

Георгий Георгиевич КРУГЛОВ, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой "Гидротехническое и энергетическое строительство" Белорусского национального технического университета

Николай Николаевич ЛИНКЕВИЧ, кандидат технических наук, доцент кафедры "Гидротехническое и энергетическое строительство" Белорусского национального технического университета

Ирина Николаевна ЛИНКЕВИЧ, студентка механико-математического факультета Белорусского государственного университета

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОДОСЛИВНОЙ ПЛОТИНЫ ПОЛОЦКОЙ ГЭС

MODELING FOR SPILLWAY DAM OF POLOCK HYDROELECTRIC STATION

Проведены моделирование и гидравлические исследования пропускной способности и сопряжения бьефов водосливной плотины Полоцкой ГЭС. Изучен процесс пропуск льда. Даны рекомендации по безопасной глубине воды в нижнем бьефе.

The paper describes physical modeling and hydraulic tests of discharge capacity and pools conjunction in respect of dam spillway of the Polock hydroelectric station. The process of ice passage through the spillway dam has been studied in the paper. The paper contains recommendations on safety depth downstream.

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы во многих странах активно используются возобновляемые источники энергии: гидравлической, ветровой, геотермальной, солнечной и др. Это является следствием сокращения запасов органического топлива, постоянно растущих затрат на его добычу и увеличения его использования неэнергетическими отраслями хозяйства.

Республика Беларусь испытывает 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 (ГЭС) малой и средней мощности. Природные условия Республики Беларусь (незначительная среднегодовая скорость ветра менее 3,5 м/с, малое число солнечных дней в году, отсутствие термальных источников) определяют выбор гидравлической энергии в качестве основного возобновляемого источника.

Основной гидроэнергетический потенциал Республики Беларусь сосредоточен на трех реках: Западной Двине, Немане и Днепре. На Западной Двине намечено сооружение каскада из четырех ГЭС: Верхнедвинской (установленной мощностью 29,0 МВт), Полоцкой (23,0 МВт), Бешенковичской (30,5 МВт) и Витебской (40,0 МВт). На реке Неман намечено сооружение каскада из двух ГЭС: Гродненской (17,0 МВт) и Немновской (20,5 МВт); на Днепре — каскада из трех ГЭС: Оршанской (4,9 МВт), Шкловской (5,5 МВт) и Могилевской (5,0 МВт). В настоящее время в стране работает более 40 малых ГЭС общей установленной мощностью около 15 МВт. Общий гидроэнергетический потенциал можно с достаточной степенью достоверности оценить в размере 215–220 МВт [1].

В республике накоплен достаточный опыт восстановления ранее построенных и возведения новых малых ГЭС, который позволил приступить к строительству ГЭС на Немане и Западной Двине, где для этого имеются благоприятные природные условия: удобные створы, при использовании которых затопление прилегающих

территорий сводится к минимуму, так как отметки НПУ водохранилищ не превышают уровней паводковых вод в бытовых условиях. В связи с этим завершено проектирование Полоцкой ГЭС на Западной Двине.

КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ КОНСТРУКЦИЙ ПЛОТИН

В состав сооружений Полоцкой ГЭС входят здание ГЭС, бетонная водосливная и глухая земляная плотины. В архитектурном проекте в качестве водосливного сооружения была принята гравитационная водосливная плотина, очерченная по координатам профиля Ямборга, с десятью водосливными отверстиями по 12 м каждое и высотой отверстия при нормальном подпорном уровне (НПУ) 8 м. На этапе строительного проекта, при разработке уточнения конструктивно-компоновочных решений по основному сооружению был предложен вариант гравитационной водосливной плотины, очерченной по координатам Офицерова-Кригера, с шестью водосливными отверстиями шириной 20 м каждое и высотой отверстия при НПУ 6,8 м, и вариант плотины, очерченной по координатам профиля Ямборга с шестью отверстиями шириной 20 м каждое и высотой при НПУ 8,0 м.

Обе водосливные плотины должны обеспечивать в подтопленном режиме пропуск значительных паводковых расходов (расчетный паводок 3%-ной обеспеченности — 3750 м³/с и поверочный 0,5%-ной обеспеченности — 5000 м³/с), льда, наносов и надежное гашение кинетической энергии потока в нижнем бьефе. Для выбора окончательного варианта водосливной плотины и проверки принятых конструктивных решений потребовались гидравлические исследования этих типов плотин на физических моделях. Данные исследования были выполнены в гидравлической лаборатории кафедры "Гидротехническое и энергетическое строительство" БНТУ.

Компоновка Гродненской ГЭС (рис. 1) принята русской. Здание ГЭС и водосливная плотина расположены в русле реки. Водосливная плотина запроектирована в двух вариантах:

Первый вариант — гравитационная водосливная плотина практического профиля, очерченная по координатам

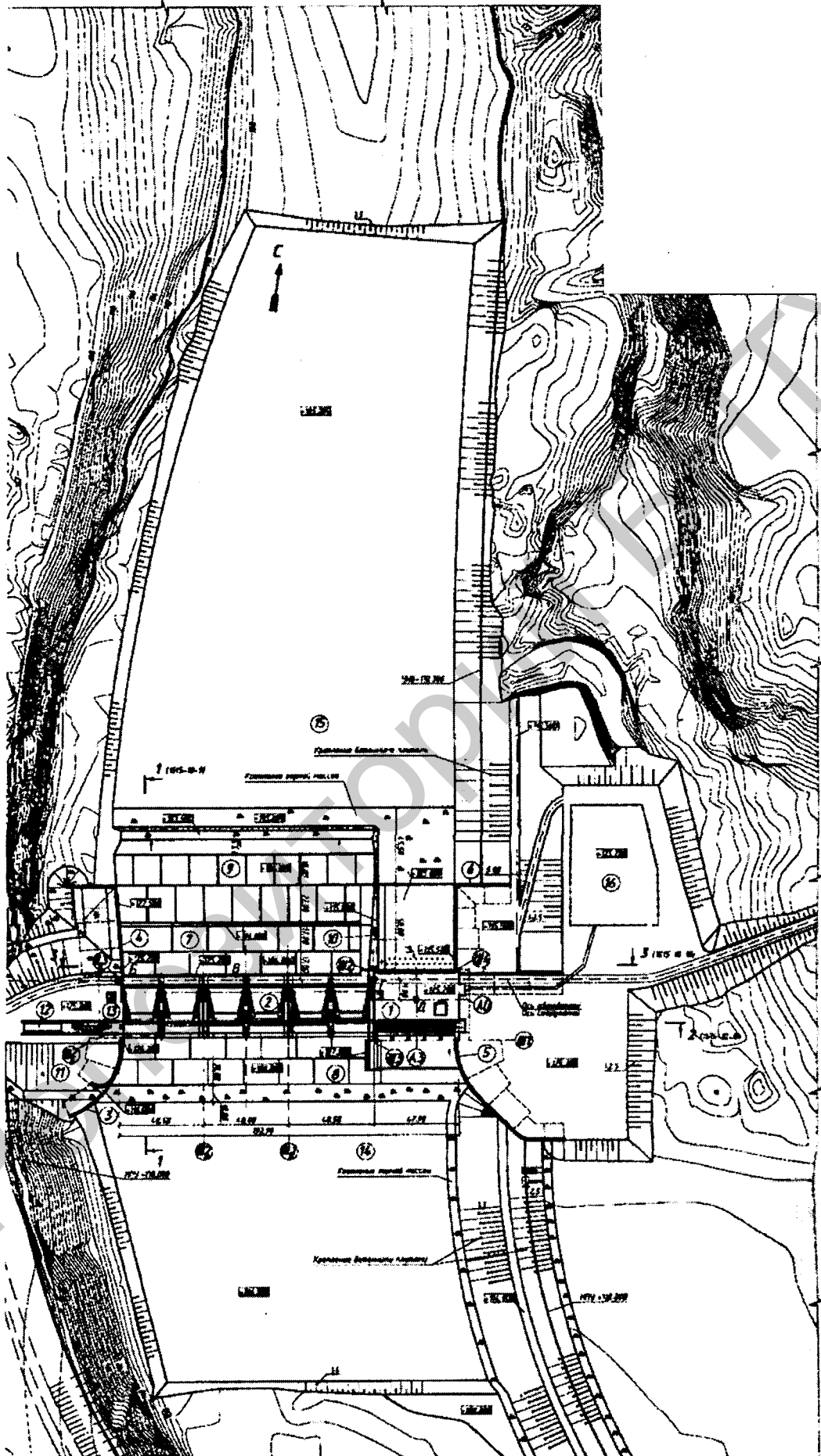


Рис. 1. Компонка Полоцкой ГЭС на р. Западная Двина

Офицерова-Кригера, с шестью водосливными отверстиями по 20 метров шириной каждое и высотой отверстия при НПУ 6,8 м. Построение водосливной грани плотины приведено на рис. 2.

Водосливной фронт плотины, равный 120 м, разбит пятью бычками на шесть водосливных отверстий. Два крайних бычка и центральный, неразрезные, выполнены толщиной 3,0 м, второй и четвертый бычки разрезные, толщиной 5,0 м каждый. Очертание напорной грани неразрезных бычков треугольное, разрезных — трапециевидное. В бычках выполнены пазы для ремонтных затворов глубиной 0,6 м и шириной 1,2 м. В качестве рабочих приняты сегментные затворы с клапаном шириной 17,0 м.

Гравитационная плотина имеет распластанный профиль с шириной подошвы 31,27 м. Максимальная высота плотины от отметки ее гребня до подошвы низового зуба — 10,5 м, высота водослива над отметкой дна реки — 5,2 м. Напорная грань плотины имеет ломаное очертание: от отметки подошвы зуба до отметки дна реки и от отметки 106 м до отметки 107 м — вертикальное, а от отметки 107 м до гребня плотины — наклонное. Два участка напорной грани выполнены горизонтальными: на отметке дна реки длиной 4,75 м и на отметке 107 м — 1,50 м. Второй горизонтальный участок предназначен для установки ремонтных затворов со стороны верхнего бьефа.

Криволинейная водосливная грань сопрягается с горизонтальной поверхностью водобоя на отметке 104 м по дуге окружности, очерченной радиусом $R = 9$ м. Концевая часть плотины выполнена в виде горизонтальной плиты толщиной 3,5 м и длиной 4,27 м, заканчивающейся низовым зубом. От крепления дна нижнего бьефа тело плотины отрезано конструктивным швом.

Водобойный колодец, расположенный за водосливом, имеет длину 34 м, разрезанную поперечным швом на два ряда плит по 17 м каждый. Глубина водобойного колодца — 2,0 м. Толщина плит, расположенных непосредственно за водосливом, — 3,5 м, а толщина следующих плит — 2,0 м. Первый ряд плит выполнен с верховым и низовым зубьями, а второй ряд — с верховым зубом. Кроме того, водобой разрезан продольными конструктивными швами.

Крепление рисбермы выполнено двумя рядами монолитных плит. В первом ряду длина плит 22,00 м,



Рис. 2. Построение водосливной поверхности плотины первого варианта

во втором — 17,97 м. Общая длина рисбермы — 39,97 м. Толщина плит первого ряда — 1,5 м, второго — 0,9 м. Концевой участок рисбермы выполнен в виде предохранительного ковша глубиной 4,5 м. Заложение верхового откоса ковша 1:3,5, низового — 1:2. Ковш заполнен камнем до отметки 103,5 м в верховой части и до отметки 105,0 м — в низовой.

Второй вариант — гравитационная водосливная плотина, очерченная по координатам профиля Ямборга с шестью водосливными отверстиями по 20 м шириной каждое и высотой отверстия при НПУ 8 м. Построение водосливной грани плотины приведено на рис. 3.

Плотина имеет распластанный профиль с шириной подошвы 31,27 м. Максимальная высота плотины от отметки гребня плотины до подошвы низового зуба — 9,3 м, высота водослива над отметкой дна реки — 4,0 м. Напорная грань плотины имеет ломаное очертание: от отметки подошвы зуба до отметки дна реки и от отметки 106 м до отметки 107 м — вертикальное, а от отметки 107 м до гребня водослива — криволинейное. Два участка напорной грани выполнены горизонтальными: на отметке дна реки длиной 1,56 м и на отметке 107 м — 1,00 м. Пазы для ремонтных затворов со стороны верхнего бьефа располагаются на расстоянии 5,47 м от напорной грани бычков.

Криволинейная водосливная грань сопрягается с горизонтальной поверхностью водобоя на отметке 104 м по дуге окружности, очерченной радиусом $R = 9$ м. Концевая часть плотины выполнена в виде горизонтальной плиты толщиной 3,50 м и длиной 1,82 м, заканчивающейся зубом. От крепления дна нижнего бьефа тело плотины отрезано конструктивным швом.

Водобойный колодец, рисберма и коневой участок рисбермы выполнены одинаковой конструкции с первым вариантом плотины и имеют те же размеры.

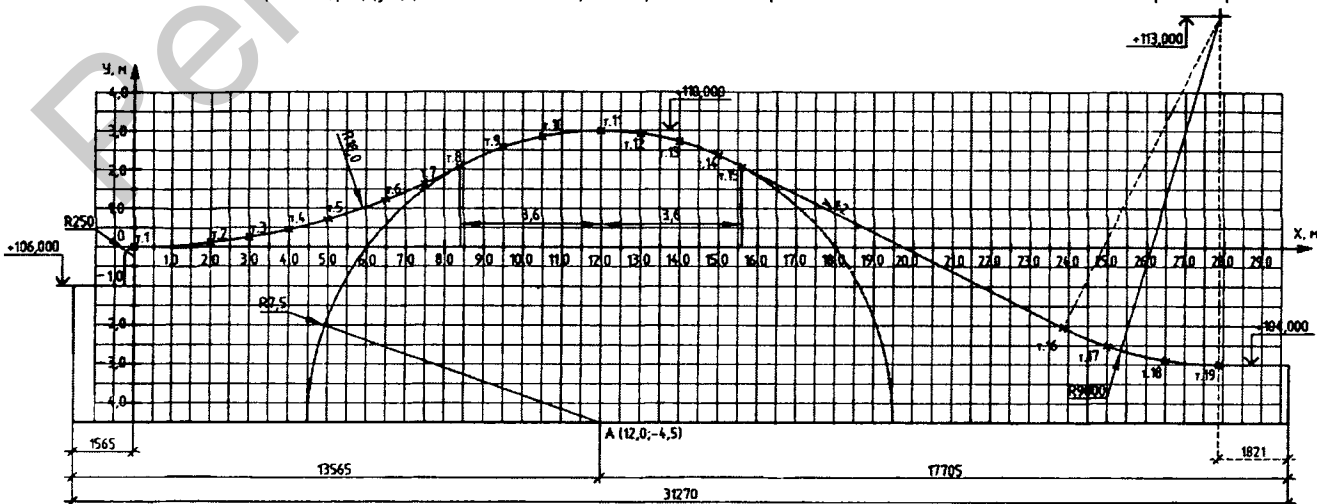


Рис. 3. Очертание водосливной грани второго варианта плотины

ВЫБОР МАСШТАБА МОДЕЛИРОВАНИЯ

В основу гидравлических исследований водосливной плотины Полоцкой ГЭС положен метод физического моделирования [2–11], 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, то есть 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, характеризующихся наличием свободной поверхности, где движение происходит с преобладанием сил тяжести над силами сопротивления, определяющим является равенство критериев Фруда для модели и природы

$$Fr = \frac{v_m^2}{g_m l_m} = \frac{v_n^2}{g_n l_n} = idem, \quad (1)$$

где v_m, v_n — средняя скорость для сходственных живых сечений модели и природы;
 l_m, l_n — линейный размер модели и природы.

Для моделирования на основе гравитационного подобия необходимо также выполнение условий квадратичного сопротивления, то есть если поток в натуре турбулентный, то он должен быть турбулентным и на модели. В этом случае силы вязкости не оказывают заметного влияния. Режим движения потока характеризуется критерием Рейнольдса

$$Re = \frac{v_m l_m}{\nu} = \frac{v_n l_n}{\nu}, \quad (2)$$

где $\nu = \nu_m = \nu_n$ — кинематический коэффициент вязкости жидкости на модели и в натуре, который принимается одинаковым, 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 R — гидравлический радиус;
 h — глубина потока;

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

— площадь поперечного сечения потока;
— 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 природы также должны быть равны значения коэффициентов гидравлического трения

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

или

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

где C — коэффициент Шези.

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

$$\begin{aligned} \text{линейных размеров} & l_n = l_m \lambda; \\ \text{площади} & \omega_n = \omega_m \lambda^2; \\ \text{уклонов} & i_n = i_m; \\ \text{скоростей} & v_n = v_m \lambda^{0,5}; \\ \text{расходов} & Q_n = Q_m \lambda^{2,5}, \end{aligned} \quad (8)$$

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, которые должны пропускаться через него, составят:

— для расчетного паводкового расчета 3%-ной обеспеченности:

$$Q_p = \frac{3750}{6} = 625 \text{ м}^3/\text{с};$$

— для поверочного расхода 0,5%-ной обеспеченности:

$$Q_n = \frac{5000}{6} = 833,33 \text{ м}^3/\text{с}.$$

При отметке дна нижнего бьефа 106 м максимальная высота сооружения, которая должна быть представлена на модели, составляет 19,2 м (отметка гребня бычка — 125,2 м). Ширина водосливного пролета 20 м и два полубычка толщиной 2,5 м и 1,5 м определяют ширину сооружения 24 м, которую необходимо замоделировать.

В соответствии с вышеприведенными размерами водосливного пролета, максимальными расходами воды, а также размерами гидравлического лотка

и расходами насосной установки в гидравлической лаборатории БНТУ был определен масштаб моделирования, который принят 1:74. Считается, что при моделировании водопропускных сооружений по критерию Фруда при $Re > Re_{кр}$, приемлемо использование моделей без искажения геометрического подобия при масштабах 1:15–1:60.

Далее необходимо найти величину 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, равен

$$Q_m = \frac{Q_n}{\lambda^{2,5}}, \quad (9)$$

где λ — масштаб моделирования;
 Q_n — натурный расход.

Максимальный натурный расход 833,33 м³/с, а минимальный — 75,4 м³/с, который пропускается при поднятом на 0,5 м затворе, когда в верхнем бьефе НПУ = 118 м. Глубина воды в нижнем бьефе в этом случае 2,5 м.

С учетом масштаба моделирования минимальный и максимальный расходы на модели будут равны:

$$Q_m^{\min} = \frac{75,4}{74^{2,5}} = 0,0016 \text{ м}^3/\text{с} = 1600 \text{ см}^3/\text{с},$$

$$Q_m^{\max} = \frac{833,33}{74^{2,5}} = 0,01769 \text{ м}^3/\text{с} = 17690 \text{ см}^3/\text{с}.$$

Глубины потока в нижнем бьефе на модели будут равны:

$$h^{\min} = \frac{250}{74} = 3,38 \text{ см},$$

$$h^{\max} = \frac{1580}{74} = 21,35 \text{ см}.$$

Ширина нижнего бьефа — 32,5 см.

Гидравлические радиусы:

$$R^{\min} = \frac{32,5 \cdot 3,38}{32,5 + 2 \cdot 3,38} = \frac{109,25}{39,26} = 2,8 \text{ см},$$

$$R^{\max} = \frac{32,5 \cdot 21,35}{32,5 + 2 \cdot 21,35} = \frac{693,88}{75,2} = 9,23 \text{ см}.$$

Скорости потока в нижнем бьефе:

$$v^{\min} = \frac{1600}{32,5 \cdot 3,38} = 14,56 \text{ см/с},$$

$$v^{\max} = \frac{17690}{32,5 \cdot 21,35} = 25,49 \text{ см/с}.$$

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

$$Re^{\min} = \frac{14,56 \cdot 2,8}{0,0124} = 3287,7,$$

$$Re^{\max} = \frac{25,49 \cdot 9,23}{0,0124} = 18973,6.$$

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 коэффициент шероховатости может быть принят $n_n = 0,014$ – $0,017$. Для геометрически подобной

модели, которая в λ раз меньше натурной, коэффициент шероховатости модели n_m должен быть меньше в δ_n раз коэффициента шероховатости натурной

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

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

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

Масштабный множитель $\delta = \lambda = 74$. Определение коэффициента шероховатости модели приведено в табл. 1.

Таблица 1. Определение коэффициента шероховатости модели

n_n	y	$\delta_n = \delta^y$	n_m
0,014	0,154	1,940	0,00722
0,017	0,169	2,070	0,00821

Таким образом, бетонным конструкциям реальной плотины на модели соответствуют гладкие поверхности с коэффициентом шероховатости $n = 0,00722$ – $0,00821$. Согласно [2–8], такие поверхности могут быть изготовлены из тщательно оструганных досок, покрытых эмалевой краской.

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ УСТАНОВОК

Модели одного пролета водосливных плотин первого и второго вариантов были изготовлены в масштабе 1:74. По вырезанным из картона шаблонам тщательно выверяли геометрические размеры моделей плотин, выполненных из дерева. Отдельно изготавливали два полубычка и все элементы соединяли между собой. Все грани плотины и полубычков зачищали наждачной бумагой, шпаклевали и покрывали эмалевой краской.

В собранном виде каждую модель водосливной плотины поочередно устанавливали в гидравлическом зеркальном лотке шириной 32,5 см и длиной 11 м. Расстояние от оголовка мерного водослива на входе в лоток до модели было 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 моделей.

Отводящий и подводящий каналы выполняли в виде пола из деревянных досок на всю ширину лотка. Все высотные размеры опытной установки выставляли относительно отметок гребней водосливов, которые устанавливали по уровню, строго горизонтально.

Очертание водосливных поверхностей моделей были выполнены по координатам, приведенным в табл. 2 и 3.

Для измерения отметок уровней воды на бортах лотка было установлено две мерные иглы. Одна — в верхнем бьефе, на расстоянии 80 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, то есть 45–75 см. В нижнем бьефе мерная игла установлена в конце рисбермы

отверстия при отметке уровня воды в верхнем бьефе НПУ = 118 м.

5. Изучение режима сопряжения бьефов при мгновенном открытии водосливного отверстия при отметке уровня воды в верхнем бьефе НПУ = 118 м.

6. Проверка пропуска льда через водосливной пролет при отметке уровня воды в верхнем бьефе НПУ = 118 м.

7. Построение графика пропускной способности водосливного пролета, перекрытого затвором, при опускании клапана затвора на 0,25; 0,75 и 1,00 м при отметке уровня воды в верхнем бьефе НПУ = 118 м.

Первые шесть опытов были выполнены для двух вариантов водосливных плотин, а седьмой — только для первого варианта.

Регулирование расходов, поступающих на модель, осуществляли при помощи задвижки на подающем трубопроводе. Из трубопровода вода поступала в оголовок лотка, где был установлен треугольный мерный водослив с углом выреза 90°. Уровень воды перед мерным водосливом измеряли при помощи иглы, установленной в пьезометре, выведенном из стенки оголовка лотка. Точность измерения уровня воды в пьезометре посредством мерной иглы — 0,1 мм.

Расход, м³/с, проходящий через треугольный мерный водослив и поступающий на модель, определяли по тарировочной кривой и, для контроля, вычисляли по зависимости, предложенной для стальных мерных водосливов

$$Q = 1,343H^{2,47}, \quad (12)$$

где H — напор на гребне мерного водослива, равный разности отметок уровня воды перед водосливом и его гребня.

Для моделирования процесса пропуска льда через водосливную 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, испытывали парафин, воск, технический жир, нафталин, древесные опилки, пропитанную вату, смеси этих материалов, склеенные деревянные пластинки и пластинки из полимерных материалов, ослабленные ледяные пластины и лед пониженной прочности.

В связи с тем, что в задании на исследование моделирования сил, возникающих при контакте льда с сооружением, и процессов разрушения льда не предусматривалось, а ставилась задача качественной оценки процесса пропуска льдин, в опытах использовали искусственно замороженный лед размером в плане 20x20, 10x10 см² и толщиной 1,0 см, что соответствовало натурным размерам льдин 15x15, 7,5x7,5 м² и толщине льда 0,7 м.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1 В процессе исследований проверена пропускная способность двух типов водосливных плотин (практическо-

го профиля и профиля Ямборга) при прохождении паводков 3%- , 0,5%- и 0,1%-ной обеспеченности при заданных отметках НПУ и ФПУ, изучены режимы сопряжения бьефов и пропуска льда, измерены скорости потока на входе в пролет водосливной плотины и на сходе с рисбермы, построены графики пропускной способности водосливного пролета двух типов плотин при НПУ в верхнем бьефе при поднятии затвора на 0,5; 1,0; 2,0 и 3,0 м и полном открытии отверстия, а также при опускании клапана затвора на 0,25; 0,75 и 1,00 м.

2 Установлено, что обе водосливные плотины обладают достаточной водопротекной способностью и устойчивым режимом сопряжения бьефов с затопленным гидравлическим прыжком при всех исследованных схемах пропускных расходов воды в нижний бьеф. Так, при водосливной плотине практического профиля паводковый расход 3%-ной обеспеченности пропускается при отметке уровня воды в верхнем бьефе 102,41 м, что на 0,29 м ниже расчетной отметки ФПУ1, поверочный паводковый расход 0,5%-ной обеспеченности — при отметке уровня воды в верхнем бьефе 122,05 м, что на 0,25 м ниже расчетной отметки ФПУ2, а паводковый расход 0,1%-ной обеспеченности — при отметке уровня воды в верхнем бьефе 122,72 м.

При водосливной плотине профиля Ямборга расчетный паводковый расход 3%-ной обеспеченности пропускается при отметке уровня воды в верхнем бьефе 120,34 м, что на 0,36 м ниже расчетной отметки ФПУ1, поверочный паводковый расход 0,5%-ной обеспеченности — при отметке уровня воды в верхнем бьефе 121,85 м, что на 0,45 м ниже расчетной отметки ФПУ2, а паводковый расход 0,1%-ной обеспеченности — при отметке уровня воды в верхнем бьефе 122,6 м.

3 Диапазон изменения скоростей по глубине потока на входе в водосливной пролет плотины практического профиля равен 1,90–2,16 м/с — при пропуске расчетного паводкового расхода, и 2,18–2,60 м/с — при пропуске поверочного паводкового расхода, а плотины профиля Ямборга соответственно 1,73–2,48 и 2,08–2,93 м/с. Максимальные значения средней скорости на оси потока в конце рисбермы плотины практического профиля составили 2,40 м/с — при пропуске расчетного паводкового расхода и 2,93 м/с — при пропуске поверочного паводкового расхода, а плотины профиля Ямборга соответственно 2,35 и 2,85 м/с.

4 Во избежание ударов льдин о водосливную поверхность плотины, дно и стенку водобойного колодца пропуск льда через плотину практического профиля необходимо начинать при отметке уровня воды в нижнем бьефе 113,8 м, а через плотину профиля Ямборга — на отметке 113,0 м. Пропускная способность одного водосливного пролета плотины практического профиля при частичном открытии отверстия изменяется от 75,37 до 362,7 м³/с, а плотины профиля Ямборга от 77,7 до 414,5 м³/с. Пропускная способность одного водосливного пролета плотины практического профиля при частичном опускании клапана затвора изменяется от 18,84 до 35,33 м³/с.

5 Результаты НИР использованы при выборе типа водосливной плотины в процессе разработки строительства проекта Полоцкой ГЭС. За окончательный вариант принята водосливная плотина практического профиля.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Смирнов, А. И. Перспективы гидро- и ветроэнергетики Беларуси / А. И. Смирнов, С. П. Гатилло // Матер. девятой Междунар. науч.-техн. конф. "Наука — образованию, производству, экономике". В 4 т. — Том 1. — Минск, 2011. — С. 115.
2. Леви, И. И. Моделирование гидравлических явлений / И. И. Леви. — Л.: Энергия, 1967. — 210 с.
3. Ляхтер, В. М. Гидравлическое моделирование / В. М. Ляхтер, А. М. Прудовский. — М.: Энергоатомиздат, 1984.
4. Шарп, Д. Ж. Гидравлическое моделирование / Д. Ж. Шарп. — М.: Мир, 1984.
5. Агроскин, И. И. Гидравлика / И. И. Агроскин, Г. Г. Дмитриев, Ф. И. Пикалов. — М.; Л.: Энергия, 1964. — 315 с.
6. Справочник по гидравлическим расчетам; под редакцией П. Г. Кисилева. — 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 пропуск льда / Д. Ф. Панфилов // Известия высш. учебн. заведений. 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 редакцией К. Н. Коржавина. — М.: Энергоатомиздат, 1990. — 182 с.

Статья поступила в редакцию 07.12.2012.