

УДК 626.8

## ГИДРАВЛИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВОДОСЛИВНОЙ ПЛОТИНЫ ГРОДНЕНСКОЙ ГЭС

Кандидаты техн. наук, доценты КРУГЛОВ Г. Г., ЛИНКЕВИЧ Н. Н.

*Белорусский национальный технический университет*

В послевоенной Белоруссии ощущался острый дефицит электрической энергии, особенно для электрификации сельского хозяйства и небольших населенных пунктов. Поэтому, несмотря на равнинный ландшафт нашей республики, начался активный процесс сооружения малых гидроэлектростанций (ГЭС) на многочисленных реках. К 1960 г. их было около 170 с общей установленной мощностью 20 МВт, большинство находилось на балансе колхозов и совхозов.

Капиталоемкость создания единицы мощности на них была достаточно высокой, приходилась она в основном на возведение подпорного и водосбросного сооружений, здания ГЭС и чаши водохранилища. Достоинством же как в то время, так и теперь было и остается использование возобновляемых источников энергии гидроресурсов.

Активное наращивание мощности Белорусской энергосистемы, ставшей впоследствии составной частью единой энергосистемы Советского Союза, строительство крупных и экономичных в то время тепловых электростанций сделали работу этих ГЭС нерентабельной, они постепенно выводились из эксплуатации и были законсервированы.

В середине 90-х гг. прошлого века резко подорожали энергоресурсы, в основном импортируемые, что вызвало необходимость поиска альтернативных источников энергии: местных видов топлива, вторичных и возобновляемых.

В настоящее время, по данным концерна «Белэнерго», в Беларуси действуют 25 гидроэлектростанций общей мощностью 10 МВт, а общий гидроэнергетический потенциал страны составляет 400 МВт [1]. Использование гидроэнергетического потенциала – 2,5 %. Доля возобновляемых источников в энергетическом балансе в ближайшей перспективе должна достигнуть 25 %. Использование гидроресурсов является одним из путей решения этой проблемы [2].

В республике накоплен достаточный опыт восстановления ранее действовавших и строительства новых малых ГЭС, который позволяет при-

ступить к созданию ГЭС на таких крупных реках, как Неман, Западная Двина и Днепр, где для этого имеются благоприятные условия: удобные створы, при использовании которых отметки НПУ водохранилищ не превышают уровней паводковых вод в бытовых условиях.

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 режиме пропуск значительных паводковых расходов (расчетный паводок 3%-й обеспеченности  $2250 \text{ м}^3/\text{с}$  и поверочный – 0,5%-й обеспеченности  $3280 \text{ м}^3/\text{с}$ ), 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.

Компоновка Гродненской ГЭС (рис. 1) принята пойменной. Здание ГЭС и водосливная плотина расположены на правом берегу, а русло реки и левый берег перекрыты земляной плотинной. Водосливной фронт плотины, равный 80 м, разбит тремя бычками на четыре водосливных отверстия шириной по 20 м каждое. Крайние бычки – неразрезные, имеют толщину 2,5 м, а центральный бычок – разрезной, его толщина – 5,0 м. Очертание напорной грани крайних бычков – треугольное, центрального бычка – трапецеидальное.

Водосливные отверстия шириной 20 м и высотой 6,5 м перекрыты сегментными затворами с клапаном высотой 1 м. В бычках выполнены пазы для ремонтных затворов глубиной 0,6 м со стороны верхнего бьефа (ВБ) и нижнего бьефа (НБ). Маневрирование основными и ремонтными затворами ВБ осуществляется стационарными подъемниками, а ремонтными затворами НБ – козловым краном.

Поперечный разрез по водосливной плотине приведен на рис. 2. Гравитационная плотина имеет распластанный профиль с шириной подошвы, равной 37 м. Максимальная высота плотины от отметки гребня до отметки подошвы зуба – 6,5 м, высота водослива над отметкой дна реки – 3,5 м. Напорная грань плотины имеет ломаное очертание: от отметки подошвы зуба до отметки 90 м – вертикальное, от отметки 90 до 91 м – наклонное, затем снова вертикальное до отметки дна реки. Два участка напорной грани выполнены горизонтальными: на отметке 92 м длиной 2,75 м и на отметке 93 м – 1,25 м. Второй горизонтальный участок предназначен для установки ремонтных затворов со стороны верхнего бьефа. От отметки 93 м до гребня плотины напорная грань выполнена наклонной.

Криволинейная водосливная грань сопрягается с горизонтальной поверхностью водобоя на отметке 92 м по дуге окружности, очерченной радиусом  $R = 10$  м. Концевая часть плотины выполнена в виде горизонтальной плиты толщиной 2,5 м и длиной 15,9 м, заканчивающейся низовым зубом.

От крепления дна нижнего бьефа тело плотины отрезано конструктивным швом. Водобой, расположенный за водосливом, имеет комбинированную конструкцию. Непосредственно за водосливом располагается водо-

бойная плита толщиной 2,5 м и длиной 10 м, в конце которой выполнена водобойная стенка трапецеидального очертания высотой 2 м и толщиной по низу 1,8 м. За водобойной стенкой находится водобойный колодец глубиной 1 м (отметка поверхности колодца – 91 м) и длиной 15 м. Водобой разрезан продольными конструктивными швами через 15 м. Крепление рисбермы выполнено бетонными монолитными плитами. Первый ряд плит толщиной 1,4 м имеет плановые размеры 22×15 м, второй ряд плит толщиной 0,8 м – 15×18 м.

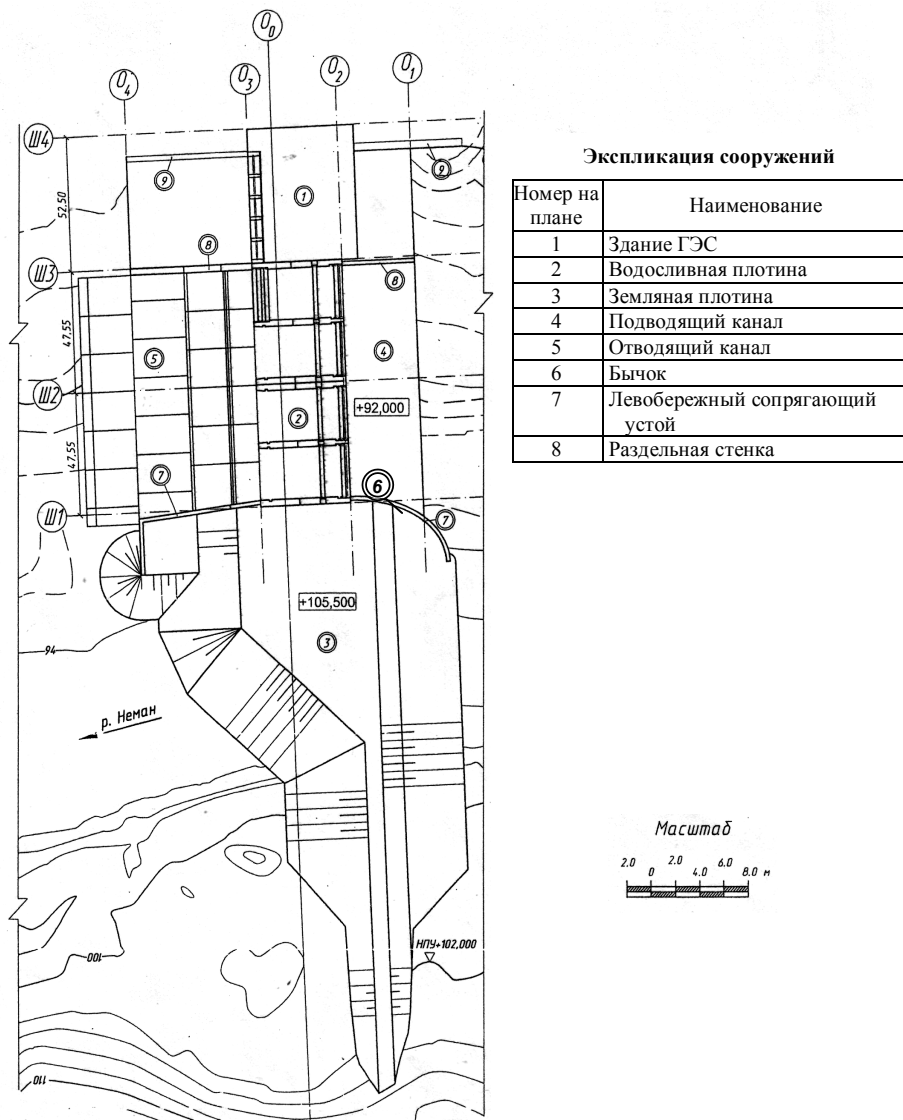


Рис. 1. Компоновка Гродненской ГЭС

Концевой участок рисбермы выполнен в виде предохранительного ковша глубиной 4,5 м. Заложение верхового откоса ковша 1:3,5. Ковш заполнен камнем до отметки 89,5 м – над верховым откосом и до отметки 91,0 м – над низовым откосом ковша.



с углом выреза  $90^\circ$ . Уровень воды перед мерным водосливом измерялся при помощи иглы в пьезометре, выведенном из стенки оголовка лотка. Точность измерения уровня воды в пьезометре – 0,1 мм.

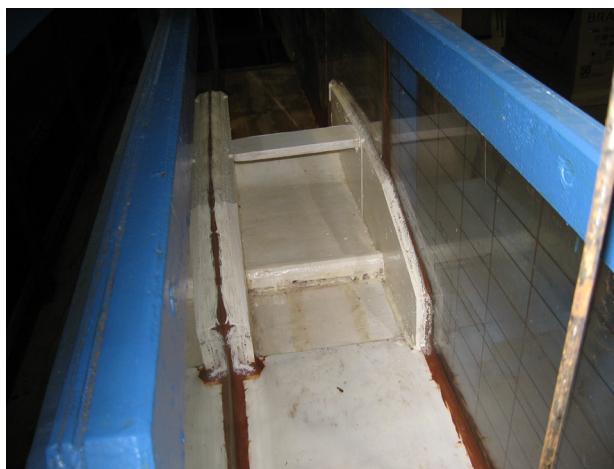


Рис. 3. Общий вид опытной установки

Расход, проходящий через треугольный мерный водослив и поступающий на модель, определялся по тарировочной кривой и для контроля вычислялся по зависимости, предложенной для стальных мерных водосливов:

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

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

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

1. Проверка пропуска расчетного паводкового расхода 3%-й обеспеченности.
2. Проверка пропуска поверочного паводкового расхода 0,5%-й обеспеченности.
3. Проверка пропуска льда через водосливной пролет при открытии клапана сегментного затвора. Высота клапана – 1 м, пропускаемый расход  $Q = 150 \text{ м}^3/\text{с}$ , в верхнем бьефе отметка нормального подпорного уровня (НПУ) равна 102,0 м, в нижнем бьефе отметка уровня воды – 94,8 м. Толщина льда – 68 см.

Первые два опыта, в которых проверялись условия пропуска 3%-го и 0,5%-го паводков, проводились в следующей последовательности:

- при помощи мерного водослива устанавливался расчетный расход, поступающий на модель;
- посредством жалюзей в нижнем бьефе модели устанавливалась глубина воды, соответствующая этому расходу;
- измерялась отметка уровня воды в верхнем бьефе модели и определялись напор на гребне плотины и перепад между верхним и нижним бьефами, при котором проходил расчетный расход;

- фиксировалось положение гидравлического прыжка и оценивался режим сопряжения бьефов;
- в расчетном створе нижнего бьефа измерялись скорости потока на рисберме. Измерения проводились на оси потока через 0,5–4,0 см по вертикали.

Третий опыт проводился в следующем порядке:

- при помощи мерного водослива устанавливался расчетный расход, поступающий на модель;
- посредством жалюзей в нижнем бьефе модели последовательно устанавливались различные глубины воды, начиная с отметки 94,8 м;
- при каждой глубине воды в нижнем бьефе пропускался через плотину лед и фиксировался режим его прохождения.

В результате опытов проведены:

- **проверка пропуска расчетного паводкового расхода 3%-й обеспеченности.** Расчетный паводковый расход 3%-й обеспеченности равен  $2250 \text{ м}^3/\text{с}$ , через один пролет водосливной плотины должен пропускаться расход  $562,5 \text{ м}^3/\text{с}$  при отметке уровня воды в верхнем бьефе, равной 102,0 м. Глубина воды в нижнем бьефе (в конце рисбермы), соответствующая этому расходу, равна 101,75 м.

Модельный расход, соответствующий расчетному паводковому расходу, равный  $12,79 \text{ л/с}$ , проходит при отметке уровня воды в верхнем бьефе 102,45 м, т. е. на 0,45 м выше НПУ. Таким образом, перепад уровней воды в бьефах составляет  $102,45 - 101,75 = 0,7 \text{ м}$ .

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

Скорости потока в конце рисбермы не превышают  $3,5 \text{ м/с}$  (рис. 4а).

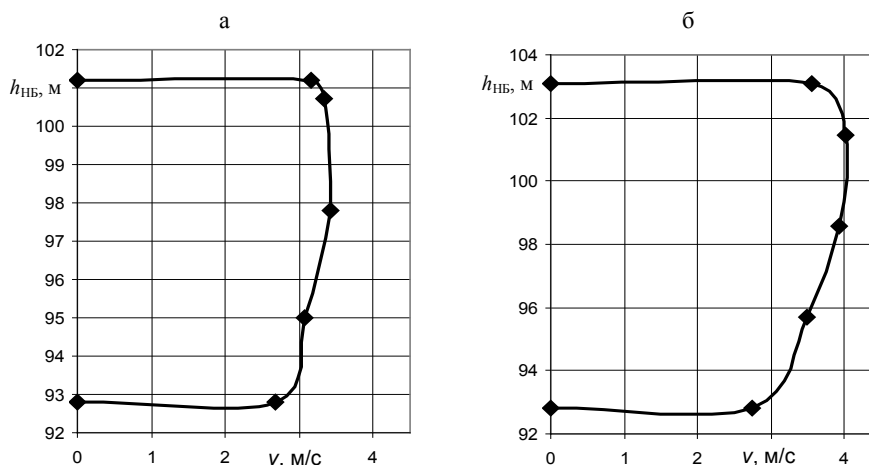


Рис. 4. Эпюры скоростей потока в нижнем бьефе на оси пролета: а – при пропуске расчетного расхода 3%-й обеспеченности; б – то же поверочного паводкового расхода 0,5%-й обеспеченности

Лед при таких уровнях воды в бьефах проходит свободно, не задевая водосливную поверхность плотины и не задерживаясь на водобое и рисберме;

• **проверка пропуска поверочного расхода 0,5%-й обеспеченности.** Поверочный паводковый расход 0,5%-й обеспеченности равен 3280 м<sup>3</sup>/с, через один пролет водосливной плотины должен пропускаться расход 820 м<sup>3</sup>/с, при отметке уровня воды в верхнем бьефе равной 104,5 м. Глубина воды в нижнем бьефе (в конце рисбермы), соответствующая этому расходу, равна 103,8 м.

Модельный расход, соответствующий расчетному паводковому расходу, равный 18,64 л/с, проходит при отметке уровня воды в верхнем бьефе 105,17 м, т. е. на 0,67 м выше форсированного паводкового уровня (ФПУ). Перепад между уровнями воды в бьефах равен 1,37 м. Характер движения потока аналогичен предыдущему опыту, только волнение в нижнем бьефе несколько большее.

Скорости потока в конце рисбермы не превышают 4,0 м/с (рис. 4б).

Также был проведен опыт (по просьбе проектировщиков), при котором поверочный расход на модели уменьшался на 3 % с целью учета погрешности масштаба моделирования. На модель подавался расход 18,1 л/с, уровень воды в нижнем бьефе тот же, что и в предыдущем опыте. Этот расход проходил при отметке верхнего бьефа, равной 105,11 м, т. е. на 0,61 м выше форсированного паводкового уровня. Перепад между уровнями воды в бьефах составил 1,31 м.

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

• **проверка пропуска льда через водосливную плотину.** В верхнем бьефе отметка НПУ равна 102,0 м. Расчетный расход  $Q = 150$  м<sup>3</sup>/с, отметка уровня воды в нижнем бьефе, соответствующая этому расходу, равна 94,8 м. Отметка гребня затвора, через который сбрасывается в нижний бьеф лед, – 101,0 м. При таком положении затвора расчетный расход проходит при отметке уровня воды в верхнем бьефе 103,79 м, т. е. на 1,79 м выше отметки НПУ.

При высоте водобойной стенки 2 м (отметка гребня стенки – 94,0 м) гидравлический прыжок находится в критическом положении (начало прыжка располагается в сжатом сечении). За водобойной стенкой образуется второй гидравлический прыжок, который располагается в пределах водобойного колодца и также находится в критическом положении. Перепад на выходе из водобойного колодца незначительный. Скорость потока в конце рисбермы составляет 2,34 м/с.

Искусственно замораживались льдины размерами в плане 13×18 см<sup>2</sup> и 9×13 см<sup>2</sup> и толщиной 1 см, что в масштабе соответствовало плановым размерам льдин 10×13 м<sup>2</sup> и 6,5×10 м<sup>2</sup> и их толщине 0,7 м. Лед при замораживании подкрашивали чернилами.

При отметке уровня воды в нижнем бьефе 94,8 м льдины всех размеров при пропуске над затвором ударялись о водосливную поверхность плотины, о водобойную стенку и об уступ водобойного колодца (рис. 5).

При увеличении глубины воды в нижнем бьефе до отметки 96,1 м льдины не задевали водобойную стенку и уступ водобойного колодца и проходили, не задерживаясь в них. Однако отмечены удары льдин о водосливную поверхность плотины.

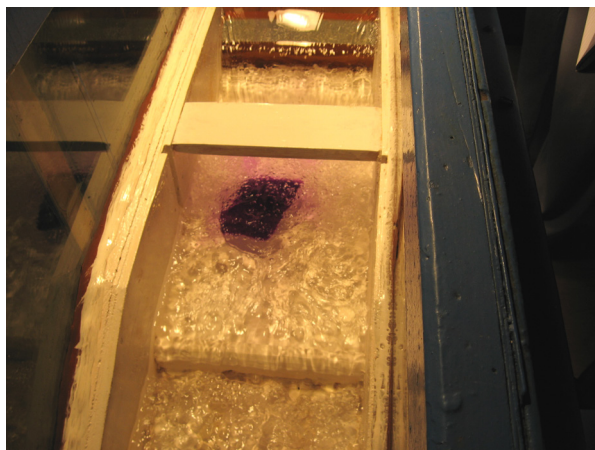


Рис. 5. Пропуск льда через водосливную плотину

Аналогичная картина наблюдалась и при отметке уровня воды в нижнем бьефе 96,8 м. При этом льдины меньших размеров не задерживались в прыжке перед стенкой, а льдины большего размера задерживались в зоне гидравлического прыжка и под воздействием водоворотного потока периодически ударялись о водосливную поверхность плотины.

При глубине воды в нижнем бьефе 6,0 м, что соответствует отметке уровня воды 98,0 м, прыжок и перед водобойной стеной и в водобойном колодце затоплен. Льдины всех размеров проходят, не затрагивая бетонные конструкции. Небольшие по размерам льдины совершают несколько возвратно-поступательных движений в прыжке, однако их ударов о бетонные конструкции не отмечено.

Таким образом, во избежание ударов льдин о водосливную поверхность плотины и о крепления дна в нижнем бьефе пропуск льда необходимо начинать при отметке уровня воды в НБ, равной 98,0 м. Согласно кривой связи уровней и расходов воды в нижнем бьефе такая глубина соответствует расходу  $900 \text{ м}^3/\text{с}$ .

## ВЫВОДЫ

1. Водосливная плотина Гродненской ГЭС, состоящая из четырех пролетов по 20 м каждый, пропускает расчетный паводковый расход 3%-й обеспеченности при отметке уровня воды в верхнем бьефе 102,45 м на 0,45 м выше отметки НПУ.

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

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

4. 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.

5. 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.

6. Пропуск льда в нижний бьеф при расходе 150 м<sup>3</sup>/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.

7. Во избежание ударов льдин о водосливную поверхность плотины и о водобойные конструкции нижнего бьефа пропуск льда необходимо начинать при отметке уровня воды в нижнем бьефе 98,0 м, что соответствует пропускаемому расходу 900 м<sup>3</sup>/с.

Результаты исследований использованы для уточнения конструкции водосливной плотины при разработке строительного проекта Гродненской ГЭС.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Современное состояние и возможные пути развития гидроэнергетики Беларуси // А. Н. Альферович [и др.] / Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 1993. – № 3–4.
2. Шенец, Л. В. Модернизация энергетической отрасли через энергоэффективные и ресурсосберегающие технологии / Л. В. Шенец // Белорусский промышленный форум, 2007. Технологии. Оборудование. Качество: сб. материалов 10-го междунар. симпоз., 15–18 мая 2007 г. – Минск, 2007. – С. 25–26.
3. Леви, И. И. Моделирование гидравлических явлений / И. И. Леви. – Л.: Энергия, 1967. – 210 с.
4. Ляхтер, В. М. Гидравлическое моделирование / В. М. Ляхтер, А. М. Прудовский. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 39 с.
5. Шарп, Д. Ж. Гидравлическое моделирование / Д. Ж. Шарп. – М.: Мир, 1984. – 279 с.
6. Агроскин, И. И. Гидравлика / И. И. Агроскин, Г. Г. Дмитриев, Ф. И. Пикалов. – М.; Л.: Энергия, 1964. – 352 с.
7. Справочник по гидравлическим расчетам / под ред. П. Г. Киселева. – М.: Энергия, 1972. – 312 с.
8. Зегжда, А. П. Теория подобия и методика расчета гидротехнических моделей / А. П. Зегжда. – М.; Л.: Госстройиздат, 1938. – 164 с.
9. Веников, В. А. Теория подобия и моделирования применительно к задачам электроэнергетики / В. А. Веников. – М.: Высш. шк., 1966.
10. Панфилов, Д. Ф. Моделирование давления и пропуска льда / Д. Ф. Панфилов // Изв. высш. учеб. заведений. Строительство и архитектура. – 1964. – № 7. – С. 115–122.
11. Петруничев, Н. Н. О динамическом давлении льда на гидротехническое сооружение. Льдотермические вопросы в гидротехнике / Н. Н. Петруничев. – М.; Л.: Гидрометеоздат, 1954. – С. 17–64.
12. Пропуск льда через гидротехнические сооружения / под ред. К. Н. Коржавина. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 182 с.

Представлена кафедрой гидротехнического  
и энергетического строительства

Поступила 12.12.2008