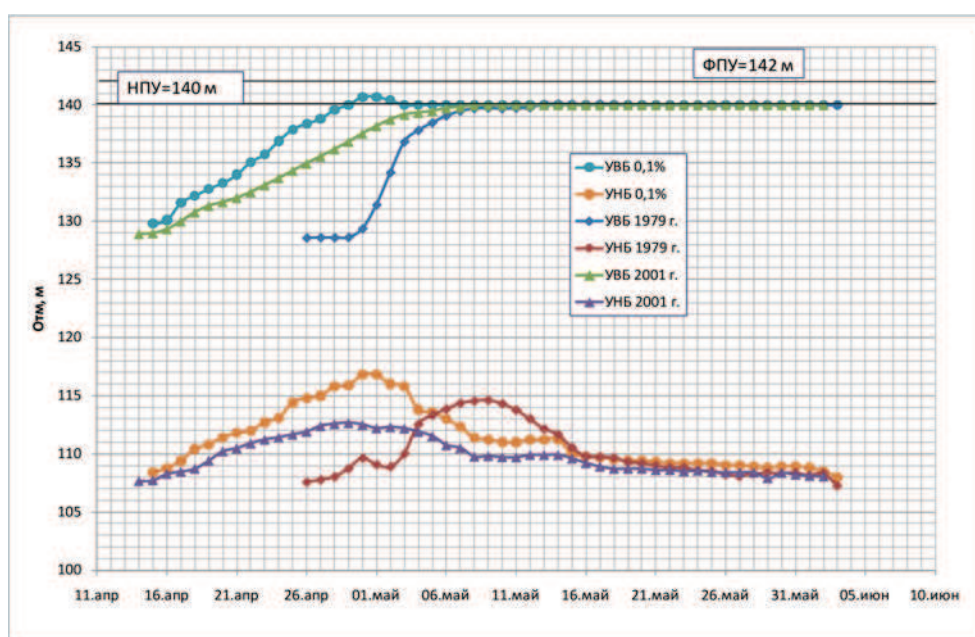


Рис. 8. Расчетные уровни воды 0,1 %-ной обеспеченности в верхнем и нижнем бьефах Павловской ГЭС

Таким образом, выполненный анализ гидрологических условий р. Уфы в створе Павловской ГЭС за период 1913–2013 гг. показал, что за исследуемый период (101 год) значительных изменений среднегодового и максимального притока к створу ГЭС не произошло. С помощью модельного гидрографа пропуска половодья 0,1 %-ной обеспеченности, построенного с учетом натурных данных по притоку и опыта эксплуатации ГЭС, установлено, что открытия камеры шлюза для пропуска паводковых расходов расчетной обеспеченности не требуется.

Выводы

Для обеспечения надежной и безопасной работы водопропускных сооружений ГЭС при длительном периоде эксплуатации водохозяйственной системы необходимо уточнять проектные характеристики притока воды к створу ГЭС и выполнять оценку возможных изменений гидрологического режима водотока.

Анализ ряда наблюдений среднегодового притока р. Уфы в створе Павловской ГЭС не выявил изменения нормы стока и подтвердил соответствие натурных данных проектным. При этом отмечена цикличность колебаний, заключающаяся в смене периодов с пониженной или повышенной по сравнению с нормой водностью. Такая цикличность характерна для большинства рек континентальных областей в естественных условиях.

За период наблюдений не выявлено тенденций к изменению характеристик максимального притока половодья (объем половодья, максимальный расход, продолжительность половодья). Это позволило по данным наблюдений уточнить статистические характеристики максимального притока к створу ГЭС и с учетом диспетчерского графика и опыта эксплуатации смоделировать пропуск половодья расчетной обеспеченности через водопропускные сооружения ГЭС.

Проведенное исследование показало, что при половодье 0,1 %-ной обеспеченности сбросы воды из водохранилища могут быть произведены через водосливную плотину гидроузла, необходимость использования шлюза для пропуска половодья расчетной обеспеченности маловероятна.

Список литературы

1. Чеботарев А. И. Вопросы влияния хозяйственной деятельности на водный режим и водные ресурсы / А. И. Чеботарев // Тр. ГГИ. — Л.: Гидрометеиздат, 1973. — Вып. 206.
2. Шикломанов И. А. Влияние хозяйственной деятельности на речной сток / И. А. Шикломанов. — Л.: Гидрометеиздат, 1989. — 334 с.
3. Красногорская Н. Н. Оценка изменений водности реки Белой как фактора обеспечения безопасности жизнедеятельности человека / Н. Н. Красногорская, Т. Б. Фащевская [и др.] // Безопасность жизнедеятельности. — 2009. — № 3 (98).
4. Ресурсы поверхностных вод СССР. — Л., 1972. — Т. 11. Прил.
5. СП 33-101-2003. Определение основных расчетных гидрологических характеристик. — М., 2004.
6. Рекомендации по статистическим методам анализа однородности пространственно-временных колебаний речного стока. — Л.: Гидрометеиздат, 1984. — 78 с.