

УДК 626.8

## ГИДРАВЛИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВОДОСЛИВНОЙ ПЛОТИНЫ ПРОФИЛЯ ЯМБОРГА ПОЛОЦКОЙ ГЭС

Кандидаты техн. наук, доценты КРУГЛОВ Г. Г., ЛИНКЕВИЧ Н. Н.,  
студенты РУДЬКО А. И., МАШУК Ю. С.

*Белорусский национальный технический университет*

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.

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 Немане – из двух ГЭС: Гродненской (17,0 МВт) и Немновской (20,5 МВт); на Днепре – из трех ГЭС: Оршанской (4,9 МВт), Шкловской (5,5 МВт) и Могилевской (5,0 МВт). Общий гидроэнергетический потенциал можно с достаточной степенью достоверности оценить в 215–220 МВт [1]. В связи с этим завершено проектирование Полоцкой ГЭС на Западной Двине.

В состав сооружений Полоцкой ГЭС входят здание ГЭС, бетонная водосливная плотина и глухая земляная плотина. 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 основным сооружениям 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%-й обеспеченности – 3750 м<sup>3</sup>/с и поверочный – 0,5%-й обеспеченности –

5000 м<sup>3</sup>/с), пропуск 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. Эти исследования были выполнены в гидравлической лаборатории кафедры гидротехнического и энергетического строительства Белорусского национального технического университета.

Компоновка Гродненской ГЭС принята русловой. Здание ГЭС и водосливная плотина расположены в русле реки. Гравитационная водосливная плотина, очерченная по координатам профиля Ямборга, имеет шесть водосливных отверстий шириной 20 м каждое и высоту отверстия при НПУ 8 м. Два крайних бычка и центральный неразрезные выполнены толщиной 3 м, второй и четвертый бычки разрезные толщиной 5 м каждый. Очертание напорной грани неразрезных бычков треугольное, разрезных – трапециoidalное. 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 м.

Плотина имеет распластаный профиль с шириной подошвы 31,27 м (рис. 1). Максимальная высота плотины от отметки ее гребня 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, расположенный за водосливом, имеет длину 34 м, разрезанную поперечным швом на два ряда плит по 17 м каждый. Глубина водобойного колодца 2 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, второй ряд – с верховым зубом. Кроме того, водобой разрезан продольными конструктивными швами.

Крепление рисбермы выполнено двумя рядами монолитных плит. В первом ряду длина плит составляет 22,00 м, 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 1,0:3,5, низового – 1,0:2,0. Ковш заполнен камнем до отметки 103,5 м в верховой части и до отметки 105,0 м – в низовой.

В основу гидравлических исследований водосливных плотин Полоцкой ГЭС положен метод физического моделирования [2–11], цель которого – воспроизведение в уменьшенном масштабе изучаемых явлений и обеспечение полного подобия натуральных и модельных явлений.

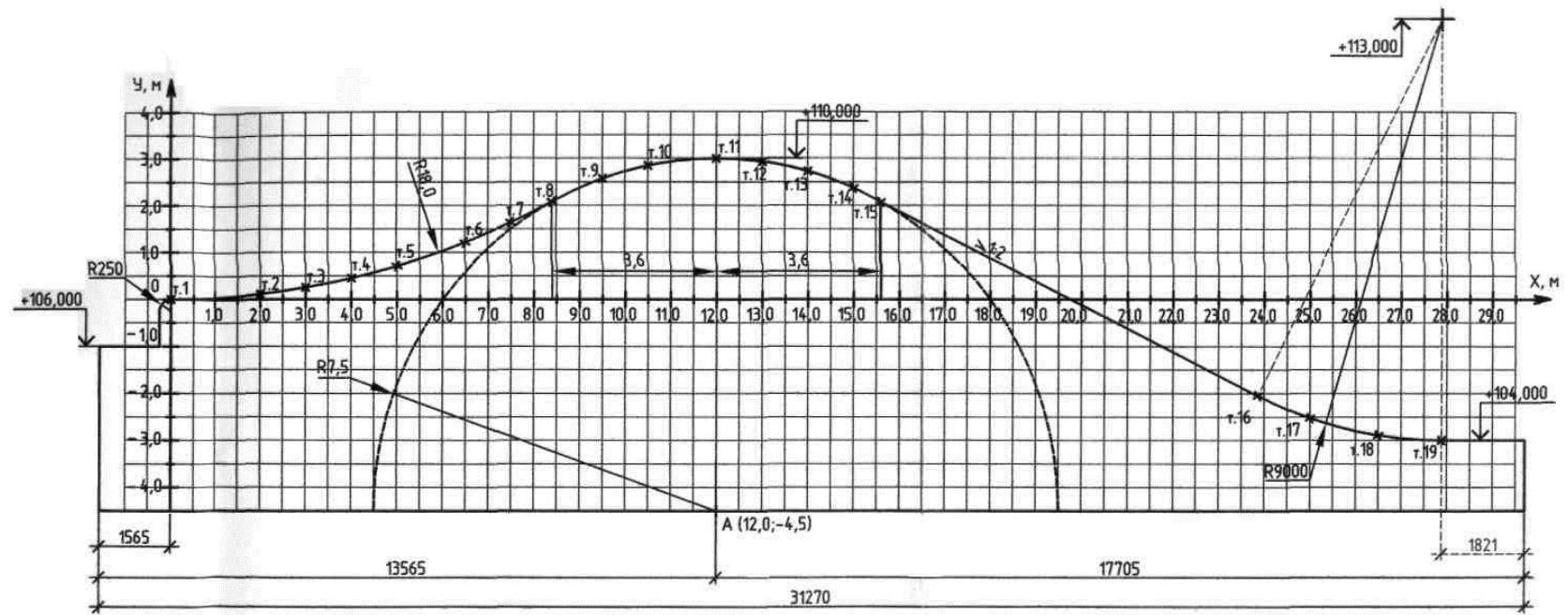


Рис. 1. Очертание водосливной грани плотины профиля Ямборга

Размеры водосливного пролета, максимальные расходы воды, а также размеры гидравлического лотка и расходы насосной установки гидравлической лаборатории БНТУ обусловили изготовление опытной установки в масштабе 1:74.

Для измерения отметок уровней воды на бортах лотка были установлены 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, т. е. 45–75 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.

Скорость течения потока измерялась с помощью тарированной вертушки конструкции Центрального научно-исследовательского института комплексного использования водных ресурсов (ЦНИИКИВР). Погрешность в определении среднего значения скорости в каждой точке не превышала 2 %.

Регулирование расходов, поступающих на модель, осуществляли при помощи задвижки на подающем трубопроводе. Из трубопровода вода поступала в оголовок лотка, где 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  $Q$ , м<sup>3</sup>/с, проходящий через треугольный мерный водослив и поступающий на модель, определялся по тарировочной кривой и для контроля вычислялся по зависимости, предложенной для стальных мерных водосливов

$$Q = 1,343H^{2,47},$$

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

Общий вид опытной установки приведен на рис. 2.

В соответствии с заданием на проведение исследований были выполнены следующие опыты:



Рис. 2. Общий вид опытной установки плотины профиля Ямборга:  
а – с нижнего бьефа; б – с верхнего бьефа

1. Проверка пропуска расчетного паводкового расхода 3,0%-й обеспеченности.

2. Проверка пропуска поверочного паводкового расхода 0,5%-й обеспеченности.

3. Проверка пропуска поверочного паводкового расхода 0,1%-й обеспеченности.

4. Построение графика пропускной способности водосливного пролета при частичном поднятии затвора на 0,5; 1,0; 2,0; 3,0 м и полном открытии водосливного 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.

Первых три опыта, в которых проверяли условия пропуска 3,0%-го, 0,5%-го и 0,1%-го паводков, проводили в такой последовательности:

- при помощи мерного водослива устанавливали расчетный расход, поступающий на модель;
- посредством жалюзи в нижнем бьефе модели устанавливали глубину воды, соответствующую этому расходу;
- измеряли отметку уровня воды в верхнем бьефе модели и определяли напор на гребне плотины и перепад между верхним и нижним бьефами, при котором проходил расчетный расход;
- фиксировали положение гидравлического прыжка и оценивали режим сопряжения бьефов;
- в расчетном створе в нижнем бьефе и на входе потока на водослив (в створе верховой грани бычков) измеряли скорости потока. Измерения проводили на оси потока через 3–4 см по вертикали.

При построении графика пропускной способности водосливного пролета при частичном и полном поднятии затвора, а также при опускании клапана затвора опыты проводили в следующем порядке:

- в верхнем бьефе устанавливался уровень воды на отметке НПУ = 118 м;
- по треугольному мерному водосливу определяли расход, проходящий через водослив при каждом поднятии затвора или опускании клапана затвора;
- измеряли глубину воды в нижнем бьефе;
- фиксировали положение гидравлического прыжка и оценивали режим сопряжения бьефов;
- фиксировали режим истечения через водослив;
- при полном поднятии затвора измеряли кривую свободной поверхности воды вдоль потока.

Проверку пропуска льда через водослив проводили следующим образом:

- в верхнем бьефе устанавливался уровень воды на отметке НПУ = 118 м;
- посредством жалюзи в нижнем бьефе последовательно устанавливали различные глубины воды, начиная с отметки 110 м;

- при каждой глубине воды в нижнем бьефе пропускали через водослив лед и фиксировали режим его прохождения;
- по треугольному мерному водосливу измеряли расход, проходивший через водослив.

Изучение режима сопряжения бьефов при мгновенном открытии водосливного отверстия проводили следующим образом:

- в верхнем бьефе устанавливался уровень воды на отметке НПУ = 118 м;
- мгновенно поднимался затвор, перекрывающий водосливной пролет;
- фиксировался режим сопряжения бьефов.

В результате опытов были выполнены следующие мероприятия.

**1. Проверка пропуска расчетного паводкового расхода 3%-й обеспеченности.** Расчетный паводковый расход 3%-й обеспеченности равен 3750 м<sup>3</sup>/с, через один пролет водосливной плотины должен пропускаться расход 625 м<sup>3</sup>/с при отметке форсированного подпорного уровня (ФПУ) воды в верхнем бьефе, равном ФПУ<sub>1</sub> = 120,7 м. Глубина воды в нижнем бьефе (в конце рисбермы), соответствующая этому расходу, равна 120,3 м.

Поток в верхнем бьефе плотины на входе в водосливной пролет – спокойный. От пазов, расположенных на боковых поверхностях бычков, на поверхности потока образуются косые волны, сходящиеся на оси пролета.

Скорости по глубине потока на входе в водосливной пролет и в конце рисбермы приведены в табл. 1, а эпюры скоростей потока по оси пролета в верхнем бьефе – на рис. 3а, в конце рисбермы – на рис. 3б.

Модельный расход, соответствующий расчетному паводковому расходу, равный 13,27 л/с, проходит при отметке уровня воды в верхнем бьефе 120,3 м, т. е. на 0,4 м ниже расчетного уровня ФПУ<sub>1</sub>. Перепад между уровнем воды в бьефах отсутствует.

При таких уровнях воды в верхнем и нижнем бьефах лед проходит в нижний бьеф свободно, не задевая водосливную поверхность плотины и не задерживаясь на водобое и рисберме.

Таблица 1

Скорость потока при обеспеченности расхода 3 %

Точка измерения	Скорость потока, м/с					
	на поверхности воды	на глубине, м				у дна
		3	6	9	12	
На входе в водосливной пролет	2,19	2,48	2,38	2,24	–	1,73
В конце рисбермы	1,77	1,89	2,20	2,35	2,22	1,92

**2. Проверка пропуска поверочных расходов 0,5%-й и 0,1%-й обеспеченности.** Поверочный паводковый расход 0,5%-й обеспеченности равен 5000 м<sup>3</sup>/с, через один пролет водосливной плотины должен пропускаться расход 833,3 м<sup>3</sup>/с при отметке уровня воды в верхнем бьефе ФПУ<sub>2</sub> = 122,3 м. Глубина воды в нижнем бьефе (в конце рисбермы), соответствующая этому расходу, равна 121,8 м.

Поток в верхнем бьефе плотины на входе в водосливной пролет – спокойный. От пазов, расположенных на боковых поверхностях бычков, на поверхности потока образуются косые волны, сходящиеся на оси пролета.

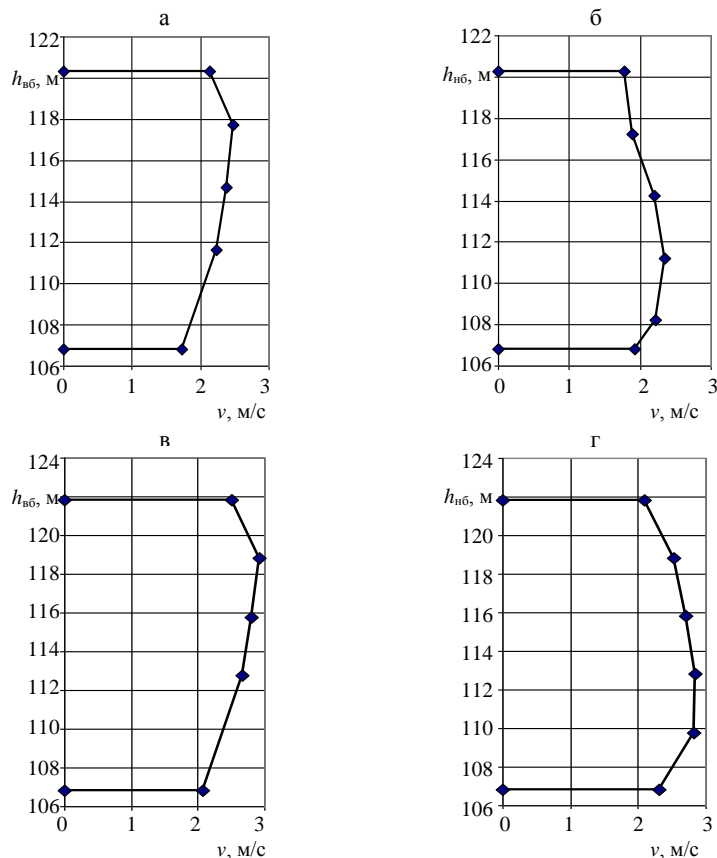


Рис. 3. Эпюры скоростей потока по оси пролета в верхнем (а, в) и нижнем (б, г) бьефах при пропуске расхода обеспеченности: а, б – 3,0 %; в, г – 0,5 %;  $v$  – скорость потока;  $h_{вб}$  – глубина воды в верхнем бьефе;  $h_{нб}$  – глубина воды в нижнем бьефе

Скорости по глубине потока на входе в водосливной пролет и в конце рисбермы приведены в табл. 2, а эпюры скоростей потока по оси пролета – на рис. 3в, в конце рисбермы – на рис. 3г.

Таблица 2

**Скорость потока при обеспеченности расхода 0,5 %**

Точка измерения	Скорость потока, м/с					
	на поверхности воды	на глубине, м				у дна
		3	6	9	12	
На входе в водосливной пролет	2,50	2,93	2,80	2,67	–	2,08
В конце рисбермы	2,10	2,52	2,71	2,85	2,82	2,30

Модельный расход, соответствующий поверочному, равный 17,69 л/с, проходит при отметке уровня воды в верхнем бьефе 121,9 м, т. е. на 0,4 м ниже расчетного уровня ФПУ<sub>2</sub>. Перепад между уровнем воды в бьефах равен 0,1 м.

Поверочный расход 0,1%-й обеспеченности равен 5240 м<sup>3</sup>/с, через один пролет должен пропускаться расход 873,3 м<sup>3</sup>/с. Глубина воды в нижнем бьефе, соответствующая этому расходу, – 122,5 м.

Модельный расход, соответствующий расходу 0,1%-й обеспеченности, равный 18,54 л/с, проходит при отметке уровня воды в верхнем бьефе 122,6 м.

Лед при всех этих уровнях воды в бьефах проходит свободно, не задевая водосливную поверхность плотины и не задерживаясь на водобое и рисберме.

Сводные результаты проверки пропускной способности водосливной плотины профиля Ямборга приведены в табл. 3.

Таблица 3

Сводные результаты проверки пропускной способности водосливной плотины профиля Ямборга

Обеспеченность расхода, %	Расход, м <sup>3</sup> /с		∇УНБ, м	∇УВБ, м	
	Общий	Одного пролета		Расчетная	Опытная
3,0	3750	625,0	120,3	ФПУ <sub>1</sub> = 120,7	120,3
0,5	5000	833,3	121,8	ФПУ <sub>2</sub> = 122,3	121,9
0,1	5240	873,3	122,5		122,6

**3. Проверка пропускной способности водосливного пролета при частичном открытии отверстия.** Для построения графика пропускной способности водосливного пролета при частичном открытии отверстия были проведены четыре опыта, в которых затвор поднимался на 0,5; 1,0; 2,0; 3,0 м, и пятый опыт – при полном открытии водосливного отверстия.

Во всех опытах уровень воды в верхнем бьефе устанавливался на отметке НПУ = 118 м. Подъем затвора осуществлялся поэтапно. В каждом опыте измеряли расход, глубину воды в нижнем бьефе, режим сопряжения бьефов и режим истечения через водослив. Результаты опытов приведены в табл. 4, а график пропускной способности водосливного пролета – на рис. 4.

Таблица 4

Пропускная способность водосливного пролета при отметке верхнего бьефа НПУ = 118 м

Высота подъема затвора $a$ , м	$Q$ , м <sup>3</sup> /с	$h_{нб}$ , м	Гидравлический прыжок	Истечение через водослив
0,5	77,7	2,2	Надвинут	Не подтопленное
1,0	176,6	3,3		
2,0	289,7	4,3		
3,0	414,5	5,2		
Поднят полностью	838,5	7,9		

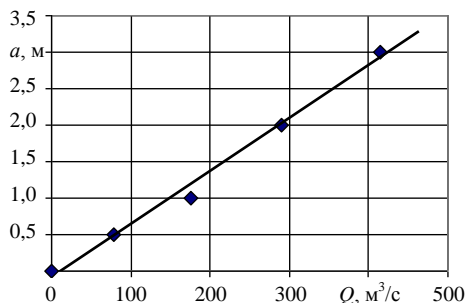


Рис. 4. График пропускной способности частично открытого водосливного отверстия:  $a$  – высота подъема затвора;  $Q$  – расход воды



Кроме того, при всех схемах подъема затвора измеряли скорости потока на входе в водосливной пролет.

Скорости по глубине потока на входе в водосливной пролет приведены в табл. 5, а эпюры скоростей – на рис. 5.

Таблица 5

Скорость потока на входе в водосливной пролет

Высота подъема затвора $a$ , м	Скорость потока, м/с				
	на поверхности воды	на глубине, м			у дна
		3	6	9	
0,5	0,51	0,60	0,64	1,02	0,46
1,0	0,75	0,81	0,86	0,73	0,66
2,0	1,34	1,32	1,39	1,33	1,01
3,0	1,87	1,86	1,71	1,58	1,48
Поднят полностью	4,03	4,09	4,03	3,58	2,71

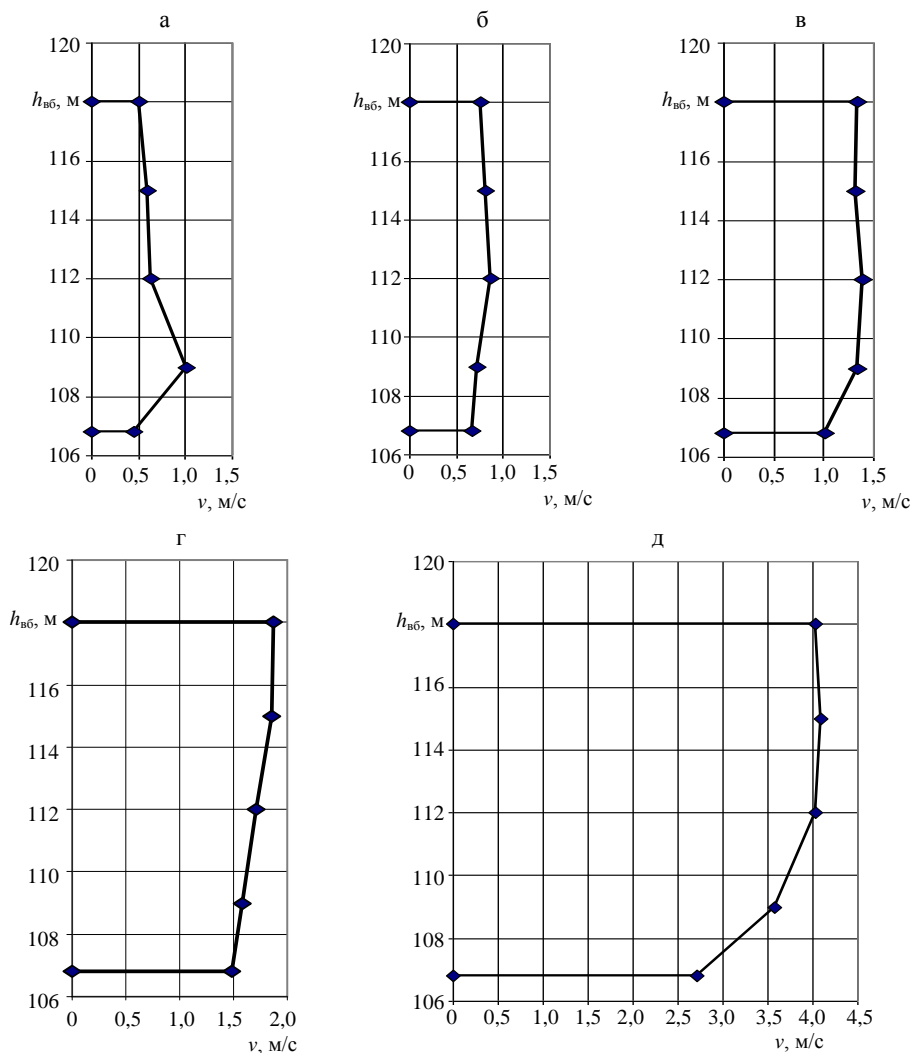


Рис. 5. Эпюры скоростей в верхнем бьефе по оси пролета при поднятии затвора:  
 а – на 0,5 м; б – на 1,0 м; в – на 2,0 м; г – на 3,0 м; д – полное поднятие;  
 $v$  – скорость потока;  $h_{вб}$  – глубина воды в верхнем бьефе

**4. Проверка пропуска льда через водосливной пролет.** В верхнем бьефе отметка НПУ = 118 м. Уровни воды в нижнем бьефе постепенно поднимались и фиксировались режимы пропуска льдин. При отметке уровня воды в нижнем бьефе 110 м и ниже и неподтопленном истечении через водослив льдины всех размеров ударялись о водосливную поверхность плотины, дно и заднюю стенку водобойного колодца.

При увеличении глубины воды в нижнем бьефе до отметки 112 м льдины не ударялись о водосливную поверхность, но иногда задевали заднюю стенку водобойного колодца, а при глубине воды в нижнем бьефе 7 м, что соответствует отметке УНБ = 113 м, лед свободно проходил в нижний бьеф.

Таким образом, во избежание ударов льдин о водосливную поверхность плотины, дно и заднюю стенку водобойного колодца пропуск льда необходимо начинать при отметке уровня воды в нижнем бьефе, равной 113 м. Истечение через водослив в этом случае подтопленное.

## ВЫВОДЫ

1. Водосливная плотина профиля Ямборга обладает достаточной водопропускной способностью и устойчивым режимом сопряжения бьефов с затопленным гидравлическим прыжком при всех исследованных схемах пропуска расходов воды в нижний бьеф.

2. Расчетный паводковый расход 3,0%-й обеспеченности пропускается при отметке уровня воды в верхнем бьефе 120,3 м, что на 0,4 м ниже расчетной отметки ФПУ<sub>1</sub>.

3. Поверочный паводковый расход 0,5%-й обеспеченности пропускается при отметке уровня воды в верхнем бьефе 121,9 м, что на 0,4 м ниже расчетной отметки ФПУ<sub>2</sub>.

4. Паводковый расход 0,1%-й обеспеченности пропускается при отметке уровня воды в верхнем бьефе 122,6 м.

5. Паводковые расходы пропускаются через водосливную плотину при подтопленном режиме истечения.

6. Диапазон изменения скоростей по глубине потока на входе в водосливной пролет 1,73–2,48 м/с – при пропуске расчетного паводкового расхода и 2,08–2,93 м/с – при пропуске поверочного паводкового расхода.

7. Максимальные значения средней скорости на оси потока в конце рисбермы 2,35 м/с – при пропуске расчетного паводкового расхода и 2,85 м/с – при пропуске поверочного паводкового расхода.

8. Во избежание ударов льдин о водосливную поверхность плотины, дно и стенку водобойного колодца пропуск льда необходимо начинать при отметке уровня воды в нижнем бьефе 113 м.

9. Пропускная способность одного водосливного пролета при частичном открытии отверстия изменяется от 77,7 до 414,5 м<sup>3</sup>/с.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Смирнов, А. И. Перспективы гидро- и ветроэнергетики Беларуси / А. И. Смирнов, С. П. Гатилло // Наука – образованию, производству, экономике / материалы IX Междунар. науч.-техн. конф.: в 4 т. – Минск, 2011. – Т. 1. – 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 ред. 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.: Высш. шк., 1966.
9. Панфилов, Д. Ф. Моделирование давления и пропуск льда / Д. Ф. Панфилов // Известия высш. учеб. завед. 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.

Представлена кафедрой гидротехнического  
и энергетического строительства

Поступила 07.03.2012