

станций общей мощностью более 200 МВт, что для нашей Республики очень много. В ней ставится задача перехода к сооружению ГЭС с единичной мощностью более 10 МВт. В настоящее время идет строительство первого такого объекта – Гродненской ГЭС на р. Неман и завершено проектирование Полоцкой ГЭС на р. Западная Двина.

Как видно из приведенной выше таблицы, выполнение программ идет успешно.

УДК 621.22

Г.Г. Круглов, Н.Н. Линкевич (БНТУ)

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОДОСБРОСНОГО СООРУЖЕНИЯ ПОЛОЦКОЙ ГЭС

Республика Беларусь испытывает постоянные финансовые трудности при расчете за импортируемые топливно-энергетические ресурсы. Для снижения расхода органического топлива на производство электрической энергии существует несколько путей. Один из них - развитие гидроэнергетики путем строительства гидроэлектростанций малой и средней мощности.

В связи с тем, что водосбросная плотина Полоцкой ГЭС должна обеспечить пропуск значительных паводковых расходов (расчетный паводок – 3 % -й обеспеченности 3750 м³/с, поверочный – 0,5 % -й обеспеченности 5000 м³/с) пропуск льда и надежное сопряжение бьефов потребовались гидравлические исследования на физической модели для проверки пропускной способности плотины, режима сопряжения бьефов и пропуска льда.

В основе гидравлических исследований паводкового водосброса Полоцкой ГЭС лежит метод физического моделирования [1...6], цель которого 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 подо-

бия, которые выражаются в геометрическом подобии сопоставляемых явлений и траекторий движений сходственных частиц жидкости, в сохранении одинаковой ориентации в пространстве границ потока, пропорциональности и параллельности действующих в сходственных точках жидкости сил, постоянства отношений плотности по всему полю течения. Это выражается в сохранении геометрического подобия форм, распределение скоростей, давлений и других физических констант [1 ... 6].

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

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

$$Fr = \frac{V_M^2}{g l_M} = \frac{V_N^2}{g l_N} = idem, \quad (1)$$

где V_M и V_N – средние скорости для сходственных живых сечений модели и природы; l_M и l_N – 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, тогда силы вязкости не оказывают заметного влияния. Режим движения потока характеризуется критерием Рейнольдса

$$Re = \frac{V_M \cdot l_M}{\nu} = \frac{V_N \cdot l_N}{\nu}, \quad (2)$$

где $\nu = \nu_m = \nu_n$ – кинематический коэффициент вязкости жидкостей на модели и в натуре, которые принимаются одинаковыми, считая, что на модели и в натуре используется одна и та же 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 R - гидравлический радиус:

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

ω – площадь поперечного сечения потока, χ - смоченный периметр.

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

$$Re > Re_{кр}. \quad (5)$$

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

$$K_m = K_n = idem \quad (6)$$

или

$$C_m = C_n = idem, \quad (7)$$

где C – коэффициент Шези.

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

$$\left\{ \begin{array}{ll} \text{линейных размеров } \ell_H = \ell_M \cdot \lambda; \\ \text{площадей} & \omega_H = \omega_M \cdot \lambda; \\ \text{уклонов} & J_H = J_M; \\ \text{скоростей} & V_H = V_M \cdot \lambda^{0,5}; \\ \text{расходов} & Q_H = Q_M \cdot \lambda^{0,5}, \end{array} \right. \quad (8)$$

где λ – масштаб моделирования.

Кинематический коэффициент вязкости воды при средней ее температуре в лабораторных условиях 12 °С равен

$$\nu = 0,0124 \text{ см}^2 / \text{с}.$$

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

Плотина с безвакуумным водосливом, построенным по координатам Кригера-Офицера при профилирующем напоре на гребне равным 6,0 м.

В соответствии с заданием на проведение исследований необходимо промоделировать пропуск поверочного расхода 0,5 %-ой обеспеченной, расчетного расхода 3 %-ой обеспеченности и пропуск расхода через затворы высотой 4 м, установленные на гребне водосливной плотины, при отметке в верхнем бьефе равной НПУ.

Поверочный паводковый расход обеспеченностью 0,5 % равный 5000 м³/с должен проходить при уровне воды в нижнем бьефе 121,80 м. При отметке дна водобойного колодца 105,0 м необходимая высота сооружения, которая должна быть представлена на модели составляет минимум 17 м. Гидравлические исследования проводятся для одного водосливного пролета плотины, шириной 12,0 м при наличии двух полубычков, шириной по 1,5 м каждый. В бычках устраиваются пазы для затворов глубиной 0,7 м и шириной 1,50 м. Аналогичные пазы устраиваются и со стороны нижнего бьефа. Один пролет водосливной плотины должен пропускать расход равный 500 м³/с.

В соответствии с вышеперечисленными размерами водосливного пролета, максимальным расходом воды, глубинами в верхнем и нижнем бьефах, а также размерами гидравлического лотка и расходами насосной установки гидротехнической лаборатории Белорусского национального технического университета был определен масштаб моделирования, который принят равным 1:47. Далее необходимо найти величину расчетного расхода на модели, соответствующую ему глубину 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, равен

$$Q_M = \frac{Q_H}{\lambda^{2,5}}, \quad (9)$$

где $\lambda = 47$ – масштабный коэффициент;

Q_H – расход, принятый расчетным при пропуске через один пролет плотины.

При пропуске расхода 0,5 % обеспеченности через один пролет проходит 500 м³/с. Этому расходу на модели будет соответствовать расход, определяемый по зависимости (9).

$$Q_{M,0,5\%} = \frac{500}{47^{2,5}} = 0,033016 \text{ м}^3/\text{с} = 33,016 \text{ л/с}.$$

Глубина потока в натуральных условиях в нижнем бьефе 15,8 м, а на модели будет равной

$$H_M^{\text{НБ}} = \frac{15,8 \text{ м}}{47} = 0,3362 \text{ м}$$

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

$$Re_{0,5\%} = \frac{VR}{\nu},$$

где скорость $V = \frac{Q_{M,0,5\%}}{\omega}$,

площадь живого сечения нижнего бьефа $\omega = v_{л} H_{M}^{НБ}$,

$v_{л}$ – ширина гидравлического лотка, $v_{л} = 32,5$ см

$$V = \frac{33016}{32,5 \cdot 33,62} = 30,22 \text{ см/с}.$$

Гидравлический радиус

$$R = \frac{\omega}{\chi} = \frac{32,5 \cdot 33,62}{2 \cdot 33,62 + 32,5} = 10,95 \text{ см}.$$

Число Рейнольдса

$$Re_{0,5\%} = \frac{30,22 \cdot 10,9}{0,0124} = 26686,2 > Re^{кр} = 900.$$

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

Расчетный паводковый расход 3 % – й обеспеченности равен $3750 \text{ м}^3/\text{с}$. Тогда через один пролет должен пропускаться расход $Q_{3\%} = 375 \text{ м}^3/\text{с}$. Этому расходу на модели будет соответствовать расход, вычисленный как

$$Q_{M3\%} = \frac{375}{47^{2,5}} = 0,024762 \text{ м}^3/\text{с} = 24,76 \text{ л/с}.$$

Глубина воды в нижнем бьефе в натуре равна 14,3 м, а на модели

$$H_M^{\text{НБ}} = \frac{14,3 \text{ м}}{47} = 0,3043 \text{ м},$$

$$V = \frac{24762}{32,5 \cdot 30,43} = 25,04 \text{ см/с},$$

$$R = \frac{32,5 \cdot 30,43}{2 \cdot 30,43 + 32,5} = \frac{988,975}{93,36} = 10,59 \text{ см},$$

$$\text{Re}_{3\%} = \frac{25,04 \cdot 10,59}{0,0124} = 21384,97 > \text{Re}^{\text{кр}} = 900.$$

И для этого расхода условие (5) соблюдается.

Для третьего случая на гребне водосливной плотины устанавливается затвор высотой 4 м и шириной 1,2... 1,4 м, что соответствует модельным размерам: высота 8,52 см, ширина 2,5 см. Для этих условий и при отметке верхнего бьефа, равной НПУ = 118 м, на модели проходит расход $Q_M = 3,60595$ л/с, что соответствует расходу в натуральных условиях $Q_H = 54,609$ м³/с.

По заданию для этого режима отметка уровня воды в нижнем бьефе 109,4 м, т.е. глубина воды в нижнем бьефе равна 3,4 м, что соответствует глубине воды на модели

$$H_M^{\text{НБ}} = \frac{3,4 \text{ м}}{47} = 0,0723 \text{ м},$$

$$V = \frac{3605,95}{32,5 \cdot 30,43} = 3,646 \text{ см/с},$$

$$R = \frac{32,5 \cdot 7,23}{2 \cdot 7,23 + 32,5} = \frac{234,975}{46,96} = 5,0 \text{ см},$$

$$Re = \frac{3,646 \cdot 5,0}{0,0124} = 1470,2 > Re^{кр} = 900.$$

Таким образом, для всех трех случаев, для которых будут выполняться гидравлические исследования, поток в нижнем бьефе будет турбулентный, так как расчетные значения числа Рейнольдса больше его критического значения. А это означает, что моделирование водосливной плотины Полоцкой ГЭС должно осуществляться в соответствии с критерием Фруда.

При подборе материалов для изготовления модели исходили из того, что плотина возводится из бетона, что в натуре перед сооружением и за ним укладываются железобетонные плиты, для которых коэффициент шероховатости может быть принят $n_n = 0,014 \dots 0,017$. Для геометрически подобной модели, которая в λ раз меньше натуре, коэффициент шероховатости материала модели n_m должен быть меньше в δ_m раз коэффициента шероховатости натуре

$$n_m = \frac{n_n}{\delta_n}, \quad (10)$$

где $\delta_n = \delta^y$ – масштабный множитель коэффициента шероховатости;

$\delta = \lambda$ – линейный масштабный множитель;

y – показатель степени в формуле Н.Н. Павловского, который приблизительно можно определить по формуле

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

Масштабный множитель $\delta = \lambda = 47$. После этого определялись коэффициенты шероховатости модели n_m , значения которых приведены в таблице 1.

Таким образом, железобетонным и бетонным конструкциям реальной плотины на модели соответствуют гладкие поверхности с коэффициентом шероховатости $n = 0,0077 \dots 0,0089$. Согласно [1 ...6]

такие поверхности могут быть изготовлены из тщательно ошпунтованных досок, покрытых эмалевой краской.

Таблица 1 – Определение коэффициентов шероховатости модели

n_n	y	$\delta_n = \delta^y$	n_m
0,014	0,154	1,81	0,00773
0,017	0,169	1,92	0,00886

Модель одного пролета водосливной плотины была изготовлена в масштабе 1 : 47 (рисунок 1). По вырезанному из картона шаблону тщательно выверялись геометрические размеры модели, выполненной из дерева. Отдельно изготавливались два полубычка и все элементы соединились между собой. Все грани плотины и полубычков зачищались наждачной бумагой, шпаклевались и покрывались эмалевой краской.

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 из лотка не оказывали влияния на режимы потока в верхнем и нижнем бьефах модели.

В нижнем бьефе водосливной плотины устраивался водобойный колодец глубиной 2,13 см и длиной 25,63 см. Съёмной доской, соответствующих размеров, водобойный колодец мог закрываться, образуя сопряжение водосливной поверхности

непосредственно с дном отводящего канала. Таким образом, моделировалась работа водосливной плотины без водобойного колодца.

Отводящий и подводящий каналы выполнялись в виде пола из деревянных досок на 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 Кригера-Офицера.

Для моделирования процесса пропуска льда через водосливную

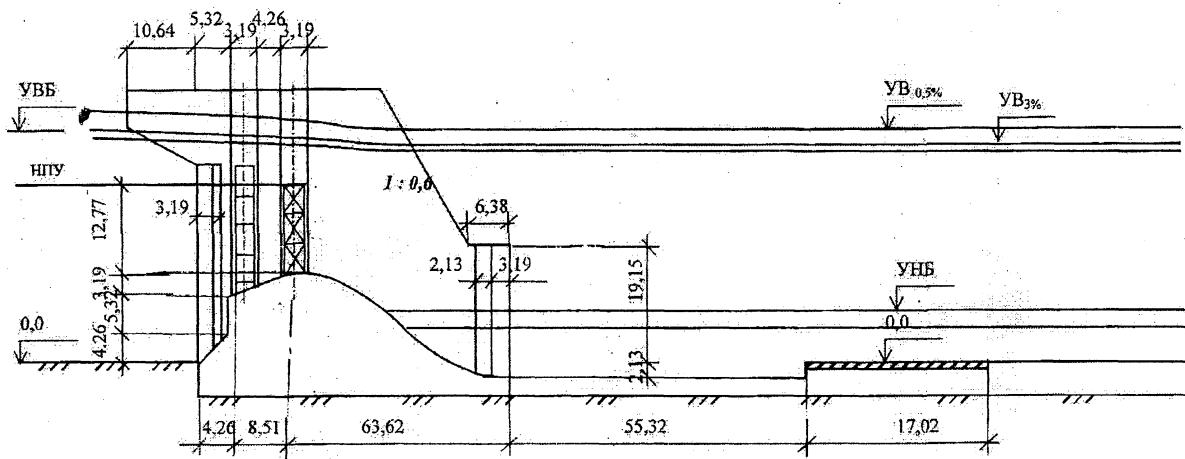


Рисунок 1 – Опытная схема установки

плотину и оценки сил, возникающих при контакте 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, 7... 10]. 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 [10].

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

В связи с тем, что ставилась задача качественной оценки процесса пропуска льдин, в опытах использовался искусственно замороженный лед размером в плане 20×20 см и толщиной около 1,6 см, что соответствовало натурным размерам льда 10×10 м и толщине льда 75 см.

Результаты гидравлических исследований позволили установить, что:

1. Расчетный паводок 3 % -ой обеспеченности проходит при отметке верхнего бьефа 120,8 м, а поверочный паводковый расход 0,5 % -ой обеспеченности - при отметке ФПУ = 122,4 м.

2. Сопряжение бьефов при пропуске расчетного и поверочного паводковых расходов, а также при переливе потока через шандронное заграждение высотой 4 м происходит при затопленном гидравлическом прыжке.

3. В связи с тем, что придонные скорости потока на сходе с рисбермы при отсутствии водобойного колодца увеличиваются на 25 ... 30 %, а также в связи с тем, что исследованы не все возможные схемы открытия затворов, рекомендуется устройство за водосливной плотиной водобойного колодца глубиной 1 м.

4. Пропуск льда через шандронное заграждение высотой 4 м при отметке верхнего бьефа равной НПУ = 112 м сопровождается ударами льдин по водосливной поверхности плотины, задержанием

льдин в зоне гидравлического прыжка с периодическими ударами по водосливной поверхности и поверхности водобоя.

Для увеличения дальности отброса струи, и предотвращения ударов льдин о водосливную поверхность плотины рекомендуется устройство на шандорном ограждении клапана высотой 1...1,5 м с плавным криволинейным очертанием его водосливной поверхности.

Во избежание задержки льдин в зоне гидравлического прыжка и предотвращения ударов о водосливную поверхность плотины и поверхность водобоя, пропуск льда необходимо начинать при глубине потока в нижнем бьефе не менее 5 м, т. е. при отметке уровня нижнего бьефа 111 м и выше.

Результаты исследований использованы при разработке архитектурного проекта гидроузла Полоцкой ГЭС на реке Западная Двина.

ЛИТЕРАТУРА

1. Справочник по гидравлическим расчетам. Под редакцией П.Г. Киселева. – М: Энергия, 1972. – 312 с.
2. Леви, И.И. Моделирование гидравлических явлений. – Л.: Энергия, 1967. – 210 с.
3. Ляхтер, В.М., Прудовский, А.М. Гидравлическое моделирование. – М: Энеоатомиздат, 1984.
4. Шарп, Д.Ж. Гидравлическое моделирование. – М.: Мир, 1984.
5. Агроскин, И.И., Дмитриев, Г.Т., Пикалов, Ф.И. Гидравлика. – М. – Л.: Энергия, 1964. – 352 с.
6. Зегжда, А.П. Теория подобия и методика расчета гидротехнических моделей. М. – Л.: Госстройиздат, 1938. – 164 с.
7. Веников, В.А. Теория подобия и моделирования применительно к задачам электроэнергетики. – М.: Высшая школа, 1966.
8. Панфилов, Д.Ф. Моделирование давления и пропуска льда. Известия Вузов. Строительство и архитектура. 1964. № 7. – С. 115-122.
9. Петруничев, Н.Н. О динамическом давлении льда на гидротехническое сооружение. Льдотермические вопросы в гидроэнергетике. – М. – Л.: Гидрометеиздат, 1954. – С. 17-64.
10. Под редакцией Коржавина, К.Н. Пропуск льда через гидротехнические сооружения. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 182 с.