

## ГИДРАВЛИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ И СОПРЯЖЕНИЯ БЬЕФОВ ПАВОДКОВОГО ВОДОСБРОСА ГИДРОУЗЛА МИНСКОЙ ТЭЦ-2

*Кандидаты техн. наук, доценты КРУГЛОВ Г. Г., КУНЦЕВИЧ Н. М., ЛИНКЕВИЧ Н. Н.*

*Белорусский национальный технический университет*

В Республике Беларусь накоплен достаточный опыт восстановления ранее построенных и строительства новых гидроэлектростанций (ГЭС) на гидроузлах неэнергетического назначения, одним из которых является гидроузел, обеспечивающий водоснабжение Минской ТЭЦ-2. Устройство малой ГЭС значительно изменяет существующий эксплуатационный режим гидроузла и схемы пропуска расходов в нижний бьеф (НБ), что требует изучения режимов сопряжения бьефов. В связи с этим в гидротехнической лаборатории БНТУ на физической модели были выполнены исследования режимов сопряжения бьефов при различных схемах пропуска расходов в нижний бьеф, а также условий пропуска паводкового расхода двухпроцентной обеспеченности.

Гидроузел ТЭЦ-2 возведен на р. Свислочь с целью создания подпора уровня воды в реке для гарантированного водоснабжения ТЭЦ-2 в створе, отстоящем от устья реки на 247 км, и расположен в черте г. Минска. В эксплуатацию гидроузел введен в 1953 г. Основным его сооружением является бетонная водосливная плотина с широким порогом. Водосливной фронт плотины – 40 м. Он разделен бычками на пять водосливных отверстий шириной по 8 м. Отверстия перекрываются плоскими стальными затворами высотой по 2,5 м. Бычки – неразрезные толщиной 1,7 м. Отметка гребня бычков в месте размещения затворов – 192,0 м, далее в нижнем бьефе они имеют ступенчатую форму. Отметка порога водослива – 189,5 м.

В настоящее время на р. Свислочь выше гидроузла ТЭЦ-2 создано несколько водохранилищ (гидроузлы «Парк Горького», «Комсомольское озеро», «Дрозды», «Криница», «Го-

нолес»), регулирующих сток реки, а также построена Вилейско-Минская водная система, осуществляющая переброску части стока реки Вилии в р. Свислочь. В связи с этим расчетные расходы р. Свислочь в створе гидроузла ТЭЦ-2 составляют от 6 до 15–17 м<sup>3</sup>/с в нормальных условиях эксплуатации и 180 м<sup>3</sup>/с – в случае катастрофического паводка. Это позволяет уменьшить длину водосливного фронта плотины, используя один из водосливных пролетов для размещения малой гидроэлектростанции.

Выполненные в НПО «Малая энергетика» проектные разработки показали возможность возведения малой ГЭС в составе гидроузла Минской ТЭЦ-2 с установленной мощностью 300 кВт. Гидроэлектростанция будет оборудована двумя гидравлическими турбинами мощностью по 150 кВт, которые будут располагаться в пределах крайнего водосливного пролета плотины, примыкающего к правому берегу реки. Расход воды, подаваемой на одну турбину, составит 4 м<sup>3</sup>/с, следовательно, при одновременной работе двух агрегатов – 8 м<sup>3</sup>/с. Поперечный разрез и план гидроэлектростанции приведены на рис. 1.

В основу гидравлических исследований водосбросного сооружения и гидроэлектростанции гидроузла ТЭЦ-2 положен метод физического моделирования [1–4], цель которого – воспроизведение в уменьшенном масштабе изучаемых явлений и обеспечение полного подобия натуральных и модельных явлений. Размеры плотины, глубины, минимальные и максимальные расходы обусловили изготовление опытной установки на русловой площадке в масштабе 1:30.

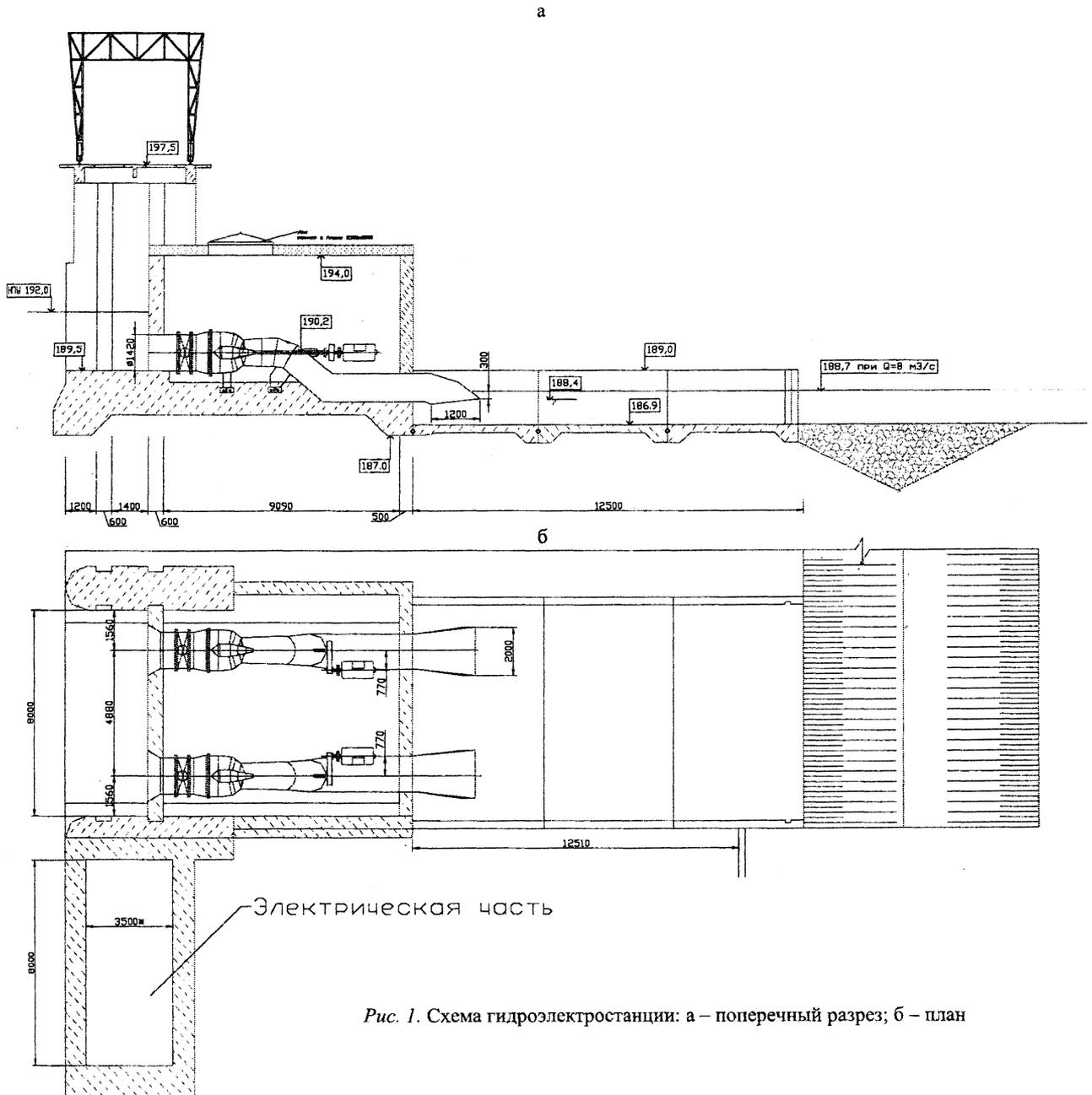


Рис. 1. Схема гидроэлектростанции: а – поперечный разрез; б – план

Модель водосливной плотины выполнена из дерева. Дерево проолифиле, все стыки заделали силиконовым герметиком и покрасили масляной краской. Основные размеры модели приведены на рис. 2, 3. Отсасывающие трубы ГЭС, по которым вода отводится в НБ, изготовлены из жести.

Отводящее русло в НБ выполнено из дерева. На участке от сливного пола до существующей поперечной деревянной стенки переменной высотой на дно модели уложен мелкозернистый песок.

Подача воды на опытную установку осуществлялась из водомерного бака, в котором устроено два треугольных мерных водослива. По трапециевидному каналу, дно и стенки которого покрыты полиэтиленовой пленкой во избежание потерь воды на подводящем участке, вода поступала в успокоительный бассейн прямоугольной формы, из которого плавно подводилась к модели плотины и ГЭС. Для измерения глубины воды в верхнем и нижнем бьефах гидроузла установлены мерные иглы. Точность измерения отметки уровней воды при помощи мерных игл – 0,1 мм.

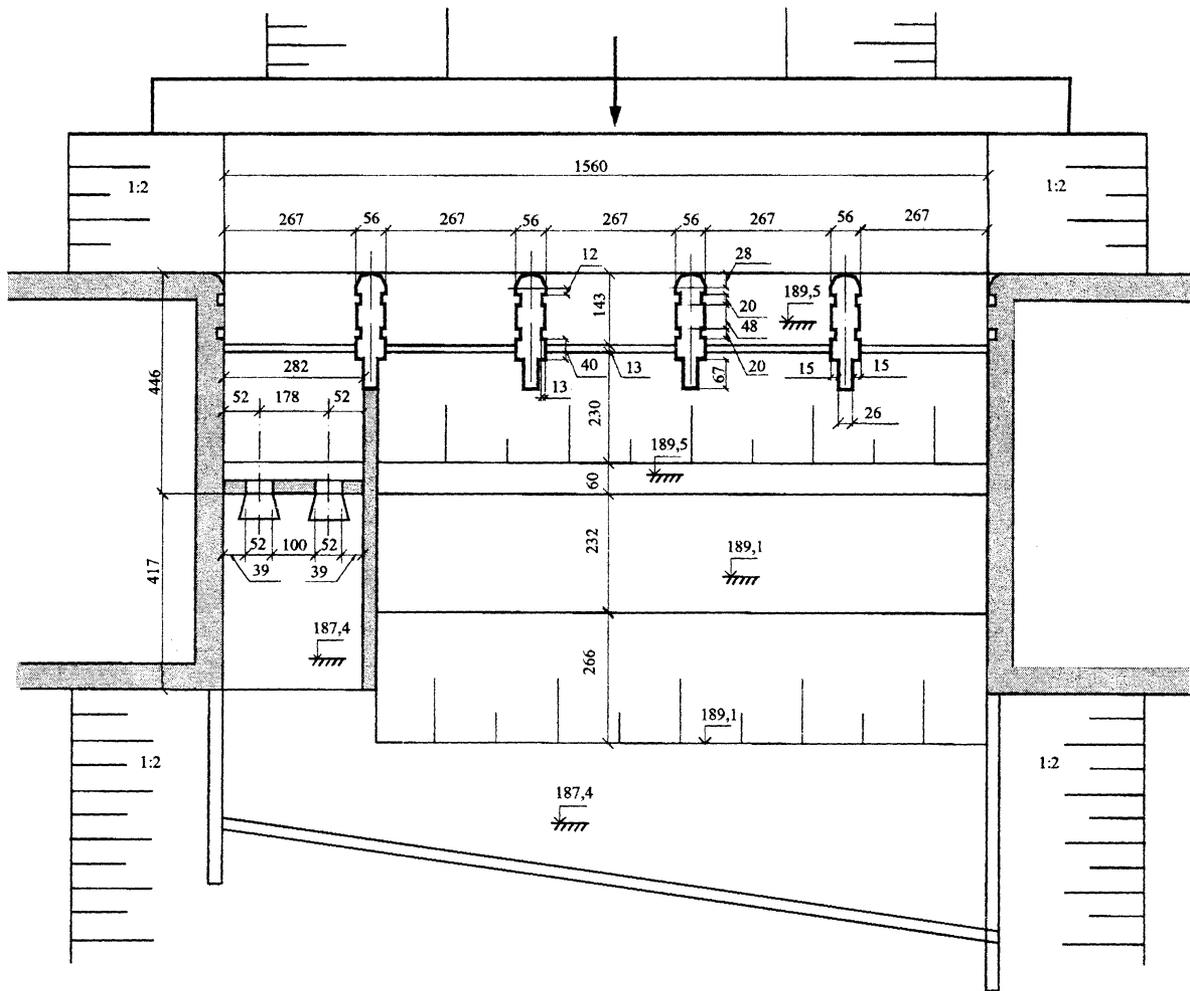


Рис. 2. План модели гидроузла ТЭЦ-2 г. Минска

Скорость течения потока измерялась с помощью тарированной вертушки конструкции ЦНИИКИВР.

В соответствии с заданием на проведение исследований были выполнены опыты, соответствующие следующим эксплуатационным режимам работы гидроузла:

1. Расход воды в реке ( $4 \text{ м}^3/\text{с}$ ) полностью пропускается через правую турбину, левая турбина не работает. Перелива воды через гребень затворов, перекрывающих водосливные отверстия плотины, нет.

2. Расход воды в реке ( $4 \text{ м}^3/\text{с}$ ) полностью пропускается через левую турбину, правая турбина не работает. Перелива воды через гребень затворов нет.

3. Расход воды в реке –  $6 \text{ м}^3/\text{с}$ . Работает одна левая турбина, через которую пропускается  $4 \text{ м}^3/\text{с}$  воды, а  $2 \text{ м}^3/\text{с}$  – сбрасывается в нижний бьеф через гребень затворов.

4. Расход воды в реке –  $6 \text{ м}^3/\text{с}$ . Работает одна правая турбина, через которую пропускается  $4 \text{ м}^3/\text{с}$  воды, а  $2 \text{ м}^3/\text{с}$  – сбрасывается в нижний бьеф через гребень затворов.

5. Расход воды в реке –  $17 \text{ м}^3/\text{с}$ . Работает одна левая турбина, через которую пропускается  $4 \text{ м}^3/\text{с}$  воды, а  $13 \text{ м}^3/\text{с}$  – сбрасывается в нижний бьеф через гребень затворов.

6. Расход воды в реке –  $17 \text{ м}^3/\text{с}$ . Работает одна правая турбина, через которую пропускается  $4 \text{ м}^3/\text{с}$  воды, а  $13 \text{ м}^3/\text{с}$  – сбрасывается в нижний бьеф через гребень затворов.

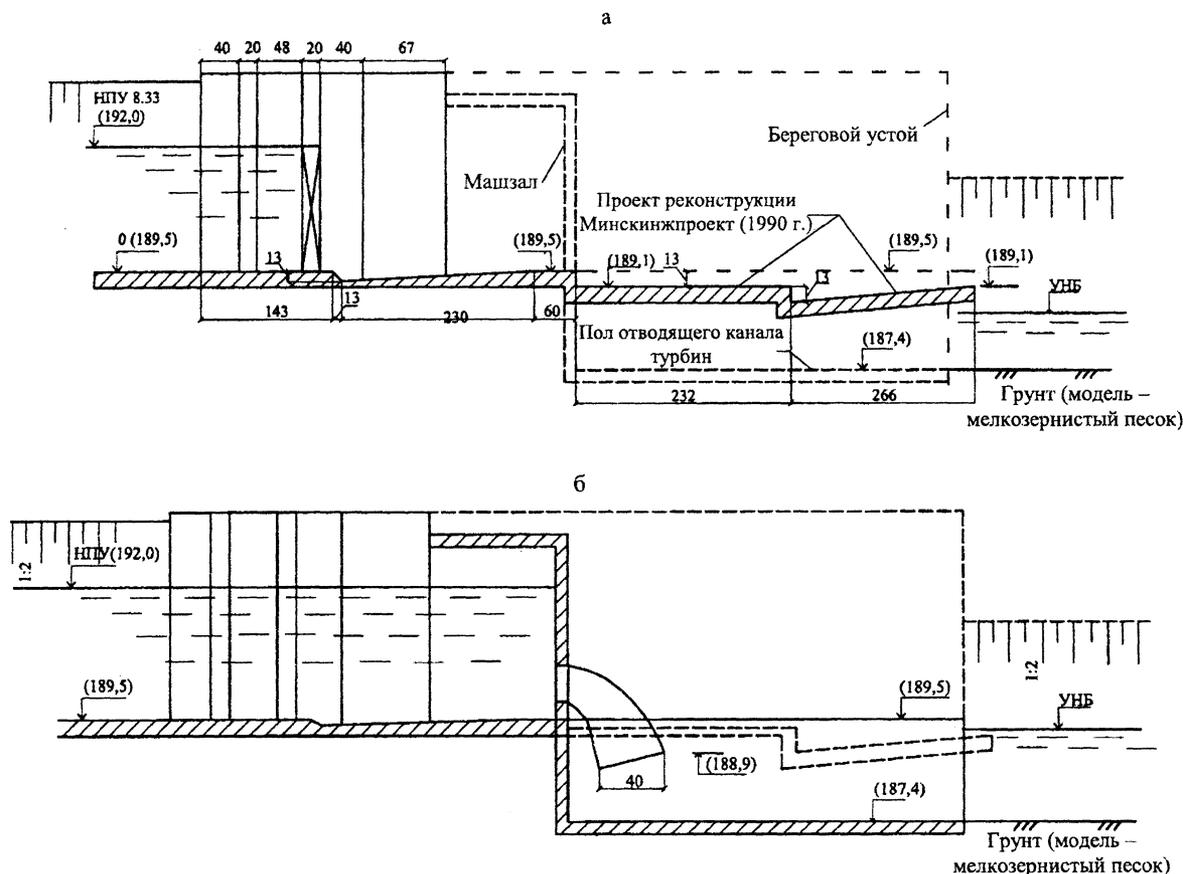


Рис. 3. Разрезы по модели гидроузла ТЭЦ-2: а – по оси пролета водосливной плотины; б – по оси отверстия ГЭС

7. Расход воды в реке –  $17 \text{ м}^3/\text{с}$ . Работают обе турбины, через которые пропускается  $8 \text{ м}^3/\text{с}$  воды, а  $9 \text{ м}^3/\text{с}$  – сбрасывается в нижний бьеф через гребень затворов.

8. Расход воды в реке –  $180 \text{ м}^3/\text{с}$ . Обе турбины не работают, и весь расход пропускается в нижний бьеф через четыре полностью открытых водосливных пролета плотины.

Опыты проводились в следующей последовательности:

- при помощи мерных водосливов устанавливался расход воды, соответствующий натурному;
- в течение трех часов через опытную установку пропускался заданный расход и с интервалом в 0,5 ч мерными иглами измерялись уровни воды в верхнем и нижнем бьефах, которые на протяжении опыта должны были оставаться неизменными;
- визуально фиксировался режим истечения потока и характер перемещения грунта в нижнем бьефе;

- при помощи микровертушки измерялась скорость течения потока, проходящего через отверстия турбины, в месте выхода его на песчаное дно;

- прекращалась подача воды на опытную установку и после того, как модель полностью осушалась, фотографировались размывы грунта в нижнем бьефе;

- песчаное дно за водосбросом выравнивалось, и установка была готова к проведению следующего опыта.

В последнем опыте проверялся пропуск максимального паводкового расхода. В этом случае закрывались оба отверстия моделирующей турбины, открывались полностью все четыре водосливных отверстия. Устанавливался расчетный расход, соответствующий натуральному расходу  $180 \text{ м}^3/\text{с}$ . Определялись отметки уровней верхнего и нижнего бьефов, при которых пропускается расчетный расход, измерялись скорости потока и фотографировались размывы грунта в нижнем бьефе.

Основным фактором прогнозирования местных размывов при модельных исследованиях являются правильный выбор размываемого материала и учет его физико-механических свойств.

Предполагается, что известный критерий подобия местных размывов, выраженный в масштабных множителях, предложенных И. И. Леви и Ф. И. Пикаловым, при несоответствии масштаба размываемого грунта критерию гравитационного подобия не применим. Поэтому приходится пользоваться приемами искаженного моделирования местных размывов, и в этих условиях происходит искажение кинематических и динамических характеристик потока. Осуществляя искаженное моделирование местных размывов, невозможно определить натурную глубину воронки размыва на основе линейного увеличения модельной глубины, так как не учитываются полностью физико-механические характеристики размываемых грунтов. Если в натуре преобладают средние или мелкие пески, то, уменьшая их крупность, даже при достаточно больших геометрических масштабах модели практически невозможно подобрать необходимый размываемый материал. Поэтому рекомендуется при исследованиях местных размывов применять натуральный грунт. В этом случае геометрического подобия глубин размыва на модели и в натуре не будет, а полученные в результате лабораторных исследований размывы могут использоваться только для качественной или сравнительной оценки.

В результате опытов проведено:

• **исследование режимов потока в нижнем бьефе при пропуске расходов через гидроэлектростанцию.** В процессе эксплуатации гидроузла такие режимы возможны в тех случаях, когда расход воды в реке – меньше  $4 \text{ м}^3/\text{с}$  (будет работать только одна турбина) и около  $8 \text{ м}^3/\text{с}$  (работают одновременно две турбины). В данных случаях перелива воды через гребень затворов нет. В верхнем бьефе поток входит на сооружение спокойно. Уровень воды в ВБ на отметке НПУ –  $192,0 \text{ м}$ , в НБ (при работе одной турбины) –  $188,7 \text{ м}$ . Уровни воды в НБ опреде-

лялись пропускаемыми расходами и отметками бетонной стенки в нижнем бьефе. Были исследованы следующие три режима:

1. При истечении потока ( $Q = 4 \text{ м}^3/\text{с}$ ) через правое (по ходу течения) отверстие ГЭС в нижнем бьефе в пределах лотка, отделенного продольной стенкой от креплений НБ за водосливом, образуется ярко выраженное водоворотное движение. Поток захватывал мельчайшие частицы песка в нижнем бьефе, которые откладывались практически в центре лотка. На выходе из лотка поток – спокойный, сбойности течения и размывов песка не наблюдалось. Скорости на сходе потока с лотка на грунт не превышали  $0,4 \text{ м/с}$ .

2. При истечении потока ( $Q = 4 \text{ м}^3/\text{с}$ ) через левое отверстие ГЭС водоворотное движение в лотке незначительное, но отмечается сбойность потока в пределах лотка. Струя отжимается вправо, скорости на оси струи потока на выходе из лотка: донные –  $1,62 \text{ м/с}$ , поверхностные –  $2,01 \text{ м/с}$ , в месте схода потока с лотка образуется воронка размыва, смещенная в сторону правого берега.

3. При пропуске воды  $8 \text{ м}^3/\text{с}$  через оба отверстия ГЭС отметка уровня в нижнем бьефе –  $188,72 \text{ м}$ . Отмечено небольшое отклонение потока влево. На выходе из лотка поток – спокойный, размывов грунта не было. Скорости на сходе с лотка не превышали  $0,4 \text{ м/с}$ ;

• **исследование режимов потока в нижнем бьефе при пропуске расходов через гидроэлектростанцию и водосбросную плотину.** Во время эксплуатации гидроузла такие режимы будут в тех случаях, когда расходы воды в реке превысят пропускную способность одной турбины, но будут меньше пропускной способности двух турбин, а также когда расходы будут превышать пропускную способность двух турбин. Поэтому были выполнены исследования следующих пяти режимов:

1. Расход воды в реке –  $6 \text{ м}^3/\text{с}$ . Через правое отверстие ГЭС пропускается  $4 \text{ м}^3/\text{с}$ , а  $2 \text{ м}^3/\text{с}$  – через гребень затворов, перекрывающих четыре водосливных отверстия плотины. Отметка уровня воды в ВБ –  $192,09 \text{ м}$ , отметка уровня воды в НБ –  $188,70 \text{ м}$ . В пределах лотка имелось водоворотное движение. Поток захватывал мельчайшие частицы песка, которые откладывались в центре лотка. На выходе из лотка по-

ток несколько отклонялся в сторону водосливной плотины. Скорости на сходе потока с лотка не превышали 0,4 м/с. Поток, сливающийся через гребень затворов, в нижнем бьефе распределен равномерно, скорости его течения – незначительные. На сходе потока с плиты крепления, между отметкой которой и дном реки имеется перепад в 1,7 м, по проекту реконструкции гидроузла, составленному Минскинж-проектом, образуется небольшая воронка размыва грунта. Потоки, идущие через гидроэлектростанцию и водосливную плотину, между собой сопрягаются спокойно, сбойности течения в нижнем бьефе за креплениями нет.

2. Расход воды в реке – 6 м<sup>3</sup>/с. Через левое отверстие ГЭС пропускается 4 м<sup>3</sup>/с, а 2 м<sup>3</sup>/с – через гребень затворов. Отметка уровня воды в ВБ – 192,09 м, в НБ – 188,70 м. Водоворотное движение потока в лотке выражено слабо. Поток, выходящий из лотка, отжимался в сторону правого берега. Скорости измерялись по оси струи на сходе с лотка. Донные скорости – 1,64 м/с, практически такие же, как и в случае работы левого отверстия без перелива через затворы. А поверхностные скорости (1,85 м/с) меньше, что объясняется взаимодействием двух потоков, идущих через ГЭС и плотину. Поток, проходящий через водосливную плотину, распределен равномерно, скорости его течения – незначительны. На сходе потока с плиты крепления образуется небольшая воронка размыва, которая уширяется в месте выхода из лотка струи, пропускаемой через левое отверстие. Сопряжение потоков через гидроэлектростанцию и водосливную плотину – спокойное. Сбойности течения в нижнем бьефе за креплениями нет.

3. Расход воды в реке – 17 м<sup>3</sup>/с. Через правое отверстие ГЭС пропускается 4 м<sup>3</sup>/с, а 13 м<sup>3</sup>/с – через гребень затворов. Отметка уровня воды в ВБ – 192,32 м, в НБ – 188,75 м. В пределах лотка имелось водоворотное течение с отложением мельчайших частиц песка в центре лотка. На выходе из лотка поток плавно сопрягался с потоком, проходящим через водосливную плотину, сбойного течения в нижнем бьефе не было. Скорости потока на выходе из лотка не превышали 0,4 м/с. На сходе потока с плиты крепления образуется воронка размыва.

4. Расход воды в реке – 17 м<sup>3</sup>/с. Через левое отверстие ГЭС пропускается 4 м<sup>3</sup>/с, а 13 м<sup>3</sup>/с – через гребень затворов. Отметка уровня воды в ВБ – 192,32 м, в НБ – 188,75 м. Водоворотное движение потока в лотке выражено слабо, однако поток захватывает мельчайшие частицы песка, которые откладываются в центре лотка. Максимальные скорости течения на выходе из лотка отмечены на оси струи, движущейся у боковой стенки. Донные скорости (1,63 м/с) такие же, как и в других опытах, где работало одно левое отверстие. Поверхностные скорости (1,92 м/с) несколько больше, чем при расходе в реке (6 м<sup>3</sup>/с) за счет большей скорости потока, идущего через водосливную плотину. На сходе потока с плиты крепления образуется воронка размыва, которая уширяется в месте выхода из лотка струи, сбрасываемой через левое отверстие.

5. Расход воды в реке – 17 м<sup>3</sup>/с. Через оба отверстия ГЭС пропускается 8 м<sup>3</sup>/с, а 9 м<sup>3</sup>/с – через гребень затворов. Отметка уровня воды в ВБ – 192,18 м, в НБ – 188,75 м. На выходе из лотка поток – спокойный, размыва грунта не было. Средняя скорость течения на выходе из лотка – 1,33 м/с. На сходе потока с плиты крепления образуется небольшая воронка размыва. Потоки, проходящие через гидроэлектростанцию и водосливную плотину, сопрягаются без образования сбойного течения;

• **исследование пропуска паводка через водосливную плотину.** Во время пропуска паводка 2%-й обеспеченности, равного 180 м<sup>3</sup>/с, гидроэлектростанция не будет работать, так как перепад между уровнями верхнего и нижнего бьефов будет незначительным. В связи с этим пропуск паводка осуществляется через четыре полностью открытые водосливные отверстия. Установлено, что пропускная способность четырех отверстий вполне достаточна для пропуска 180 м<sup>3</sup>/с. При этом отметка уровня воды в ВБ – 191,7 м, т. е. на 30 см ниже отметки НПУ. Отметка уровня воды в НБ – 190,5 м. Средняя скорость потока на сходе с плиты – 3,29 м/с. Дно нижнего бьефа за креплением размыто. Размытый грунт нижнего бьефа заносится в лоток ГЭС.

## ВЫВОДЫ

1. Подтверждена техническая возможность возведения гидроэлектростанции в правом

крайнем пролете водосливной плотины гидроузла Минской ТЭЦ-2.

2. Пропускная способность четырех водосливных пролетов достаточна для сброса паводка 2%-й обеспеченности при отметке верхнего бьефа, не превышающей НПУ 192,0 м.

3. При пропуске речного расхода только через турбины (левую, правую или обе вместе) сопряжение потока с нижним бьефом – спокойное. Сбойного течения в нижнем бьефе за пределами крепления не возникало.

4. При пропуске речных расходов одновременно через турбины и гребень затворов, перекрывающих водосливные отверстия, сопряжение потоков – спокойное, без образования сбойного течения в нижнем бьефе за пределами крепления.

5. В связи с тем, что во всех исследованных схемах работы гидроэлектростанции и водосливной плотины не отмечалось сбойного потока в нижнем бьефе, нет необходимости в устройстве на выходе из лотка специальных гасителей, обеспечивающих плавное растекание потока в нижнем бьефе.

6. В тех случаях, когда должна работать одна из двух турбин, предпочтение следует отдавать правой (по ходу течения реки), так как в этом случае скорости потока на выходе из лотка минимальные.

7. В принятом Минскийжпроектном варианте реконструкции гидроузла (1990 г.) за водосливной плотиной на сходе с плиты крепления возникает перепад в 1,7 м между отметкой верха плиты и дном реки (из-за выбора отметки дна отводящего лотка ГЭС 187,4 м), поэтому пропуск любого (даже незначительного) расхода через водосливную плотину вызывает размывы грунта в нижнем бьефе. При реконструкции гидроузла необходимо выполнить сопряжение плиты крепления с дном нижнего бьефа без перепада, что существенно снизит размывающую способность потока, сбрасываемого через водосливную плотину.

8. В месте сопряжения креплений нижнего бьефа за плотиной и гидроэлектростанцией с дном нижнего бьефа следует выполнить зуб из каменной наброски глубиной не менее 1,5 м для защиты концевой участка крепления от подмыва. Кроме того, рекомендуется закрепить дно нижнего бьефа каменной наброской на длине не менее 20 м.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. *Справочник по гидравлическим расчетам* / Под ред. П. Г. Кисилева. – 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.: Энергоиздат, 1984.
4. *Гиляров Н. П.* Моделирование речных потоков. – Л.: Гидрометеиздат, 1973. – 200 с.

УДК 532.5.013

## ФИЛЬТРАЦИЯ ВОДЫ В СЛОЕ ОДНОРОДНОЙ ЗЕРНИСТОЙ ЗАГРУЗКИ

*Инж. КРАВЦОВ А. М.*

*Институт повышения квалификации и переподготовки кадров  
по новым направлениям развития техники, технологии и экономики*

До сих пор часто для расчетов скоростей фильтрации  $v_{\phi}$  жидкостей в плотных зернистых средах используют степенные формулы вида [1]

$$v_{\phi} = K_0 I^n, \quad (1)$$

где  $K_0$  – коэффициент пропорциональности;  $I$  –

гидравлический уклон;  $n$  – показатель степени, изменяющийся от 0,5 до 1.

Значения  $K_0$  и  $n$  определяются опытным путем. Так, при  $n = 1$  получается известная формула Дарси, которая применяется при медленных движениях воды в плотных зернистых сре-