

DOI: <https://doi.org/10.33408/2519-237X.2021.5-4.447>

УДК 001.891.53[627.8.034:712.5]

ЛАБОРАТОРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ УРОВЕННОГО РЕЖИМА КАСКАДА ГИДРОУЗЛОВ АЗЕРБАЙДЖАНСКОЙ РЕСПУБЛИКИ

Пастухов С.М., Османов Х.С., Бузук А.В.

Цель. Определить скорость изменения уровня воды в каждой ступени каскада на реке Куре с учетом величины боковой приточности и в зависимости от сценария возникновения аварийной ситуации при максимальных водосбросных расходах.

Методы. Лабораторные исследования уровня режима искусственных водных объектов и методы моделирования установившегося неравномерного плавно изменяющегося движения жидкости.

Результаты. Разработана методика проведения лабораторных исследований уровня режима каскада гидроузлов, позволяющая устанавливать зависимость уровня поднятия воды H (м) в нижележащем водоеме от расхода Q ($\text{м}^3/\text{с}$) и времени ее поступления T (с) при различных сценариях возникновения аварии на вышележащем гидроузле, а также определять значения скорости поднятия уровня воды в верхних бьефах водоемов.

Область применения исследований. Результаты исследований являются составной частью методики по оценке риска возникновения чрезвычайных ситуаций на искусственных водных объектах, расположенных в каскадах, позволяющей оценивать вероятностную меру опасности возникновения чрезвычайных ситуаций, разработку кратко- и среднесрочных прогнозов возникновения аварийных ситуаций.

Ключевые слова: водохранилище, каскад гидроузлов, критерии подобия, моделирование, оценка риска, чрезвычайные ситуации.

(Поступила в редакцию 26 октября 2021 г.)

Введение

В настоящее время в Азербайджане эксплуатируется около 140 искусственных водных объектов, относящихся к категории водохранилищ различного назначения (для выработки электроэнергии, ирригации, рыбозаводства, технического и питьевого водоснабжения) с общим объемом воды более $21,5 \text{ км}^3$. Крупнейшими водохранилищами являются Мингечаурское, Шамкирское, Араз, Сарсангское. Относительно территориального расположения водохранилища являются как одиночными, так и расположенными в каскаде, т.е. на водотоке одной реки, либо на ее притоках. Наиболее крупным является каскад водохранилищ на реке Куре, который включает Шамкирское, Еникендское, Мингечаурское и Варваринское водохранилища.

Одним из главных недостатков каскадов водохранилищ с точки зрения обеспечения безопасности является возможность возникновения аварийных ситуаций на вышележащем гидроузле, при котором возникает опасность разрушения всех нижележащих гидроузлов и сооружений на них. Лабораторные исследования динамики уровня режима каскадов водохранилищ проводятся с целью установления зависимости изменения уровня воды в каждой ступени каскада для ее дальнейшего учета при оценке риска возникновения гидродинамических аварий.

Основная часть

Лабораторные исследования позволяют в меньшем масштабе и с меньшими затратами реализовать сценарии возникновения и протекания аварийных ситуаций. Наибольшую сложность при моделировании вызывают разноплановые процессы, протекающие на натурном объекте, например, для гидроузлов Азербайджанской Республики это учет дополнительной боковой приточности на участке реки между гидроузлами. Для определения уровня из-

менения воды в каждой ступени такого каскада необходимо разработать модели гидротехнических сооружений, определить максимальные расходные характеристики (10, 5 и 1 % обеспеченности), а также учесть расход притоков на свободном участке русла. Приведенная методика исследований разработана с учетом характеристик лабораторного оборудования гидротехнической лаборатории Белорусского национального технического университета.

Планирование исследований осуществлялось в следующей последовательности:

- 1) выполнение условий геометрического и динамического подобия;
- 2) обоснование схем расположения гидроузлов;
- 3) определение величины боковой приточности для участков рек;
- 4) определение масштаба и размеров моделей ГТС;
- 5) разработка сценарного подхода возникновения чрезвычайных ситуаций на гидроузлах.

Выполнение условий геометрического и динамического подобия. Выполнение условий геометрического и динамического подобия в соответствии с работой [1] – одно из основных требований при моделировании режимов движения жидкости в лабораторных условиях. При соблюдении указанных условий определенные в лаборатории параметры водного потока через масштабные коэффициенты целесообразно использовать при прогнозировании возникновения чрезвычайных ситуаций на искусственных водных объектах.

Две гидравлические системы считаются геометрически подобными, если между соответствующими размерами этих систем всюду существует постоянное соотношение [1]:

$$l_n/l_m = \alpha_l = \text{const}, \quad (1)$$

где l_n – линейный размер действительного сооружения (в натуральных условиях); l_m – соответствующий линейный размер модели; α_l – масштаб длин.

С целью выполнения условий динамического подобия в соответствии с работами [1; 2] при моделировании потоков жидкости, характеризующихся наличием свободной поверхности, исходили из критерия Фруда:

$$(Fr)_m = (Fr)_n, \quad \text{следовательно} \quad \frac{v_m^2}{l_m g} = \frac{v_n^2}{l_n g}, \quad (2)$$

где $v_{m(n)}$ – средняя скорость водного потока для модели (натурных условий), м/с; $l_{m(n)}$ – характерный линейный размер для модели (натурных условий), м; g – ускорение силы тяжести, м/с².

Искомый показателем при лабораторных исследованиях являлась скорость изменения уровня воды во всех ступенях каскада v_n (м/с) и ее изменение в зависимости от сценария возникновения аварийной ситуации. Поскольку рассматриваемое движение обуславливается главным образом силами тяжести, соответственно, при моделировании исходили только из одного критерия подобия (критерия Фруда). Силы вязкости, а следовательно, критерий Рейнольдса, в данном случае не учитывался.

Таким образом, для выполнения условий динамического подобия (отношения значений в натуральных условиях к элементам модели) исходя из условия $(Fr)_m = (Fr)_n$ масштабные коэффициенты составили:

$$\text{для расхода} - M = \alpha_l^{2,5};$$

$$\text{для времени и скорости} - M = \alpha_l^{0,5}.$$

Кроме того, при планировании и проведении лабораторных исследований дополнительно производился расчет критерия Фруда. Полученные значения не превысили $Fr < 1$, что свидетельствовало о спокойном движении водного потока как на модели, так и в натуральных условиях. Следовательно, дополнительным условием моделирования было [1]:

$$Fr < 1. \quad (3)$$

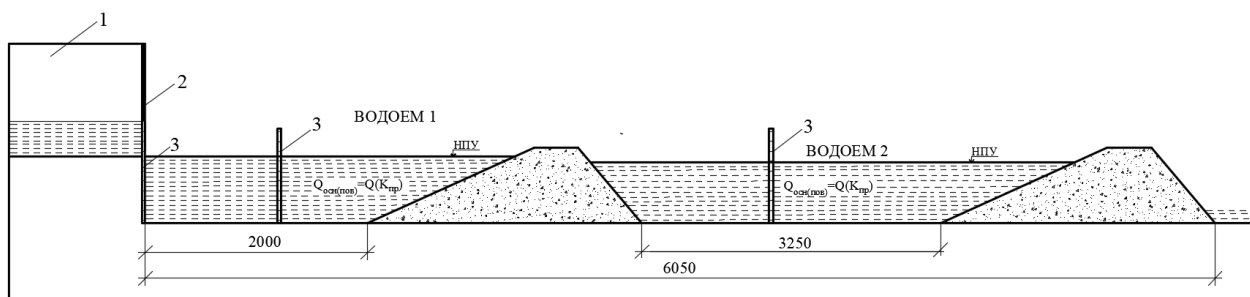
Необходимо отметить, что отличительной особенностью от существующих исследований [3–7] являлось то, что моделирование функционирования гидроузлов осуществлялось при максимальных водосбросных расходах (1, 5 и 10 % обеспеченности) с учетом максимальных значений боковой приточности участка русла между водоемами.

Обоснование схем расположения гидроузлов. Отличительной особенностью каскадного функционирования гидроузлов является их расположение на водотоке основной реки либо на ее притоках. С целью обоснования схем расположения и работы гидроузлов на реке Куре выполнялся расчет кривой свободной поверхности потока l_n . По результатам расчета установлено, что в одном каскаде могут располагаться водоемы, которые находятся в подпоре друг с другом (длина кривой подпора l_n превышает участок русла между водоемами с нормальной глубиной h_0), а также водоемы, между которыми присутствует свободный участок русла l_0 . При таком расположении влияние уровня вышележащего водоема на нижележащий будет происходить через определенный интервал времени (запас по времени) даже при водосбросных расходах высокой обеспеченности. Изучение и установление указанного интервала времени для объекта исследований (каскада гидроузлов на реке Куре) представляет как научную, так и практическую задачу и позволит разработать превентивные мероприятия по оповещению и эвакуации людей, проживающих в нижних бьефах гидроузлов.

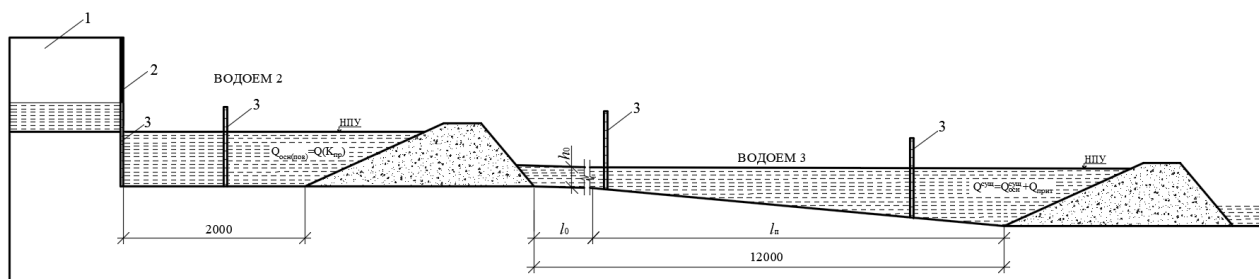
Таким образом, для проведения лабораторных исследований были разработаны следующие схемы каскадного расположения гидроузлов (рис. 1):

схема 1 – расположение водоемов в подпоре (непосредственно друг за другом) без участка русла между ними (Шамкирское с Еникендским водохранилищем);

схема 2 – расположение и соединение водоемов друг с другом на расстоянии, равном длине свободного участка русла l_0 с нормальной глубиной h_0 (Еникендское с Мингечаурским, Мингечаурское с Варваринским водохранилищем).



а – расположение водоемов в подпоре (схема 1)



б – расположение водоемов при наличии участка русла с нормальной глубиной h_0 (схема 2)

1 – мерный (оттарированный) бак; 2 – треугольный водослив; 3 – мерные иглы

Рисунок 1. – Схемы расположения моделей ГТС в лабораторной установке

Определение величины боковой приточности для участков рек. Исходя из разработанных схем расположения гидроузлов, моделирование аварийной ситуации для Еникендского и Мингечаурского гидроузлов осуществлялось с учетом расхода жидкости, включающей боковую приточность.

На практике для определения максимальных расходов боковой приточности используется метод водного баланса либо разность между соответственными расходами воды в начале и в конце контрольного участка русла (СП 58.13330.2019¹). Кроме того, при определении величины боковой приточности согласно СП 58.13330.2019 допускается суммирование половодных или паводочных расходов воды отдельных притоков, поступающих одновременно к периметру водохранилища или замыкающему участку створу в том случае, если распространение подпора в пределах контрольного участка незначительно.

При достаточности данных об измеренных расходах воды по притокам (при суммарной площади водосборов, превышающей 70 % площади частного водосбора между ограничивающими участок реки створами), расчет максимальных расходов воды боковой приточности осуществляется путем суммирования половодных или паводочных расходов воды по отдельным притокам (СП 58.13330.2019).

На основании данных проектных материалов, а также результатов многолетних наблюдений² в таблице 1 приведены значения расходных максимальных характеристик исследуемого каскада гидроузлов, а также значения боковой приточности рек (Гянджачай, Иори, Алазани) на участке русла между Еникендским и Мингечаурским гидроузлами.

Таблица 1. – Значение расходных характеристик каскада гидроузлов на реке Куре

Наименование водохранилища	Максимальная пропускная способность гидроузла, м ³ /сек
Шамкирское	3310,0
Еникендское	3250,0
Мингечаурское	3890,0*
Варваринское	3970,0

Примечание: * для Мингечаурского гидроузла значение максимальной пропускной способности приведено с учетом боковой приточности.

Максимальные расходные характеристики рек: Гянджачай – 25,6 м³/с; Иори – 99,5 м³/с; Алазани – 502,0 м³/с. Таким образом, величина боковой приточности участка русла между Еникендским и Мингечаурским гидроузлами составляет:

$$Q_{\text{бок}} = Q_{\Gamma} + Q_{\text{И}} + Q_{\text{А}} = 25,6 + 99,5 + 502,0 = 627,1 \text{ м}^3/\text{с}, \quad (4)$$

где Q_{Γ} – максимальный многолетний расход реки Гянджачай, м³/с; $Q_{\text{И}}$ – максимальный многолетний расход реки Иори, м³/с; $Q_{\text{А}}$ – максимальный многолетний расход реки Алазани, м³/с.

Анализируя особенности расходных характеристик исследуемого каскада гидроузлов на реке Куре, необходимо отметить, что величина боковой приточности между Мингечаурским и Варваринским гидроузлами незначительна и при моделировании не учитывалась, не смотря на наличие свободного участка русла между ними (СП 58.13330.2019).

На рисунке 2 приведена схема определения расчетных расходных характеристик каскада гидроузлов на реке Куре с учетом требований к учету боковой приточности и схем их работы.

¹ Гидротехнические сооружения. Основные положения. СНиП 33-01-2003: СП 58.13330.2019. – Введ. 17.06.20. – М.: Стандартинформ, 2020. – 34 с.

² Основные положения правил использования водных ресурсов Мингечаурского водохранилища на р. Куре на период 1991–1995 гг. / Всесоюзное ордена Ленина проектно-изыскательское и научно-исследовательское объединение «Гидропроект» им. С.Я. Жука; глав. инж. Бакгидропроект. Р.И. Байрамов. – Бакгидропроект: Баку, 1991. – 45 с.

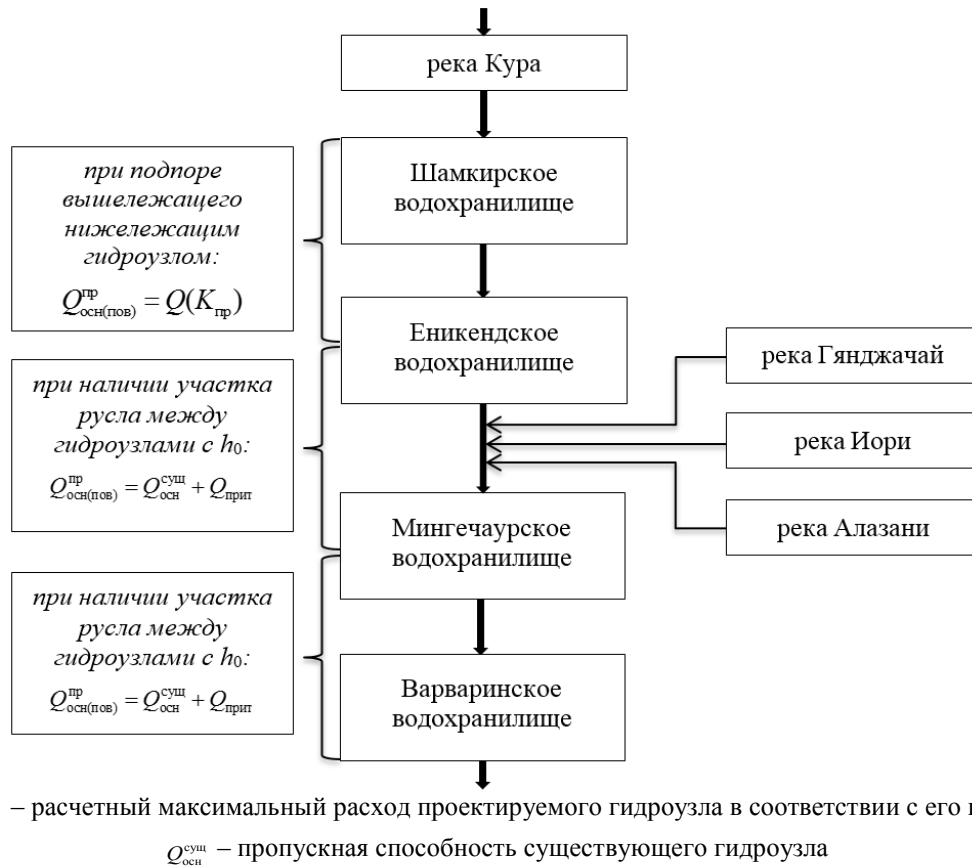


Рисунок 2. – Схема определения расчетных расходных характеристик каскада гидроузлов на реке Кура

Определение масштаба и размеров моделей ГТС. При определении масштаба уменьшения моделей ГТС исходили из проектных значений их размеров, размеров руслового лотка (длина – 15,0 м, ширина – 1,0 м), а также пропускной способности треугольного водослива. Исходя из перечисленных условий масштаб моделей составил 1 : 250. С учетом ограниченной длины руслового лотка моделирование уровня режима каскада гидроузлов осуществлялось попарно для каждой схемы регулирования: по схеме 1 – Шамкирское с Еникендским (рис. 1а); по схеме 2 – Еникендское с Мингечаурским, Мингечаурское с Варваринским (рис. 1б).

Основные расчетные характеристики моделируемых гидроузлов приведены в таблице 2. Геометрические параметры ГТС и значения расходов различной обеспеченности для натуральных условий и модели приведены в таблицах 3 и 4 соответственно.

Таблица 2. – Значения основных характеристик моделируемых гидроузлов

Наименование водохранилища	Максимальный форсированный уровень, м	Уровень мертвого объема, м	Нормальный подпорный уровень, м	Объем, млн м ³	Площадь зеркала, км ²
Шамкирское	159,9	143,5	158,0	2677,0	115,0
Еникендское	104,3	96,5	104,0	158,0	22,61
Мингечаурское	85,5	67,5	83,0	15730,0	605,0
Варваринское	18,8	12,6	18,4	62,0	21,4

Таблица 3. – Параметры ГТС каскада водохранилищ (для натуральных условий)

Название водохранилища	B , м	H , м	m_1	m_2	$Q_{10\%}$, м ³ /с	$Q_5\%$, м ³ /с	$Q_1\%$, м ³ /с
Шамкирское	10,0	70,0	1 : 2,5	1 : 2,5	33,5	167,7	3310,0
Еникендское	10,0	27,0	1 : 2,5	1 : 2,5	390,0	1950,0	3250,0
Мингечаурское	10,0	80,0	1 : 2,5	1 : 2,5	2330,0	2600,0	3890,0
Варваринское	3,0	23,0	1 : 2,5	1 : 2,5	476,4	2382,0	3970,0

Таблица 4. – Параметры ГТС каскада водохранилищ (для модели)

Название водохранилища	B , м	H , м	m_1	m_2	$Q_{10\%}$, м ³ /с	$Q_5\%$, м ³ /с	$Q_1\%$, м ³ /с
Шамкирское	0,04	0,28	1 : 2,5	1 : 2,5	0,00003	0,00017	0,00028
Еникендское	0,04	0,11	1 : 2,5	1 : 2,5	0,00039	0,00197	0,00329
Мингечаурское	0,04	0,32	1 : 2,5	1 : 2,5	0,00236	0,00263	0,00324
Варваринское	0,01	0,09	1 : 2,5	1 : 2,5	0,00048	0,00241	0,00402

Примечание к таблицам 3–4: B – ширина плотины по гребню; H – высота плотины; m_1 , m_2 – коэффициенты заложения верхового и низового откоса соответственно; $Q_{(10\%, 5\%, 1\%)}$ – расход воды через водосброс 10, 5 и 1 % обеспеченности.

Разработка сценарного подхода возникновения аварийных ситуаций на гидроузлах. При проведении лабораторных исследований применялся сценарный подход возникновения аварийных ситуаций на различных ступенях каскада. При разработке сценариев принималось допущение о возможности возникновения аварии только на одном из водоемов, образующих каскад. Указанные сценарии основаны на проведенном анализе литературных источников, данных натурных наблюдений и оценке состояния сооружений напорного фронта.

Таким образом, при моделировании учитывались следующие сценарии возникновения аварийных ситуаций:

сценарий 1 – перелив воды через гребень плотины. Реализация указанного сценария возможна при неисправности водосбросных сооружений, а также вследствие возникновения сверхрасчетного паводка либо сверхрасчетной боковой приточности. Нарушение режима эксплуатации водосбросных сооружений происходит в результате их естественного старения, что, в свою очередь, приводит к заклиниванию, механическому повреждению затворов и выходу их из работоспособного состояния [8].

Сверхрасчетный паводок возможен при одновременном возникновении таких опасных природных процессов и явлений, как очень сильный дождь; сильный ветер, генерирующий образование волн и ветрового нагона; интенсивное снеготаяние при положительных температурах и высоком запасе снежного покрова, высокие уровни воды;

сценарий 2 – разрушение напорного фронта вышележащего гидроузла с последующим переливом через гребень плотины на нижележащем гидроузле. Реализация указанного сценария возможна при протекании абразионных процессов напорных верховых откосов и коренных берегов водохранилищ, а также при нарушении режима фильтрации тела плотины и возникновении контактного выпора в местах примыкания плотины к водосбросным сооружениям и коренным берегам. Моделирование расходных характеристик при данном сценарии осуществлялось от стадии образования прорана в теле плотины с его последующим увеличением до уровня воды, соответствующего уровню мертвого объема. Непосредственно моделирование уровня режима осуществлялось путем регулирования расходных характеристик через треугольный водослив. Механизм и скорость образования прорана в теле плотины принимались на основании исследований [9–11].

Описание лабораторной установки и порядок проведения исследований. Основной целью проведения лабораторных исследований было установление зависимости между уровнем поднятия воды в нижележащем водоеме H (м), расходом Q (м³/с) и временем ее поступления T (с), а также влияние сценариев возникновения аварии на вышележащем гидроузле.

Схема лабораторной установки приведена на рисунке 1.

Установка представляет собой гидравлический лоток шириной 1,0 м и длиной 15,0 м. Непосредственно к лотку примыкает мерный бак 1, в котором установлен треугольный водослив 2. Для достижения равномерного движения жидкости по лотку в мерном баке устроена ниша глубиной 0,3 м для гашения энергии водного потока.

При расположении водоемов по схеме 1 в лотке были сконструированы плотины, приведенные на рисунке 1а. Расстояние от треугольного водослива 3 до первой плотины

принималось постоянным и равным 2,0 м, расстояние между водоемом 1 и водоемом 2 по схеме 1 принималось равным 3,25 м. При расположении водоемов по схеме 2 (рис. 1б) расстояние между ними принималось равным 12 м. Кроме того, при данной схеме расположения водоемов дополнительно устанавливался участок русла длиной, равной разнице между кривой свободной поверхности потока и участком русла с нормальной глубиной h_0 . Уклон русла соответствовал естественному и составлял 0,0014.

В качестве материала изготовления моделей ГТС была использована клееная фанера, защищенная полиэтиленовым покрытием. Места примыкания моделей к лотку, а также места соединений отдельных элементов друг с другом герметизировались силиконовым герметиком.

Регистрация изменения уровня воды ($\Delta H = H_2 - H_1$) в водоемах осуществлялась с использованием мерных игл 3. Крепление игл осуществлялось на специальных подставках. Все иглы были оснащены световой индикацией при касании их водной поверхности. Точность измерения отметки уровней воды с помощью мерных игл составляла 0,1 мм.

Перед проведением лабораторных исследований осуществлялось заполнение водой тарированного бака и водоемов до уровня, соответствующего нормальному подпорному уровню водохранилищ.

Подача воды в гидравлический лоток с постоянным расходом осуществлялась через треугольный водослив 2. Расход, проходящий через треугольный водослив 2 и поступающий в лоток, определялся по тарировочной кривой и проверялся по формуле Кинга [1]:

$$Q = 1,343H^{2,47}, \quad (5)$$

где H – геометрический напор на водосливе, м.

После достижения устойчивого (ламинарного) потока через водослив производилась регистрация уровня в каждом водоеме через равные интервалы времени (каждые 10 с при расходах 1 и 5 % обеспеченности, каждые 20 с при расходах 10 % обеспеченности).

При проведении исследований по схеме 1 мерные иглы устанавливались в центральной части каждого водоема (рис. 1а). При расположении водоемов по схеме 2 иглы устанавливались в верхнем бьефе водоемов, соединяющихся участком русла (рис. 1б).

После каждой серии экспериментальных исследований модели восстанавливались либо заменялись новыми, заново заполнялись водой до нормального подпорного уровня.

При моделировании работы каскада водохранилищ по сценарию 1 осуществлялось поддержание постоянных расходов (1, 5 и 10 % обеспеченности) с одновременной регистрацией изменения уровня в ниже- и вышележащих водоемах.

Для каждой схемы расположения гидроузлов и сценария возникновения чрезвычайной ситуации выполнялось по 8 серий однотипных исследований.

Скорость поднятия уровня воды в верхних бьефах водоемов $v_{\text{п}}$ (м/с) определялась на основании полученных экспериментальных данных по следующим зависимостям:

– при расположении водоемов по схеме 1:

$$v_{\text{п}} = K_v \frac{\Delta H}{\Delta T}, \quad (6)$$

где $\Delta H = H_2 - H_1$ – разница между наивысшим H_2 и начальным H_1 уровнем воды, соответствующим нормальному подпорному уровню, м;

$\Delta T = T_2 - T_1$ – разность между моментами времени, соответствующими H_2 и H_1 , с;

$K_v = S_1 / S_2$ – коэффициент, учитывающий изменение площади водного зеркала водохранилища от величины напора. S_1 и S_2 – значения площади водного зеркала водохранилища при напоре, соответствующем нормальному подпорному уровню (H_1) и уровню перелива воды через гребень плотины (H_2) соответственно. Указанный параметр принимает значения

от 0 до 1 и определяется индивидуально для каждого гидроузла на основании зависимостей $S = f(H)$, разрабатываемых на стадии проектирования;

– при расположении водоемов по схеме 2:

$$v_{II} = K_v \frac{\Delta H}{\Delta T_p + \Delta T}, \quad (7)$$

где ΔT_p – время движения воды по участку русла с нормальной глубиной, с.

Заключение

Разработанная методика лабораторных исследований позволяет моделировать уровень аварийной работы гидроузлов с учетом высоких водосбросных расходов и определить скорости изменения уровня воды в каждой ступени каскада водохранилищ. Отличительной особенностью методики является учет величины боковой приточности через расходные характеристики вышележащего гидроузла в каскаде. Кроме того, методика учитывает схемы расположения водоемов в каскаде (в подпоре и с наличием участка свободного русла с нормальной глубиной), а также сценарии возникновения чрезвычайных ситуаций на гидроузлах. Результаты проведенных исследований будут являться составной частью методики по оценке риска возникновения чрезвычайных ситуаций применительно к Азербайджанской Республике.

ЛИТЕРАТУРА

1. Чугаев, Р.Р. Гидравлика (техническая механика жидкости) / Р.Р. Чугаев. – 4-е изд. – Ленинград: Энергоиздат, Ленингр. отд., 1982. – 672 с.
2. Френкель, Н.З. Гидравлика / Н.З. Френкель. – М.: Госэнергоиздат, 1956. – 456 с.
3. Пастухов, С.М. Оценка риска возникновения чрезвычайных ситуаций на гидроузлах Республики Беларусь, расположенных в каскадах: дис. ... канд. техн. наук: 05.26.02 / С.М. Пастухов. – Минск, 2011. – 132 л.
4. Исмайылов, Г.Х. Моделирование режима работы каскада гидроузлов Верхневолжской водохозяйственной системы / Г.Х. Исмайылов, А.В. Перминов // Природообустройство. – 2020. – № 2. – С. 99–103. DOI: 10.26897/1997-6011-2020-2-99-104.
5. Счисленок, В.Н. Совершенствование управления каскадом волжских водохранилищ на основе гидродинамических моделей и ГИС-технологий / В.Н. Счисленок [и др.] // Мелиорация и водное хозяйство. – 2002. – № 2. – С. 8–12.
6. Беднарук, С.Е. О планировании мероприятий по снижению риска ущербов от наводнений / С.Е. Беднарук // Безопасность энергетических сооружений: научно-технический и производственный сборник. – 2003. – Вып. 11. – С. 407–414.
7. Беднарук, С.Е. Опыт управления каскадом волжскокамских водохранилищ с использованием имитационных математических моделей в период весеннего половодья [Электронный ресурс] / С.Е. Беднарук, Ю.Г. Мотовилов // Управление водно-ресурсными системами в экстремальных условиях: сб. статей междунар. конф., Москва, 4–5 июня 2008 г. – М., 2008. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM).
8. Малик, Л.К. Факторы риска повреждения гидротехнических сооружений. Проблемы безопасности / Л.К. Малик. – М.: Наука, 2005. – 354 с.
9. Левкевич, В.Е. Анализ экспериментальных данных по моделированию уровня режима каскадов водохранилищ при возникновении аварийных ситуаций / В.Е. Левкевич, С.М. Пастухов // Вестн. Команд.-инженер. ин-та МЧС Респ. Беларусь. – 2010. – № 2 (12). – С. 14–25.
10. Пастухов, С.М. Методика лабораторных исследований уровня режима водохранилищ, расположенных в каскадах / С.М. Пастухов // Вестн. Команд.-инженер. ин-та МЧС Респ. Беларусь. – 2010. – № 2 (12). – С. 4–13.
11. Богославчик, П.М. Резервные водосбросы с размываемыми грунтовыми вставками на малых водохранилищах и прудах гидромелиоративных систем: дис. ... канд. техн. наук: 06.01.02 / П.М. Богославчик. – Минск, 1986. – 158 л.

**Лабораторные исследования уровня режима каскада гидроузлов
Азербайджанской Республики**

**Laboratory studies of the level mode of the cascade of hydraulic units
of the Republic of Azerbaijan**

Пастухов Сергей Михайлович

кандидат технических наук, доцент

Министерство по чрезвычайным
ситуациям Республики Беларусь,
отдел науки и инновационного развития,
начальник отдела

Адрес: ул. Революционная, 5,
220030, г. Минск, Беларусь

Email: plamennyj98@gmail.com

ORCID: 0000-0003-1437-1913

Sergey M. Pastukhov

PhD in Technical Sciences, Associate Professor

Ministry of Emergency Situations
of the Republic of Belarus,
Science and Innovation Development
Department, Head of Department

Address: Revolyutsionnaya str., 5,
220030, Minsk, Belarus

Email: plamennyj98@gmail.com

ORCID: 0000-0003-1437-1913

Османов Хикмет Собирович

Министерство по чрезвычайным ситуациям
Азербайджанской Республики,
главное управление кадровой политики,
начальник управления

Адрес: ул. М. Мушвига, 501,
AZ1073, г. Баку, Азербайджан

Email: az.hikmet@gmail.com

Khikmet S. Osmanov

Ministry of Emergency Situations
of the Republic of Azerbaijan,
Main Department of Personnel Policy,
Head of Department

Address: M. Mushviga str., 501,
AZ1073, Baku, Azerbaijan

Email: az.hikmet@gmail.com

Бузук Александр Вячеславович

Министерство по чрезвычайным
ситуациям Республики Беларусь,
отдел науки и инновационного развития,
главный специалист

Адрес: ул. Революционная, 5,
220030, г. Минск, Беларусь

Email: uk007@rambler.ru

ORCID: 0000-0002-8356-9977

Aleksandr V. Buzuk

Ministry of Emergency Situations
of the Republic of Belarus,
Science and Innovation Development
Department, Chief Specialist

Address: Revolyutsionnaya str., 5,
220030, Minsk, Belarus

Email: uk007@rambler.ru

ORCID: 0000-0002-8356-9977

DOI: <https://doi.org/10.33408/2519-237X.2021.5-4.447>

LABORATORY STUDIES OF THE LEVEL MODE OF THE CASCADE OF HYDRAULIC UNITS OF THE REPUBLIC OF AZERBAIJAN

Pastukhov S.M., Osmanov X.S., Buzuk A.V.

Purpose. To determine the rate of change in the water level in each stage of the cascade on the river Kura, taking into account the value of the lateral inflow and depending on the scenario of an emergency at maximum discharge flows.

Methods. Laboratory studies of the level regime of artificial water bodies and methods of modeling steady-state uneven smoothly varying fluid movement.

Findings. A technique has been developed for laboratory studies of the level regime of a cascade of hydrosystems, which makes it possible to establish the dependence of the level of water rise H (m) in the underlying reservoir located in the cascade on the flow rate Q (m³/s) and the time of its arrival T (s) under various scenarios of the occurrence of an accident on the overlying hydrolic units, as well as to determine the values of the rate of rise of the water level in the headwaters of reservoirs.

Application field of research. The research results are an integral part of the methodology for assessing the risk of emergencies at artificial water bodies located in cascades, which makes it possible to assess the probabilistic measure of the danger of emergencies, and the development of short and medium-term forecasts of emergencies.

Keywords: (water) storage reservoir, hydrolic units' cascade, similarity criteria, modeling, risk assessment, emergency situations.

(The date of submitting: October 26, 2021)

REFERENCES

1. Chugaev R.R. *Gidravlika (tekhnicheskaya mekhanika zhidkosti) [Hydraulics (technical fluid mechanics)]*: 4th edition. Leningrad: Energoizdat, 1982. 672 p. (rus)
2. Frenkel' N.Z. *Gidravlika [Hydraulics]*. Moscow: Gosenergoizdat, 1956. 456 p. (rus)
3. Pastukhov S.M. *Otsenka riska vozniknoveniya chrezvychaynykh situatsiy na gidrouzlahk Respubliki Belarus', raspolozhennykh v kaskadakh [Assessment of the risk of emergencies at hydrolic units of the Republic of Belarus located in cascades]*. PhD tech. sci. diss.: 05.26.02. Minsk, 2011. 132 p. (rus)
4. Ismaylyov G.Kh., Perminov A.V. Modelirovanie rezhima raboty kaskada gidrouzlov Verkhnevolzhskoy vodokhozyaystvennoy sistemy [Modeling of the operating mode of the hydraulic units cascade of the Upper Volga management system]. *Prirodoobustroystvo*, 2020. No. 2. Pp. 99–103. (rus). DOI: 10.26897/1997-6011-2020-2-99-104.
5. Schislenok V.N. et al. Sovershenstvovanie upravleniya kaskadom volzhskikh vodokhranilishch na osnove gidrodinamicheskikh modeley i GIS-tekhnologiy [Improving the management of the cascade of the Volga reservoirs based on hydrodynamic models and GIS technologies]. *Melioratsiya i vodnoe khozyaystvo*, 2002. No 2. Pp. 8–12. (rus)
6. Bednaruk, S.E. O planirovani meropriyatiy po snizheniyu riska ushcherbov ot navodneniy [On planning measures to reduce the risk of flood damages] / S.E. Bednaruk // Bezopasnost' energeticheskikh sooruzheniy: scientific, technical and production collection, 2003. Iss. 11. Pp. 407–414. (rus)
7. Bednaruk S.E., Motovilov Yu.G. Opyt upravleniya kaskadom volzhskokamskikh vodokhranilishch s ispol'zovaniem imitatsionnykh matematicheskikh modeley v period vesennego polovod'ya [The experience of managing a cascade of Volzhskokamsk water storage reservoirs using simulation mathematical models during the spring flood]: electronic resource. *Proc. Intern. conf. «Upravleniye vodno-resursnymi sistemami v ekstremal'nykh usloviyakh»*, Moscow, June 4–5, 2008. 1 electronic optical disc (CD-ROM). (rus)
8. Malik L.K. *Faktery riska povrezhdeniya gidrotekhnicheskikh sooruzheniy. Problemy bezopasnosti [Risk factors of hydraulic structures damage. Safety concerns]*. Moscow: Nauka, 2005. 354 p. (rus)
9. Levkevich V.E., Pastukhov S.M. Analiz eksperimental'nykh dannykh po modelirovaniyu urovnennogo rezhima kaskadov vodokhranilishch pri vozniknovenii avariynykh situatsiy [Analysis of experimental data on modeling the level regime of reservoir cascades in the event of emergency situations]. *Vestnik Komandno-inzhenerenogo instituta MChS Respubliki Belarus'*, 2010. No. 2 (12). Pp. 14–25. (rus)

10. Pastukhov S.M. Metodika laboratornykh issledovaniy urovennogo rezhima vodokhranilishch, raspolozhennykh v kaskadakh [Technique for laboratory studies of the level regime of reservoirs located in cascades]. *Vestnik Komandno-inzhenerного instituta MChS Respubliki Belarus'*, 2010. No. 2 (12). Pp. 4–13. (rus)
11. Bogoslavchik P.M. *Rezervnye vodosbrosy s razmyvaemymi gruntovymi vstavkami na malykh vodokhranilishchakh i prudakh gidromeliorativnykh sistem* [Reserve spillways with soil inserts that can be eroded at small water reservoirs and ponds of irrigation and drainage systems]. PhD tech. sci. diss.: 06.01.02. Minsk, 1986. 158 p.