

УДК 001.891.53:[627.8.034:712.5]

АНАЛИЗ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ ПО МОДЕЛИРОВАНИЮ УРОВЕННОГО РЕЖИМА КАСКАДОВ ВОДОХРАНИЛИЩ ПРИ ВОЗНИКНОВЕНИИ АВАРИЙНЫХ СИТУАЦИЙ

Левкевич В.Е., к.т.н., доцент, Пастухов С.М.
Командно-инженерный институт МЧС Республики Беларусь
e-mail: plamennyj98@gmail.com

На основании моделирования уровня режима водохранилищ, расположенных в каскадах, получены количественные значения скорости поднятия (снижения) уровня воды в каждой ступени каскада при различных схемах расположения водоемов и сценариях возникновения гидродинамических аварий. Проведен детальный анализ размыва грунтовых вставок, используемых в качестве резервных водосбросов, а также анализ образования прорана в теле плотины при разрушении напорных верхних откосов сооружений напорного фронта. Моделирование уровня режима водохранилищ проводилось при расходах 10 %-ной, 5 %-ной и 1 %-ной обеспеченности. Разработан и обоснован критерий безопасности каскадного расположения гидроузлов.

Based on the water level variation modeling of tandem reservoir system in consideration of different reservoir system arrangement and hydrodynamic disaster initiation scenarios of the water level raising (recession) rate quantitative data for any step of tandem is presented. The detailed analysis of dirt fillings wash-out used as idle spillway as far as closure channel of dam initiation in case of upstream face disruption analysis are carried out. The water level variation modeling was conducted in consideration of 10%, 5% and 1% weir flow provision. The tandem reservoir system arrangement safety criterion is developed and validated.

(Поступила в редакцию 10 мая 2010 г.)

ВВЕДЕНИЕ

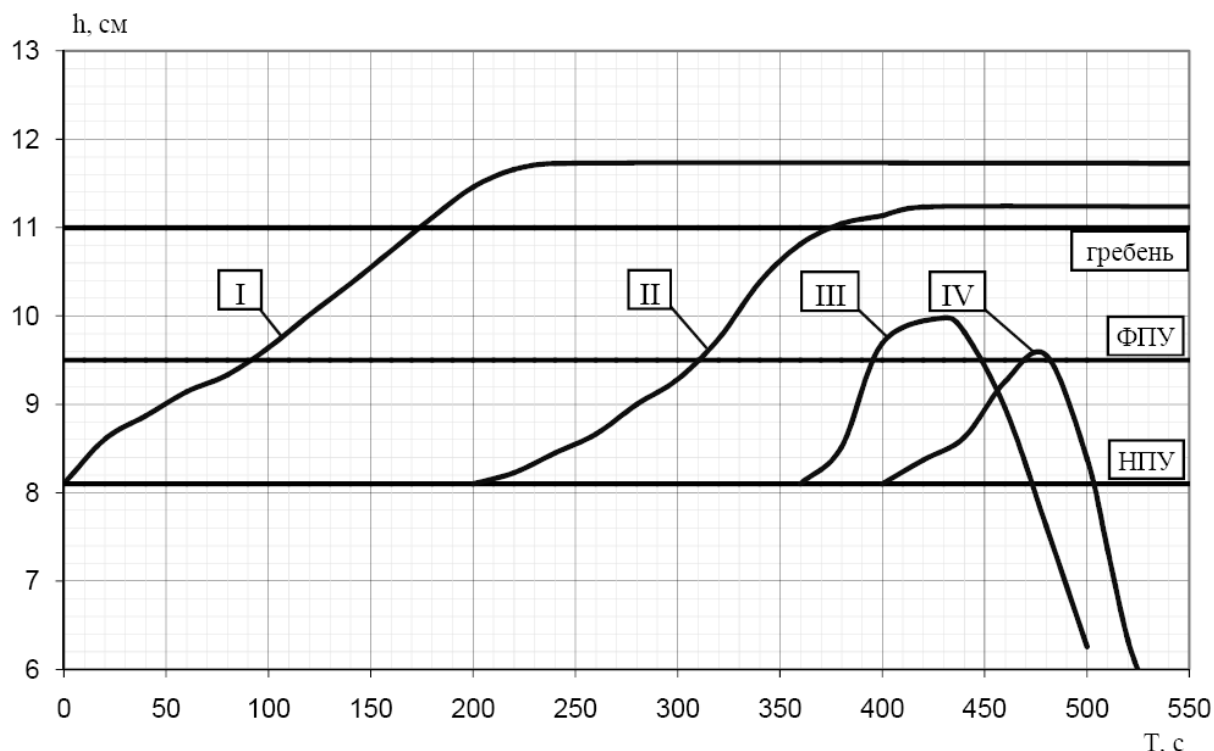
На сегодняшний день проводится большое количество исследований, направленных на изучение уровня режима водохранилищ, как одиночных, так и зарегулированных в каскады. Работы выполняются в лабораторных условиях, а также с использованием методов компьютерного и математического моделирования. Наиболее известными являются работы М.А. Макагоновой (Тихоокеанский институт географии) [1], А.Л. Бубера, М.А. Вольнова, М.В. Трошиной (Всероссийский НИИ гидротехники и мелиорации им. А.Н. Костякова) [2], С.Е. Беднарука, Ю.Г. Мотовилова, В.В. Чуканова, Р.Р. Юнисова (ФГУП «Центр Российского регистра гидротехнических сооружений и Государственного водного кадастра») [3], А.А. Pemobade, N.J. Manson, D. Stephenson (Южно-Африканский институт гражданского строительства) [4] и др. Большинство выполненных исследований посвящено разработке диспетчерских графиков управления каскадами гидроузлов при небольших водосбросных расходах, которые не учитывают аварийные режимы работы сооружений и направлены на недопущение возникновения на них гидродинамических аварий. Применительно к каскадам водохранилищ Республики Беларусь представляются актуальными исследования их уровня режима при различных сценариях аварийных ситуаций, при этом следует иметь в виду, что на большинстве существующих водохранилищ отсутствует круглосуточно дежурящий персонал.

Настоящие исследования по оценке уровня режима каскадов водохранилищ проводились в гидравлической лаборатории Белорусского национального технического университета на основании предварительно разработанной методики [5]. Целью работы было изучение уровня режима каскада водохранилищ, а именно, получение зависимостей изменения уровня во времени от величины водосбросных расходов 10 %-ной, 5 %-ной и 1 %-ной обеспеченности.

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

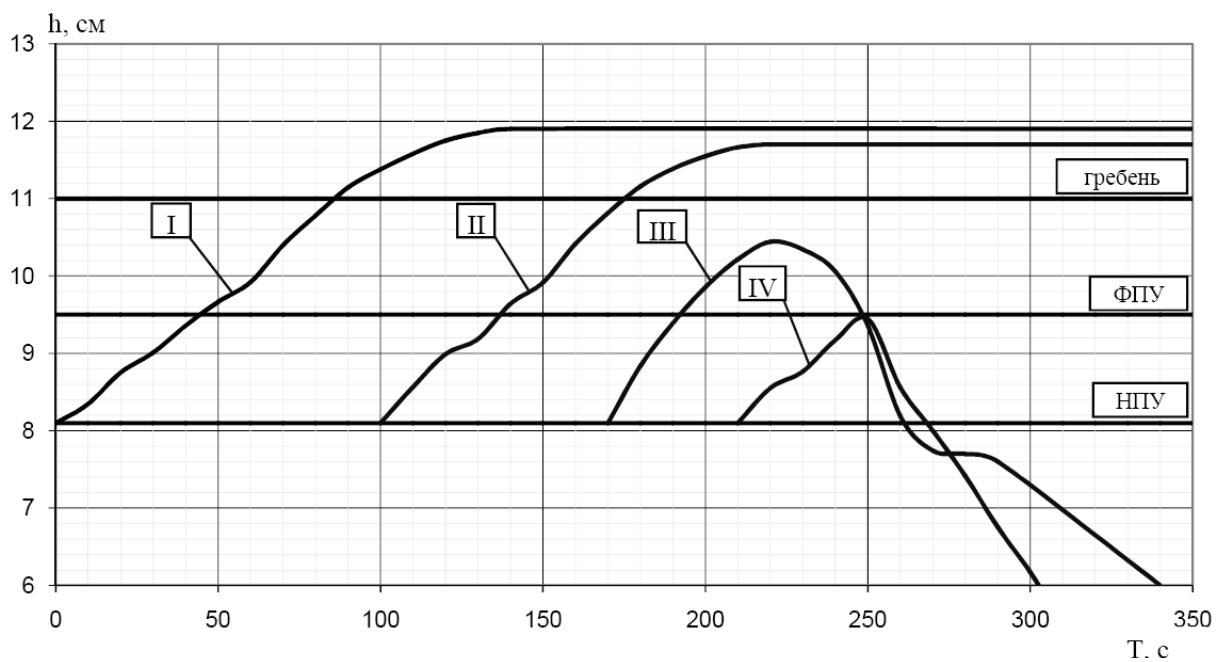
В соответствии с представленной в работе [5] методикой лабораторных исследований в гидравлическом лотке была сконструирована модель каскада гидроузлов. Данная методика учитывала два основных сценария возникновения гидродинамической аварии: перелив воды через гребень плотины и образование прорана в теле плотины. На основании анализа водохранилищного фонда Республики Беларусь были выбраны две схемы каскадного расположения гидроузлов. При расположении водоемов по схеме 1 в лотке были изготовлены и устроены 4 плотины, расположенные непосредственно друг за другом. Участок русла между ними отсутствовал. При расположении водоемов по схеме 2 в гидравлическом лотке устраивались две плотины, соединяющиеся друг с другом участком русла прямоугольной формы длиной 10 м. При каждом сценарии и схеме расположения осуществлялась регистрация уровня воды верхнем бьефе водоемов мерными иглами через равные промежутки времени.

На рис. 1–3 показана динамика изменения уровня воды в каждой ступени каскада. Практический интерес представляет скорость поднятия уровня воды в верхнем бьефе каждого водоема, а для водоемов III–IV также скорость снижения уровня при размыве грунтовой вставки и открытии затвора водосбросного сооружения. При этом на представленных графиках подъем воды начинается от нормального подпорного уровня (НПУ) в верхнем бьефе всех водоемов каскада (I–IV), а его снижение для водоема III при размыве грунтовой вставки, для водоема IV – при открытии затвора водосбросного сооружения на отметках водной поверхности соответствует форсированному подпорному уровню (ФПУ).



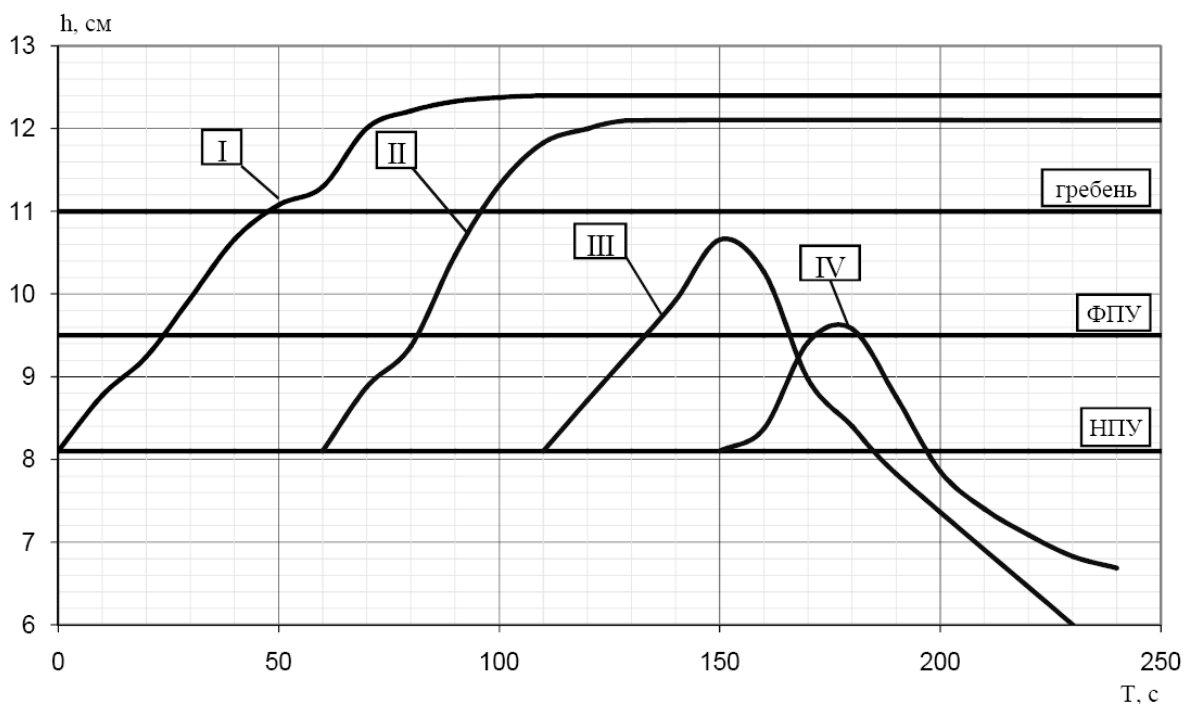
I–IV – порядковый номер моделей водохранилищ в гидравлическом лотке

Рисунок 1 – Динамика изменения уровня воды в водоемах при расположении по схеме 1 и расходе 10 %-ной обеспеченности



I-IV – порядковый номер моделей водохранилищ в гидравлическом лотке

Рисунок 2 – Динамика изменения уровня воды в водоемах при расположении по схеме 1 и расходе 5 %-ной обеспеченности



I-IV – порядковый номер моделей водохранилищ в гидравлическом лотке

Рисунок 3 – Динамика изменения уровня воды в водоемах при расположении по схеме 1 и расходе 1 %-ной обеспеченности

При расположении водоемов по схеме 1 скорость поднятия уровня воды зависела только от величины водосбросных расходов. В свою очередь для водоема III влияние на скорость снижения уровня оказывали форма размываемой вставки и состав грунта. Необходимо отметить, что масштабные исследования по размыву грунтовых вставок

и возможности их использования в качестве резервных водосбросов проводились П.М. Богославчиком в волновом лотке и на русловой площадке без искажения масштаба моделей [6]. Исследование по размыву грунтовых вставок заключалось в оценке их эффективного использования на гидроузлах, расположенных в каскадах. На рис. 4 приведено сравнение значений скорости снижения уровня в водоеме III (она же скорость размыва грунтовой вставки), полученных в результате лабораторных исследований с данными П.М. Богославчика при среднем диаметре грунта 0,1–0,5 мм и расходе 1 %-ной обеспеченности. Приведенные данные свидетельствуют о хорошем соответствии полученных результатов.

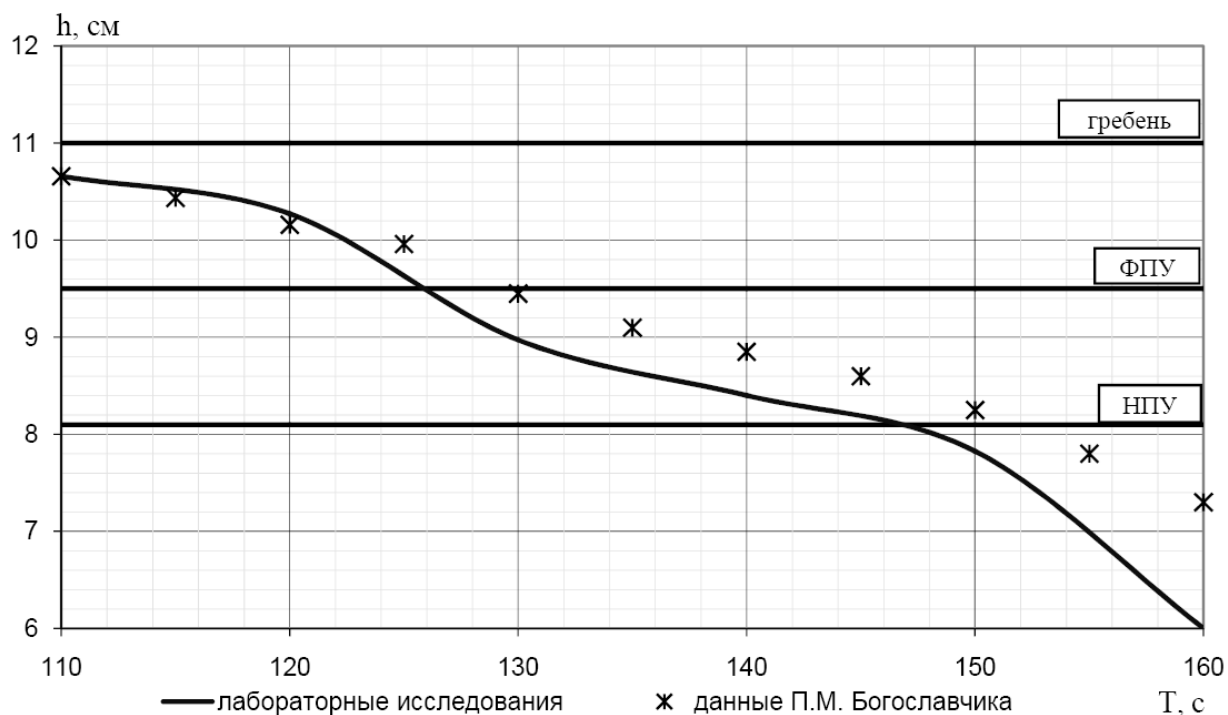


Рисунок 4 – Сравнительный анализ результатов экспериментальных данных с исследованиями П.М. Богославчика

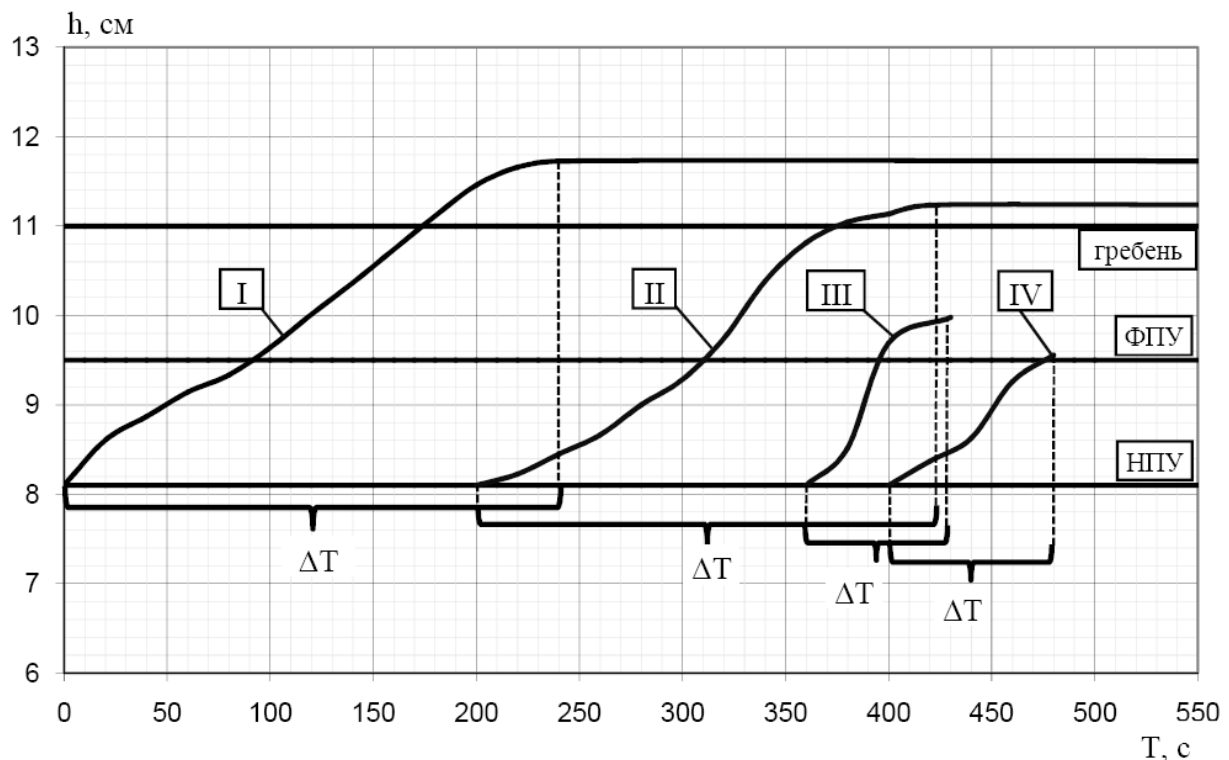
Для водоема IV скорость снижения уровня воды зависела от пропускной способности водосброса (т. е. от его геометрических размеров), а также от своевременного открытия затвора. На графиках, представленных на рис. 1–3, видно, что из-за ручного привода открывания затвора отметка, при которой осуществлялось его поднятие, не всегда соответствовала форсированному подпорному уровню. Это приводило к началу перелива воды через водосбросное отверстие. Однако данный факт существенно не повлиял на скорость снижения уровня в водоеме IV.

Скорость поднятия уровня воды в верхнем бьефе водоемов определялась в соответствии с графиком, представленном на рисунке 5 (на графике приведены результаты при расположении водоемов по схеме 1 и расходе 10 %-ной обеспеченности), за период времени ΔT , равный разнице между временем устойчивого перелива воды через гребень плотины (T_2) и временем начала подачи воды (T_1). Численное значение скорости поднятия (снижения) уровня воды в водоемах определялось по следующей формуле:

$$v_{\text{п}} = \Delta h / \Delta T, \quad (1)$$

где $\Delta h = h_2 - h_1$ – разница между наивысшим и начальным уровнем воды, соответствующим нормальному подпорному уровню, м;

$\Delta T = T_2 - T_1$ – разность между моментами времени, соответствующими h_2 и h_1 , с.



I–IV – порядковый номер моделей водохранилищ в гидравлическом лотке

Рисунок 5 – Определение скорости поднятия уровня воды в верхнем бьефе водоемов

Для водоема III момент времени T_2 принимался до начала снижения гребня размываемой грунтовой вставки, для водоема IV – до поднятия затвора водосбросного сооружения. Значение скорости изменения уровня воды при других сценариях возникновения аварии и схемах расположения водохранилищ определялась аналогичным способом, и в таблице 1 представлены конечные значения.

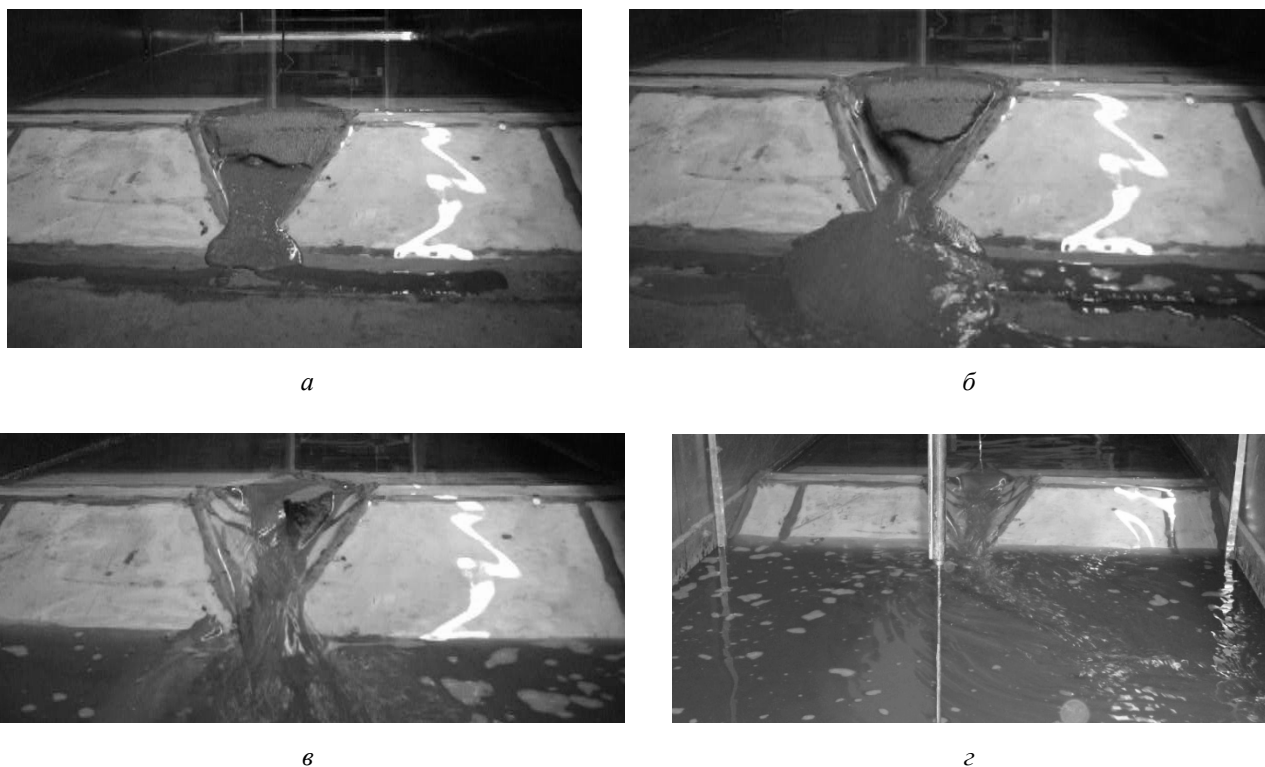
Таблица 1 – Экспериментальные данные скорости изменения уровня в водоемах

Водоем	Скорость ($v_n \cdot 10^{-3}$, м/с) при обеспеченности расходов (Q , м ³ /с)		
	10 %	5 %	1 %
Схема 1			
Водоем I	1,55	2,78	4,40
Водоем II	1,40	3,08	5,85
Водоем III	1,82 / 4,4	4,88 / 6,10	6,65 / 5,91
Водоем IV	1,95 / 3,9	3,60 / 14,4	6,32 / 7,90
Схема 2			
Водоем I	1,45	2,14	3,50
Водоем II	проран	2,60 / 1,36	4,46 / 2,5
	водосброс	1,73 / 5,20	3,60 / 7,20
<i>Примечание:</i> в числителе указана скорость поднятия уровня, в знаменателе – скорость снижения уровня воды в водоемах			

Анализ приведенных в таблице 1 данных при расположении водоемов по схеме 1 показывает, что скорость изменения уровня режима в водохранилищах I–III зависит преимущественно от величины приточности, образуемой за счет перелива потока из вышележащего водоема в нижележащий. За счет интенсивного размыва грунтовой вставки происходит эффективное снижение уровня в водоеме III. При этом значение скорости снижения уровня при размыве грунтовой вставки и расходах 10 %-ной и 5 %-ной обеспеченности несколько выше, чем скорость поднятия уровня в нижележащем водоеме, что объясняется перетеканием части жидкости обратно в водоем III при полном разрушении вставки. Исключение составили серии опытов при расходе 1 %-ной обеспеченности, где скорость снижения уровня в водоеме III была ниже скорости его поднятия в водоеме IV за счет особенностей разрушения грунтовой вставки, представленных ниже.

Для водоемов I–II наличие такого показателя, как скорость снижения уровня воды, было не характерно, поскольку при переливе через глухую плотину в течение всего времени образовывался устойчивый уровень воды, который сохранялся постоянным до прекращения ее подачи через водослив.

Сравнивая численные значения скорости снижения уровня при разрушении грунтовой вставки и при работе водосброса, можно сделать вывод о том, что при расходах воды 10 %-ной обеспеченности значения данных параметров были близкими ($4,4 \cdot 10^{-3}$ м/с – для водоема III и $3,9 \cdot 10^{-3}$ – для водоема IV). При увеличении расхода (5 %-ной и 1 %-ной обеспеченности) работа водосбросных сооружений была более эффективна. Данное утверждение основывается на особенностях работы грунтовой вставки, динамика размыва которой представлена на рисунке 6. С началом перелива, когда расход через размываемую вставку еще незначительный вследствие малого напора на гребне, уровень воды в верхнем бьефе продолжает подниматься. Момент времени, при котором достигается равенство расходов через размываемую плотину и приточности, соответствует максимально возможному повышению уровня верхнего бьефа. Затем происходит интенсивное снижение отметки гребня вставки и увеличение напора, что приводит к быстрому увеличению расхода через плотину [6].



а – начальная стадия перелива (10 с после перелива); *б* – разрушение низового откоса (35 с после перелива); *в* – разрушение верхового откоса (80 с после перелива); *г* – полное разрушение (95 с после перелива)

Рисунок 6 – Размыв грунтовой вставки при расходе 1%-ной обеспеченности

На рис. 6 видно, что в первые секунды происходило интенсивное впитывание воды в тело размываемой модели, а в отдельных сериях опытов наблюдался фильтрационный вынос грунта вставки в нижний бьеф (рис. 6, *а*). В начальной стадии размыв осуществлялся постепенно путем образования небольших вымоин у наружных граней вставки (рис. 6, *б*). При этом ее профиль со стороны низового откоса заметно деформировался. При увеличении напора происходил интенсивный размыв низового откоса, причем, как показано на рис. 6, *в*, наблюдался отрыв отдельных слоев вставки. После полного размыва низового откоса начиналось интенсивное снижение гребня размываемой модели до момента времени, при котором уровень воды в нижележащем водоеме не уравнился с уровнем в вышележащем водоеме.

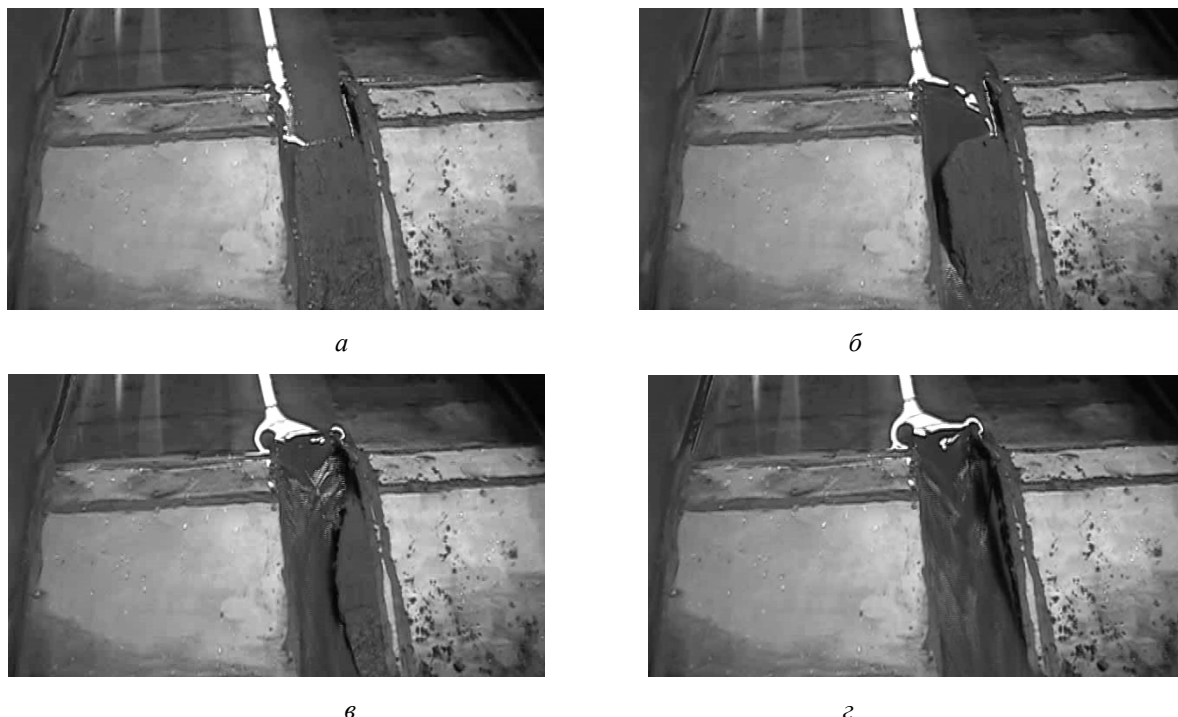
Таким образом, в результате проведенных исследований можно сделать вывод о том, что размыв грунтовой вставки происходил в соответствии с исследованиями П.М. Богославчика, проводившим свои эксперименты на одиночных водоемах. По данным [6], размыв грунтовой вставки происходил в две стадии. На первой стадии размывался низовой откос, начиная с низовой бровки. На второй стадии происходило интенсивное снижение гребня и всего профиля вставки, в результате чего обеспечивалось безопасное снижение уровня воды в верхнем бьефе водохранилища.

Анализируя экспериментальные данные при расположении водоемов по схеме 2, можно сделать следующие выводы:

- скорость поднятия и снижения уровня в водоеме II при наличии в плотине грунтовой вставки была примерно такая же, как и при расположении по схеме 1 (см. табл. 1);
- при моделировании образования прорана в теле плотины скорость снижения уровня воды в водоеме II во всех случаях была меньше, чем при разрушении размываемой вставки.

Этот факт подтверждает эффективное использование размываемых грунтовых вставок в качестве резервных водосбросов, как на одиночных водоемах, так и на каскадах, и позволяет рассматривать образование прорана в качестве вероятного сценария возникновения гидродинамических аварий при оценке риска возникновения чрезвычайных ситуаций данной группы.

Динамика образования прорана в теле плотины приведена на рис. 7.

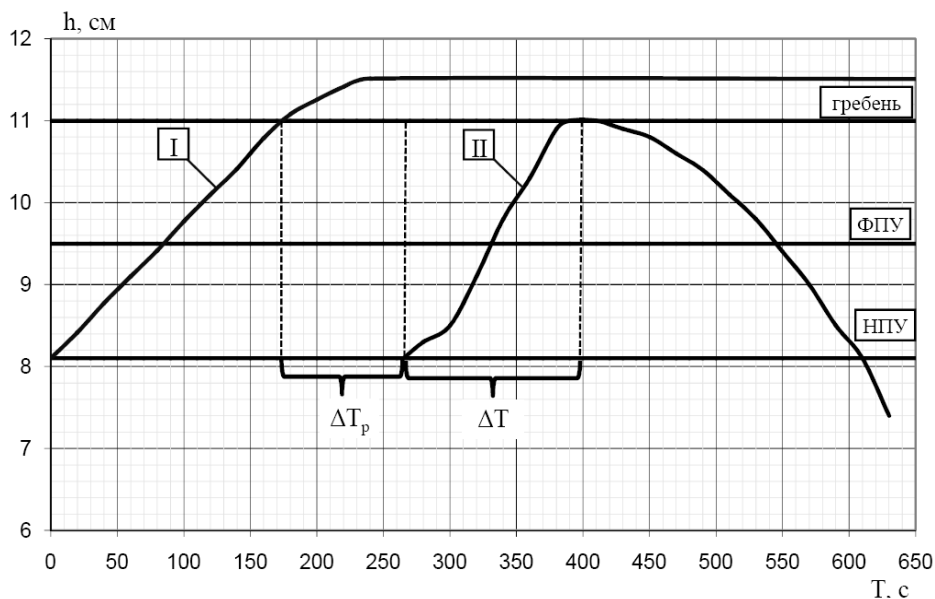


а – начало разрушения – 10 с; *б* – образование вымоины в низовом откосе – 30 с;
в – интенсивное разрушение низового откоса – 50 с; *г* – полное разрушение – 90 с

Рисунок 7 – Образование прорана в теле плотины при расположении водоемов по схеме 2 и расходе 1 %-ной обеспеченности

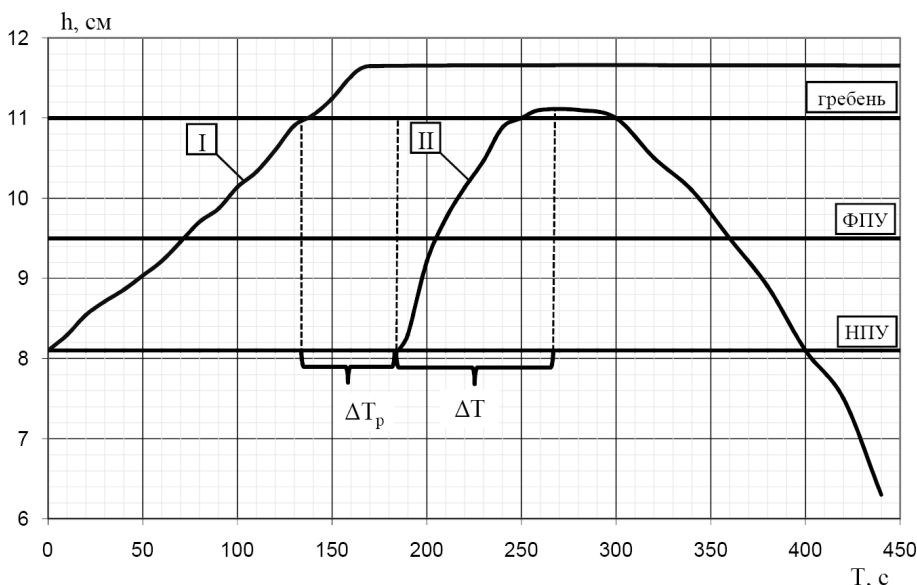
Наблюдаемая картина образования прорана в теле плотины во многом была схожа с размывом грунтовой вставки. Отличия наблюдались лишь впервые секунды перелива, когда на низовой грани грунтового откоса образовывалась небольшая вымоина (рис. 7, а, б), которая увеличивалась в глубину и ширину (рис. 7, в) и с течением времени превращалась в проран. Полный вымыв грунта и снижение уровня воды в водоеме ниже НПУ (рис. 7, г) при расходе 1 %-ной обеспеченности происходил через 90 с после перелива, а при расходах 5 %-ной и 10 %-ной обеспеченности – через 130 и 240 с соответственно.

Закономерной является следующая отличительная особенность расположения водоемов по схеме 2: поднятие уровня воды в нижележащем водоеме наступает не одновременно с переливом потока через гребень вышележащего, а спустя интервал времени (ΔT_p) за счет преодоления потоком участка русла длиной 10 м. Схематично данный отрезок времени представлен на графиках (рис. 8–10) при расходах различной обеспеченности.



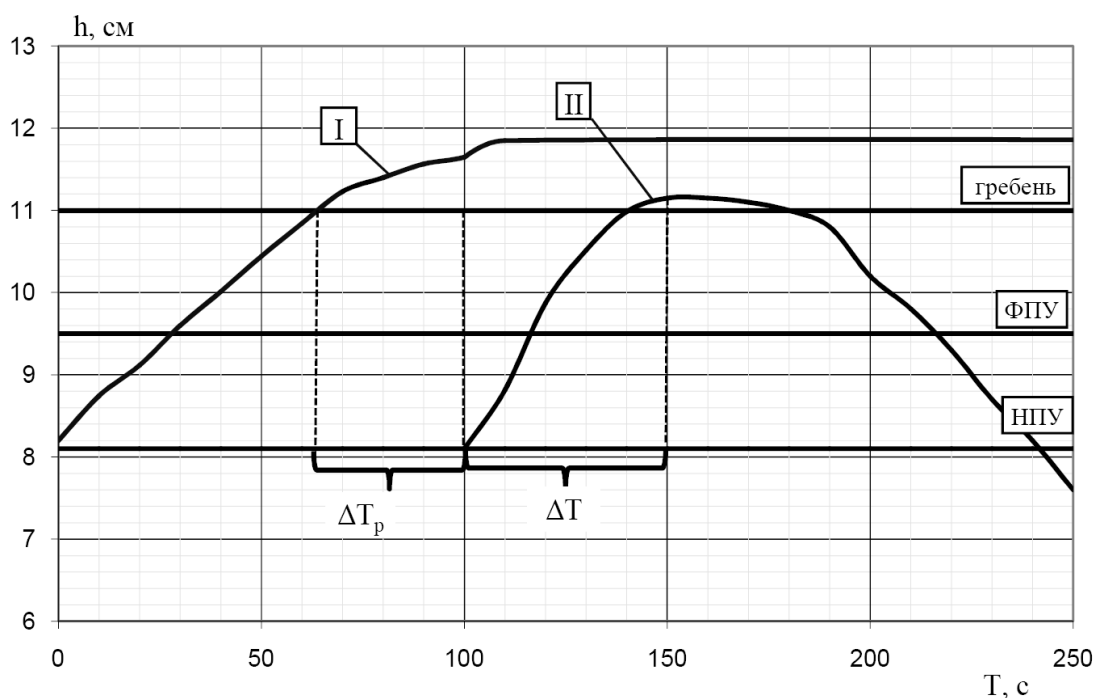
I–II – порядковый номер моделей водохранилищ в гидравлическом лотке

Рисунок 8 – График изменения уровня воды при расположении водоемов по схеме 2 и расходе 10 %-ной обеспеченности



I–II – порядковый номер моделей водохранилищ в гидравлическом лотке

Рисунок 9 – График изменения уровня воды при расположении водоемов по схеме 2 и расходе 5 %-ной обеспеченности



I–II – порядковый номер моделей водохранилищ в гидравлическом лотке

Рисунок 10 – График изменения уровня режима при расположении водоемов по схеме 2 и расходе 1 %-ной обеспеченности

Таким образом, в расчете скорости поднятия уровня воды в нижележащем водоеме при расположении гидроузлов по схеме 2 дополнительной составляющей является время движения воды (ΔT_p) по участку русла длиной 1000 м (для натуральных условий). С учетом проведенных исследований скорость поднятия уровня воды в нижележащем водоеме при его расположении по схеме 2 определялась по формуле (2). В табл. 2 приведены ее значения при расходах различной обеспеченности:

$$v_p = \frac{\Delta h}{\Delta T_p + \Delta T}, \quad (2)$$

где ΔT_p – время движения воды по участку русла длиной $l = 10$ м (для натуральных условий $l = 1000$ м), с.

Таблица 2 – Скорость поднятия уровня воды в нижележащем водоеме при его расположении по схеме 2 и расходах различной обеспеченности

Обеспеченность расхода воды	Скорость поднятия воды $v_p \cdot 10^{-3}$, м/с		Время ΔT_p , с	
	модель	натурные условия	модель	натурные условия
10 %	0,12	1,2	90	900
5 %	0,21	2,1	50	500
1 %	0,34	3,4	35	350

Значения времени ΔT_p получены для свободного участка русла длиной 1000 м. Данные значения допускается применять при больших расстояниях между смежными водоемами, принимая зависимость времени от расхода линейной.

Полученные значения скорости поднятия воды в русле были учтены при разработке и обосновании критерия безопасности каскадного расположения гидроузлов.

КРИТЕРИЙ БЕЗОПАСНОСТИ КАСКАДНОГО РАСПОЛОЖЕНИЯ ГИДРОУЗЛОВ

При создании водохранилищ руслового типа за счет наличия искусственного препятствия (плотины) вверх по реке образуется участок русла, который находится в подпоре. Согласно [7–10] различают следующие формы свободной поверхности при неравномерном движении жидкости в открытых руслах: кривые подпора и кривые спада. При увеличении глубин вдоль потока образуется кривая подпора, при уменьшении – спада. Применительно к русловым водохранилищам, где глубина потока увеличивается вниз по течению, выполняются следующие неравенства:

$$h_2 > h_1; \quad (3)$$

следовательно,

$$i > 0; h_0 > h_{кр}; h > h_0; h > h_{кр}; K > K_0 \text{ и } P_k < 1,$$

где h_1, h_2 – глубины в расчетных сечениях вниз по течению реки, м;

i – уклон дна реки;

h_0 – нормальная (бытовая глубина) глубина в русле, м;

h – глубина в расчетном сечении, м;

$h_{кр}$ – критическая глубина в русле, м;

K, K_0 – расходные характеристики, соответствующие расчетной (h) и нормальной глубине (h_0), м³/с;

P_k – параметр кинетичности потока.

В соответствии с [9] для водоемов данного типа регулирования образуется вогнутая кривая подпора типа a_1 . Данная кривая является наиболее важным типом с практической точки зрения и для каскадов водохранилищ [11]. Задаваясь значениями глубины потока вниз по течению, можно определить расстояние, на которое распространится подпор при переменных значениях уклона дна и расходах воды в русле реки, а следовательно, установить, находятся ли смежные водоемы в подпоре друг с другом. Если длина кривой подпора больше длины участка русла между смежными водоемами, то при поступлении воды из вышележащего водоема одновременно будет происходить поднятие уровня воды в нижележащем. Данный вариант характерен для расположения водоемов по схеме 1 при выполнении лабораторных исследований, а также для каскада водохранилищ на р. Свислочь (Заславское, Криницы, Дрозды, Комсомольское озеро, ТЭЦ-2, Чижовское), где расстояние между смежными водоемами значительно меньше длины кривых подпора, рассчитанных при расходах высокой обеспеченности [11].

Таким образом, с целью оценки уровня режима каскадов водохранилищ при различных сценариях возникновения гидродинамических аварий нами предлагается использовать критерий безопасности каскадного расположения гидроузлов (k_α), определяемый по следующим формулам:

$$\text{при условии } l_\phi < l_n: k_\alpha = \frac{\Delta h}{\sum_{i=1}^n \frac{\Delta T}{l_{np}}} = \sum_{i=1}^n \frac{v_y}{v_{np}}; \quad (4)$$

$$\text{при условии } l_\phi > l_n: k_\alpha = \frac{\Delta h}{\sum_{i=1}^n \frac{\Delta T_p + \Delta T}{l_n}} = \sum_{i=1}^n \frac{v_p}{v_n}; \quad (5)$$

где v_y – скорость поднятия уровня воды в нижележащем водоеме, м/с;

$v_{пр}$ – скорость поднятия уровня воды в водоеме с учетом изменения площади зеркала водохранилища, м/с;

$v_{п}$ – скорость поднятия уровня воды при расположении водоемов с учетом длины кривой подпора $l_{п}$, м/с;

$v_{р}$ – скорость поднятия уровня воды при наличии участка русла с длиной $l_{р}$ между водоемами, м/с;

$l_{пр} = \Delta S / \Delta h$ – приведенная длина водохранилища, равная отношению изменения площади водохранилища ΔS к разнице уровня Δh , м/с. Понятие «приведенная длина» вводится с учетом того, что водохранилища Республики Беларусь руслового типа имеют вытянутую в плане форму;

$l_{п}$ – длина кривой подпора свободной поверхности жидкости, м.

Формула (4) применима, если нижележащие водоемы каскада находятся в подпоре с вышележащими, т. е. фактическое расстояние между смежными водоемами $l_{ф}$ меньше, чем длина кривой подпора $l_{п}$. Приведенное в числителе выражение $\Delta h / \Delta T$ характеризует скорость поднятия уровня воды $v_{у}$ в водоеме в зависимости от величины напора на водосливе Δh , выражение в знаменателе $l_{пр} / \Delta T$ – это скорость поднятия уровня воды $v_{пр}$ с учетом изменения площади зеркала ΔS от уровня Δh .

При расчете критерия безопасности по формуле (5) учитывается длина участка русла с нормальной глубиной h_0 , а также длина кривой подпора $l_{п}$ от плотины до естественного русла. Тогда скорость $v_{р}$ характеризует время, за которое происходит поднятие уровня на величину Δh с учетом прохождения водным потоком участка русла длиной 1000 м (для натуральных условий) и глубиной h_0 , а скорость $v_{п}$ – время поднятия уровня от НПУ до гребня плотины с учетом гидрологических характеристик водохранилища. Суммарное значение приведенных скоростей учитывает количество водоемов в каскаде, а также наличие и длину участка русла между гидроузлами с нормальной глубиной h_0 .

В таблице 3 приведены результаты расчета критерия безопасности k_{α} для каскада водохранилищ на р. Свислочь с учетом различных сценариев возникновения гидродинамических аварий. В данной таблице в числителе указаны фактические значения предложенного критерия при водосбросных расходах 5 %-ной обеспеченности, а в знаменателе – предельно допустимые значения данного критерия, полученные в предположении того, что при нормальных условиях эксплуатации допускается кратковременное повышение уровня воды в водохранилищах до отметки ФПУ.

Таблица 3 – Значения критерия безопасности k_{α} для тестовых каскадов водохранилищ

Название каскада	Критерий безопасности k_{α} при различных сценариях возникновения аварий			
	перелив	проран	вставка	водосброс
Каскад на р. Свислочь*	$1,4 \cdot 10^{-3} /$ $5,7 \cdot 10^{-5}$	$1,7 \cdot 10^{-3} /$ $8,2 \cdot 10^{-4}$	$6,2 \cdot 10^{-4} /$ $3,9 \cdot 10^{-4}$	$6,4 \cdot 10^{-4} /$ $6,2 \cdot 10^{-4}$
<i>Примечание:</i> * в числителе приведены расчетные значения критерия безопасности $k_{\alpha(р)}$, в знаменателе – предельно допустимые значения $k_{\alpha(д)}$ данного критерия.				

Таким образом, условие безопасности каскадного расположения гидроузлов имеет следующий вид:

$$k_{\alpha(р)} \leq k_{\alpha(доп)}. \quad (6)$$

Приведенные в табл. 3 значения показывают, что условия безопасности каскадного расположения гидроузлов практически выполняются только при своевременном открытии

затворов водосбросных сооружений, а также при устройстве в теле плотины размываемой грунтовой вставки в качестве резервного водосброса. Наихудшими вариантами возникновения аварии являются перелив воды через гребень и образование прорана в теле плотины.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате полученных значений скорости поднятия (снижения) уровня воды при моделировании уровня режима каскадов водохранилищ можно сделать вывод о том, что даже при расположении в подпоре малые водохранилища способны аккумулировать расходы воды малой обеспеченности. Минимальное расстояние между смежными водоемами рекомендуется принимать не менее длины кривой подпора, поскольку в таком случае при возникновении аварийных ситуаций на вышележащих водоемах скорость поднятия уровня воды в нижележащих будет значительно ниже, чем при их расположении в подпоре.

На основании полученных экспериментальных данных по скорости изменения уровня режима и расчетных значений кривых подпора участков свободной поверхности обоснован и разработан критерий безопасности каскадного расположения гидроузлов. Данный критерий позволяет количественно оценить различные сценарии возникновения гидродинамических аварий и схемы расположения гидроузлов. В дальнейших исследованиях критерий безопасности каскадного расположения гидроузлов будет являться составной частью математической модели по оценке вероятности возникновения гидродинамических аварий.

ЛИТЕРАТУРА

1. Макагонова, М.А. Проблема антропогенного воздействия на гидроклиматическую систему / М.А. Макагонова // Управление водно-ресурсными системами в экстремальных условиях [Электронный ресурс] : сб. статей Междунар. конф. Москва 04–05 июн. 2008 г. – Электрон. дан. и прогр. (700 Мб). – М., 2008. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM) : зв., цв. (на рус. и англ. яз.).
2. Бубер, А.Л. Многоцелевое использование компьютерного моделирования для решения задач управления каскадом гидроузлов Нижней Кубани / А.Л. Бубер М.А. Волинов, М.В. Трошина // Управление водно-ресурсными системами в экстремальных условиях [Электронный ресурс] : сб. статей Междунар. конф. Москва 04-05 июн. 2008 г. – Электрон. дан. и прогр. (700 Мб). – М., 2008. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM) : зв., цв. (на рус. и англ. яз.).
3. Беднарук, С.Е. Опыт управления каскадом волжско-камских водохранилищ с использованием имитационных математических моделей в период весеннего половодья / С.Е. Беднарук, Ю.Г. Мотовилов // Управление водно-ресурсными системами в экстремальных условиях [Электронный ресурс] : сб. статей Междунар. конф. Москва 04-05 июн. 2008 г. – Электрон. дан. и прогр. (700 Мб). – М., 2008. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM): зв., цв. (на рус. и англ. яз.).
4. Pemobade, A.A. Design and Operational Optimisation of Water Supply and Distribution Systems / A.A. Pemobade, N.J. Manson, D. Stephenson. // Proceedings, 4th Biennial Congress of the African Division of the IAHR on Conserving and Sharing Water Resources in a Water Scarce Environment. Windhoek, Namibia. 7-9 June 2000.
5. Пастухов, С.М. Методика лабораторных исследований уровня режима каскадов водохранилищ / С.М. Пастухов // Вестник Ком.-инж. ин-та МЧС Респ. Беларусь. – 2010. – № 2 (12). – С. 4–13.
6. 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.
7. Бахметьев, Б.А. Гидравлика открытых русел / Б.А. Бахметьев. – Л. : Стройиздат наркомстроя, 1941. – 246 с.
8. Штеренлихт, Д.В. Гидравлические расчеты : учеб. пособие. / Д.В. Штеренлихт, В.М. Алышев, Л.В. Яковлева. – М. : Колос, 1992. – 287 с.