

УДК 621.22

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОДОСЛИВНОЙ ПЛОТИНЫ ГРОДНЕНСКОЙ ГЭС

Г.Г. Круглов, кандидат технических наук

Н.Н. Линкевич, кандидат технических наук

Белорусский национальный технический университет

Ключевые слова: водосливная плотина, моделирование, расчетный расход, режим сопряжения бьефов, пропуск льда

Введение

В последние десятилетия во всем мире отмечается устойчивый интерес к вопросам использования возобновляемых источников энергии: гидравлической, ветровой, геотермальной, солнечной и др. Это объясняется сокращением запасов органического топлива, растущими затратами на его добычу и увеличением его использования неэнергетическими отраслями хозяйства. Как известно, доля альтернативных источников в энергетическом балансе в ближайшей перспективе должна достигнуть 25% [1].

Природные условия Республики Беларусь (незначительная среднегодовая скорость ветра $\leq 3,5$ м/с, малое число солнечных дней в году, отсутствие термальных источников) определяют выбор гидравлической энергии в качестве основного возобновляемого источника.

Использование гидроэнергетического потенциала рек Беларуси составляет 2,5 %, что несопоставимо с показателями ведущих мировых держав (США – 92 %, Норвегия – 93, Япония – 78, Канада – 65 % и т.д.). Для Беларуси интерес к развитию собственной гидроэнергетики обусловлен стремлением достигнуть максимальной независимости от источников органического топлива за рубежом, а также постоянно растущими ценами на топливо.

Основными первоочередными направлениями в использовании гидроэнергетического потенциала Республики Беларусь являются [2]:

- строительство гидроэлектростанций на крупных и малых реках;
- реконструкция и восстановление ранее построенных малых ГЭС;
- строительство ГЭС на существующих водохранилищах неэнергетического назначения. В более отдаленной перспективе возможно строительство гидроаккумулирующих электростанций с наземными и подземными зданиями и нижними бассейнами.

В соответствии с этими направлениями начато строительство на р. Неман Гродненской ГЭС установленной мощностью 17 МВт. В состав сооружений Гродненской ГЭС входят бетонная водосливная плотина, здание ГЭС и глухая земляная плотина.

В связи с тем, что водосливная плотина должна обеспечить в подтопленном режи-

ме пропуск значительных паводковых расходов (расчетный паводок 3%-ной обеспеченности 2250 м³/с и поверочный – 0,5%-ной обеспеченности – 3280 м³/с), пропуск льда расчетной толщиной 68 см и надежное гашение кинетической энергии потока в нижнем бьефе, потребовались гидравлические исследования плотины на физической модели. Эти исследования были выполнены в гидравлической лаборатории кафедры гидротехнического и энергетического строительства Белорусского национального технического университета.

Выбор масштаба моделирования

В основу гидравлических исследований водосливной плотины Гродненской ГЭС положен метод физического моделирования [3-8], целью которого является воспроизведение в уменьшенном масштабе изучаемых явлений и обеспечение полного подобия натуральных и модельных явлений.

Для правильного воспроизведения одинаковой физической природы явлений должно обеспечиваться механическое подобие изучаемых явлений, т.е. их кинематическое и динамическое подобие, которое выражается в геометрическом подобии сопоставимых явлений и траекторий движения сходственных частиц жидкости, в сохранении одинаковой ориентации в пространстве границ потока, пропорциональности и параллельности действующих в сходственных точках жидкости сил, постоянстве отношений плотности по всему полю течения. Это выражается в сохранении геометрического подобия форм, распределении скоростей, давлений и других физических констант.

Геометрическое подобие реализуется легко, так как необходимо только сделать модель, подобную натуре. Значительно сложнее осуществить во всех частях модели подобие одноименных физических параметров, для которых требуется равенство своего критерия подобия.

В случае движения потока в напорных системах, когда преобладают силы сопротивления, моделируют исходя из критерия Рейнольдса.

При моделировании безнапорных турбулентных потоков, характеризуемых наличием свободной поверхности, где движение происходит с преобладанием сил тяжести над силами сопротивления, определяющим является равенство критериев Фруда для модели и природы, т.е.

$$Fr = \frac{V_M^2}{g \ell_M} = \frac{V_H^2}{g \ell_H} = idem \quad (1)$$

где V_M и V_H – средние скорости для сходственных живых сечений модели и природы;

ℓ_M и ℓ_H – линейные размеры модели и природы.

Для моделирования на основе гравитационного подобия необходимо также выполнение условий квадратичного сопротивления, т.е. если поток в природе турбулентный,

то он должен быть турбулентным и на модели. В этом случае силы вязкости не оказывают заметного влияния. Режим движения потока характеризуется критерием Рейнольдса

$$Re = \frac{V_M \ell_M}{\nu} = \frac{V_H \ell_H}{\nu}, \quad (2)$$

где $\nu = \nu_M = \nu_H$ – кинематический коэффициент вязкости жидкостей на модели и в натуре, которые принимаются одинаковыми, считая, что на модели и в натуре используется одна жидкость.

При этом число Рейнольдса на модели сравнивается с критическим числом Рейнольдса $Re_{кр}$.

Для открытых потоков при равномерном движении

$$Re = \frac{VR}{\nu} = \frac{Vh}{\nu} \quad (3)$$

где h – глубина потока, R – гидравлический радиус,

$$R = \frac{\omega}{\chi} \quad (4)$$

ω – площадь поперечного сечения потока; χ – смоченный периметр.

Критическое значение числа Рейнольдса $Re_{кр}$ для открытых русел считается равным 800...900. Для турбулентных потоков должно соблюдаться условие

$$Re > Re_{кр} \quad (5)$$

Для модели и натуре также должны быть равны значения коэффициентов гидравлического трения

$$K_H = K_M = idem \quad (6)$$

или

$$C_H = C_M = idem, \quad (7)$$

где C – коэффициент Шези.

Пересчет параметров с модели на натуре при этом будет вестись по зависимостям:

линейных размеров	$\ell_H = \ell_M \lambda$	
площади	$\omega_H = \omega_M \lambda^2$	
уклонов	$i_H = i_M$	(8)
скоростей	$V_H = V_M \lambda^{0,5}$	
расходов	$Q_H = Q_M \lambda^{2,5}$	
	,	

где λ – масштаб моделирования.

Кинематический коэффициент вязкости воды при средней ее температуре в лабораторных условиях 12°C $\nu = 0,0124 \text{ см}^2/\text{с}$.

Масштаб моделирования λ выбирается максимально возможным, исходя из натуральных условий и возможностей лаборатории (плановых и высотных размеров гидравлического лотка, максимальной величины расхода лабораторной насосной установки и т.д.).

В соответствии с заданием на проведение исследований необходимо промоделировать пропуск расчетного и поверочного паводковых расходов. Так как моделироваться будет один водосливной пролет, то натурные расходы ($\text{м}^3/\text{с}$), которые должны пропускаться через него, составят:

для расчетного паводкового расчета 3 %-ной обеспеченности

$$Q_{\text{от}} = \frac{2250}{4} = 562,5$$

для поверочного расхода 0,5 %-ной обеспеченности

$$Q_{\text{от}} = \frac{3280}{4} = 820$$

При отметке дна нижнего бьефа 92,0 м максимальная высота сооружения, которая должна быть представлена на модели, составляет 13 м (отметка гребня бычка 105 м).

Ширина водосливного пролета 20 м и два полубычка толщиной 2,5 и 1,25 м определяют ширину сооружения 23,75 м, которую необходимо замоделировать.

В соответствии с вышеприведенными размерами водосливного пролета, максимальными расходами воды, а также размерами гидравлического лотка и расходами насосной установки гидравлической лаборатории БНТУ был определен масштаб моделирования, который принят 1:72. Считается, что при моделировании водопропускных сооружений по критерию Фруда при $Re > Re_{\text{кр}}$ приемлемо использование моделей без искажения геометрического подобия при масштабах 1:15...1:60.

Далее необходимо найти величины максимального и минимального расходов на модели, соответствующие им глубины потока на опытной установке, и проверить условие (5), при соблюдении которого справедливо моделирование по закону подобия Фруда.

С учетом масштаба моделирования расход, который должен проходить через водосливной пролет плотины на модели,

$$Q_{\text{м}} = \frac{Q_{\text{н}}}{\lambda^{2,5}} \quad (9)$$

где λ – масштаб моделирования; $Q_{\text{н}}$ – натуральный расход.

Максимальный натуральный расход $820 \text{ м}^3/\text{с}$, а минимальный – $150 \text{ м}^3/\text{с}$, который устанавливается при пропуске льда при отметке верхнего бьефа НПУ = 102,0 м и открытии клапана высотой 1 м сегментного затвора. Глубина воды в нижнем бьефе в этом случае

составит: $94,8 \text{ м} - 92,0 \text{ м} = 2,8 \text{ м}$.

С учетом масштаба моделирования минимальный и максимальный расходы на модели

$$Q_{\text{м}}^{\text{max}} = \frac{820}{72^{2,5}} = 0,018641 \text{ м}^3 / \text{с} = 18641 \text{ см}^3 / \text{с}$$

$$Q_{\text{м}}^{\text{min}} = \frac{150}{72^{2,5}} = 0,00341 \text{ м}^3 / \text{с} = 3410 \text{ см}^3 / \text{с}$$

Глубины потока (см) в нижнем бьефе на модели

$$h^{\text{min}} = \frac{280}{72} = 3,89 \quad h^{\text{max}} = \frac{1180}{72} = 16,39$$

Ширина нижнего бьефа – 32,5 см.

Гидравлические радиусы (см):

$$R^{\text{min}} = \frac{32,5 \cdot 3,89}{32,5 + 2 \cdot 3,89} = \frac{126,43}{40,28} = 3,14$$

$$R^{\text{max}} = \frac{32,5 \cdot 16,39}{32,5 + 2 \cdot 16,39} = \frac{532,68}{65,28} = 8,16$$

Скорости потока в нижнем бьефе (см/с):

$$V^{\text{min}} = \frac{3410}{32,5 \cdot 3,89} = 26,97 \quad V^{\text{max}} = \frac{18641}{32,5 \cdot 16,39} = 34,99$$

Тогда числа Рейнольдса на модели в нижнем бьефе, где изучаются гидравлические явления:

$$Re^{\text{min}} = \frac{26,97 \cdot 3,14}{0,0124} = 6829,5 \quad Re^{\text{max}} = \frac{34,99 \cdot 8,16}{0,0124} = 23025$$

Следовательно, условие (5) соблюдается и возможно моделирование по критерию Фруда.

При подборе материалов для изготовления модели исходили из того, что плотина возводится из бетона, для которого может быть принят коэффициент шероховатости $n_{\text{н}} = 0,014-0,017$. Для геометрически подобной модели, которая в l раз меньше натуре, коэффициент шероховатости модели $n_{\text{м}}$ должен быть меньше в $\delta_{\text{н}}$ раз коэффициента шероховатости натуре

$$n_{\text{м}} = \frac{n_{\text{н}}}{\delta_{\text{н}}} \tag{10}$$

где $\delta_{\text{н}} = \delta y$ – масштабный множитель коэффициента шероховатости; $\delta = l$ – линейный масштабный множитель; y – показатель степени в формуле Н.Н. Павловского, который приблизительно можно определить по формуле:

$$y = 1,3 \sqrt{n_n} \quad (11)$$

Масштабный множитель $\delta = \lambda = 72$. Определение коэффициента шероховатости модели приведено в табл. 1.

Таблица 1. Определение коэффициента шероховатости модели

n_n	y	$d_n = d^y$	n_m
0,014	0,154	1,932	0,00725
0,017	0,169	2,060	0,00885

Таким образом, бетонным конструкциям реальной плотины на модели соответствуют гладкие поверхности с коэффициентом шероховатости $n = 0,00725 \dots 0,00885$. Согласно [3-8], такие поверхности могут быть изготовлены из тщательно оструганных досок, покрытых эмалевой краской.

Описание экспериментальной установки

Модель одного пролета водосбросной плотины была изготовлена в масштабе 1:72 (см. рисунок). По вырезанному из картона шаблону тщательно выверялись геометрические размеры модели, выполненной из дерева. Отдельно изготавливались два полубычка и все элементы соединялись между собой. Все грани плотины и полубычков зачищались наждачной бумагой, шпаклевались и покрывались эмалевой краской.

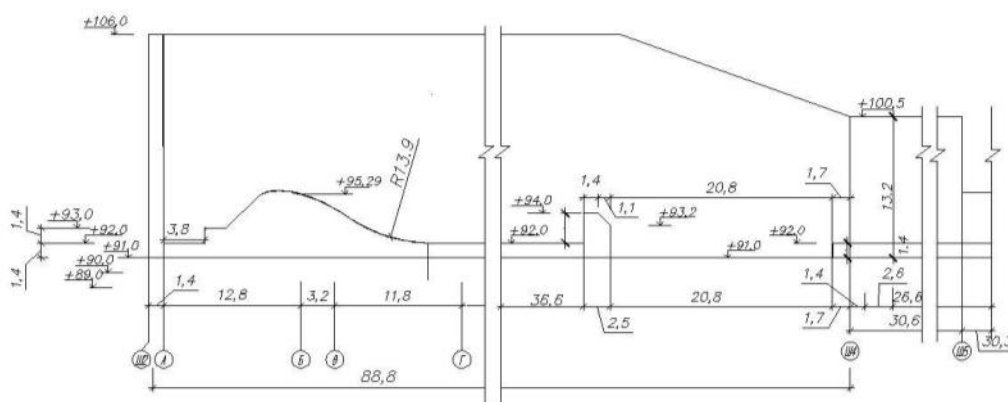


Схема опытной установки (размеры в см, отметки в м)

В собранном виде модель водосливной плотины устанавливалась в гидравлическом зеркальном лотке шириной 32,5 см и длиной 11 м. Расстояние от оголовка мерного водослива на входе в лоток до модели принято около 5 м, а до выхода из лотка – около 6 м. Таким образом, вход и выход потока из лотка не оказывали влияния на режимы потока в верхнем и нижнем бьефах модели.

Отводящий и подводящий каналы выполнялись в виде пола из деревянных досок на

Таблица 2. Координаты водосливной поверхности модели (x, y, см)

x	0	0,49	0,97	1,46	1,94	2,43	2,92	3,40	3,89	4,38	4,86	5,35	5,83	6,32	6,81	7,29	7,78	8,26	8,75	9,24	15,83
y	-0,44	-0,2	-0,08	-0,01	0	0,03	0,09	0,18	0,29	0,44	0,60	0,80	1,01	1,24	1,50	1,77	2,06	2,37	2,70	3,05	4,86

всю ширину лотка. Все высотные размеры опытной установки выставлялись относительно отметки гребня водослива, который устанавливался по уровню, строго горизонтально. Очертание водосливной поверхности модели было выполнено по координатам, приведенным в табл. 2.

Для измерения отметок уровней воды на бортах лотка были установлены две мерных иглы. Одна в верхнем бьефе, на расстоянии 65 см от напорной грани плотины, где не сказывается кривая спада, образующаяся на входе потока в водосливное отверстие и распространяющаяся в сторону верхнего бьефа на расстояние 3...5 напоров на гребне водослива, т.е. 35...60 см. В нижнем бьефе мерная игла установлена в конце рисбермы на расстоянии 65 см от водобойного колодца. Точность измерения отметок уровней воды при помощи мерных игл 0,1 мм.

Расход, подаваемый на модель плотины, измерялся с помощью треугольного мерного водослива. Точность измерения 0,1 л/с.

Скорость течения потока измерялась с помощью тарированной вертушки конструкции ЦНИИКИВР. Погрешность в определении среднего значения скорости в каждой точке не превышает 2 %.

Для моделирования процесса пропуска льда через водосбросную плотину и оценки сил, возникающих при контактах льда с сооружением, необходимо, прежде всего, выдержать геометрическое подобие, уменьшив все размеры в λ раз. Кроме того, материал, заменяющий на модели лед, должен иметь прочность и модуль упругости в λ раз меньше природного льда [4,8-11]. Однако, моделирование процессов разрушения льда осуществить достаточно сложно. Поэтому моделирование пропуска льда через сооружение и особенно возникающих сил взаимодействия может дать лишь качественную картину явления с достаточно грубым приближением к натуре [11].

При выборе материала, заменяющего лед на модели, испытывались парафин, воск, технический жир, нафталин, древесные опилки, пропитанная вата, смеси этих материалов, клеенные деревянные пластинки и пластинки из полимерных материалов, ослабленные ледяные пластины и лед пониженной прочности.

В связи с тем, что моделирование сил, возникающих при контакте льда с сооружением, и процессов разрушения льда в задании на исследования не предусматривалось, а ставилась задача качественной оценки процесса пропуска льдин, в опытах использовался искусственно замороженный лед размером в плане 13x18, 9x13 см² и толщиной 1 см, что соответствовало натурным размерам льдин 10x13, 6,5x10 м² и толщине льда 0,7 м.

Заключение

На основании проведенных гидравлических исследований установлено, что водосливная плотина Гродненской ГЭС, состоящая из четырех пролетов по 20 м каждый, пропускает расчетный паводковый расход 3 %-ной обеспеченности при отметке уровня воды в верхнем бьефе 102,45 м, что на 0,45 м выше отметки НПУ.

Поверочный паводковый расход 0,5 %-ной обеспеченности пропускается при отметке уровня воды в верхнем бьефе 105,17 м, что на 0,67 м выше отметки ФПУ.

Сопряжение бьефов при пропуске расчетного и поверочного паводковых расходов происходит при затопленном гидравлическом прыжке.

Максимальные значения средней скорости на оси потока в конце рисбермы 3,42 м/с при пропуске расчетного паводкового расхода и 4,02 м/с – при пропуске поверочного паводкового расхода.

Расчетный расход $Q = 150 \text{ м}^3/\text{с}$, при котором планируется сбрасывать в нижний бьеф лед через открытый клапан высотой 1 м, пропускается при отметке уровня воды в верхнем бьефе 103,79 м, что на 1,79 м выше отметки НПУ.

Пропуск льда в нижний бьеф при расходе $150 \text{ м}^3/\text{с}$ и соответствующей ему отметке уровня воды в НБ 94,8 м сопровождается ударами льдин о водосливную поверхность плотины и о конструкции крепления дна в нижнем бьефе.

Во избежание ударов льдин о водосливную поверхность плотины и водобойные конструкции нижнего бьефа пропуск льда необходимо начинать при отметке уровня воды в нижнем бьефе 98,0 м, что соответствует пропускаемому расходу $900 \text{ м}^3/\text{с}$.

Литература

1. Шенец, Л.В. Модернизация энергетической отрасли через энергоэффективные и ресурсосберегающие технологии / Л.В.Шенец // Белорусский промышленный форум, 2007. Технологии. Оборудование. Качество. 10-й Междунар. симпоз., 15-18 мая 2007. Сб. матер. – Минск, 2007. – С. 25-26.
2. Альферович, А.Н. Современное состояние и возможные пути развития гидроэнергетики Беларуси/ А.Н.Альферович, П.М.Богославчик, Л.А.Гриневич, Г.Г.Круглов, Н.В.Синицын. / Известия вузов и энергетических объединений СНГ// Энергетика. – 1993. – № 3-4.
3. Ляхтер, В.М. Гидравлическое моделирование / В.М.Ляхтер, А.М. Прудовский. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 39 с.
4. Шарп, Д.Ж. Гидравлическое моделирование./Д.Ж.Шарп. – М.: Мир, 1984. – 279 с.
5. Агроскин, И.И. Гидравлика./ И.И.Агроскин, Г.Г.Дмитриев, Ф.И.Пикалов. – М.-Л.: Энергия, 1964. – 352 с.
6. Справочник по гидравлическим расчетам. Под ред. П.Г. Киселева. – М.: Энергия, 1972. – 312 с.
7. Зегжда, А.П. Теория подобия и методика расчета гидротехнических моделей./ А.П.Зегжда. – М.-Л.: Госстройиздат, 1938. – 164 с.
8. Веников, В.А. Теория подобия и моделирования применительно к задачам электроэнергетики./ В.А.Веников – М.: Высшая школа, 1966.
9. Панфилов, Д.Ф. Моделирование давления и пропуска льда. Известия вузов. / Д.Ф.Панфилов. Строительство и архитектура. – 1964. – № 7. – С. 115-122.

- 10.Петруничев, Н.Н. О динамическом давлении льда на гидротехническое сооружение. Льдотермические вопросы в гидротехнике./Н.Н.Петруничев. – М.-Л.: Гидрометеиздат, 1954. – С. 17-64.
11.Пропуск льда через гидротехнические сооружения./Под ред. К.Н.Коржавина. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 182 с.

Summary

Kruglov G. , Linkevitch N. Modeling of Spillway Dam of Grodno HPP

Method of physical modeling is accepted as a basis for hydrostatic test of spillway dam of Grodno NPP. The scale of modeling is defined as 1:72. It is stated that designed flood discharge of 3% occurrence passes through 0.45 m higher than normative headwater level (NHL), and verifying flood discharge of 0.5% occurrence is 0.67 m higher than maximum flood level (MFL). To avoid ice cake stroke against overflow surface of the dam and baffle weir structures of downstream pool, passing of ice cakes is to be started when elevation of water in downstream pool equals 98.0 m, that corresponds to 960 m³/s. of throughput discharge.

Поступила 27 февраля 2009 г.