

УДК 001.891.53:[627.8.034:712.5]

## МЕТОДИКА ЛАБОРАТОРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ УРОВЕННОГО РЕЖИМА ВОДОХРАНИЛИЩ, РАСПОЛОЖЕННЫХ В КАСКАДАХ

Пастухов С.М.

Командно-инженерный институт МЧС Республики Беларусь

e-mail: plamennyj98@gmail.com

*Представлена методика лабораторных исследований уровня режима водохранилищ, расположенных в каскадах. Методика учитывает различные сценарии возникновения гидродинамических аварий. На основании анализа водохранилищного фонда Республики Беларусь приведено обоснование расположения гидроузлов в каскадах по двум схемам: при наличии участка русла между водоемами и при его отсутствии. Приведено обоснование масштаба моделирования, а также критериев геометрического и динамического подобия. Представлены схема лабораторной установки и внешний вид моделей гидротехнических сооружений, сконструированных на основании проектных данных по объектам Витебской области. Сделан вывод о возможном использовании разработанной методики для оценки уровня режима водохранилищ, расположенных в каскадах, при возникновении на них чрезвычайных ситуаций.*

*Laboratory research procedure for water level variation of tandem reservoir system is presented. It particularly includes different hydrodynamic disaster initiation scenarios. Based on reservoir stock of the Republic of Belarus two variants of reasonable tandem reservoir system arrangement are noted: with or without channel segment between reservoirs. There is particular part of the article dedicated to modeling scale validation, as well as to geometric and dynamic similarity criteria. Laboratory setups and developed on the Vitebsk region objects data on waterworks models appearance are submitted. The proposition of presented procedure possible usage for water level variation assessment at tandem reservoir systems in case of emergencies is made.*

(Поступила в редакцию 10 мая 2010 г.)

### ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в Республике Беларусь созданы и эксплуатируются свыше 150 искусственных водных объектов (водохранилищ) с полным объемом более 1 млн м<sup>3</sup>. Большинство искусственных водоемов относятся к русловому типу регулирования и располагаются не на главных реках, а на притоках первого–третьего порядков [1]. Для наиболее полного и рационального водохозяйственного использования эти водоемы соединяются в каскады [2]. В настоящее время в стране существуют 25 каскадов, в состав которых входят 70 водохранилищ.

Создание каскада водохранилищ влияет на внутригодовое распределение стока, уменьшая объем половодья и увеличивая сток в меженный период. Каскадное расположение оказывает определенное влияние на характер уровня и волнового режима водоемов, а также на распределение скорости внутриводоемных течений. Кроме того, в работе Г.А. Радионова [3] (по Волжско-Камскому каскаду водохранилищ) указывается, что при таком расположении происходит увеличение высот ветровых волн. Так, в случае зарегулирования водотоком одной реки высота волн не превышает 0,5–0,8 м, а при каскадном расположении увеличиваются длины ветрового разгона. На ряде водоемов высота волн достигает трех метров.

Каскадное расположение водохранилищ вызывает интерес не только с точки зрения рационального использования водных ресурсов, но и с точки зрения оценки безопасности и недопущения возникновения на них гидродинамических аварий. По данным литературных источников, в период половодий и паводков на каскадах водохранилищ путем

маневрирования затворами регулируется уровень воды в вышележащем и всех нижележащих водоемах, что приводит к недопущению затопления местности и пропуску паводка с расходом расчетной обеспеченности 1–5 %. Однако в случае повреждения либо разрушения вышележащего гидроузла происходит резкое повышение уровня воды в нижележащем водохранилище, следствием чего могут быть перелив через гребень плотины и разрушение нижележащих водоемов.

С целью изучения уровня режима каскадного регулирования водохранилищ Республики Беларусь при высоких водосбросных расходах нами были проведены лабораторные исследования в гидравлической лаборатории Белорусского национального технического университета.

### СЦЕНАРИИ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ АВАРИЙ

Методика лабораторных исследований уровня режима водохранилищ основана на сценарном подходе возникновения гидродинамических аварий на водоемах, образующих каскад. Сценарии разрабатывались исходя из анализа многочисленных литературных источников, а также на основании собственных натуральных исследований состояния гидротехнических сооружений водоемов [4], позволивших выявить возможные причины разрушения гидроузлов. Методика проведения натуральных наблюдений детально представлена в работе [4].

Основой лабораторного эксперимента являются следующие сценарии возникновения гидродинамических аварий:

1. *Перелив воды через гребень плотины* – такое развитие событий возможно вследствие нарушения эксплуатации водосбросных сооружений, а также вследствие возникновения сверхрасчетного паводка. 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 [5]. Несвоевременное поднятие затворов может быть вследствие нарушения режима эксплуатации, а также из-за отсутствия подъемного оборудования.

Так называемый «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 окружающего воздуха и высоком запасе снежного покрова. Причинами перелива воды через гребень плотины при каскадном расположении водоемов могут быть также аварийный сброс воды либо разрушение вышележащего гидроузла.

2. *Образование прорана в теле плотины* – такой сценарий возможен при поочередном либо одновременном ледовом воздействии на напорные верховые откосы, протекании на них процессов абразии вследствие колебания уровня воды, а также волновом воздействии. Кроме того, причиной прорана могут являться фильтрационные деформации сооружений (суффозионный вынос грунта из основания и тела плотины) [6].

### МЕТОДИКА ЛАБОРАТОРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Основной целью проведения лабораторных исследований было установление зависимости поднятия уровня воды в нижележащем водоеме от расхода и времени ее поступления, а также сценария возникновения аварии в вышележащем водоеме.

Схема лабораторной установки приведена на рис. 1–2. Установка представляет собой гидравлический лоток 1 шириной 1,07 м и длиной 15,4 м. Непосредственно к лотку примыкает бак 2, в котором установлен треугольный водослив 3. Для достижения равномерного движения жидкости по лотку в баке устроена ниша 4 глубиной 0,3 м, выполняющая функцию водобойного колодца.

Были разработаны и изучены следующие схемы каскадного расположения гидроузлов:

1. Участок русла между искусственными водоемами отсутствует, и они расположены непосредственно друг за другом (например, водохранилища Заславское, Криницы, Дрозды, Комсомольское озеро – каскад на р.Свислочь) (рис. 1).

2. В лотке расположены два искусственных водоема, соединенных друг с другом посредством участка русла (например, водохранилища Чигиринское и Тетеринское – каскад на р. Друть) (рис. 2).

При расположении водоемов по схеме 1 в лотке 1 были сконструированы 4 плотины. Коэффициенты заложения верхового и низового откосов плотин принимались равными  $m_1 = m_2 = 2,5$ . Расстояние от водослива 3 до первой плотины, а также между остальными плотинами принималось постоянным и равным 2,0 м. Первые две плотины 6, 8 были выполнены глухими (рис. 3, а), без водосбросных сооружений. По центру третьей плотины 10 в соответствии с данными [7] была устроена размываемая грунтовая вставка 11 трапециевидальной формы размером 24,4 см в верхней части и 1,0 см в нижней части. Вставка заполнялась однородным песчаным грунтом, средний диаметр которого составлял  $d_{50} = 0,3$  мм.

Работа водосброса с размываемой грунтовой вставкой состояла в следующем. В обычных условиях эксплуатации гидроузла грунтовая вставка выполняет роль подпорного сооружения, являясь частью напорного фронта. При сверхрасчетном превышении уровня воды в верхнем бьефе, когда пропускная способность основного водосброса исчерпывается, происходят перелив через грунтовую вставку и ее запланированное разрушение до ограниченного неразрываемой одеждой предела [7]. Скорейшему разрушению вставки способствует ее сужение к основанию плотины. За счет данной конструкции происходят увеличение скорости водного потока и вымыв грунта.

В четвертой плотине 13 было устроено водосбросное отверстие 14 шириной 15 см (рис. 3, б) с затвором 15, входящим в предварительно проделанные пазы в теле модели. Привод поднятия затвора осуществляется вручную при помощи металлической штанги и направляющих в теле плотины.

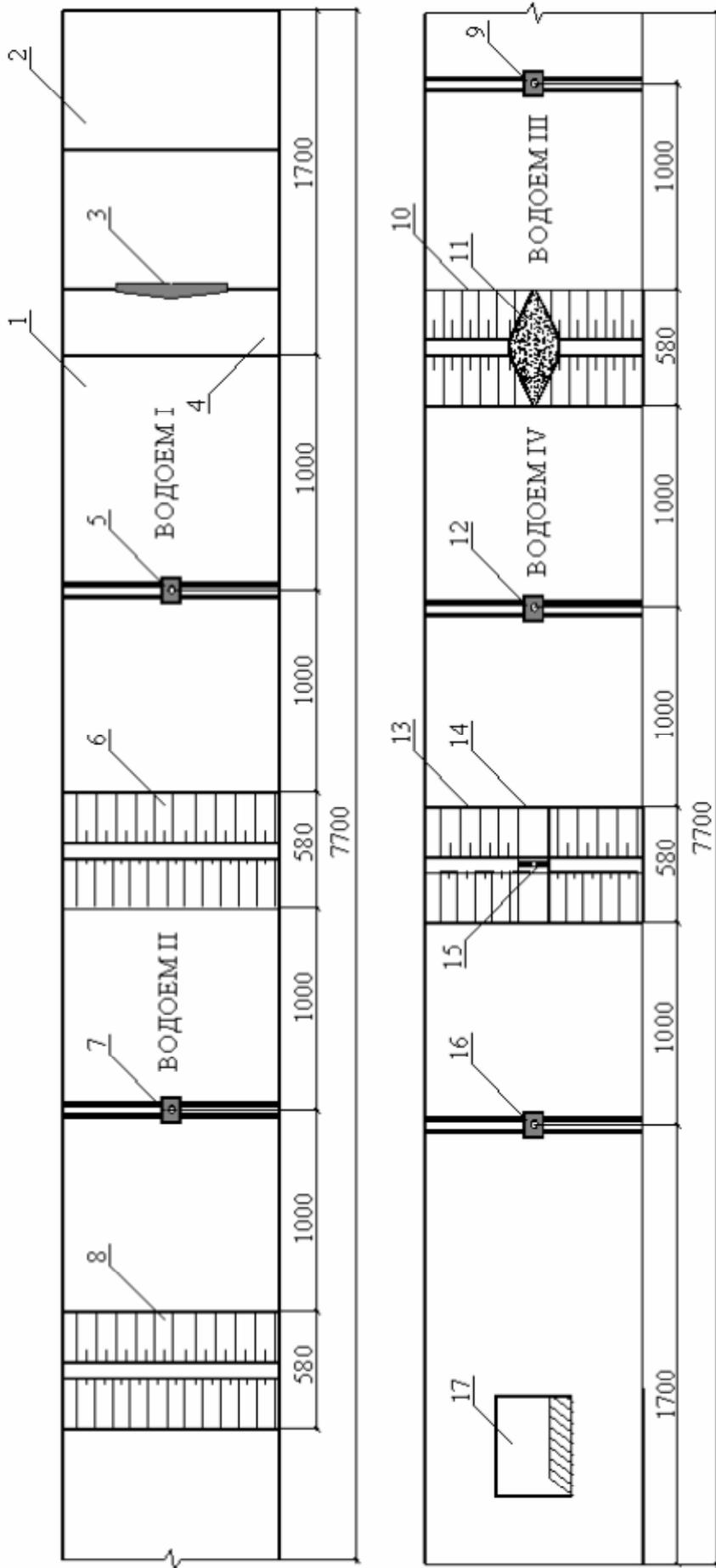
При расположении водоемов по схеме 2 расстояние между вышележащей плотиной и водосбросом составляло 2,0 м. Длина прямоугольного участка русла, соединяющего водоемы, составляла 10 м. Уклон русла соответствовал естественному и составлял 0,0001.

После проведения серии опытов с наличием в модели плотины водосброса затвор из нее извлекался, и водосливное отверстие заполнялось грунтом, состав которого был аналогичен составу размываемой грунтовой вставки. При данной конструкции осуществлялось моделирование образования прорана в теле плотины. Высота заложения грунтовой призмы была на одном уровне с гребнем плотины. После завершения серии опытов по исследованию образования прорана плотина 13 из лотка 1 извлекалась, и на ее место устанавливалась плотина 10 с размываемой грунтовой вставкой.

Для изготовления моделей гидротехнических сооружений (ГТС) была использована клееная фанера, защищенная полиэтиленовым покрытием. Места примыкания моделей к лотку, а также места соединений отдельных элементов друг с другом герметизировались гидроизолирующим материалом (силиконом).

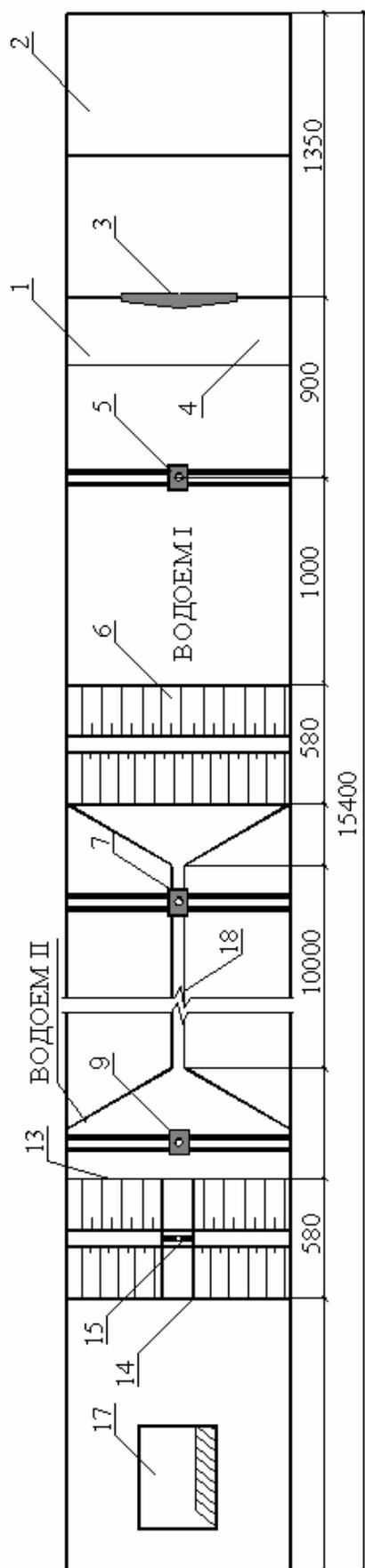
### **ВЫПОЛНЕНИЕ УСЛОВИЙ ГЕОМЕТРИЧЕСКОГО И ДИНАМИЧЕСКОГО ПОДОБИЯ**

В соответствии с работой [8] при исследовании движения жидкости в лабораторных условиях модель гидротехнических сооружений необходимо подготовить таким образом, чтобы она была геометрически и динамически подобна действительному сооружению. При соблюдении данного условия найденные при испытании модели величины можно без изменения переносить на натуру.



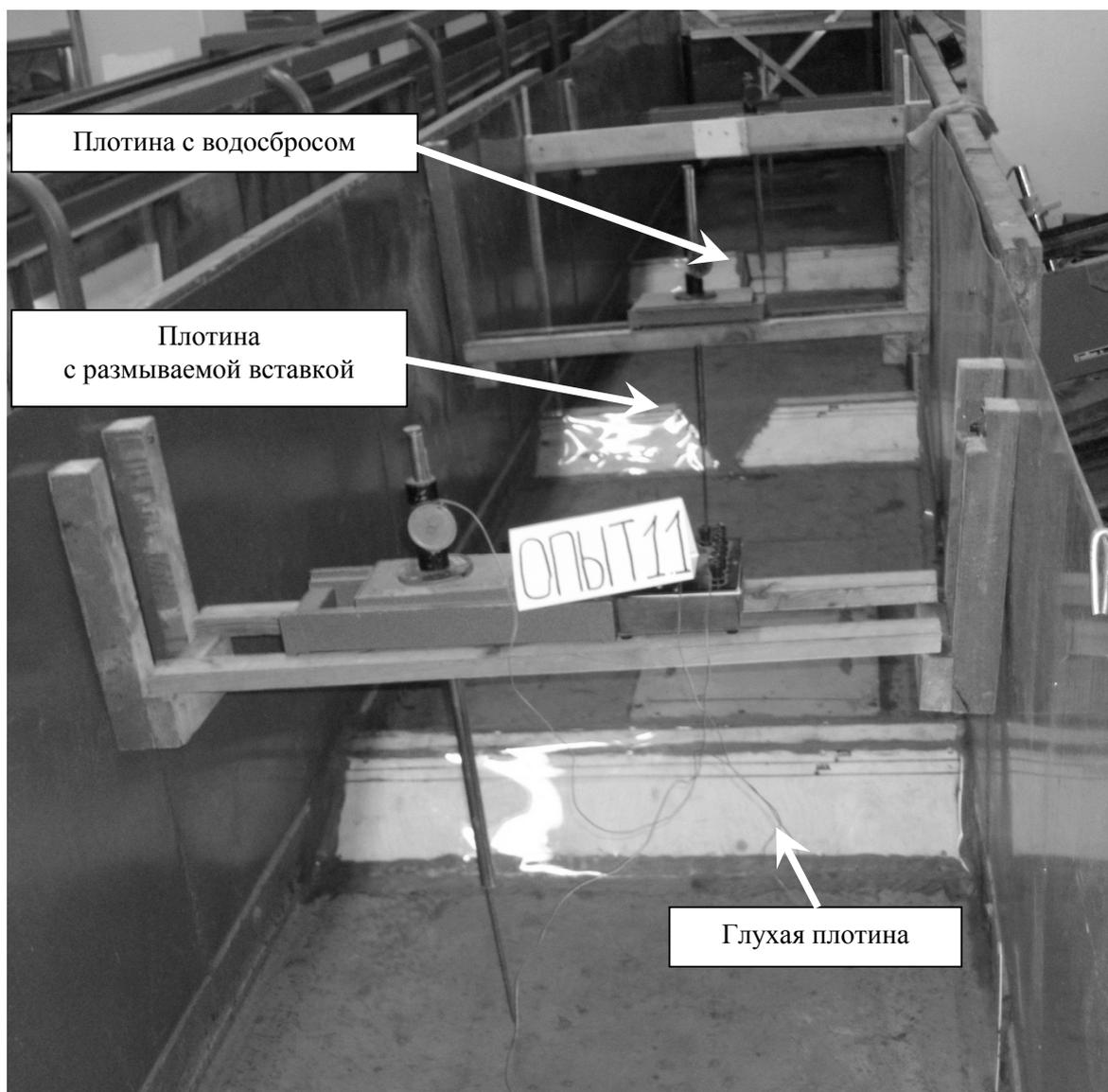
1 – русловой лоток; 2 – мерный бак; 3 – треугольный водослив; 4 – гаситель энергии водного потока; 5, 7, 9, 12, 16 – мерные иглы; 6, 8 – глухая плотина; 10 – плотина с размываемой грунтовой вставкой; 11 – размываемая грунтовая вставка; 13 – плотина с водобросом; 14 – водобросное отверстие; 15 – затвор; 17 – сливное отверстие

**Рисунок 1 – Расположение моделей гидротехнических сооружений в лабораторной установке по схеме 1**

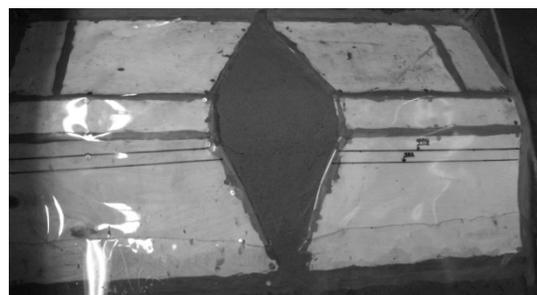
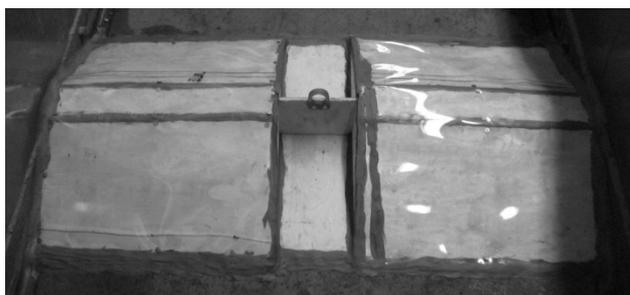


1 – русловой лоток; 2 – мерный бак; 3 – треугольный водослив; 4, 6, 7 – мерные иглы; 8 – участок русла между гидроузлами; 9 – плотина с водобросом; 10 – водобросное сооружение; 11 – затвор; 12 – сливное отверстие; 13 – плотина с водобросом; 14 – водобросное отверстие; 15 – затвор; 16 – мерная игла; 17 – сливное отверстие

**Рисунок 2 – Расположение моделей гидротехнических сооружений в лабораторной установке по схеме 2**



*a*



*a* – глухая плотина; *б* – плотина с водосбросом; *в* – плотина с размываемой грунтовой вставкой

**Рисунок 3 – Внешний вид моделей гидротехнических сооружений, установленных в гидравлическом лотке**

Две гидравлически системы будут геометрически подобными, если между соответствующими размерами этих систем всюду существует постоянное соотношение:

$$\frac{l_n}{l_m} = \alpha_l = \text{const}; \quad (1)$$

где  $l_n$  – некоторый размер действительного сооружения (натуры);

$l_m$  – соответствующий размер модели;

$\alpha_l$  – масштаб длин.

За основу геометрических размеров моделей гидротехнических сооружений (рис. 4) принимались проектные данные по водохранилищам Витебской области, а именно по Браславской ГЭС, Волпянской ГЭС, Гезгальской ГЭС, Гомельской ГЭС и Добромысленской ГЭС. Масштаб, в котором выполнялись модели гидротехнических сооружений, принимался в соответствии с [9] и составлял 1:100. Геометрические параметры гидротехнических сооружений и значения расходов различной обеспеченности для натуры и модели приведены в табл. 1 и 2 соответственно.

Таблица 1 – Параметры гидротехнических сооружений (для натуральных условий)

Название водохранилища	$B, \text{ м}$	$L, \text{ м}$	$H, \text{ м}$	$m_1$	$m_2$	$Q_{10\%}, \text{ м}^3/\text{с}$	$Q_{5\%}, \text{ м}^3/\text{с}$	$Q_{1\%}, \text{ м}^3/\text{с}$	Параметры русла между гидроузлами, м	
									$b$	$h$
Браславская ГЭС	6,0	209,0	6,5	1:2,5	1:2,5	23,5	54,8	58,5	1,731	1,25
Волпянская ГЭС	6,0	240,0	6,3	1:2,5	1:2,5	18,6	175,0	291,0	6	0,8
Гезгальская ГЭС	10,0	330,0	6,0	1:2,5	1:2,5	72,2	158,0	237,0	8	1
Гомельская ГЭС	3,0	72,0	8,3	1:2,5	1:2,5	19,7	68,7	93,5	5,89	1
Добромысленская ГЭС	5,0	164,0	6,2	1:2,5	1:2,5	36,4	190,0	250,0	6	1,1

Таблица 2 – Параметры гидротехнических сооружений (модель)

Название водохранилища	$B, \text{ м}$	$L, \text{ м}$	$H, \text{ м}$	$m_1$	$m_2$	$Q_{10\%}, \text{ м}^3/\text{с}$	$Q_{5\%}, \text{ м}^3/\text{с}$	$Q_{1\%}, \text{ м}^3/\text{с}$	Параметры русла между гидроузлами, м	
									$b$	$h$
Браславская ГЭС	0,06	2,09	0,07	1:2,5	1:2,5	0,00024	0,00055	0,00059	0,009	0,006
Волпянская ГЭС	0,06	2,40	0,06	1:2,5	1:2,5	0,00019	0,00175	0,00291	0,030	0,004
Гезгальская ГЭС	0,10	3,30	0,06	1:2,5	1:2,5	0,00072	0,00158	0,00237	0,040	0,005
Гомельская ГЭС	0,03	0,72	0,08	1:2,5	1:2,5	0,00020	0,00069	0,00094	0,029	0,005
Добромысленская ГЭС	0,05	1,64	0,06	1:2,5	1:2,5	0,00036	0,0019	0,00250	0,030	0,006

*Примечание:* условные обозначения к таблицам 1, 2:  $B$  – ширина плотины по гребню;  $L$  – длина плотины по гребню;  $H$  – высота плотины;  $m_1, m_2$  – коэффициент заложения верхового и низового откоса соответственно;  $Q_{(10\%, 5\%, 1\%)}$  – расход воды через водосброс 10 %-ной, 5 %-ной и 1 %-ной обеспеченности;  $b$  – ширина русла реки по верху;  $h$  – глубина воды в русле.

Для выполнения условий динамического подобия в соответствии с [8, 10] при моделировании потоков жидкости, характеризуемых наличием свободной поверхности, исходили из критерия Фруда:  $(Fr)_m = (Fr)_n$ , следовательно:

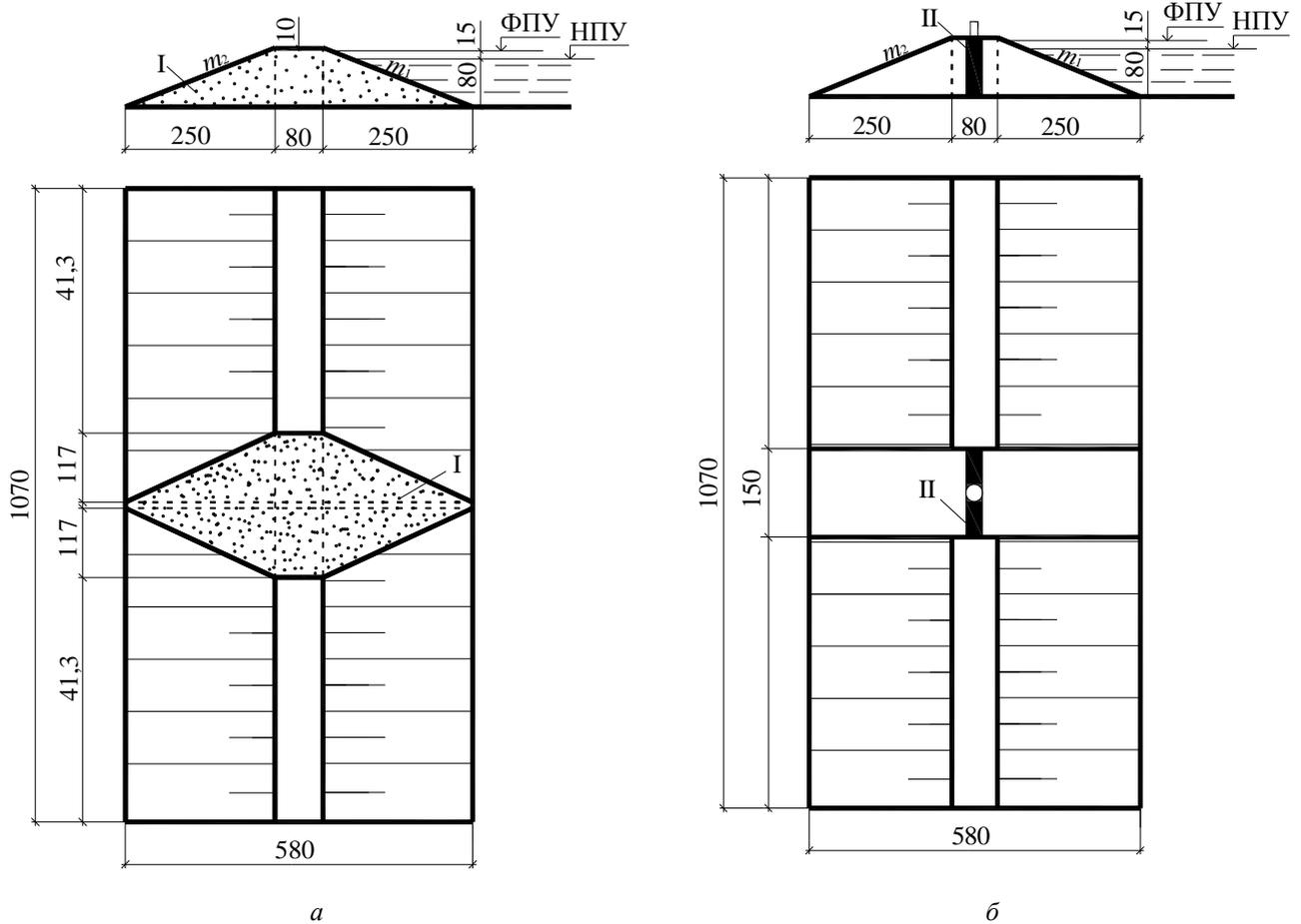
$$\frac{v_m^2}{l_m g} = \frac{v_n^2}{l_n g}, \quad (2)$$

где  $v$  – средняя скорость, м/с;

$l$  – характерный линейный размер, м;

$g$  – ускорение силы тяжести, м/с<sup>2</sup>;

$m, n$  – индексы, относящиеся, соответственно, к модели и натуре.



*a* – плотина с размываемой грунтовой вставкой (I); *б* – плотина с водосбросом (II)

**Рисунок 4 – Геометрические параметры моделируемых гидротехнических сооружений**

Поскольку основной целью лабораторных исследований было установление зависимостей скорости поднятия (опускания) уровня воды в водоемах от величины приточности, то исходили только из одного критерия подобия (критерия Фруда). Силами вязкости (критерием Рейнольдса) в данном случае пренебрегали и считали, что рассматриваемое движение обуславливается, главным образом, силами тяжести.

Учитывая вышеприведенное для достижения динамического подобия отношения элементов природы к элементам модели и исходя из условия  $(Fr)_м = (Fr)_н$  имеем: для расхода –  $\alpha_l^{2,5}$ , для времени и скорости –  $\alpha_l^{0,5}$ .

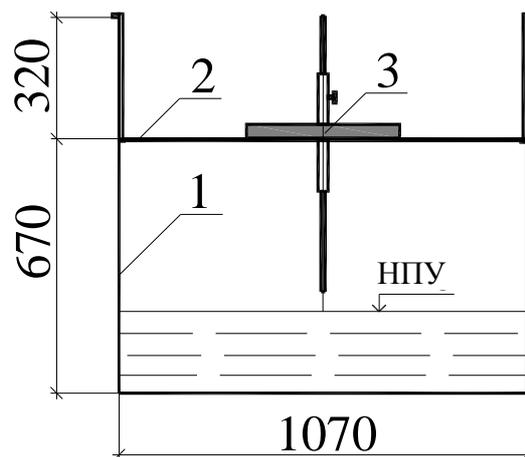
Расчетное значение критерия Фруда при различных сценариях возникновения аварии получалось меньше 1, что говорит о спокойном движении водного потока как на модели, так и в натуре. Таким образом, дополнительным условием моделирования было [8]:

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

### ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

Перед проведением измерений осуществлялось заполнение водой предварительно протарированного бака 2, а также водоемов I–IV (см. рис. 1) и I–II (см. рис. 2) до уровня воды, соответствующего нормальному подпорному уровню (НПУ). Заполнение водоемов производилось при помощи сети подводящих к лотку трубопроводов.

Уровень воды в верхнем бьефе каждого водоема, расположенного в каскаде, измеряется с использованием мерных игл (поз. 5, 7, 9, 12, 16 на рис. 1–2). Крепление игл осуществлялось на специальных подставках (поз. 2 на рис. 5). Все иглы были оснащены световой индикацией при касании их водной поверхности.



1 – гидравлический лоток; 2 – устройство крепления мерных игл к лотку;  
3 – мерная игла

**Рисунок 5 – Схема установки мерной иглы в гидравлическом лотке**

Подача воды с постоянным расходом в гидравлический лоток осуществлялась через треугольный водослив 3 (см. рис. 2). Расход воды, проходящей через треугольный водослив 3 и поступающей в лоток 1, определялся по тарировочной кривой и для контроля проверялся по формуле Кинга [11]:

$$Q = 1,343H^{2,47}, \quad (4)$$

где  $H$  – геометрический напор на водосливе, м.

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

При расположении водоемов по схеме 1 мерные иглы устанавливались в центральной части каждого водоема. В случае расположения водоемов по схеме 2 иглы устанавливались в верхнем бьефе водоемов, соединяющихся участком русла 18.

Дополнительно в плотине 10 осуществлялось наблюдение за размывом грунтовой вставки 11. При переливе воды через гребень плотины 13 производилось поднятие затвора 15 и измерение интенсивности снижения воды в водоеме IV (при расположении водоемов по схеме 2 – в водоеме II).

После каждой серии опытов модели гидротехнических сооружений восстанавливались, размываемая вставка 11 заполнялась грунтом, затвор 15 возвращался в закрытое положение, и водоемы снова заполнялись до необходимых отметок.

Одновременно с выполнением прямых измерений осуществлялась контрольная (дублирующая) видеозапись процессов перелива воды через гребень плотины, размыва грунтовой вставки и опорожнения водоема после поднятия затвора.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанная методика оценки уровня режима водохранилищ, расположенных в каскадах, предназначена для определения механизма развития гидродинамических аварий на всех водоемах каскада и получения зависимостей скорости поднятий (снижения) уровня воды в водоемах от поступающего расхода. Представленная методика позволяет учитывать сценарии возникновения гидродинамических аварий, а следовательно, может быть использована при оценке уровня режима одиночных водохранилищ и каскадов на стадии их проектирования и эксплуатации.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Водохранилища Беларуси : справочник / М.Ю. Калинин [и др.] ; под общ. ред. М.Ю. Калинина. – Минск : Полиграфкомбинат им. Я.Коласа, 2005. – 183 с.
2. Российское акционерное общество энергетики и электрификации «ЕЭС России». Гидротехника. Основные понятия. Термины и определения. СО 34.21.308-2005. – Введ. 01.01.06. – СПб. : ОАО «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева», 2005. – 69 с.
3. Радионов, Г.А. Волжско-Камский каскад гидроэлектростанции – основа комплексного использования ресурсов Поволжья / Г.А. Радионов, Л.С. Подоплелов ; под ред. проф. А.Д. Шабанова. – Саратов : Изд-во Саратовского ун-та, 1983. – 103 с.
4. Левкевич, В.Е. Натурные исследования рискообразующих факторов на гидроузлах Республики Беларусь, расположенных в каскадах / В.Е. Левкевич, С.М. Пастухов // Вестник Ком.-инж. ин-та МЧС Респ. Беларусь. – 2008. – № 1 (7). – С. 4–12.
5. Малик, Л.К. Факторы риска повреждения гидротехнических сооружений. Проблемы безопасности / Л.К. Малик. – М. : Наука, 2005. – 354 с.
6. Методические указания по проведению анализа риска аварий гидротехнических сооружений: СТП ВНИИГ 210.02.НТ-04. – Введ. 19.11.2004. – СПб. : Изд-во ОАО «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева», 2005. – 108 с.
7. 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.
8. Чугаев, Р.Р. Гидравлика (техническая механика жидкости) / Р.Р. Чугаев. – 4-е изд. – Л. : Энергоиздат, 1982. – 672 с.
9. Единая система конструкторской документации. Масштабы : ГОСТ 2.302-68\*. – Введ. 01.01.71. – М. : Межгос. совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 1971. – 1 с.
10. Леви, И.И. Моделирование гидравлических явлений / И.И. Леви. – Л. : Энергия, 1967. – 210 с.
11. Френкель, Н.З. Гидравлика / Н.З. Френкель. – М. : Госэнергоиздат, 1956. – 456 с.