

ПЕТРОВ
Олег Александрович

**МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ВОЛНЕНИЯ В НИЖНЕМ
БЬЕФЕ ГИДРОУЗЛОВ ПРИ РАБОТЕ ВОДОСБРОСНЫХ СООРУЖЕНИЙ**

Специальность 05.23.16 – «Гидравлика и инженерная гидрология»

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург
2015

Работа выполнена в Открытом акционерном обществе «Всероссийский научно-исследовательский институт гидротехники имени Б.Е. Веденеева».

Научный руководитель:

Климович Виталий Иванович,
доктор физико-математических наук, профессор,
Открытое акционерное общество «Всероссийский
научно-исследовательский институт гидротехники
имени Б.Е. Веденеева»

Официальные оппоненты:

Ханов Нартмир Владимирович,
доктор технических наук, профессор,
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования «Российский государственный
аграрный университет – МСХА К.А.Тимирязева»,
заведующий кафедрой
«Гидротехнические сооружения».

Новикова Инна Соломоновна,
кандидат технических наук,
ведущий научный сотрудник,
Открытое акционерное общество
«Научно-исследовательский институт
энергетических сооружений»

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
профессионального образования
«Государственный университет морского и
речного флота имени адмирала С.О. Макарова»
(ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С.О. Макарова»)

Защита состоится «16» июня 2015 г в 14.00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.229.17 в ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» по адресу 195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., д.29, Гидрокорпус-2, ауд. 411.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» и на сайте университета <https://www.spbstu.ru/science/defences.html>.

Автореферат разослан «__» _____ 2015 г

Учёный секретарь
диссертационного совета,
д.т.н., доцент

Сидоренко Геннадий Иванович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. В настоящее время отсутствуют обобщенные расчетные рекомендации и методики по определению характеристик волнения в нижнем бьефе гидроузлов при работе водосбросных сооружений. Имеются лишь отдельные измерения параметров волн, их ориентировочные оценки, предложения по определению высоты волн на ближайшем к концу гидравлического прыжка участке для плоских условий.

При применении схемы сопряжения бьефов отбросом потока от сооружения волнообразование в русле нижнего бьефа может быть более интенсивным, по сравнению со схемой гашения энергии в водобойном колодце или на креплении. Количественная оценка параметров волн в этих случаях в настоящее время возможна только на основе проведения специальных экспериментальных исследований. В связи с этим, может оказаться неэффективным принятое без проведения исследований проектное решение о применении указанной схемы сопряжения, если в последующем потребуется выполнение дорогостоящих мероприятий по защите берегов и гидротехнических сооружений в нижнем бьефе гидроузлов от волнового воздействия. В ряде случаев, большое практическое значение имеет и изучение волнообразования за гасителями, т.к. даже при их наличии в нижнем бьефе образуются волны, распространяющиеся на большие расстояния от сооружений. Вопросы о защите берегов в нижнем бьефе приобретают особую значимость вне зависимости от выбранной схемы сопряжения, если на них располагаются автодороги, площадки ОРУ, промзоны, опоры ЛЭП.

Отмеченное выше определяет актуальность в разработке методики определения характеристик волнения в нижнем бьефе за зоной сопряжения потока и закономерностей снижения высоты волн с расстоянием от места образования.

Степень разработанности темы работы.

При разработке диссертации использованы работы А.Н. Рахманова, Т.П. Проворовой, Н.И. Блиядзе, авторы которых проводили лабораторные исследования параметров волн за гидравлическим прыжком в плоских условиях. В.М. Лятхером, А.Д. Халтуриным, И.М. Чекуриным проведены важные натурные измерения высоты волн в нижнем бьефе Воткинской и Жигулевской ГЭС при пропуске сбросных расходов. Большой вклад в работу вложила Бурейская ГЭС, выполнившая натурные измерения высоты волн в нижнем бьефе при пропуске паводка 2004 года.

Цель работы

Разработка методики определения характеристик волнения (высота, длина) в нижнем бьефе гидроузлов при работе водосбросных сооружений, как для варианта сопряжения бьефов отбросом потока от сооружения, так и при гашении энергии в водобойном колодце или на креплении.

В соответствии с поставленной целью решались следующие задачи

1. Проведение экспериментальных исследований на пространственных моделях различных гидроузлов и измерение на них параметров волн при разных граничных условиях, как для варианта отброса струи от сооружения, так и в случае гашения энергии в водобойном колодце или на креплении.
2. Сопоставление результатов измерений параметров волн с натурными материалами для условий Бурейского и Камского гидроузлов.
3. Разработка методики по определению характеристик волнения в нижнем бьефе при работе водосбросных сооружений.
4. Проведение численного моделирования течений при работе водосбросных сооружений Бурейского гидроузла и пропуске через него различных расходов.

Научная новизна работы заключается в:

- проведении и обобщении экспериментальных исследований на физических моделях различных гидроузлов как для варианта сопряжения бьефов отбросом потока (Бурейский,

Зейский, Гоцатлинский гидроузлы и ГЭС ЛайЧау), так и при гашении энергии в водобойном колодце или на креплении (Нижне-Зейский, Нижне-Бурейский, Богучанский, Камский гидроузлы); измерении параметров волнения в нижнем бьефе при пропуске различных сбросных расходов и получении закономерностей их изменения от граничных условий; сопоставлении полученных результатов исследований с натурными данными для ряда гидроузлов;

- разработке методики определения характеристик волнения в нижнем бьефе гидроузлов как за местом сопряжения потока с нижним бьефом, так и с удалением от зоны образования.

Практическая значимость работы

Разработанная расчетная методика позволяет по известным характеристикам (сбросной расход, перепад уровней в бьефах, степень затопления гидравлического прыжка, характерная глубина воды за зоной падения струи и ширина отводящего русла) определять параметры волнения, как в случае отброса потока от сооружения, так и при гашении энергии в водобойном колодце или на креплении.

Методика позволяет на стадии проектирования гидроузлов производить оценки технических особенностей вариантов сопряжения бьефов и обосновывать необходимость защитных конструкций берегов нижнего бьефа при пропуске сбросных расходов на значительном расстоянии от плотины.

Результаты работы использованы в проектах защитных креплений берегов нижнего бьефа Бурейского и Зейского гидроузлов.

Методы исследований

В основу диссертационной работы были положены следующие методы:

- экспериментальные исследования характеристик волнения в нижнем бьефе на физических моделях восьми гидроузлов;
- численное исследование течений при работе водосбросных сооружений для варианта сопряжения бьефов отбросом потока.

На защиту выносятся следующие положения:

- результаты экспериментальных исследований характеристик волнения в нижнем бьефе гидроузлов при работе водосбросных сооружений;
- анализ и обобщение имеющихся данных по параметрам волн; сопоставление полученных результатов измерений с натурными данными и численным моделированием;
- расчетная методика определения характеристик волн в русле нижнего бьефа гидроузлов при работе водосбросных сооружений.

Достоверность результатов работы обеспечивается:

- применением теории моделирования гидравлических процессов;
- применением стандартных апробированных средств измерений и методов обработки экспериментальных данных;
- согласованностью результатов экспериментальных измерений с натурными данными и численным моделированием.

Апробация работы

Основные и отдельные положения работы в процессе ее выполнения представлялись и докладывались на:

- 76-й международной комиссии по большим плотинам (Болгария, 2008);
- 35-м конгрессе МАГИ (Китай, 2013);
- научно – технических конференциях «Гидроэнергетика. Новые разработки и технологии»;
- секциях ученого совета ОАО «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева».

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована практическая значимость работы, сформулирована цель и задачи исследований, отражена научная новизна, приведены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе выполнен обзор литературы по волнообразованию в нижнем бьефе гидроузлов при работе водосбросных сооружений.

Анализ литературы показал, что имеется ряд авторов, которые проводили исследования или измерения параметров волн за гидравлическим прыжком. В исследованиях А.Н. Рахманова и Т.П. Проворовой, приведены зависимости, по которым можно построить линии максимальных и минимальных уровней свободной поверхности потока (высоту волн) непосредственно за гидравлическим прыжком. В монографии В.М. Лятхера «Турбулентность в гидросооружениях» приводятся важные натурные измерения высоты волн в нижнем бьефе Воткинской ГЭС, полученные с помощью стереофотосъемки. Здесь приведены также результаты измерений высоты волн в нижнем бьефе Жигулевского гидроузла на разном расстоянии от водосливной плотины. Отмечается, что затухание волн в нижнем бьефе происходит значительно быстрее, чем в условиях моря или водохранилищ. Н.И. Блядзе в статье «Исследование волновых колебаний потока за гидравлическим прыжком», приводит зависимость по расчету высоты волн, возникающих на ближайшем к концу гидравлического прыжка участке. Представленные расчетные зависимости указанных авторов по определению высоты волн непосредственно за гидравлическим прыжком являются оценочными и применимы для условий плоской задачи при гашении энергии в водобойном колодце. Авторы не рассматривают случай сопряжения бьефов отбросом потока и волнообразование при таком режиме. Не приводятся данные по снижению (затуханию) высоты волн с расстоянием от зоны их образования.

В первой главе работы приведен ряд примеров волнообразования в нижнем бьефе гидроузлов и последствия волновых воздействий. Рассмотрены случаи повреждений берегов и их креплений, как при отбросе потока от сооружения, так и в случае гашения энергии в водобойном колодце или на креплении. Такими примерами может служить Красноярский гидроузел, на котором в связи с интенсивным волнением в нижнем бьефе при реализации схемы сопряжения с отбросом потока, происходили неоднократные подмывы левого берега и разрушения его крепления. Повреждения креплений берегов в нижнем бьефе фиксировались на Бухтарминском и Зейском гидроузлах; подмыв неукрепленного берега наблюдался при пропуске строительных расходов через Бурейский гидроузел и др. Представлены примеры воздействий волн на откосы незащищенных берегов, расположенных на больших расстояниях от плотины, достигающих 2-3 км, в случае гашения энергии в водобойном колодце или на креплении (Кременчугский, Волжский и Угличский гидроузлы). Приведенные в первой главе примеры 11 гидроузлов, при эксплуатации которых произошли подмывы берегов или разрушения их креплений, подтверждают актуальность поставленной цели работы.

Обзор литературы по волнообразованию в нижнем бьефе гидроузлов при работе водосбросных сооружений показал, что в настоящее время отсутствуют обобщенные расчетные методики по определению характеристик волнения и закономерностей их изменений с расстоянием от зоны образования. В результате проведенного анализа сформирована цель диссертационной работы – разработать расчетную методику по определению характеристик волнения в нижнем бьефе при работе водосбросных сооружений на основе проведенных экспериментальных исследований для ряда гидроузлов.

Во второй главе представлены результаты лабораторных исследований по волнообразованию в русле нижнего бьефа на моделях следующих гидроузлов: Бурейского; Зейского; Гоцатлинского; Богучанского; Нижне-Бурейского; Нижне-Зейского; Камского и ЛайЧау. Ос-

новые исследования проведены в гидравлической лаборатории ОАО «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева».

Моделирование на указанных выше моделях гидроузлов осуществлялось по критерию Фруда. При проведении исследований обеспечивалась автомодельность по числу Рейнольдса, как для течений $Re_c = \frac{V_c R}{\nu} > Re_{cr,c}$ (где V_c -средняя скорость потока; R -гидравлический радиус; ν – кинематический коэффициент вязкости), так и для волнового движения жидкости $Re_w = \frac{V_m h}{\nu} > Re_{cr,w}$, (где V_m -максимальная орбитальная скорость волны; h -высота волны). Автомодельность по числу Вебера, также выполнялась. С учетом геометрического подобия ($L_M=L_n/m$), выбора масштаба времени в виде $t_M=t_n/\sqrt{m}$, обеспечивалось подобие по критерию Струхала для моделирования волновых процессов. Хорошее согласование результатов экспериментальных измеренных параметров волн с рядом натурных данных подтверждают возможность их моделирования в лабораторных условиях, а также подтверждают подобие между характеристиками волнения на моделях и в натурных условиях.

Для мобильности проведения исследований волнообразования, измерения высоты волн на моделях гидроузлов выполнялись тастером со световым индикатором. На пространственной модели Бурейского гидроузла выполнялись записи волнения на компьютер и сопоставлялись с результатами измерений тастером. Пример характерной обработанной записи реализации волнового процесса приведен на рисунке 1.

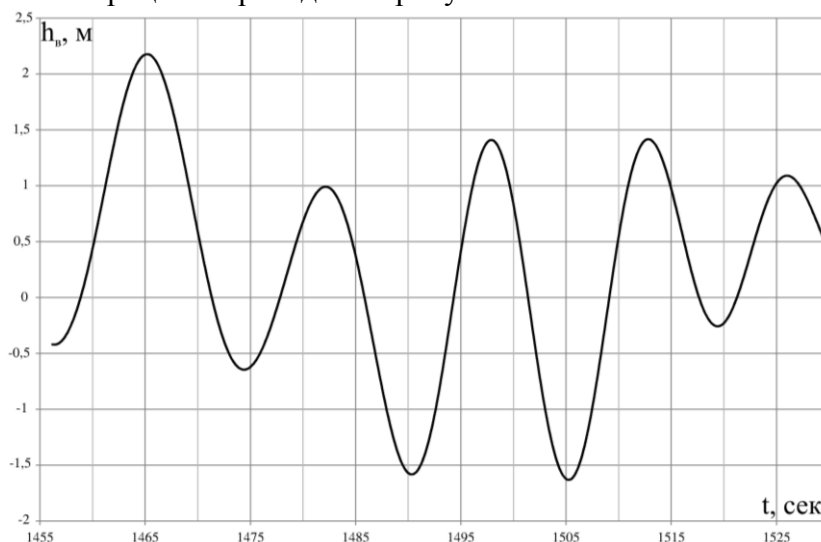


Рисунок 1 – Характерный пример обработанной записи волнения у правого берега в нижнем бьефе Бурейского гидроузла

Сопоставления результатов измерений при помощи тастера с записью волнения показали удовлетворительное их согласование. Коэффициент корреляции составил 0,95.

При проведении исследований волнообразования на моделях гидроузлов погрешности измерений были следующие:

- высота волн не более 10%;
- уровни воды в верхнем и нижнем бьефах – 1 мм;
- деформации отводящего русла – 1-2 мм;
- расходы воды через мерные водосливы – не более 3-5%.

Результаты лабораторных исследований волнообразования в русле нижнего бьефа гидроузлов при работе водосбросных сооружений показали следующее.

На модели Бурейского гидроузла масштаба 1:120 проведены исследования при падении струи на неразмытое русло нижнего бьефа; в случае образования ямы размыва в месте

падения потока и бара за ней; при разборке бара из отводящего канала. Для всех указанных случаев сбросной расход через водосбросные сооружения составлял: 9600; 6650; 4400 и 2150 м³/с.

При пропуске максимального расхода равного 9600 м³/с в условиях неразмытого русла высота волн достигала 6,5 м у правого берега на расстоянии 500 м от оси плотины и медленно затухала вниз по течению и составляла около 5 м на расстоянии 900 м. У левого берега за местом падения струи высота волн достигала 10 м (рисунок 2). В случае стабилизации деформаций русла, с образованием ямы и бара при пропуске аналогичного по значению расхода максимальное волнение снижалось и составляло не более 5-6 м за местом падения струи и до 2,5 м у правого берега на расстоянии 500 м. При расчистке русла от гряды отложений продуктов размыва высота волн у правого берега составляла 2-3 м.

Исследования волнообразования на модели Зейского гидроузла масштаба 1:100 проводились для условий сформировавшейся ямы размыва (максимальная глубина в яме составляла 15-17 м) и пропуске через водосбросные сооружения расходов 6600 м³/с и 3300 м³/с. Измерения высоты волн осуществлялись от зоны падения потока вниз по течению. Результаты этих измерений сведены в таблицу 1.

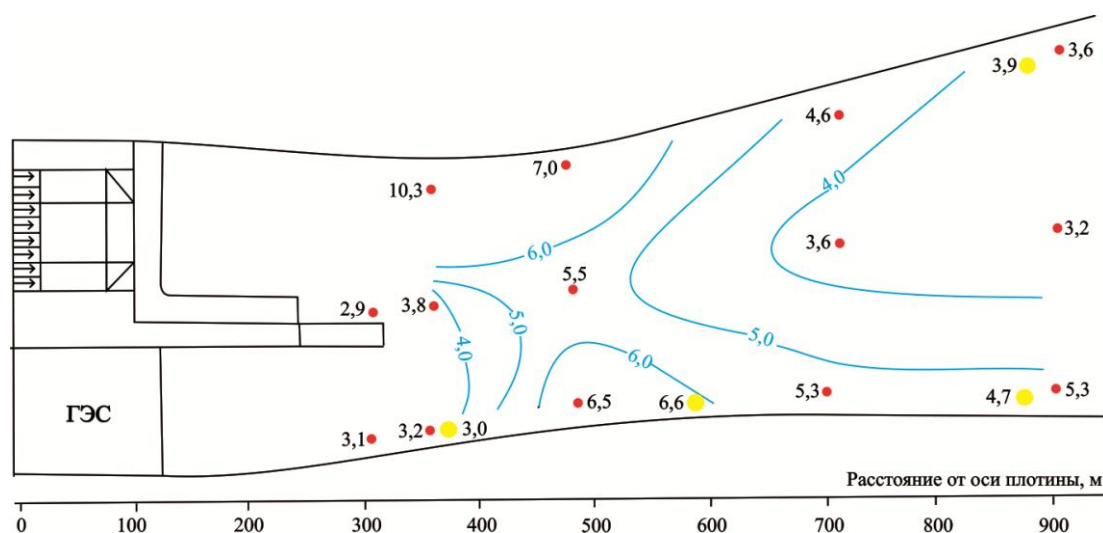


Рисунок 2 – Максимальные высота волн в нижнем бьефе Бурейской ГЭС при пропуске через водосброс расхода 9600 м³/с. Условные обозначения: 6,5 ● - максимальная высота волн, измеренная тастером; 6,6 ● - максимальная высота волн, измеренная волнографом; — 1,5 — - изолинии волн; русло неразмытое

Таблица 1 – Результаты измерений максимальной высоты волн в нижнем бьефе Зейской ГЭС

Q, м ³ /с	Отм. УВБ, м	Отм. УНБ, м	L от места падения струи	Высота волн, м
6600	319,4	227,0	0	4,3
			25	3,4
			100	1,9
			150	1,4
			200	1,1
3300	319,4	224,7	0	3,3
			25	3,1
			100	1,9
			150	1,5
			200	1,3

В опытах на модели Гоцатлинского гидроузла масштаба 1:75 изменялась глубина воды в русле нижнего бьефа с 4 м до 10 м (для природы), при постоянном расходе равном $657\text{ м}^3/\text{с}$; деформации русла нижнего бьефа стабилизировались. При глубине воды 4 м за местом падения струи образовывался раздробленный гребень высотой 5,6 м, который являлся инициатором системы перемещающихся волн в нижнем бьефе, высота которых не превышала 1-1,5 м (см. рисунок 3). При глубине 10 м за зоной падения потока так же образовывался гребень высотой около 10 м, однако максимальная высота волн в нижнем бьефе за счет увеличения глубины воды в русле составляла 1-1,5 м и уменьшалась с удалением от этой зоны (см. рисунок 3).

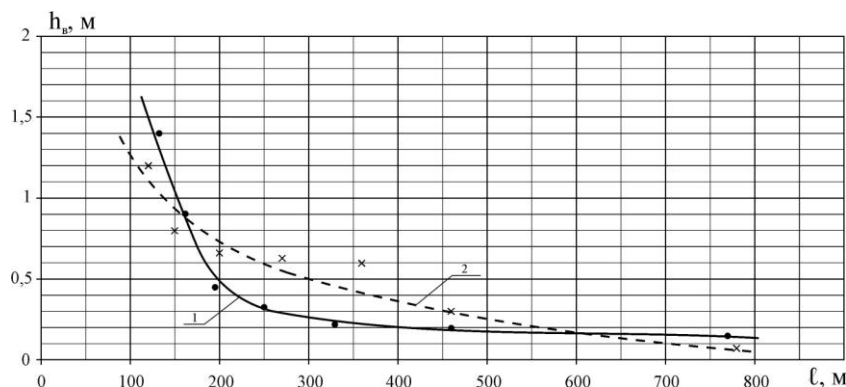


Рисунок 3 – Изменение максимальной высоты волн с расстоянием от места падения потока при пропуске через водосбросные сооружения Гоцатлинского гидроузла расхода $657\text{ м}^3/\text{с}$;
1 – глубина воды в нижнем бьефе – 4 м; 2 – глубина воды – 10 м

Исследования на модели гидроузла ЛайЧау масштаба 1:100 проводились в лаборатории Энергетического Института во Вьетнаме, г. Ханой. Измерения параметров волн выполнялись при пропуске следующих сбросных расходов: 26000; 18000; 15700; 10400 и 8000 $\text{м}^3/\text{с}$ для варианта с ямой размыва в зоне падения потока. Результаты измерений показали, что при пропуске расхода равного 26000 $\text{м}^3/\text{с}$ максимальная высота волн у левого и правого берегов достигала 4-5 м на расстоянии 450-500 м от оси плотины и затухали до 3-х м на расстоянии 900 м. При расходе 18000 $\text{м}^3/\text{с}$ высота волн у берегов сохранялась практически такой же, как и при пропуске максимального расхода. Затухание волнения до 2-х м происходило на участке более 900 м от плотины для указанного выше расхода. При меньших расходах высота волн составляла в зоне падения потока не более 2-3 м, а на расстоянии 900 м снижалась до 1,5 м.

Исследования параметров волн для условий гашения энергии в водобойных колодцах или на креплениях, выполненные на пространственных моделях Нижне-Бурейского, Богучанского, Нижне-Зейского и Камского гидроузлов показали, что высота волн за гидравлическим прыжком, как правило, не превышает 2-3 м в диапазоне расходов от 5000 до 16000 $\text{м}^3/\text{с}$ и затухает практически по такому же закону, как и при отбросе потока от сооружения.

На всех вышеуказанных моделях проводились измерения длины волн, результаты которых показали, что эта характеристика изменяется в широком диапазоне и составляет от 5 до 15 высот волн.

Во второй главе также представлены результаты сопоставлений экспериментальных исследований параметров волн с натурными данными, которые показали следующее.

1. В 1956 году проведены натурные измерения высоты волн в нижнем бьефе Жигулевского гидроузла на разном расстоянии от водосливной плотины и пропуске сбросного расхода равного 21000 $\text{м}^3/\text{с}$ (рисунок 4). Результаты измерений в натуральных условиях на Жигулевской ГЭС хорошо согласуются с обобщенной зависимостью затухания волн с расстоянием от места их образования, которая получена на основании экспериментальных исследований.

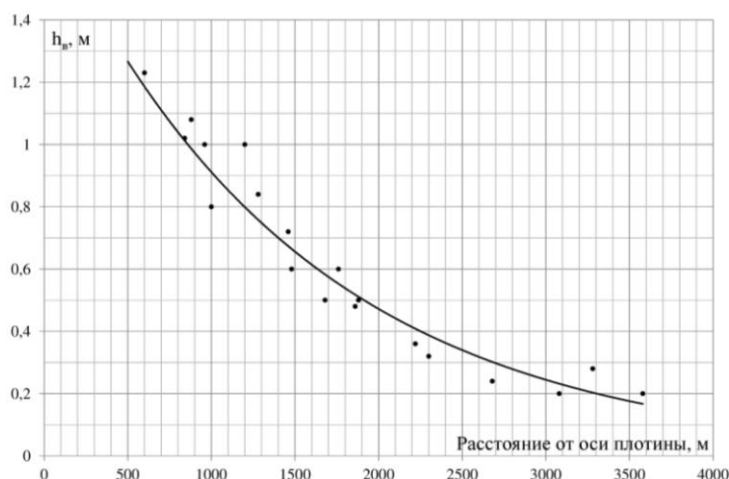


Рисунок 4 – Результаты натуральных измерений высоты волн в нижнем бьефе Жигулевского гидроузла при пропуске сбросного расхода равного $21000 \text{ м}^3/\text{с}$

2. Волны высотой 1,5 м фиксировались у левого берега в 300 м ниже водобойной стенки при пропуске через Саяно-Шушенский гидроузел в 1979 г расхода $7000 \text{ м}^3/\text{с}$. Аналогичные по высоте волны измерены на пространственной модели этого гидроузла при пропуске указанного выше расхода.

3. При пропуске строительных расходов в 2004 г. через Бурейский гидроузел в натуральных условиях выполнялось измерение высоты волн у правого берега. Максимальная высота волн составляла около 1,5 м в 450 м от оси плотины при пропуске расхода через водосбросные сооружения равного $3340 \text{ м}^3/\text{с}$. Для аналогичных условий на модели проводились сопоставительные измерения вдоль правого берега. Результаты сопоставлений с натурными данными оказались удовлетворительными. Хорошо согласовались волны небольшой высоты, измеренные на этом гидроузле. На расстоянии 600-800 м от плотины высота волн составляла от 0,5 до 0,8 м, что было подтверждено измерениями на модели на этом же участке русла.

4. При проведении натуральных испытаний эксплуатационного водосброса Бурейского гидроузла в 2008 и 2009 гг оценивалась высота волн в нижнем бьефе. При пропуске расхода через водосброс равного $2000 \text{ м}^3/\text{с}$ высота волн на расстоянии 450 м от оси плотины составляла около 1,0 м, высота волн у левого берега непосредственно за плотиной – 2,0 м. Длина волн фиксировалась от 6 до 10 высот волн. При пропуске расхода $4500 \text{ м}^3/\text{с}$ высота волн у правого берега составляла около 2 м, а вблизи места падения струи – 3,5 – 4 м, в 1 км от плотины – 0,5 м. Измеренные характеристики волн на модели при пропуске аналогичных сбросных расходов хорошо согласуются с натурными данными.

5. В 2012 году оценивалась высота волн в нижнем бьефе Камского гидроузла при пропуске расхода через водосброс $2140 \text{ м}^3/\text{с}$. Максимальное волнение наблюдалось непосредственно за местом сопряжения потока с нижним бьефом и составляло 1,5-2,0 м. На расстоянии 400 м от плотины она снижалась вдвое и не превышала 0,5 м. Проведенные сопоставления параметров волн на пространственной модели этого гидроузла при аналогичных граничных условиях показали хорошее согласование с результатами натуральных измерений.

6. В натуральных условиях, так же как и на моделях волны незначительной высоты наблюдаются на большом удалении от плотины. На Кременчугской ГЭС волны высотой до 0,3 м фиксировались на расстоянии около 500 м от водосброса. За плотиной Волжского гидроузла образовывались волны высотой до 2 м, которые постепенно затухали с расстоянием. Эти волны незначительной высоты интенсивно разрушали надводную часть берега на расстоянии около 3-х км от плотины Волжской ГЭС. На Угличской ГЭС небольшие по высоте волны, по данным натуральных измерений, подмывали вогнутый берег р. Волги, расположенный примерно в 2 км от плотины.

В третьей главе приведена методика определения характеристик волнения в нижнем бьефе гидроузлов при работе водосбросных сооружений, которая разработана на материалах экспериментальных исследований, выполненных на указанных выше моделях гидроузлов и опубликованных данных по волнению. Надежность выполненных исследований подтверждена рядом проведенных сопоставлений с натурными измерениями. В работе рассматривались параметры перемещающихся волн от зоны их генерации. Другие типы волн, такие как волна попуска, волна прорыва, стоячие волны и др., здесь не освещаются.

Пределы применимости разработанной методики соответствуют следующему диапазону измерений на моделях: $600 < Q < 25990 \text{ м}^3/\text{с}$; $30 < q < 280 \text{ м}^2/\text{с}$; $15 < Z < 211 \text{ м}$; $6,5 < h_{\text{нб}} < 60,7 \text{ м}$; $0,3 < h_{\text{в}} < 10 \text{ м}$. Здесь Q – расход через водосбросные сооружения; q – удельный расход; Z – перепад уровней в бьефах; $h_{\text{нб}}$ – глубина воды в зоне падения струи или в водобойном колодце; $h_{\text{в}}$ – высота волн в русле нижнего бьефа.

На первом этапе применения расчетной методики устанавливается высота исходной волны в зоне волнообразования (как правило, непосредственно за местом падения потока); на втором – оценивается уменьшение (затухание) ее высоты с удалением от этой зоны. В методике выделяются следующие характерные случаи, определяющие условия волнообразования в нижнем бьефе гидроузлов.

1. При малых глубинах в русле нижнего бьефа, когда $h_{\text{нб}} < h_2$ и $\eta < 1$ (h_2 – вторая сопряженная глубина, η – степень затопления прыжка), образуется сверхкритический поток, в русле на некотором его участке имеет место бурное течение. За местом падения струи при таком режиме может возникать значительное волнение.

2. Глубин нижнего бьефа достаточно для образования затопленного гидравлического прыжка, когда $h_{\text{нб}} > h_2$ и $\eta > 1$.

Для определения исходной высоты волн за зоной сопряжения потока с нижним бьефом в случае, когда $h_{\text{нб}} < h_2$ может быть предложена следующая экспериментальная зависимость:

$$\frac{h_{\text{исх}}}{Z} = \alpha \left(\frac{Q}{Z \cdot B \cdot \sqrt{gh_{\text{нб}}}} \right)^{1/2} \quad (1)$$

где $h_{\text{исх}}$ – исходная высота волны непосредственно за местом падения потока; Z – перепад уровней в бьефах; α – эмпирический коэффициент; Q – сбросной расход через водосбросные сооружения; B – ширина русла в месте падения потока; g – ускорение свободного падения. Коэффициент α определен на основе метода наименьших квадратов равным 0,3.

Для определения исходной высоты волн за зоной сопряжения потока с нижним бьефом в случае, когда $h_{\text{нб}} > h_2$ может быть предложена следующая зависимость:

$$\frac{h_{\text{исх}}}{Z_{\text{ост}}} = \alpha \left(\frac{Q}{Z_{\text{ост}} \cdot B \cdot \sqrt{gh_{\text{нб}}}} \right)^{1/2} \quad (2)$$

где $\alpha=0,35$; B – ширина русла в месте падения потока или ширина водобойного колодца; $Z_{\text{ост}}$ – «остаточный» перепад уровней бьефов с учетом потерь энергии в гидравлическом прыжке, определяется как:

$$Z_{\text{ост}} = Z - E_{\text{пр}}, \quad (3)$$

$E_{\text{пр}}$ – потери энергии потока в гидравлическом прыжке, находим по формуле (Чугаев, 1982):

$$E_{\text{пр}} = \frac{(h_2 - h_1)^3}{4h_2 \cdot h_1} \quad (4)$$

Закономерность снижения высоты исходной волны с расстоянием изучалась на указанных выше моделях гидроузлов. Результаты измерений параметров волн в русле нижнего бьефа на различном расстоянии от зоны их генерации позволили построить зависимость $h_{\text{в}}/h_{\text{исх}} = f(\ell/h_{\text{исх}})$ (рисунок 5). Здесь ℓ – расстояние от места образования исходной волны; $h_{\text{в}}/h_{\text{исх}}$ – снижение высоты исходной волны. Приведенная на рисунке 5 зависимость может

быть использована как для варианта сопряжения бьефов отбросом потока от сооружения, как и в случае гашения энергии в водобойном колодце или на креплении. На рисунке 5 нанесены также значения высот волн, измеренных в натуральных условиях в русле нижнего бьефа Жигулевского гидроузла при пропуске сбросного расхода равного $21000 \text{ м}^3/\text{с}$. Результаты этих измерений хорошо согласуются с экспериментальной зависимостью, подтверждая возможность моделирования волнения в лабораторных условиях на пространственных моделях. Согласно зависимости, представленной на рис. 4 при соотношении $\ell/h_{\text{исх}} = 100$ высота исходной волны снижается вдвое, а при соотношении $\ell/h_{\text{исх}} = 200$ высота уменьшается на 75 % от первоначальной.

Коэффициенты корреляции (r) для указанных выше случаев составили:

- при отбросе потока от сооружения, когда $h_{\text{нб}} < h_2 - 0,95$;
- при отбросе потока, когда $h_{\text{нб}} > h_2 - 0,83$;
- при гашении энергии в водобойном колодце или на креплении – 0,93.
- при определении изменения относительной высоты волн ($h_{\text{в}}/h_{\text{исх}}$) от расстояния – 0,8.

Доверительные интервалы при вероятности 0,05, составил:

- при $h_{\text{нб}} < h_2 - 0,013$;
- при $h_{\text{нб}} > h_2 - 0,052$;
- при гашении энергии на гасителе – 0,12;
- при определении изменения относительной высоты волн от расстояния – 0,27.

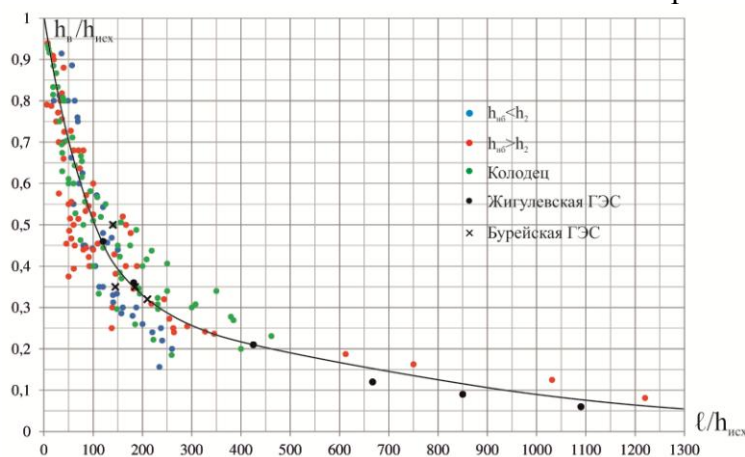


Рисунок 5 – Изменение относительной высоты волн ($h_{\text{в}}/h_{\text{исх}}$) от расстояния при:

- – $h_{\text{нб}} < h_2$; ● – $h_{\text{нб}} > h_2$; ● – гашении энергии в водобойном колодце или на креплении;
- – натурные измерения высоты волн в нижнем бьефе Жигулевского гидроузла
- х - натурные измерения высоты волн в нижнем бьефе Бурейского гидроузла

При выполнении расчетов креплений берегов, как каменного, так и плитчатого, важными исходными параметрами являются высота ($h_{\text{в}}$) волн на интересующем нас участке нижнего берега и их длина (λ). При проведении экспериментальных исследований на моделях гидроузлов выполнены измерения длины волн. Аналогичная оценка выполнялась и в натуральных условиях при проведении испытаний эксплуатационного водосброса Бурейского гидроузла и при пропуске весеннего половодья на Камской ГЭС. Результаты экспериментальных и натуральных измерений показали, что волны, распространяющиеся от места падения струи вниз по течению, более крутые, чем, например, ветровые, и их длина, изменяются в широком диапазоне (спектре) в зависимости от граничных условий и составляет от 5 до 15 высот волн. Представляется целесообразным производить расчеты креплений, рассматривая несколько значений длины волн (например, $\lambda = 5h_{\text{в}}$, $\lambda = 10h_{\text{в}}$ и $\lambda = 15h_{\text{в}}$) и по наибольшим нагрузкам назначать его конструкцию, тем самым вводя некоторый запас, обеспечивающий надежность крепления.

В четвертой главе выполнено численное моделирование течений при работе водосбросных сооружений Бурейского гидроузла и пропуске различных сбросных расходов.

Основной задачей настоящей главы диссертации являлось выполнение численного моделирования работы водосброса Бурейской ГЭС при пропуске различных сбросных расходов и определение параметров волн в русле нижнем бьефе, а так же сопоставление полученных результатов расчета с материалами экспериментальных исследований. В качестве математической модели использовалась модифицированная модель мелкой воды, предложенная В.И. Климовичем, и позволяющая учитывать уклон и кривизну водосливной поверхности и возможность отрыва потока от дна по типу отброшенной струи. При выполнении расчетов вопросы, связанные с аэрацией потока, не рассматривались. Вычисления проводились на расчетной сетке 550x400 узлов, число Куранта задавалось равным 0,4. Полагалось, что давление под летящей струей равно атмосферному, так как для условий Бурейского гидроузла предусмотрен подвод воздуха под струю на водосливной грани плотины при помощи трамплинов аэраторов.

Расчеты проводились для случая неразмытого русла нижнего бьефа при пропуске различных расходов через водосбросные сооружения гидроузла и работе следующих пролетов: 1 – 8 (расход $9600 \text{ м}^3/\text{с}$); 1 – 3 и 6 – 8 (расход $6650 \text{ м}^3/\text{с}$); 1, 3, 6, 8 (расход $4400 \text{ м}^3/\text{с}$).

На рисунках 6 и 7 приведены результаты расчетов для случая работы всех пролетов водосброса (1-8) с полным открытием затворов.

Рассматривался вариант с ямой размыва в зоне падения потока при работе всех пролетов водосброса и пропуске сбросного расхода равного $9600 \text{ м}^3/\text{с}$. На рисунке 8 приведены сопоставления результатов расчетов высоты волн с экспериментальными измерениями на модели Бурейской ГЭС для варианта неразмываемого русла нижнего бьефа и для варианта с ямой размыва и пропуске различных расхода через водосбросные сооружения гидроузла.

Проведенные расчеты позволяют сделать вывод о возможности использования модифицированной модели мелкой воды и разработанных численных программ для оценки параметров волн, образующихся в нижнем бьефе водосбросов, работающих по принципу отброшенной струи.

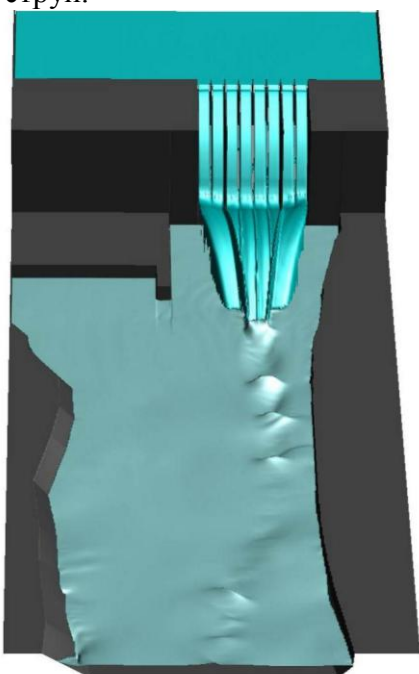


Рисунок 6 – Вид свободной поверхности воды со стороны нижнего бьефа при работе всех пролетов водосливной плотины Бурейского гидроузла; $Q_{\text{в}} = 9600 \text{ м}^3/\text{с}$

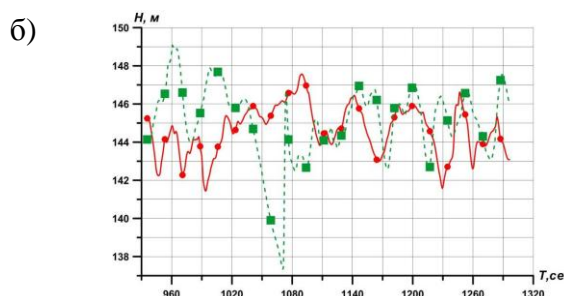
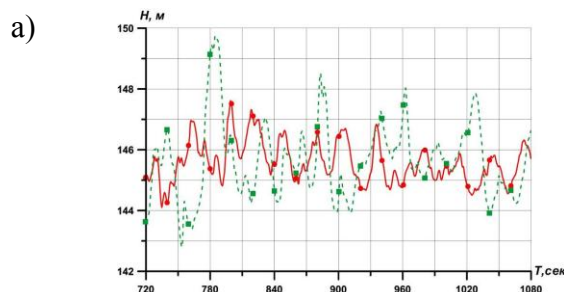


Рисунок 7 – Динамика отметок свободной поверхности воды в нижнем бьефе Бурейского гидроузла при работе всех пролетов водосброса;
а) 400 м от оси плотины; б) 800 м;
● - у правого берега; ■ - у левого берега

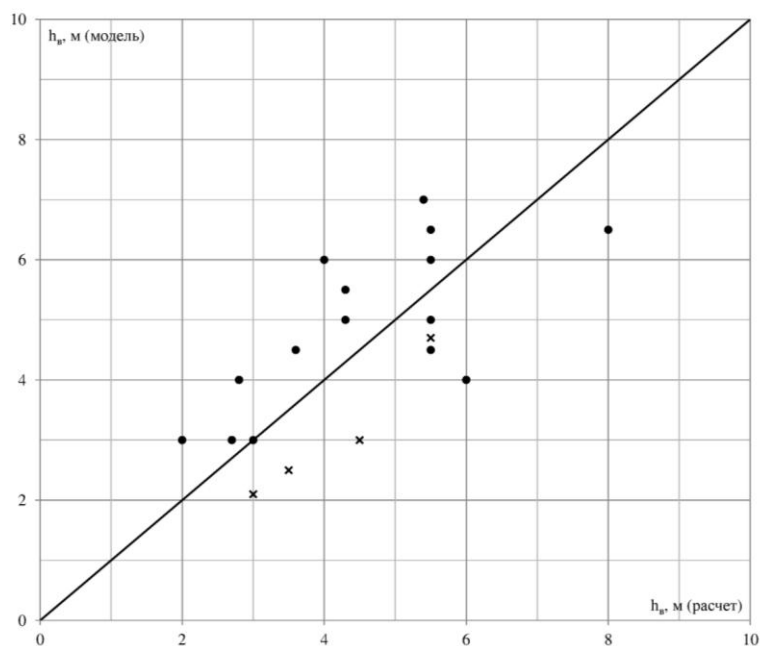


Рисунок 8 – Сопоставления результатов расчетов высоты волн с экспериментальными исследованиями на модели Бурейского гидроузла при пропуске различных расходов (● – при $h_{нб} < h_2$; x – при $h_{нб} > h_2$)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты исследований, полученные при выполнении диссертационной работы и имеющие научно-практическое значение, можно сформулировать следующим образом.

1. Проведены экспериментальные исследования на моделях различных гидроузлов, позволившие определить характеристик волнения как при отбросе потока от сооружения (Бурейский, Зейский, Гоцатлинский гидроузлы и ГЭС ЛайЧау), так и при гашении энергии в водобойном колодце или на креплении (Богучанская, Нижне-Бурейская, Нижне-Зейская и Камская ГЭС).

2. Проанализированы результаты измерений на физических моделях, показавшие наличие влияния на волнение в нижнем бьефе следующих характеристик: сбросного расхода; перепада уровней воды в бьефах; глубины в русле и степени затопления гидравлического прыжка; деформации дна нижнего бьефа.

3. Проведен ряд сопоставлений модельных и натурных результатов измерений характеристик волнения в русле нижнего бьефа для Бурейской и Камской ГЭС, показавший их удовлетворительное согласование. Снижение высоты волн с расстоянием от места их образования подтверждено результатами натурных измерений волнения на Жигулевской ГЭС, которые хорошо согласуются с расчетной экспериментальной зависимостью.

4. Разработана методика определения характеристик волнения в нижнем бьефе гидроузлов при работе водосбросных сооружений, которая основана на экспериментальных исследованиях, выполненных на моделях различных гидроузлов, опубликованных данных в литературе по волнению и материалах натурных измерений.

5. Выполнены расчеты течений при работе водосбросных сооружений Бурейской ГЭС на основе модифицированных уравнений мелкой воды как при отбросе потока на неразмытое русло ($h_{нб} < h_2$), так и при наличии ямы размыва в нижнем бьефе ($h_{нб} > h_2$). Сопоставление экспериментальных результатов измерений с численным моделированием показало их удовлетворительное согласование.

6. Результаты работы использованы в проектах защитных креплений откосов берегов нижнего бьефа Бурейского и Зейского гидроузлов.

Публикации

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1. Петров, О.А. Исследования волнообразования в нижнем бьефе Бурейского гидроузла / О.А. Петров // Гидротехническое строительство. – 2007. – № 10. – С. 43 – 47.
2. Петров, О.А. Лабораторные исследования параметров волн, возникающих в нижнем бьефе при отбросе потока от водосбросных сооружений / О.А. Петров // Известия ВНИИГ. – 2009. – Т. 254. – С. 28-34.
3. Климович, В.И. Численное моделирование течений при работе водосливной плотины Бурейской ГЭС / В.И. Климович, О.А. Петров // Известия ВНИИГ. – 2012. – Т. 266. – С.22-36.
4. Климович, В.И. Методика определения характеристик волнения в нижнем бьефе гидроузлов при работе водосбросных сооружений / В.И. Климович, О.А. Петров // Известия ВНИИГ. – 2014. – Т. 274. – С.105-112.

Публикации на международных научных конференциях:

1. Petrov, O. Wave action effects at spillways operation, laboratory studies of waves originating behind the spillway of Bureisk HPP / O. Petrov // 76th Annual Meeting of the International Commission on Large Dams (ICOLD). – 2008. – публикация на электронном носителе – номер доклада 1-44.
2. Klimovich, V. Numerical modeling of currents and water levels dynamics under operational spillway of Bureyskaya HPP / V. Klimovich, O. Petrov // 35Th IAHR World Congress. – 2013. – публикация на электронном носителе – номер доклада 10133.