

05.23.07 ГИДРОТЕХНИЧЕСКОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО

Обоснование максимальных расходов воды для гидроузла на малой горной реке Эшкаконе

УДК 627.81/627.83

Волосухин Я.В.

Генеральный директор, Инженерный консалтинговый центр «Безопасность гидротехнических сооружений» (г. Новочеркасск); e-mail: mail@ibgts.ru

Мордвинцев М.М.

Инженерный консалтинговый центр «Безопасность гидротехнических сооружений», (г. Новочеркасск); e-mail: mmm-48@mail.ru

Статья получена: 21.05.2020. Рассмотрена: 02.06.2020. Одобрена: 12.06.2020. Опубликовано онлайн: 30.06.2020. ©РИОР

Аннотация. В работе анализируются максимальные расходы р. Подкумок (гидропост г. Кисловодск) и на малой горной р. Эшкаконе за период 1936–1941 гг. и 1944–2019 гг. с учетом данных службы эксплуатации Эшкаконе гидроузла, сданного в эксплуатацию в декабре 1989 г.

В дождевой паводок 22 июня 2002 г. на водосбросном сооружении Эшкаконе гидроузла служба эксплуатации зафиксировала расход примерно 200 м³/с, а на гидропосту г. Кисловодска на р. Подкумок расход воды был равен 328 м³/с. Авторами работы уточнены расходы редкой обеспеченности для Эшкаконе гидроузла с учетом расхода редкой обеспеченности дождевого паводка 22 июня 2002 г.

Ключевые слова: дождевой паводок, водосбросное сооружение, гидропост на р. Подкумок (г. Кисловодск), расходы редкой обеспеченности в створе Эшкаконе гидроузла.

В вопросе о принятии расчетных значений максимальных расходов воды для практики строительства и эксплуатации гидроузлов существует два противоположных мнения: 1) ограничить сверху кривую распределения максимальных расходов и 2) признать, что максимальные расходы малой вероятности превышения достаточно локальны, и что значение нормативов расчетной вероятности превышения максимальных расходов — задача по своей сущности технико-экономическая, решаемая сопоставлением ущербов от разрушения сооружения со стоимостью увеличения размеров водопропускных устройств [2].

В первом случае считается, что применение кривых распределения вероятностей максимальных расходов (биномиальная кривая с положительной асимметрией и подобные ей рас-

JUSTIFICATION OF THE MAXIMUM WATER DISCHARGE FOR THE HYDROELECTRIC COMPLEX ON THE SMALL MOUNTAIN RIVER ESHKAKON

Yakov Volosukhin

General Director, Engineering Consulting Center «Safety of Hydraulic Structures», Novocheerkassk; e-mail: mail@ibgts.ru

Mihail Mordvintsev

Engineering Consulting Center «Safety of Hydraulic Structures», Novocheerkassk; e-mail: mmm-48@mail.ru

Manuscript received: 21.05.2020. **Revised:** 02.06.2020. **Accepted:** 12.06.2020. **Published online:** 30.06.2020. ©РИОР

Abstract. The paper analyzes the maximum costs river Podkumok (gauging station in Kislovodsk) and on the small mountain river

Eshkakon for the period 1936–1941 and 1944–2019 taking into account the data of the operation service of the Eshkakonskoye hydroelectric complex, commissioned in December 1989.

In the rain flood on June 22, 2002 at the spillway structure of the Eshkakon hydroelectric complex, the operating service recorded a flow rate of about 200 m³/s, and at the gauging station in Kislovodsk on the river Podkumok water flow was equal to 328 m³/s. The authors of the work specified the expenses of rare security for the Eshkakon hydroelectric complex taking into account the consumption of rare security of the rain flood on June 22, 2002.

Keywords: rain flood, spillway, gauging station on the river Podkumok (Kislovodsk), expenses of rare security in the alignment of the Eshkakon hydroelectric complex.

пределения), для которых характерно существенное возрастание расходов бездоказательно за пределами длительности наблюдений, т.е. в зоне экстраполяции. Сторонники этой позиции считают, что существует некоторый предел максимальных расходов, переход через который лишен физического смысла. Но как определить этот «предел»?

Оппоненты этого мнения считают наоборот, более логичным установить для особо ответственных сооружений вероятность превышения 0,01% с целью исключить ошибки, обусловленные особенностями гидрологического режима за период наблюдений, либо недостаточностью ряда наблюдений.

И те и другие ссылаясь на различные сведения о половодьях и паводках со всей планеты, приводят примеры инструментальных гидрометрических измерений, из которых видно, что наряду с преобладающей повторяемостью максимальных расходов воды не более 1% нередки случаи, когда вероятность превышения существенно меньше 0,1%.

В данной работе предпринята попытка разобраться, в каких случаях значения максимальных расчетных расходов для практики эксплуатации гидроузлов могут преднамеренно завышаться или занижаться, и какими средствами можно обосновать правильность выбора расчетного максимального расхода (на примере гидрологического обоснования гидроузла на малой горной р. Эшкакон в Карачаево-Черкесской Республике).

Этот объект интересен в следующих отношениях:

- 1) с геоморфологической точки зрения р. Эшкакон является главным истоком бассейна реки Подкумок;
- 2) в бассейне р. Эшкакон более 30 лет функционирует водохранилище (с 1989 г.), снабжающее курорт Кисловодск и Малокарачаевский район питьевой водой;
- 3) ниже плотины Эшкаконского гидроузла по руслу Эшкакон и ниже его устья по руслу Подкумка паводок 2002 г. приобрел катастрофический характер.

Карта бассейна р. Эшкакон представлена на рис. 1.

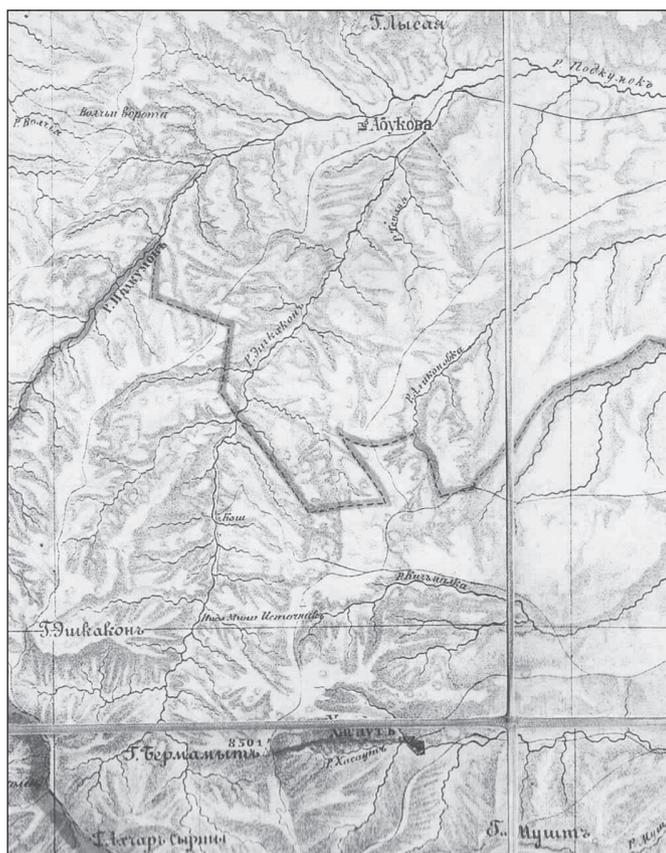


Рис. 1. Карта р. Эшкакон (1850 г.)

Для анализа гидрологических характеристик максимального стока р. Подкумок — гидропост г. Кисловодск (пост — аналог для створа гидроузла на р. Эшкакон) был принят ряд максимальных расходов воды, представленный Росгидрометом за период наблюдений 1936–1941, 1944–2014 гг. ($n = 78$) и результаты расчетов максимальных расходов воды, выполненных институтами «Севкавгипроводхоз» (2016 г.) и «Кубаньводпроект» (из проекта «Защита пос. Белый Уголь от паводковых вод р. Подкумок и Большой Ессентучек Предгорного района» — ООО «ГеоВерсум», 2016).

Результаты расчетов максимального стока представлены в табл. 1.

Максимальный расход характеризуется тремя показателями: средний максимальный расход воды — \bar{Q} , коэффициенты вариации — C_V , и асимметрии — C_S . Согласно СП 33-101-2003 [10] коэффициенты вариации C_V и асимметрии C_S определяют методом моментов по формулам:

$$C_V = (a_1 + a_2/n) + (a_3 + a_4/n) \cdot \tilde{C}_V + (a_5 + a_6/n) \cdot \tilde{C}_V^2; \quad (1)$$

$$C_S = (b_1 + b_2/n) + (b_3 + b_4/n) \cdot \tilde{C}_S + (b_5 + b_6/n) \cdot \tilde{C}_S^2, \quad (2)$$

где $a_1, \dots, a_6; b_1, \dots, b_6$ — коэффициенты, определяемые по приложению Б, табл. Б. 1, для распределения Пирсона III типа и с помощью таблицы из [4] — для распределения Крицкого — Менкеля;

\tilde{C}_V и \tilde{C}_S — соответственно смещенные оценки коэффициентов вариации и асимметрии, определяемые по формулам:

$$\tilde{C}_V = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (k_i - 1)^2}{n - 1}}; \quad \tilde{C}_S = \frac{n \sum_{i=1}^n (k_i - 1)^3}{\tilde{C}_V^2 \cdot (n - 1) \cdot (n - 2)}. \quad (3)$$

Результаты расчета для р. Подкумок — створ г. Кисловодск:

$$\tilde{C}_V = \sqrt{\frac{51,6}{73 - 1}} = 0,85 \quad \tilde{C}_S = \frac{73 \cdot 204,852}{0,85^3 \cdot 72 \cdot 71} = 4,76;$$

$$\frac{\tilde{C}_S}{\tilde{C}_V} = 5,60.$$

При $r(1) = 0$: $C_V = (0 + 1,36/73) + (1,02 + -9,68/73) \cdot 0,85 + (-0,05 + 15,55/73) \cdot 0,72 = 0,89$;

$C_S = (0,03 + 2/73) + (0,92 + -5,09/73) \cdot 4,76 + (0,03 + 8,10/73) \cdot 22,66 = 7,30$; $\frac{C_S}{C_V} = 8,20$.

При $r(1) = 0,3$: $C_V = (-0,02 + 2,61/73) + (1,13 + -19,85/73) \cdot 0,85 + (-0,22 + 34,15/73) \cdot 0,72 = 0,92$;

$C_S = (0,03 + 1,77/73) + (0,93 + -3,45/73) \cdot 4,76 + (0,03 + 8,03/73) \cdot 22,66 = 7,43$; $\frac{C_S}{C_V} = 8,10$.

При $r(1) = 0,5$: $C_V = (-0,02 + 3,47/73) + (1,18 + -29,71/73) \cdot 0,85 + (-0,41 + 58,08/73) \cdot 0,72 = 0,96$;

$C_S = (0,03 + 1,63/73) + (0,92 + -0,97/73) \cdot 4,76 + (0,03 + 7,94/73) \cdot 22,66 = 7,51$; $\frac{C_S}{C_V} = 7,82$.

Таблица 1

Параметры кривой обеспеченности и расчетные величины максимальных расходов воды р. Подкумок — г. Кисловодск (из ПИВР СКГВХ)

| Период наблюдений, источник информации | \bar{Q} , м ³ /с | C_V | C_S | Расходы воды (м ³ /с) обеспеченностью P% | | | | | | |
|--|-------------------------------|-------|-----------|---|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| | | | | 0,01 | 0,1 | 0,5 | 1 | 3 | 5 | 10 |
| 1936–1941, 1944–2008 гг. СКГВХ | 53,1 48,61* | 0,90 | 6 C_V | 872 | 467 | 293 | 236 | 162 | 133 | 101 |
| 1936–1941, 1944–2002 гг. «Кубаньводпроект» | 57,5 51,22* | 0,92 | 4,5 C_V | | | 322 | 262 | 185 | 138 | 113 |
| 1936–1941, 1944–2014 гг. Институт безопасности гидротехнических сооружений | 47,88 | 0,90 | 6 C_V | 786 | 421 | 264 | 213 | 146 | 120 | 91 |
| 1936–1941, 1944–2014 гг. ИКЦ «Безопасность ГТС» | 47,88 | 0,85 | 4 C_V | 594 | 365 | 246 | 203 | 146 | 122 | 93 |

* Значение среднего за многолетие максимального расхода воды по ряду Росгидромета.

Здесь $r(1)$ — коэффициент автокорреляции между смежными членами ряда.

Ряд Росгидромета (до 2014 г.) имеет одно выдающееся значение максимального расхода воды — $328 \text{ м}^3/\text{с}$ (2002).

Согласно СП 33-101-2003, п. 5.16 [10], при учете одного выдающегося значения гидрологической характеристики, входящего в n -летний ряд данных гидрометрических наблюдений, расчетные параметры будут равны:

а) методом моментов:

$$\begin{aligned}\bar{Q} &= \frac{1}{N} \left(Q_N + \frac{N-1}{n-1} \sum_{i=1}^{n-1} Q_i \right) = \\ &= \frac{1}{72} \left(328 + \frac{72-1}{73-1} \cdot 3163,43 \right) = 47,88 \text{ м}^3/\text{с};\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}C_V &= \sqrt{\frac{1}{N} \left[\left(\frac{Q_N}{\bar{Q}} - 1 \right)^2 + \frac{N-1}{n-2} \sum_{i=1}^{n-1} \left(\frac{Q_i}{\bar{Q}} - 1 \right)^2 \right]} = \\ &= \sqrt{\frac{1}{72} \left[\left(\frac{328}{47,88} - 1 \right)^2 + \frac{72-1}{73-2} \sum_{i=1}^{n-1} \left(\frac{Q_i}{\bar{Q}} - 1 \right)^2 \right]} = \\ &= \sqrt{\frac{1}{72} (5,85^2 + 1 \cdot 17,38)} = 0,85;\end{aligned}$$

б) методом приближенного наибольшего правдоподобия в зависимости от статистик λ_2 и λ_3 , определяемых по формулам:

$$\begin{aligned}\lambda_2 &= \frac{1}{N} \left(\lg \frac{Q_N}{\bar{Q}} + \frac{N-1}{n-2} \sum_{i=1}^{n-1} \lg \frac{Q_i}{\bar{Q}} \right) = \\ &= \frac{1}{72} \left(\lg \frac{328}{47,88} + \frac{72-1}{73-2} \cdot (-6,94) \right) = \\ &= \frac{-6,1}{72} = -0,085;\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\lambda_3 &= \frac{1}{N} \left(\frac{Q_N}{\bar{Q}} \lg \frac{Q_N}{\bar{Q}} + \frac{N-1}{n-2} \sum_{i=1}^{n-1} \frac{Q_i}{\bar{Q}} \lg \frac{Q_i}{\bar{Q}} \right) = \\ &= \frac{1}{72} \left(\lg \frac{328}{47,88} \cdot 0,84 + \frac{72-1}{73-2} \cdot 1,31 \right) = \frac{7,06}{72} = \\ &= 0,098.\end{aligned}$$

По номограмме из СНиП 2.01.14-83 или по собоя [4], при $C_V = 0,85$ и полученным значениям статистик 2 и 3 получаем $C_S = (5 - 6) C_V$, т.е. принятое СКГВХ значение $C_S = 6 C_V$ как бы не противоречит требованиям СП. Но отсутствие

четкой определенности этого соотношения по номограмме и отсутствие такого соотношения для максимальных расходов воды в справочнике «Ресурсы поверхностных вод...» [5], позволяет предположить, что в расчете может быть принято соотношение $C_S = 4 C_V$. Результаты расчетов параметров кривой обеспеченности максимальных расходов воды р. Подкумок — г. Кисловодск при $C_V = 0,85$ и $C_S = 4 C_V$ приведены в табл. 1 на последней строке. Заметно значительное расхождение в расходах 0,01% вероятности превышения (46,8%). Причем, это расхождение обусловлено именно разностью между отношениями C_S/C_V .

При наличии в многолетнем ряду одного или нескольких катастрофических максимумов, резко отклоняющихся от общего направления кривой обеспеченности (например, р. Кубань — п. им. Коста Хетагурова, р. Подкумок — г. Кисловодск и др.) часто ни одна из известных формул для вычисления коэффициента асимметрии C_S не дает положительного решения и тогда пытаются подбирать значение C_S произвольно с целью «подогнать» кривую к этим отклоняющимся точкам, становясь тем самым на ложный путь решения задачи. В результате нет уверенности в правильности установления расчетного максимума и получается искаженная повторяемость наблюдаемого катастрофического максимума. В.В. Лебедев [3] отмечает, что верхнюю часть кривой обеспеченности следует проводить не изолированно, а ориентируясь на очертание ее в остальной части, обычно хорошо освещенной наблюдаемыми расходами и являющейся как бы базой для направления кривой в верхней части, т.е. кривая обеспеченности должна проходить не только по самой верхней части, но и по всем остальным точкам, расположенным в средней и нижней частях кривой.

Занимаясь вопросом выяснения влияния различных способов установления величины коэффициента асимметрии на результаты расчета максимальных расходов В.В. Лебедев сформулировал следующие выводы [3]:

- почти по всем исследуемым рекам ни одна из кривых, проведенных при различных C_S , назначенных по соотношению с коэффициентом вариации C_V , не проходит по точкам катастрофических расходов и особенно боль-

шое отклонение этих точек от кривых наблюдается по рекам с большими коэффициентами вариации, при этом, при $C_S = (4 - 5) C_V$ происходит резкое увеличение максимальных расходов при процентах обеспеченности в пределах от 1 до 0,1% и менее;

- чем больше коэффициент C_S , тем аномальнее проходит теоретическая кривая относительно эмпирических точек: в верхней части она резко поднимается вверх, а в средней части значительно опускается, отходя от эмпирических точек, в нижней же части поднимается, приближаясь к прямой линии при обеспеченностях 80–90% и более.

Таким образом, при больших коэффициентах асимметрии $C_S > (4 - 5) C_V$ кривая обеспеченности, как правило, проходит аномально относительно всех точек, и конечная задача — получение максимальных расходов малой обеспеченности — оказывается не разрешенной, так как эти максимальные расходы, определяемые по экстраполируемой части кривой, получаются «значительно завышенными против катастрофических наблюдаемых максимумов, являются фиктивными и возникновения их в бассейне реки при любых неблагоприятных условиях ожидать нельзя», и чем больше коэффициент вариации, тем больше ошибка в определении этих максимумов. Поэтому нужно весьма осторожно принимать C_S и правильнее отказываться от построения кривых обеспеченностей при коэффициентах асимметрии $C_S > 4 C_V$.

В.В. Лебедев рекомендует принимать то значение C_S , при котором кривая обеспеченностей занимает лучшее положение относительно всех эмпирических точек; часто лучшее решение в

таких случаях дает кривая, проведенная при $C_S = 2 C_V$.

В издании «СНиП II-И.7-65» п. 3.9 [7] рекомендуется при расчете максимальных расходов, в зависимости от их происхождения, пользоваться, как правило, следующими соотношениями C_S и C_V :

- для расходов талых вод равнинных рек $C_S = 2 C_V$;
- для смешанных и дождевых расходов воды равнинных рек $C_S = (3 - 4) C_V$;
- для смешанных и дождевых расходов воды горных рек $C_S = 4 C_V$.

Почему-то в последующих сводах правил (СП) эта рекомендация выпала, а взамен ее было предложено вычисление коэффициента вариации C_V и коэффициента асимметрии C_S определять методами приближенного наибольшего правдоподобия в зависимости от статистик λ_2 и λ_3 или методом моментов по формулам, приводимым в СП 33-101-2003 [10]. Но для $C_V > 0,7$ эти методы дают значения отношений $C_S/C_V > (6 - 7)$, т.е. заведомо завышаются значения максимальных расходов редкой повторяемости.

Анализ использованных рядов максимальных расходов из справочника «Ресурсы поверхностных вод...» (1973) и по данным Росгидромета (2014) показал, что в отдельные годы соответствующие значения не совпадают, однако на осредненные характеристики рядов это влияет незначительно — 3% (49,29 м³/с против 47,87 м³/с). Графическое представление ряда Росгидромета показано на рис. 2.

На рис. 3 показан фрагмент эмпирической кривой обеспеченности максимального стока р. Подкумок — Кисловодск.



Рис. 2. Максимальные расходы воды р. Подкумок — г. Кисловодск

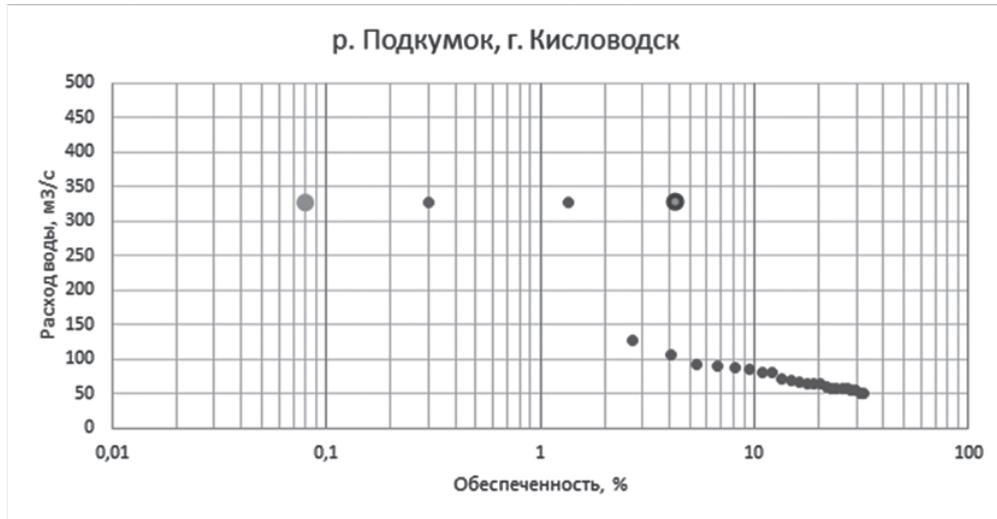


Рис. 3. Эмпирическая кривая обеспеченности максимального стока р. Подкумок — Кисловодск в зоне малой обеспеченности:

- точка обеспеченности для расхода 328 м³/с на теоретической кривой; • 95%-й доверительный интервал

Таким образом, для перехода от створа — аналога (р. Подкумок — г. Кисловодск) к створу гидроузла на р. Эшакон нами используются значения параметров кривой обеспеченности из табл. 1 (последняя строка). Выбор створа — аналога, обоснованный в проекте правил использования Эшаконского водохранилища («Севкавгипроводхоз», 2016), в целом соответствует требованиям СП 33-101-2003 [10]. Расчетные максимальные расходы воды к створу гидроузла определены по редуцированной формуле.

Модули среднего за многолетие максимального стока:

- р. Подкумок — г. Кисловодск $M_{ок} = 47,87/1010 = 0,0474 \text{ м}^3/\text{с}\cdot\text{км}^2$ (47,4 л/с·км²);
- р. Эшакон — створ гидроузла («Севкавгипроводхоз» за створ гидроузла принял створ гидропоста СК УГМС с. Учкеек, что в 7 км выше селения, с площадью водосбора 261 км²) $M_{оэ} = M_{ок} \cdot (F_к/F_э)^n = 0,0474 \cdot (1010/261)0,6 = 0,1068 \text{ м}^3/\text{с}\cdot\text{км}^2$ (1068 л/с·км²). Средний максимальный расход воды р. Эшакон для этого створа: $Q_э = 0,1068 \cdot 261 = 27,86 \text{ м}^3/\text{с}$;
- р. Эшакон — створ гидроузла (площадь водосбора по данным Правил эксплуатации Эшаконского водохранилища, «Кубань-водпроект», 1997 — 240 км²) $M_{ор} = M_{ок} \cdot (F_к/F_р)^n = 0,0474 \cdot (1010/240)0,6 = 0,1123 \text{ м}^3/\text{с}\cdot\text{км}^2$ (1123 л/с·км²). Средний максимальный расход воды р. Эшакон для створа гидроузла: $Q_р = 0,1123 \cdot 240 = 26,95 \text{ м}^3/\text{с}$;

В табл. 2 приведены имеющиеся данные о максимальных расходах воды р. Эшакон (из Правил..., 1997) и результаты расчетов СКГВХ и ИБГТС.

Для расхода 0,01% обеспеченности вычислена гарантийная поправка

$$\Delta Q_{0,01\%} = \frac{aE_{p\%}}{\sqrt{n}} Q_{0,01\%} = \frac{1 \cdot 1,22}{\sqrt{73}} \cdot 345,5 = 49 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Из табл. 2 видно, что уменьшение отношения C_s/C_v с 6 до 4 дает снижение значений максимального расхода 0,01% обеспеченности на 29,3%, 0,1% обеспеченности — 21,7%.

Для оценки годового стока р. Эшакон использованы ряды наблюдений за периоды 1936–1975 и 2002–2015 гг. Первый ряд наблюдений (1936–1975) относится к створу Гидропроекта (1 км выше селения), другой (2002–2015), наблюдения службы эксплуатации гидроузла, — к створу гидроузла Эшаконского водохранилища. Никакой значимой связи между соответствующими значениями годового стока гидропоста р. Подкумок — г. Кисловодск и створа гидроузла на р. Эшакон нет (рис. 4).

Результаты отдельного и совместного рассмотрения рядов годового стока по створу на реке Эшакон (нормы стока):

- для ряда 1936–1975 гг. ($n = 37$) $Q_{cp} = 1,64 \text{ м}^3/\text{с}$;

$$\Sigma(K - 1)^2 = 2,514 \quad C_v = \sqrt{\frac{2,514}{37 - 1}} = 0,26;$$

Максимальные расходы воды р. Эшкакон в створе Эшкаконского гидроузла

| Река — створ | F, км ² | Q _{ср} ^{max} , м ³ /с | C _V | C _S | Расходы (м ³ /с), обеспеченностью (P%) | | | | | | |
|--|--------------------|--|----------------|-----------------|---|-------|-------|-------|------|------|------|
| | | | | | 0,01 | 0,1 | 0,5 | 1 | 3 | 5 | 10 |
| р. Эшкакон — гидроузел. Гидропроект им. С.Я. Жука (ряд до 1975 г.) | 240 | — | — | — | 262 | 151 | н/д | 94,2 | н/д | 60,2 | 46,9 |
| р. Эшкакон — с. Учкеекен СКГВХ | 261 | — | 0,90 | 6C _V | 510 | 258 | 170 | 148 | 81,6 | 76,3 | 58,7 |
| р. Эшкакон — с. Учкеекен ИБГТС (ряд до 2014 г.) | 261 | 27,86 | 0,90 | 6C _V | 457,5 | 245 | 154 | 124 | 85 | 70 | 53 |
| р. Эшкакон — с. Учкеекен ИБГТС (ряд до 2019 г.) | 261 | 27,19 | 0,90 | 6C _V | 446,5 | 239,1 | 150,3 | 121,0 | 83,0 | 68,3 | 51,7 |
| р. Эшкакон — с. Учкеекен ИБГТС (ряд до 2014 г.) | 261 | 27,86 | 0,85 | 4C _V | 394,5 | 212 | 143 | 118,4 | 84,7 | 70,8 | 54 |
| р. Эшкакон — с. Учкеекен ИБГТС (ряд до 2019 г.) | 261 | 27,19 | 0,85 | 4C _V | 385,0 | 206,9 | 139,6 | 115,6 | 82,7 | 69,0 | 52,7 |
| р. Эшкакон — гидроузел ИБГТС (ряд до 2014 г.) | 240 | 26,95 | 0,85 | 4C _V | 383,2 | 205,2 | 138,5 | 114,5 | 81,9 | 68,5 | 52,3 |
| р. Эшкакон — с. Учкеекен ИБГТС (ряд до 2019 г.) | 240 | 26,33 | 0,85 | 4C _V | 374,4 | 200,5 | 135,3 | 111,9 | 80,0 | 66,9 | 51,1 |

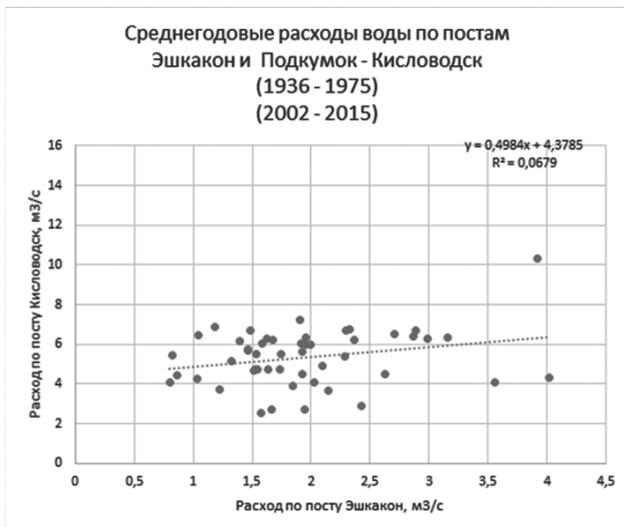


Рис. 4. График связи годового стока по гидропостам р. Подкумок — г. Кисловодск и р. Эшкакон — створ гидроузла

$$C_s = \frac{37 \cdot 0,025}{0,26^3 \cdot 36 \cdot 35} = 0,042; \text{ принято } C_s = 2$$

$$C_V = 0,52;$$

- для ряда 2002–2015 гг. ($n = 14$) $Q_{cp} = 2,77$ м³/с;

$$\sum (K - 1)^2 = 0,909; C_V = \sqrt{\frac{0,909}{14 - 1}} = 0,26;$$

$$C_s = \frac{14 \cdot 0,066}{0,26^3 \cdot 13 \cdot 12} = 0,34; \text{ принято } C_s = 2$$

$$C_V = 0,52;$$

- для ряда 1936–2015 гг. ($n = 51$) $Q_{cp} = 1,95$ м³/с;

$$\sum (K - 1)^2 = 7,139; C_V = \sqrt{\frac{7,139}{51 - 1}} = 0,38;$$

$$C_s = \frac{51 \cdot 3,973}{0,38^3 \cdot 50 \cdot 49} = 1,51; \text{ принято}$$

$$\frac{C_s}{C_V} = \frac{1,51}{0,38} = 3,97.$$

Как видно, для отдельного рассмотрения рядов с длительным разрывом значения C_s и C_V практически одинаковы. Общий ряд по р. Эшкакон имеет несколько выше значение C_V ($0,38 > 0,26$) и значительно отличающееся отношение C_s/C_V ($3,97 > 2,0$). По данным Правил... (1997): $Q_{cp} = 1,81$ м³/с; $C_V = 0,32$; $C_s = 2 C_V$. По данным проекта «Правил...» («Севкавгипроводхоз», 2016): $Q_{cp} = 2,10$ м³/с; $C_V = 0,45$; $C_s = 1,35 = 3,0 C_V$. Отсутствие достоверных данных по ряду р. Эшкакон не позволяет делать какие-либо серьезные обобщения. Для анализа можно принять данные «Севкавгипроводхоза» (2016).

Данные о годовых максимальных расходах воды в р. Эшкакон отсутствуют. В 2002 г. по р. Подкумок — г. Кисловодск зафиксирован максимальный расход 328 м³/с (~ 0,3% ВП). На Эшкаконском гидроузле по отметкам паводка на водосбросном сооружении службой эксплуатации отмечен расход ~ 200 м³/с.

Максимальные расходы, зафиксированные службой эксплуатации Эшкаконского гидроузла, составили в 2015 г. 12,30 м³/с, в 2016 г. — 13,18 м³/с, в 2017 г. — 24,90 м³/с, в 2018 г. — 12,12 м³/с, в 2019 г. — 21,05 м³/с. Максимальные расходы по р. Эшкакон проходили в последние 5 лет в период с конца мая по конец июля. Как видно, за указанные годы максимальные расходы меньше среднемноголетнего максимума (см. табл. 2). Учет этих изменений позволил пересчитать характеристики максимального стока р. Эшкакон, которые включены в табл. 2.

Параметр максимальной интенсивности стока [2]: $A = M(F + 1)^{0,25}$. По Д.Л. Соколовскому предельная величина A для ЕТС России равна 4,0 [9]. Вычисленные значения A по максимальным расходам рек Подкумок и Эшкакон приведены ниже:

- для р. Подкумок — г. Кисловодск

$$A = \frac{328}{1010} (1010 + 1)^{0,25} = 1,83;$$

- для р. Эшкакон $A = \frac{200}{261} (261 + 1)^{0,25} = 3,08$.

Если обратным ходом посчитать предельный расход при $A = 4$, то получим следующие значения максимальных (вероятных) расходов:

$$\frac{4,0 \cdot 1010}{(1010 + 1)^{0,25}} = 716,5 \text{ м}^3/\text{с} \text{ (Подкумок — Кис-}$$

$$\text{ловодск)} \text{ и } \frac{4,0 \cdot 261}{(261 + 1)^{0,25}} = 259,5 \text{ м}^3/\text{с} \text{ (Эшкакон),}$$

что близко к расчетным значениям максимальных расходов 0,01% обеспеченности при соотношении $C_s = 4 C_v$.

Для выяснения закономерностей изменения годового стока рек Подкумок — г. Кисловодск и Эшкакон по имеющимся данным были построены нормированные разностно-интегральные кривые [8], которые представлены на рис. 5.

В целом по рекам Подкумок и Эшкакон наблюдается синфазность годового стока. Смещение фазы повышения стока для Эшкакона объясняется тем, что увеличение годового стока по данным службы эксплуатации Эшкаконского гидроузла (2002–2015) не оказало влияние на годовой сток р. Подкумок — Кисловодск. Это ставит под сомнение данные службы эксплуатации, они явно завышены.



Рис. 5. Динамика годового стока рек по данным наблюдений

На настоящее время проектировщики, службы эксплуатации гидроузлов и изыскатели не имеют достойного инструмента для решения задачи по определению расчетных максимальных расходов рек. К определению максимальных расходов рек и расчету параметров кривых обеспеченности стока следует подходить весьма взвешенно: неопределенность с получением значения C_s/C_v позволяет необоснованно увеличивать максимальные расходы малой обеспеченности (0,01; 0,1%).

Максимальные расходы воды различной обеспеченности по ряду до 2019 г. для створа гидроузла на р. Эшкакон превышают соответствующие расходы, приведенные в проекте Эшкаконского гидроузла (Гидропроект, 1987), но при $C_s = 4 C_v$ они меньше значений, которые приведены в материалах СКГВХ.

Пропускная способность сооружений гидроузла при отметке ФПУ (с учетом сброса через водозаборное сооружение) — 264 м³/с. Расход воды 0,01% обеспеченности (383,2 м³/с) с учетом небольшого объема форсировки (объем между уровнями НПУ и ФПУ) $V_{\phi} = 0,634$ млн м³ не будет пропущен сооружениями гидроузла без предупредительной сработки водохранилища.

Одним из вариантов решений пропуска расхода 0,01% обеспеченности на данном гидроузле возможен за счет восстановления сброса части расхода редкой обеспеченности ($P < 0,05\%$) через эксплуатационный туннель, которые осуществлялись в период строительства Эшкаконского гидроузла (1978–1988 гг.).

Второй вариант. В период межени на р. Эшкакон (декабрь ($Q_{cp} = 2,0$ м³/с) — февраль ($Q_{cp} = 1,33$ м³/с)) осуществить удаление наносов в верхней мелководной части водохранилища

(хвостовой части), накопившихся за 27-летний период эксплуатации водохранилища ($H_{\max} = 64,0$ м, $H_{\text{max}} = 18,8$ м), что позволит увеличить полезный объем водохранилища с нынешних (2017 г.) 7,57 млн м³, а далее уменьшить отметку порога паводкового водосброса на 35 см. Между отметками 1211.65 и 1212.00 п = сосредоточено 0,0018% современного объема водохранилища. Водосливная стенка водосброса выполнена на Эшаконском гидроузле с дефектами в период строительства и требует реконструкции. Первый вариант наиболее эффективный и наименее затратный.

Сложившаяся ситуация с данными по гидрологии р. Эшакон и гидрологическими расчетами для Эшаконского водохранилища ставит актуальной задачу создания автоматизиро-

ванной системы мониторинга, которая выполняет измерения гидрометеорологических характеристик на водосборе водохранилища, составляет краткосрочный прогноз паводковой ситуации с пошаговой коррекцией в реальном режиме времени, выдает управляющие решения по водохозяйственному регулированию режима работы водохранилища. Основой такой автоматизированной системы может служить измерительный комплекс «Эмерсит» [1]. Имеющийся опыт использования системы мониторинга паводков в Краснодарском крае (на р. Адагум, реки Сочинского района и др.) позволяет прогнозировать гидрологическую обстановку с достаточной заблаговременностью для принятия оптимальных управленческих решений.

Литература

1. Автоматизированная система мониторинга паводковой ситуации на территории Краснодарского края [Электронный ресурс]. — URL: <http://emercit.ru/main/projects/9.php> (дата обращения: 13.05.2020).
2. Залесский Ф.В. Определение расчётных максимальных расходов воды [Текст] / Ф.В. Залесский, Л.Ф. Сотникова, Е.Ф. Чекаловский, О.В. Польский // Гидротехническое строительство. — 1986. — № 7. — С. 36–40.
3. Лебедев В.В. Гидрология и гидрометрия в задачах [Текст]: учеб. пособие / В.В. Лебедев. — Л.: Гидрометеиздат, 1952. — 359 с.
4. Пособие по определению расчетных гидрологических характеристик [Текст]. — Л.: Гидрометеиздат, 1984. — 448 с.
5. Ресурсы поверхностных вод СССР. — Т. 8. Северный Кавказ [Текст]. — Л.: Гидрометеиздат, 1973.
6. СНиП 33-01-2003. Гидротехнические сооружения. Основные положения. Госстрой России [Текст]. — М., 2004.
7. СНиП II-И.7-65 Расчётные максимальные расходы воды при проектировании гидротехнических сооружений на реках. Нормы проектирования [Текст]. — М.: Стройиздат, 1966.
8. Георгиади А.Г. Современные и сценарные изменения речного стока в бассейнах крупнейших рек России: Ч. 2: Бассейны рек Волги и Дона [Текст]: монография / А.Г. Георгиади [и др.]; Институт географии РАН. — М.: МАКС-Пресс, 2014. — 216 с.
9. Соколовский Д.Л. О предельных модулях максимального стока на реках земного шара и методике их определения [Текст] / Д.Л. Соколовский // Труды ГГИ. — 1968. — Вып. 163.
10. СП 33-101-2003. Определение основных расчетных гидрологических характеристик. Госстрой России [Текст]. — М., 2004.
11. Крицкий С.Н. Гидрологические основы речной гидротехники [Текст] / С.Н. Крицкий, М.Ф. Менкель. — М.-Л.: Изд-во АН СССР, 1950. — 391 с.
12. ГОСТ 3999-48. Сооружения гидротехнические. Расчет максимальных расходов воды рек [Текст].
13. Схема водоснабжения и водоотведения муниципального образования город-курорт Кисловодск с 2013 по 2023 год [Текст]. — СПб., 2013. — 327 с.
14. Программа для ЭВМ 2020611033 Российская Федерация. Многофункциональный программный комплекс «Геоинформационная система гидроузлов Ставропольского края» [Текст]: № 2020610059: заявл. 09.01.2020: опубл. 23.01.2020 / Волосухин Я.В.; заявитель и патентообладатель Волосухин Я.В.
15. Волосухин Я.В. Эшаконское водохранилище как комплексный памятник природы [Текст] / Я.В. Волосухин, Т.В. Иванкова // Материалы I Международной научной конференции «Актуальные направления сбалансированного развития горных территорий в контексте междисциплинарного подхода» (Карачаевск, 27–29 сентября 2019 г.). — Карачаевск: Карачаево-Черкесский государственный университет им. У.Д. Алиева, 2019. — С. 194–199.
16. Волосухин Я.В. Безопасность комплекса гидротехнических сооружений в бассейне малой горной реки Эшакон [Текст] / Я.В. Волосухин // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Технические науки. — 2017. — № 2. — С. 85–90.
17. Потапенко Ю.Я. Многофакторный анализ геологического строения территории Эшаконского водохранилища [Текст] / Ю.Я. Потапенко, Я.В. Волосухин // Строительство и архитектура. — 2017. — Т. 5. — № 4. — С. 219–223.
18. Волосухин Я.В. Многофакторные исследования надежности и безопасности Эшаконского гидроузла в бассейне реки Подкумок [Текст] / Я.В. Волосухин // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Технические науки. — 2017. — № 2. — С. 71–75.

References

1. *Avtomatizirovannaya sistema monitoringa pavodkovoj situacii na territorii Krasnodarskogo kraja* [Automated system for monitoring the flood situation in the Krasnodar Territory]. Available at: <http://emercit.ru/main/projects/9.php> (accessed 13 May 2020).
2. Zalesskij F.V. *Opreделение raschyotnyh maksimal'nyh raskhodov vody* [Determination of the estimated maximum water flow rates]. *Gidrotekhnicheskoe stroitel'stvo* [Hydraulic engineering]. 1986, I. 7, pp. 36–40.
3. Lebedev V.V. *Gidrologiya i gidrometriya v zadachah* [Hydrology and hydrometry in problems]. Gidrometeoizdat Publ., 1952. 359 p.
4. *Posobie po opredeleniyu raschetnyh gidrologicheskikh harakteristik* [A guide for determining the calculated hydrological characteristics]. Gidrometeoizdat Publ., 1984. 448 p.
5. *Resursy poverhnostnyh vod SSSR. Severnyj Kavkaz* [Resources of surface waters of the USSR]. Gidrometeoizdat Publ., 1973, V. 8.
6. *SNiP 33-01-2003. Hidrotekhnicheskie sooruzheniya. Osnovnye polozeniya. Gosstroj Rossii* [SNiP 33-01-2003. Hydraulic structures. Basic provisions. Gosstroy of Russia]. Moscow, 2004.
7. *SNiP II-1.7-65 Raschyotnye maksimal'nye raskhody vody pri proektirovanii gidrotekhnicheskikh sooruzhenij na rekah. Normy proektirovaniya* [SNiP II-1.7-65 Estimated maximum water consumption in the design of hydraulic structures on rivers. Design standards]. Moscow: Strojizdat Publ., 1966.
8. *Sovremennye i scenarnye izmeneniya rechnogo stoka v bassejnah krupnejshih rek Rossii: Chast' 2: Bassejny rek Volgi i Dona* [Modern and scenario changes in river flow in the basins of the largest rivers of Russia: Part 2: Basins of the Volga and Don rivers]. *Institut geografii RAN* [Institute of Geography RAS]. Moscow: MAKS-Press Publ., 2014. 216 p.
9. Sokolovskij D.L. *O predel'nyh modulyah maksimal'nogo stoka na rekah zemnogo shara i metodike ih opredeleniya* [On the limiting modules of the maximum runoff on the rivers of the world and the method of their determination]. *Trudy GGI* [Proceedings of the State Institute of Geology]. 1968, I. 163.
10. *SP 33-101-2003. Opreделение osnovnyh raschyotnyh gidrologicheskikh harakteristik. Gosstroj Rossii* [SP 33-101-2003. Determination of the main calculated hydrological characteristics. Gosstroy of Russia]. Moscow, 2004.
11. Krickij S.N. *Gidrologicheskie osnovy rechnoj gidrotekhniki* [Hydrological foundations of river hydraulic engineering]. AN SSSR Publ., 1950. 391 p.
12. *GOST 3999-48. Sooruzheniya gidrotekhnicheskie. Raschet maksimal'nyh raskhodov vody rek* [GOST 3999-48. Hydraulic structures. Calculation of the maximum flow rates of rivers].
13. *Skhema vodosnabzheniya i vodootvedeniya municipal'nogo obrazovaniya gorod-kurort Kislovodsk s 2013 po 2023 god* [Scheme of water supply and sewerage of the municipal formation of the resort city of Kislovodsk from 2013 to 2023]. St. Petersburg, 2013. 327 p.
14. *Programma dlya EVM 2020611033 Rossijskaya Federaciya. Mnogofunkcional'nyj programnyj kompleks «Geoinformacionnaya sistema gidrouzlov Stavropol'skogo kraja»: № 2020610059: zayavl. 09.01.2020: opubl. 23.01.2020* [Computer program 2020611033 Russian Federation. Multifunctional software package “Geoinformation system of waterworks of the Stavropol Territory”].
15. Volosuhin Ya.V. *Eshkakonskoe vodohranilishche kak kompleksnyj pamyatnik prirody / Ya.V. Volosuhin, T.V. Ivankova* [Eshkakonskoe reservoir as a complex natural monument]. *Materialy I Mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii «Aktual'nye napravleniya sbalansirovannogo razvitiya gornyh territorij v kontekste mezhdisciplinarnogo podhoda» (Karachaevsk, 27–29 sentyabrya 2019 g.)* [Materials of the I International Scientific Conference “Actual directions of balanced development of mountain areas in the context of an interdisciplinary approach” (Karachaevsk, September 27–29, 2019)]. Karachaevsk: Karachaevsko-Cherkesskij gosudarstvennyj universitet im. U.D. Alieva Publ., 2019, pp. 194–199.
16. Volosuhin Ya.V. *Bezopasnost' kompleksa gidrotekhnicheskikh sooruzhenij v bassejne maloj gornoj reki Eshkakon* [Safety of the complex of hydraulic structures in the basin of the small mountain river Eshkakon]. *Izvestiya vuzov. Severo-Kavkazskij region. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya vuzov. North Caucasian region. Technical science]. 2017, I. 2, pp. 85–90.
17. Potapenko Yu.Ya. *Mnogofaktornyj analiz geologicheskogo stroeniya territorii Eshkakonskogo vodohranilishcha* [Multivariate analysis of the geological structure of the territory of the Eshkakonsky reservoir]. *Stroitel'stvo i arhitektura* [Building and architecture]. 2017, V. 5, I. 4, pp. 219–223.
18. Volosuhin Ya.V. *Mnogofaktornye issledovaniya nadezhnosti i bezopasnosti Eshkakonskogo gidrouzla v bassejne reki Podkumok* [Multi-factor studies of reliability and safety of the Eshkakonsky hydroelectric complex in the Podkumok river basin]. *Izvestiya vuzov. Severo-Kavkazskij region. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya vuzov. North Caucasian region. Technical science]. 2017, I. 2, pp. 71–75.