

Работа выполнена в ГОУ ВПО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова»

На правах рукописи



ИВАНОВ
Владимир Михайлович

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕОРИИ И МЕТОДОВ
РАСЧЕТА ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ
ЗА ВОДОСБРОСНЫМИ СООРУЖЕНИЯМИ**

Специальность

05.23.07 - гидротехническое строительство

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Санкт-Петербург
2005 г.

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Михалев Михаил Андреевич
доктор технических наук, профессор
Штыков Валерий Иванович
доктор технических наук, профессор
Колосов Михаил Александрович

Ведущая организация: ОАО «Ленгидропроект»

Защита состоится “ ” 2005 г. в __ часов на заседании диссертационного совета Д 212.229.15 при ГОУ ВПО “Санкт-Петербургский государственный политехнический университет” по адресу: 195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29, гидротехнический корпус 2, ауд. 411.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке ГОУ ВПО “Санкт-Петербургский государственный политехнический университет”.

Автореферат разослан “ ” 2005 г.

Ученый секретарь
диссертационного Совета
д.т.н., профессор

Андреев А.Е.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ.

Актуальность темы. В Федеральном законе РФ “О безопасности гидротехнических сооружений”, принятом Государственной Думой 23 июня 1997г., указано, что на стадиях проектирования, строительства, ввода в эксплуатацию, эксплуатации, вывода из эксплуатации гидротехнического сооружения, а также после его реконструкции, капитального ремонта, восстановления либо консервации собственник гидротехнического сооружения или эксплуатирующая организация обязаны составлять декларацию безопасности гидротехнического сооружения, которая отражает “свойство гидротехнического сооружения, позволяющее обеспечить защиту жизни, здоровья и законных интересов людей, окружающей среды и хозяйственных объектов”. В строительных нормах и правилах СНиП 2.06.01-86 “Гидротехнические сооружения. Основные положения проектирования”, в пункте “Водосбросные, водоспускные и водовыпускные сооружения” указано: “Назначение водосбросных сооружений, выбор их конструкции, режима сопряжения бьефов, конструкций водобоев...надлежит обосновывать технико-экономическим сравнением вариантов”. До последнего времени, вышеприведенные требования полностью не могли быть выполнены, так как отсутствовал необходимый объем данных по гидродинамическим нагрузкам на крепление за водосливной плотиной с уступом при поверхностном и поверхностно-донном режимах сопряжения бьефов и при различных коэффициентах затопления гидравлического прыжка донного режима сопряжения бьефов за водосливной плотиной с плавным сопряжением водосливной грани с водобоем.

В связи с вышеизложенным, в данной работе разработаны методы расчета и предложены расчетные зависимости и их обоснование, являющиеся экспериментально-теоретическим развитием важной научной проблемы в гидротехническом строительстве. Результаты работы могут быть использованы для средне и высоконапорных гидроузлов.

Целью диссертационной работы является разработка, на основе комплексных экспериментальных исследований, новых методов расчета и обоснованных расчетных зависимостей, которые позволят определить гидродинамическую нагрузку на крепление за водосливной плотиной с уступом при поверхностном и поверхностно-донном режимах и без уступа при различных коэффициентах затопления гидравлического прыжка при донном режиме. Что дает возможность достичь при проектировании крепления оптимального выбора конструкций водосбросных сооружений и режимов сопряжения бьефов и тем самым повысить безопасность гидротехнических сооружений. Для достижения поставленной цели решались следующие **задачи:**

- определение нагрузок на крепление водобоя от пульсационной составляющей гидродинамического давления за водосливной плотиной с уступом при поверхностном и поверхностно-донном режимах сопряжения бьефов;

- определение нагрузок на крепление водобоя от осредненной составляющей гидродинамического давления за водосливной плотиной с уступом при тех же режимах сопряжения бьефов;

- определение нагрузок на крепление водобоя от пульсационной составляющей гидродинамического давления за водосливной плотиной с плавным сопряжением водосливной грани с водобоем при различных коэффициентах затопления гидравлического прыжка;

- определение нагрузок от осредненной составляющей гидродинамического давления на крепления водобоя за водосливной плотиной с плавным сопряжением водосливной грани с водобоем при тех же коэффициентах затопления прыжка.

Методы исследований. Новые и трудоемкие задачи потребовали проведения комплекса экспериментальных и теоретических исследований, а именно: измерений, выполняемых на моделях водосливных плотин разнообразных конструкций с различными режимами сопряжения бьефов при варьировании коэффициентов затопления, и обработки полученных результатов в соответствии с законами математической статистики. Особый упор в экспериментальной части исследования был сделан на изучение пульсации давления и на ее учете при проектировании плит крепления водобоя. В теоретической части исследований и при обосновании расчетных зависимостей использовались методы гидромеханики и экспериментальные данные.

Научная новизна. В диссертации разработаны, научно обоснованы и подтверждены результатами экспериментальных исследований новые подходы к проектированию сопряжения бьефов гидротехнических сооружений, позволяющие оптимизировать крепление за ними. В результате проделанной работы предложены новые методы расчета и обоснованы расчетные зависимости, полученные с помощью разработанного оригинального программного и приборного комплекса обработки экспериментальных результатов в текущем режиме времени методами математической статистики. **Впервые** получены данные, представленные в виде расчетных зависимостей и графиков:

1. Позволяющие определить, при решении плоской и пространственной задач, нагрузку от пульсации давления на крепление за водосливной плотиной с уступом при поверхностном и поверхностно-донном режимах сопряжения бьефов и за водосливной плотиной с плавным сопряжением водосливной грани с водобоем при различных коэффициентах затопления гидравлического прыжка:

- а) расстояние от уступа до места действия максимальных стандартов пульсации давления;
- б) величину максимальных стандартов пульсаций давления;
- в) значения стандартов пульсации давления в точках по длине крепления;
- г) значения максимальных, рассчитанных с заданной вероятностью пульсаций давления в точках;
- д) функции продольной, поперечной и пространственной корреляции пульсаций давления в точках;

е) авто- и взаимнокорреляционные функции пульсации давления в точках;
ж) функции спектральной плотности пульсации давления.

2. В результате создания математических моделей и программного обеспечения к ним, произведены расчеты осредненных гидродинамических нагрузок при вышеперечисленных конструкциях плотин и режимах сопряжения бьефов.

На защиту выносятся

1. Новые методы расчета и расчетные зависимости, обоснованные результатами экспериментальных исследований по определению нагрузки на крепление водобоя от пульсационной составляющей гидродинамического давления за водосливной плотиной с уступом при поверхностном и поверхностно-донном режимах сопряжения бьефов.

2. Результаты решений уравнений математической модели и результаты экспериментальных исследований по определению нагрузки на крепление водобоя от осредненной составляющей гидродинамического давления за водосливной плотиной с уступом при тех же режимах сопряжения бьефов.

3. Основные результаты анализа экспериментальных исследований по определению нагрузки на крепление от пульсационной составляющей гидродинамического давления при донном режиме сопряжения при различных коэффициентах затопления гидравлического прыжка.

4. Методика расчета крепления, разработанная на основе результатов экспериментальных исследований по определению нагрузки на крепление от осредненной составляющей гидродинамического давления за водосливной плотиной с плавным сопряжением водосливной грани с водобоем при тех же коэффициентах затопления гидравлического прыжка.

Достоверность полученных результатов. Экспериментальные исследования, результаты которых приведены в диссертации, выполнены на современных гидравлических стендах, в том числе и разработанных автором (А.С. СССР N 1280081 и N 1518434), в гидравлических и гидротехнических лабораториях по современным методикам, с использованием поверенных приборов и протарированных средств измерения (А.С. СССР N 1679292 и N 1702254) и обработки экспериментальных данных по разработанным программам, прошедшим экспертизу в вычислительных центрах ведущих отраслевых научно-исследовательских институтах (ВНИИГ). Оценка погрешности прямых и косвенных измерений в среднем находится в пределах 2–5% и позволяет сделать заключение о достоверности полученных результатов.

Практическое использование полученных результатов. Работа выполнена в рамках решения Общесоюзной научно-технической программы ГКНТ 055.08 в период 1986–91 гг. и межвузовской научно-технической программы “Строительство” по направлению “Методика проектирования водосбросных сооружений с учетом концентрации расходов при неравномерном сбросе” в 1992–93 гг.

Практическое использование полученных результатов работы заключается в возможности определения за водосливными плотинами с уступом при поверхностном и поверхностно-донном режимах сопряжения бьефов и за водосливными

плотинами с плавным сопряжением водосливной грани с водобоем при различных коэффициентах затопления гидравлического прыжка нагрузки на плиту крепления от пульсации давления. В сумме с остальными действующими нагрузками – постоянной слагаемой дефицита давления и собственным весом крепления – пульсационная составляющая давления позволяет произвести расчет плит крепления на прочность, устойчивость на всплытие и опрокидывание, назначить их рациональные, наиболее экономичные размеры. Полученные результаты используются в научной и педагогической работе кафедры гидротехнических сооружений СПбГПУ, переданы для использования в Проектно-изыскательский и научно-исследовательский институт ОАО «Ленгидропроект», а также в Алтайэнерго, Алтайэнергопроект и НИИ Горного природопользования (г. Барнаул). Учтены при проектировании 6 гидроузлов: на р. Мрича в Индонезии, на р. Усе для водоснабжения Воркутинского угольного района, при альтернативном плане реконструкции водобойного колодца Саяно-Шушенской ГЭС на р. Енисей, при проектировании Нижне-Бурейского гидроузла на р. Бурей и Майнского гидроузла на р. Енисей, при создании плана реконструкции Пермского гидроузла, а также при реконструкции гидротехнических сооружений Кольванской камнерезной фабрики и водоналивного колеса.

Материалы диссертации вошли:

1. В справочное пособие “Гидравлические расчеты водосбросных гидротехнических сооружений” (1986г, раздел 6, глава 34).

2. “Энергетическая стратегия Сибири”, разработанная РАН и утвержденная в июле 1997г. в г. Новосибирске.

3. “Концепция развития энергетики Алтайского края на период до 2010 г.”, утвержденная администрацией края 4.11.97 г. г. Барнаула.

4. Федерально-региональная программа “Алтай–2”, которая предусматривает создание на территории Алтайского края на реках Песчаная, Ануй и Чарыш более двадцати малых и средних гидроузлов (проект в стадии разработки).

В формировании второго и третьего документа автор диссертации принимал непосредственное участие, предоставив свои научные разработки по малым и средним гидроузлам.

Апробация работы. Основные разделы работы докладывались:

- на научных семинарах кафедры гидротехнических сооружений СПбГПУ и НГА-СУ (Новосибирский Государственный Архитектурно-Строительный Университет);

- на научно-технической конференции гидротехнического факультета СПбГПУ;

- на 16-й конференции молодых научных работников ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева (май 1982 г.);

- на международной научно-технической конференции (октябрь 2000 г.). – Самара: СамГАСА (Самарская Государственная Архитектурно-Строительная Академия);

- на всесоюзном научно-техническом совещании “Гидравлика гидротехнических сооружений” (ГГС–92), состоявшегося в Санкт-Петербурге в ноябре 1992 г. на ба-

зе Всероссийского научно-исследовательского института гидротехники (ВНИИГ) им. Б.Е. Веденеева;

- на заседании Бюро РНК МАГИ и координационном Совете ОНТП 0.04 “Экологически чистая гидроэнергетика”;

- на всероссийской научно-практической конференции “Горы и человек: в поисках путей устойчивого развития”, 24–26 марта 1996 года;

- на международном научно-техническом семинаре “Проблемы энергетики и пути их решения”, 24–31 мая 1997 г., г. Барселона, Испания;

- на международной научно-технической конференции “Современные проблемы гидроэнергетики”, 14–15 октября 1997 г., Ташкент, 1997 г.;

- на конференциях и семинарах кафедры гидравлики АлтГТУ им. Ползунова.

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 32 работы.

Структура и объем работы. Диссертация содержит введение, семь глав и общие выводы.

Изложена на 398 страницах машинописного текста, включая 159 рисунков (53 страниц), список литературы - 224 наименований (16 страниц) и 12 приложений (145 страниц), основная часть 253 страницы.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении раскрывается актуальность темы об определении нагрузок от пульсации давления и осредненных нагрузок на водобой за водосливной плотиной с уступом и при плавном сопряжении водосливной грани с водобоем. Это связано с необходимостью оптимизации режима сопряжения бьефов с целью экономичного проектирования. В связи с этим, диссертация разделена на две части, в которых рассмотрены две вышеназванные основные конструкции плотин. В каждой части в начале рассматриваются нагрузки от пульсации давления, а затем осредненные нагрузки на водобой.

Первая глава содержит анализ современного состояния изучаемого вопроса, на основе краткого обзора литературы. В частности, рассмотрены работы ряда авторов: М.Н. Беляшевского, Л.И. Божича, В.И. Букреева, О.Ф. Васильева, М.А. Данилова, А.А. Ивойлова, А.А. Исаева, А.Г. Кавешникова, Д.И. Кумина, С.А. Кузьмина, Е.П. Кудрявцева, В.М. Ляtxера, Л.В. Мошкова, М.А. Михалева, Н.Л. Преображенского, А.Н. Рахманова, И.С. Румянцева, М.С. Фомичева, Н.В. Халтурина, А.К. Хапаевой, А.М. Швайнштейна, Г.А. Юдицкого и др.

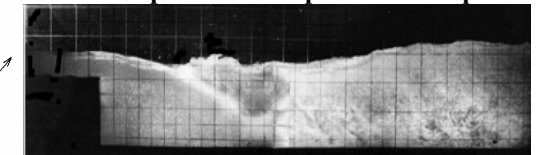
Полученные ими результаты были учтены при постановке задачи исследований и определении круга вопросов, требующих решения. На рис. 1 представлены типы режимов сопряжения бьефов за водосливной плотиной с уступом.

Вторая глава содержит задачи и методику исследований. Имеющиеся данные по пульсации давления в нижнем бьефе за уступом относятся к зданиям совмещенных ГЭС водосливного типа и не могут быть признаны исчерпывающими, имеющими широкое обобщение и достаточным для проектирования других типов водосливов с уступом.

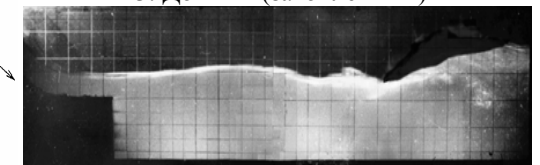
В первой части диссертации поставлены следующие задачи: 1) исследование поверхностного режима в широких пределах чисел Фруда от 8,6 до 52,8 при минимальной высоте уступа, обеспечивающей надежный поверхностный режим; 2) исследование поверхностно-донного режима с целью выявления возможности его использования при сопряжении бьефов водосливов с уступом; 3) получение для перечисленных режимов, при различных параметрах потока статистических характеристик пульсации давления в характерных точках по длине крепления, необходимых для расчета элементов крепления проектируемого сооружения. Необходимость проведения этих исследований обосновывается следующими причинами: а) все исследования относятся к водосливам, имеющим числа Фруда на сходе с уступа не более 8,0, что характерно для низконапорных гидроузлов с водосливом, имеющим широкий порог; б) относительная высота уступа (отношение высоты уступа к сжатой глубине потока на сходе с уступа) такова, что исключает возможность существования поверхностно-донного режима, и при подъеме уровня нижнего бьефа поверхностный режим сразу же переходит в поверхностный затопленный; в) имеющееся теоретическое решение по определению стандартов и спектров пульсации давления на крепление за уступом включает ряд допущений и дополнительных данных о стандартах и спектрах пульсации скорости. Вклад волновой компоненты в спектр пульсации давления на дно требуется учитывать отдельно.

№ тип	Типы режимов сопряжения бьефов	Название режима
1		Донный (прыжок отогнан)
2		Донный (прыжок в критической форме)
3		Донный (прыжок затоплен)
4		Поверхностный
5		Поверхностно-донный
6		Затопленный поверхностно-донный
7		Поверхностный затопленный
8		Восстановленный донный
9		Поверхностный на сливной грани и при затоплении плотины

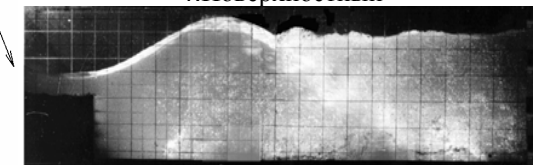
Типы режимов сопряжения бьефов



3. Донный (затопленный)



4. Поверхностный



5. Поверхностно – донный

Рис. 1. Типы режимов сопряжения бьефов за водосливной плотиной с уступом

При постановке задачи были учтены следующие качественные выводы, полученные авторами, исследовавшими пульсацию давления за водосливными

плотинами с уступом: 1) донный режим за водосливной плотиной с уступом аналогичен донному режиму за водосливной плотиной с гладким сопряжением водосливной грани с водобоем; 2) он имеет приблизительно такой же уровень пульсации давления, т.е. при проектировании крепления нижнего бьефа на пульсационную нагрузку, соответствующую поверхностному режиму эксплуатации водослива, донный режим не допустим; 3) уровень пульсационной нагрузки поверхностного затопленного режима меньше поверхностного незатопленного, но для его обеспечения требуется большая относительная высота уступа и глубина нижнего бьефа.

Для решения поставленной задачи автором была спроектирована и построена экспериментальная установка, основной частью которой являлся лоток длиной 10 м, шириной 1 м.

В лотке на расстоянии 3 м от его начала была установлена разборная универсальная модель водосливной плотины, выполненная из органического стекла с оголовком, очерченным по координатам Кригера–Офицерова.

Во избежание искажений при измерении пульсации давления в нижнем бьефе из-за вибрации лотка, колебаний плит днища, а также колебаний воды в лотке на собственной частоте были предусмотрены мероприятия, подробно рассматриваемые в реферлируемой работе.

Измерение пульсации давления в точках крепления производилось датчиками тензометрического типа, с диаметром приемной части мембраны 14 мм и частотой собственных колебаний в воде не ниже 600 Гц, с линейной частью амплитудно-частотной характеристики до 400 Гц. Это проверялось динамической тарировкой на специально созданной установке. Статическая тарировка производилась после каждого опыта без съема датчиков с днища лотка–путем изменения уровня нижнего бьефа с одновременной фиксацией отклонения луча гальванометра на шлейфовом осциллографе Н117 или пера самописца Н338, сигнал на которые поступал с тензостанции 8АНЧ-21М, одновременно служащей для питания датчиков. Оценка осреднения высокочастотных составляющих спектра по методам Д.А. Коркоса и В.М. Ляхера показала, что ошибка при определении значений спектральной плотности менее 12% соответствует частотам выше 4 Гц, на которые приходится в сумме менее 5% дисперсии процесса. С уменьшением частоты величина ошибок существенно убывает. Следовательно, точность измерений функций спектральной плотности в области низких частот, в которой сосредоточена основная часть энергии спектра, можно считать достаточной.

Подготовка на первом этапе данных с осциллограмм и перевод их на язык машинных кодов осуществлялась с помощью преобразователя графиков Ф014, на котором через заданный интервал (шаг квантования) происходило автоматическое считывание ординат пульсации относительно базисной линии, выбранной произвольно. В последующем ввод исходной информации напрямую осуществлялся через аналого-цифровой преобразователь (АЦП) в IBM-совместимый компьютер.

Пульсация давления является случайным процессом, стационарным во времени. Расчетными характеристиками таких процессов являются:

1) стандарт (среднеквадратичное отклонение от среднего) $P' = +\sqrt{D}$,

где: $D = \frac{1}{T} \int_0^T [P(t) - \bar{P}]^2 dt$ – дисперсия; $P = \frac{1}{T} \int_0^T P(t) dt$ – математическое

ожидание (среднее значение мгновенных значений $P(t)$ за время T);

2) $q(P_i) = \frac{t_i}{T}$; $F(P_i) = \sum_{j=0}^i q(P_j)$ – дифференциальные и интегральные зако-

ны распределения, где: t_i – время пребывания в i -м классом интервале;

3) коэффициенты асимметрии и эксцесса

$$As = \frac{1}{(P')^3} \times \frac{1}{T} \int_0^T [P(t) - \bar{P}]^3 dt; \quad Ek = \frac{1}{(P')^4} \times \frac{1}{T} \int_0^T [P(t) - \bar{P}]^4 dt - 3;$$

4) автокорреляционная и нормированная автокорреляционная функции

$$R(\tau) = \frac{1}{T - \tau} \int_0^{T-\tau} [P(t) - \bar{P}] [P(t + \tau) - \bar{P}] dt; \quad R_n(\tau) = R(\tau) / D;$$

где: τ – интервал корреляции;

5) взаимокорреляционная и нормированные взаимокорреляционные функции

$$R_{ij} = \frac{1}{T - \tau} \int_0^{T-\tau} [P_i(t) - \bar{P}_i] [P_j(t + \tau) - \bar{P}_j] dt; \quad R_{ij}(\tau)_n = R_{ij} / (P'_i \cdot P'_j);$$

где: i, j – точки, для которых определяют взаимокорреляционные функции;

6) нормированная автоспектральная плотность

$$S(f) = \frac{1}{\Pi} \int_0^{\tau_{\max}} R_n(\tau) \cdot \cos 2\Pi f(\tau) d\tau,$$

где: f – частота пульсации давления.

Здесь и в дальнейшем представлена удвоенная правая часть двухсторонних функций спектральной плотности, т.е.

$$2 \times \int_0^{\infty} S_n(f) df = D$$

На основе приведенных формул была разработана программа, служащая для комплексной статистической обработки данных экспериментов применительно к задаче исследования пульсации давления в точках на дне турбулентного потока и получения расчетных данных для определения размеров крепления.

В третьей главе приводятся результаты исследования пульсации давления в точках крепления дна за водосливной плотиной с уступом при поверхностном и поверхностно-донном режимах сопряжения бьефов.

Опираясь на исследования других авторов и на специально поставленный эксперимент, было выявлено, что при изменении уровня нижнего бьефа при поверхностном и поверхностно-донном режимах, не приводящем к смене режима,

значения пульсации давления в точках крепления изменяются слабо, и их для простоты постановки опытов можно считать постоянными.

Исходя из вышесказанного, глубина нижнего бьефа в опытах выбиралась такая, чтобы обеспечить устойчивое существование исследуемого режима при минимальной относительной высоте уступа. При учете взаимосвязи некоторых параметров потока, влияющих на пульсацию давления, из них можно выделить следующие независимые факторы, определяющие стандарты пульсации давления безразмерной зависимостью $\frac{P'}{V_c^2 / 2g} = f\left(\frac{d}{h_c}, \frac{x}{x_{P'_{\max}}}\right)$, где: $x_{P'_{\max}}$ – расстояние от усту-

па до места действия максимального стандарта пульсации давления, в первом приближении равное длине донного вальца.

Условие образования надежного поверхностного режима при минимальной высоте уступа (см. рис. 2) выбрано по таким соображениям:

1. Увеличение высоты уступа ведет к расширению зоны существования поверхностного режима и уменьшению пульсации давления на крепление, но одновременно требует большей глубины нижнего бьефа, обеспечить которую можно при сбросе больших расходов, что не всегда осуществимо. Это обстоятельство сокращает перечень рек, на которых возможно строительство плотин с уступом, работающих при поверхностном режиме.

2. Возможен другой вариант увеличения высоты уступа, при неизменном уровне нижнего бьефа – за счет понижения отметки дна за уступом. Но это, в свою очередь, влечет за собой увеличение объема бетонных работ в связи с ростом высоты плотины и увеличение объема земляных работ по углублению дна в нижнем бьефе.

Точность определения статистических характеристик процесса зависит от длины записи реализации (времени наблюдения). В диссертации осуществлена оценка необходимой длины реализации, при которой ошибка вычисления стандарта пульсации давления менее 5% при 95% обеспеченности различными теоретическими способами и методом подбора. Необходимая длина реализации при анализе, как при поверхностном, так и при поверхностно-донном режимах сопряжения бьефов, составила 200 с при шаге квантования 0,01 с. Кроме ошибки, связанной с выбором длины реализации, в опытах имели место ошибки, связанные с погрешностью измерений и обработки. Подсчитанная предельная суммарная ошибка при вычислении среднеквадратичного отклонения, не превышает 9,1%, что вполне приемлемо для целей, поставленных в данной работе.

Проверка гипотезы о нормальном законе экспериментального распределения пульсации давления с помощью критерия χ^2 Пирсона показала, что как при поверхностном, так и при поверхностно-донном режимах сопряжения бьефов, экспериментальное распределение может быть аппроксимировано нормальным законом (рис. 3а), с меньшей надежностью в зоне приближения струи к дну. В указанной зоне возрастают коэффициенты асимметрии до 0,5 и эксцесса до 1,0. На остальных участках крепления эти значения близки к нулю.

На рис. 3б приведена вероятность превышения максимальных относительных значений пульсации давления при нормальном законе распределения.

На рис. 4 приведен график зависимости расстояния от уступа до места действия максимального стандарта пульсации давления при поверхностном и поверхностно-донном режимах сопряжения бьефов от числа Фруда в сжатом сечении. Можно заметить, что с увеличением числа Фруда расстояние до максимального стандарта пульсации давления увеличивается. Это связано с тем, что зона приближения струи к дну также отодвигается от уступа.

На рис. 5 приведен график зависимости максимума стандарта пульсации давления, отнесенного к скоростному напору на сходе с уступа, от относительной высоты уступа (в диапазоне от 3 до 6,5) для поверхностного и поверхностно-донного режимов сопряжения бьефов.

С ростом относительной высоты уступа уровень максимальной пульсации давления при обоих режимах убывает. В целом при поверхностно-донном режиме уровень максимальной пульсации на 20 – 50 % выше, чем при поверхностном, причем большая разница соответствует меньшим значениям относительной высоты уступа.

На рис. 6 приведены графики, по которым, зная максимальный стандарт пульсации давления и расстояние до него от уступа, можно определить стандарты пульсации по всей длине крепления, как при поверхностном режиме, так и при поверхностно-донном режимах сопряжения бьефов. В целом можно отметить, что максимумы стандартов пульсации находятся при обоих рассматриваемых режимах в конце донного вальца, где наблюдается наибольшая интенсивность турбулентности потока. На расстоянии 2 – 2,5 длин вальца уровень пульсации убывает почти до значений, наблюдаемых сразу же за уступом, т.е. при поверхностном режиме до 0,4, а при поверхностно-донном режиме до 0,3 своих максимальных значений.

Полученный нормальный закон распределения значений пульсации давления в точках крепления за водосливной плотиной с уступом (рис. 3а,б), а также приведенные данные об изменении стандартов по длине крепления (рис. 4,5,6) позволяют с заданной вероятностью находить максимальные амплитуды пульсации давления как при поверхностном, так и при поверхностно-донном режимах сопряжения бьефов.

Кривые изменения пульсации давления по длине крепления при поверхностном режиме, рассчитанные для параметров нашего опыта 9 по графикам Е.П. Кудрявцева и М.А. Данилова показали что, данные Е.П. Кудрявцева, совпадая по стандарту пульсации давления, сдвинуты по месту действия их максимума в сторону уступа. Данные М.А. Данилова по пульсации давления на плиты крепления, совпадают по месту действия максимума с данными исследований, приведенными в нашей работе.

О максимальных стандартах пульсации давления можно сказать следующее: 1) при донном режиме максимум пульсации действует вдвое ближе к плоти-

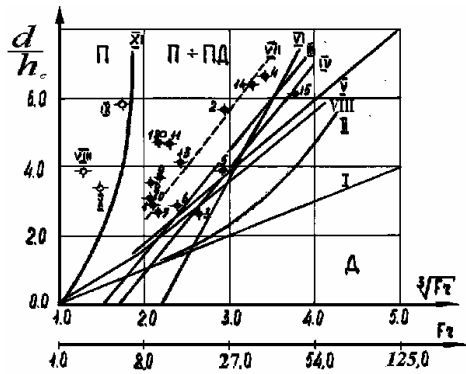


Рис 2. Граница относительной высоты уступа, при которой возможно образование поверхностного режима по данным:
 I-Д.И.Кумина;
 II-М.Д.Чертоусова;
 III-М.П.Слисского;
 IV-М.Ф.Складнева;
 V-С.М.Слисского;
 VI-Степанова П.М.;
 VII-экспериментальные данные автора (опыты - 1-15);
 VIII-Михалев М.А.

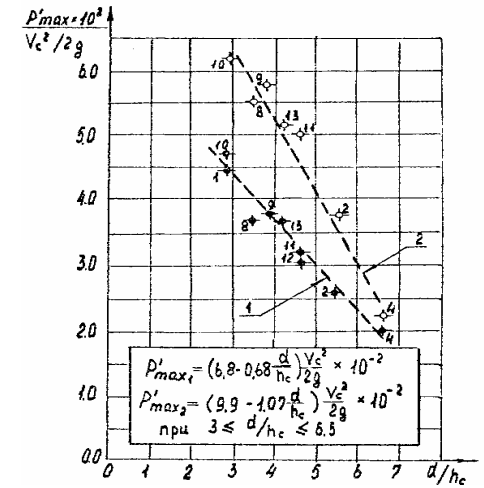
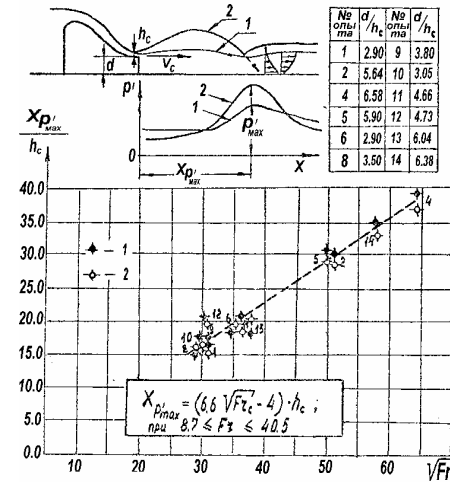


Рис 4. График зависимости расстояний от уступа до места действия максимальных стандартов пульсации давления в точках крепления при поверхностном (1) и поверхностно-донном (2) режимах сопряжения бьефов от числа Фруда

Рис 5. График зависимости максимальных стандартов пульсации давления в точках крепления за водосливной плотиной с уступом при поверхностном (1) и поверхностно-донном (2) режимах сопряжения бьефов от относительной высоты уступа

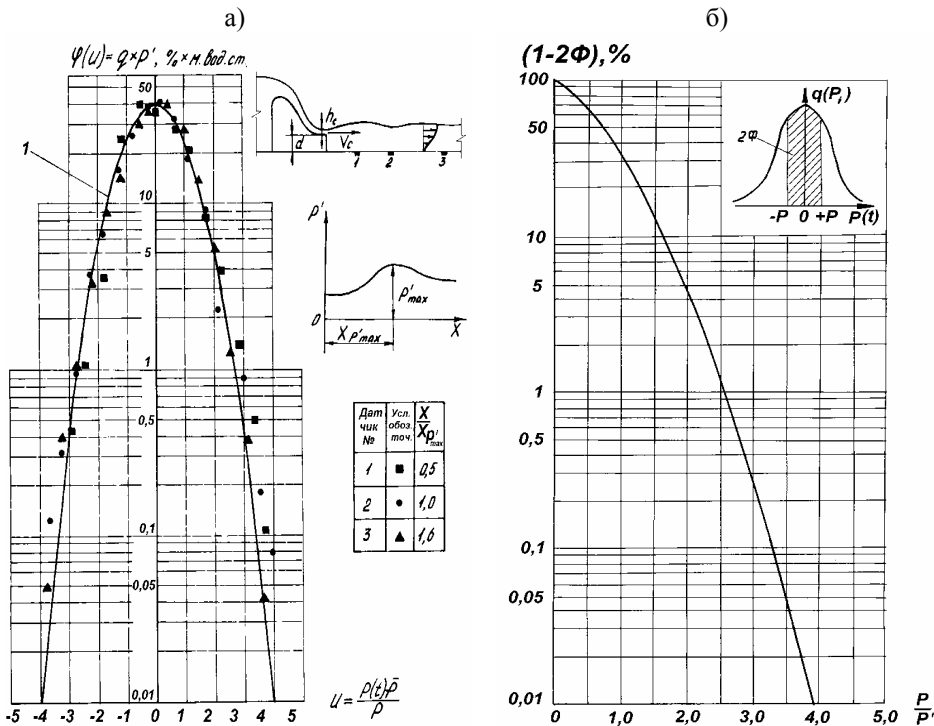


Рис 3. а) Распределение вероятностей пульсации давления за водосливной плотиной с уступом при поверхностном режиме сопряжения бьефов (опыт № 1, 9). 1 – нормальный закон распределения.
 б) Вероятность превышения максимальных относительных значений пульсации давления при нормальном законе распределения

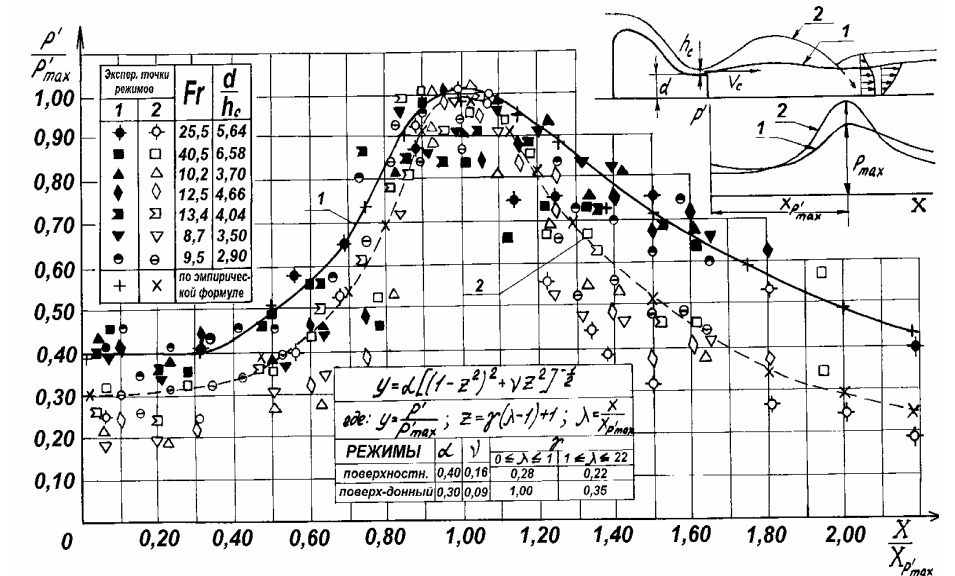


Рис 6. График зависимости стандартов пульсации давления в точках крепления за водосливной плотиной с уступом от их расстояния до уступа при поверхностном (1) и поверхностно-донном (2) режимах сопряжения бьефов

2) при поверхностном режиме максимум стандартов пульсации давления вдвое меньше, чем при донном; 3) при поверхностно-донном режиме максимум стандартов пульсации давления меньше, чем при донном, на 50 – 60 %; 4) зона максимумов стандартов пульсации давления при донном режиме гораздо шире, чем при поверхностном и поверхностно-донном; 5) на расстоянии одной длины прыжка от уступа стандарты пульсации давления как при донном, так при поверхностном и поверхностно-донном режимах имеют близкие по величине значения.

В четвертой главе изложены результаты корреляционного и спектрального анализа пульсации давления в характерных точках по длине крепления (рис 7 - 11).

Анализ кривых изменения значений расстояния до первого нуля продольной корреляционной функции x_0 (рис. 7) позволяет сделать вывод о том, что размеры вихрей, которые существенно влияют на пульсации давления в точках крепления, с удалением от уступа уменьшаются, достигают минимума в конце донного вальца, а затем вновь растут. Аналогичная картина наблюдается для значений времени до первого нуля автокорреляционных функций τ_0 (рис.9). Отношение в соответствующих точках $|x_0/\tau_0|$ - конвективная скорость сноса вихрей. Величина конвективной скорости сразу за уступом равна $0,1 - 0,2 V_c$, а затем убывает на расстоянии, равном половине длины донного вальца, до $0,03 - 0,07 V_c$, далее остается постоянной. Знание спектральной плотности (рис. 10,11), конвективной скорости и глубины над рассматриваемой точкой крепления (рис. 12), позволило получить обобщенный график спектральной плотности, который можно использовать для расчетов при проверке необходимости учета динамического приложения нагрузки, а также при оценке возможности резонанса плит крепления. Из анализа спектральных плотностей на рис. 10,11 видно, что максимум находится в области низких частот от 0,05 до 0,2 Гц. От 0,2 до 10 Гц турбулентная составляющая убывает по закону $(-5/3)$.

Анализ особенности пульсации давления за водосливной плотиной с уступом показывает, что распределение стандартов пульсации давления имеет два “горба” (кривая 2 на рис. 12а). Первый “горб” находится в зоне выхода на дно слоя смещения и является турбулентной составляющей пульсации давления. Второй “горб” находится в зоне непрерывного возвратно-поступательного перемещения впадины свободной поверхности, происходящего за счет колебаний длины донного вальца. Таким образом, интенсивность волновой составляющей пульсации давления меняется по длине крепления немонотонно, достигая максимума на разных расстояниях от уступа, что приводит к отмеченному “двугорбому” распределению интенсивности пульсации давления на крепление русла. Из анализа данных (рис. 13) следует, что в зоне первого максимума пульсации давления на крепление дисперсия турбулентной составляющей значительно больше дисперсии волновой. В области второго максимума дисперсия волновой составляющей пульсации давления больше дисперсии турбулентной. Из всего вышесказанного следует, что для определения пульсационной нагрузки на водобой за водосливными плотинами с уступом надо пользоваться результатами данной работы.

Пульсации давления за водосливами с уступом в пространственных условиях, как было отмечено, для определения нагрузки на водобойную плиту необходимо: 1) при решении плоской задачи - функции продольной корреляции (рис. 7); 2) при решении условно пространственной задачи - функции продольной и поперечной корреляции (рис. 7,8); 3) при решении пространственной задачи функции пространственной корреляции (см. рис. 14).

Квазистатическое нагружение строится в предположении, что в какой-то точке плиты водобоя реализовался расчетный редкий максимум пульсации давления, тогда в остальных точках плиты наиболее вероятным будет свое максимальное расчетное значение пульсации, умноженное на коэффициент корреляции между пульсацией давления в рассматриваемой точке плиты крепления и в точке, где реализовался расчетный максимум пульсации давления.

Построенная таким образом нагрузка будет представлять собой фигуру, сечение которой плоскостью, параллельной плите крепления, представляет эллипс, осями которого являются продольные и поперечные коэффициенты корреляции пульсации давления. Возможен такой вариант, когда оси эллипса будут направлены под углом к продольной оси потока.

Чаще всего поперечная к оси потока корреляция больше продольной, а плиты крепления имеют длину по оси потока больше ширины, что позволяет для расчетов в первом приближении считать поперечную корреляционную функцию постоянной и равной единице, хотя это и ведет к некоторому увеличению пульсационной нагрузки.

Найдем пространственную корреляцию, например, для поверхностно-донного режима сопряжения бьефов, воспользовавшись графиками на рис. 14. Для этого надо выбрать среди приведенных пространственных корреляционных функций такую, которая соответствует рассматриваемому участку крепления, и перевести относительное расстояние $X/X_{p\max}$ в абсолютные значения, при этом надо помнить, что максимальные значения пространственной корреляционной функции равны единице, а величину остальных находим пропорционально ей.

В пятой главе содержится анализ современного состояния вопроса об определении пульсационных и осредненных нагрузок на крепление дна за водосбросными сооружениями при различных коэффициентах затопления донного гидравлического прыжка с наклонным водобоем. Комплексное выполнение гидравлических и статических расчетов при проектировании крепления в нижнем бьефе водосливных плотин на скальных основаниях позволяет назначить оптимальную отметку поверхности водобоя, обеспечивающую такую степень затопления гидравлического прыжка, при которой толщина плит крепления, полученная из условия их устойчивости против опрокидывания, будет наименьшей. Методика такого расчета подробно разработана С.А. Кузьминым.

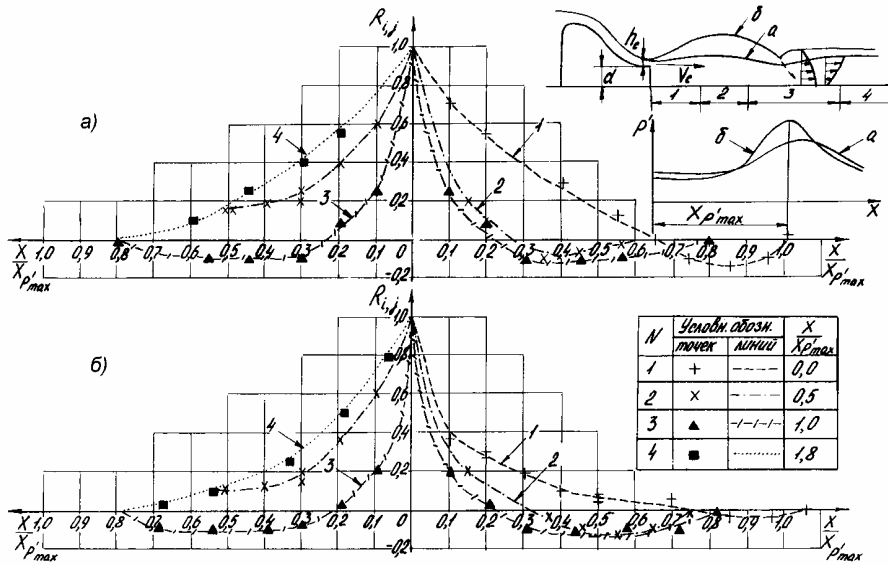


Рис. 7 Графики продольных корреляционных функций пульсации давления в точках крепления за водосливной плотиной с уступом при поверхностном (а) поверхностно-донном (б) режимах сопряжения бьефов

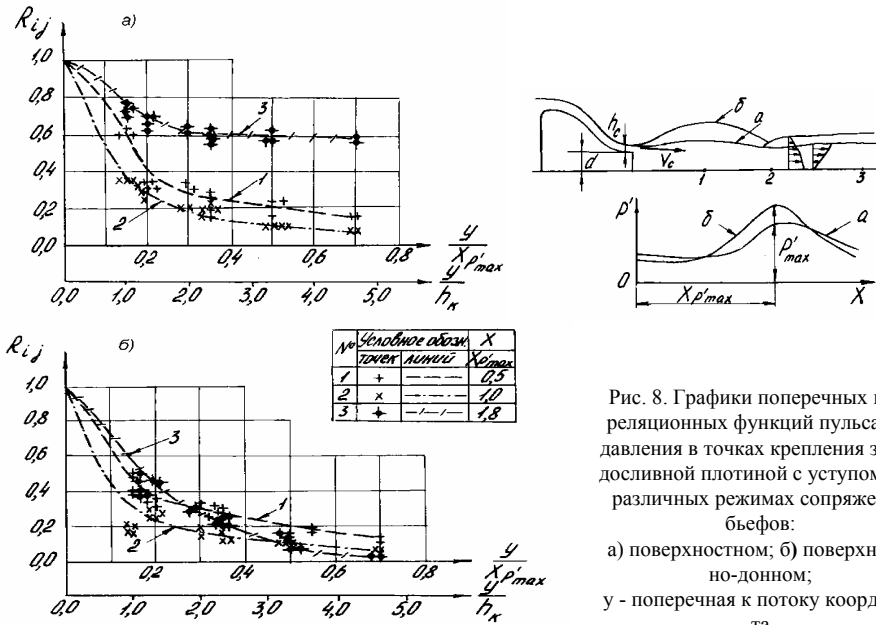


Рис. 8. Графики поперечных корреляционных функций пульсации давления в точках крепления за водосливной плотиной с уступом при различных режимах сопряжения бьефов: а) поверхностном; б) поверхностно-донном; у - поперечная к потоку координата

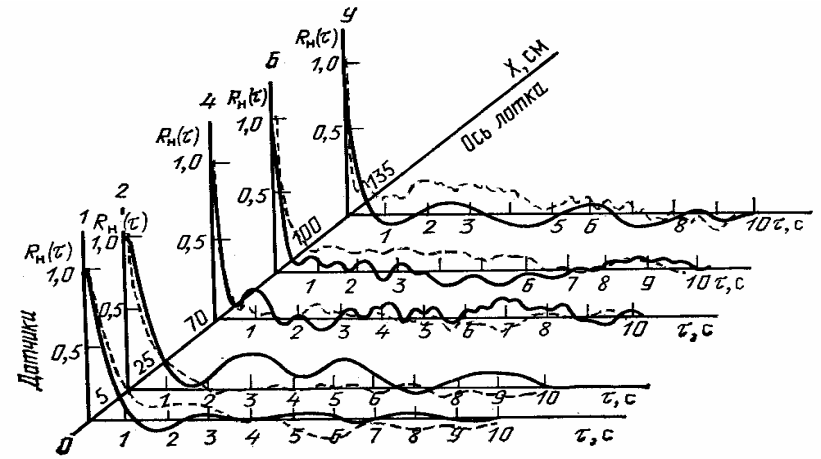


Рис. 9. Нормированные автокорреляционные функции пульсации давления. Режим поверхностный, опыт № 9

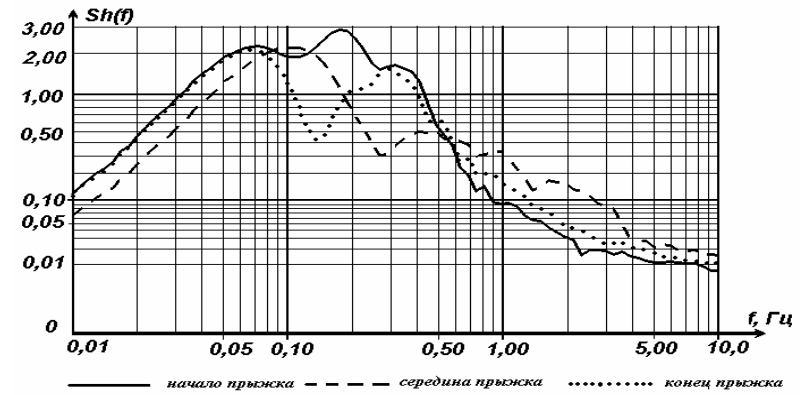


Рис. 10. Спектральные плотности. Опыт № 9. Поверхностный режим

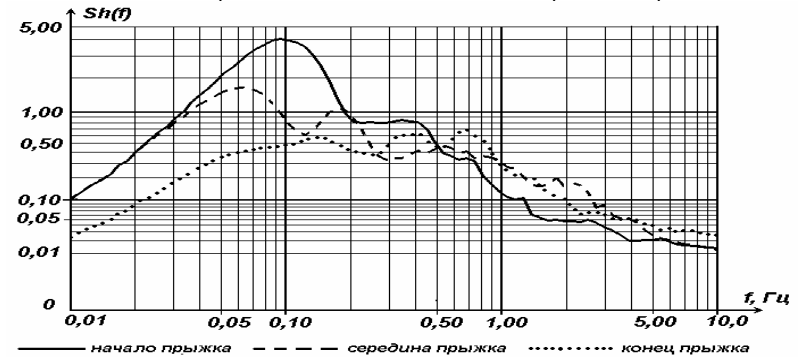


Рис. 11. Спектральные плотности. Опыт № 9. Поверхностно-донный режим

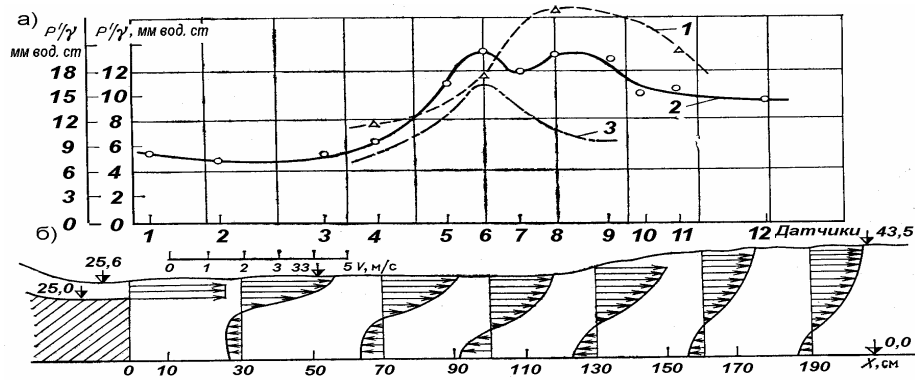


Рис. 12. Поверхностный режим за плотиной с уступом:

а - интенсивность пульсации давления и свободной поверхности (опыт №9); 1 - стандарт колебаний свободной поверхности P'_n по экспериментальным данным; 2 - стандарт пульсации давления на крепление P' по экспериментальным данным; 3 - стандарт турбулентной составляющей пульсации давления, рассчитанный по В.М. Лятхеру; б - свободная поверхность и осредненные продольные скорости (опыт № 9)

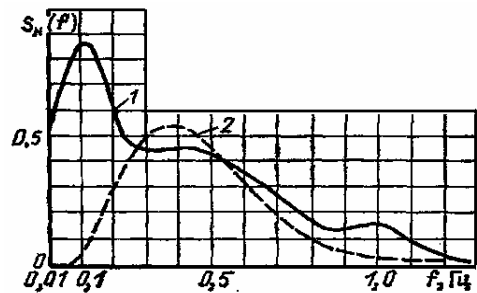


Рис. 13. Спектральная плотность пульсации давления:
1-измеренная по датчику 7;
2 - рассчитанная по В.М. Лятхеру

В настоящее время задачи назначения отметки поверхности водобоя и определения его толщины должны решаться технико-экономическим сравнением вариантов, что закреплено нормативным документом СНиП 2.06.01-86. Но это не всегда выполнимо, так как для этого проектировщик должен обладать достоверной и полной информацией по определению нагрузок от сбрасываемого потока на

крепления нижнего бьефа за водосбросными гидротехническими сооружениями для всех известных или хотя бы наиболее распространенных конструкций и режимов сопряжения бьефов. Принимаемое заглубление водобоя при коэффициенте затопления $K_3 = 1,05...1,10$ лишь гарантирует устойчивое затопление прыжка, но получаемая при этом толщина водобоя далека от оптимальной. Затраты в рассматриваемом примере на бетонное крепление существенно уменьшаются с увеличением коэффициента затопления прыжка и достигают минимального значения при $K_3 = 1,4$, при этом толщина крепления уменьшена почти втрое. Следует отметить, что часто в качестве основной нагрузки при расчете крепления против опрокидывания, принимается момент от дефицита давления, а нагрузка от пульсации давления не учитывается. Считается, что она вполне покрывается принимаемым коэффициентом запаса, поскольку составляет не более 10% нагрузки от дефицита давления.

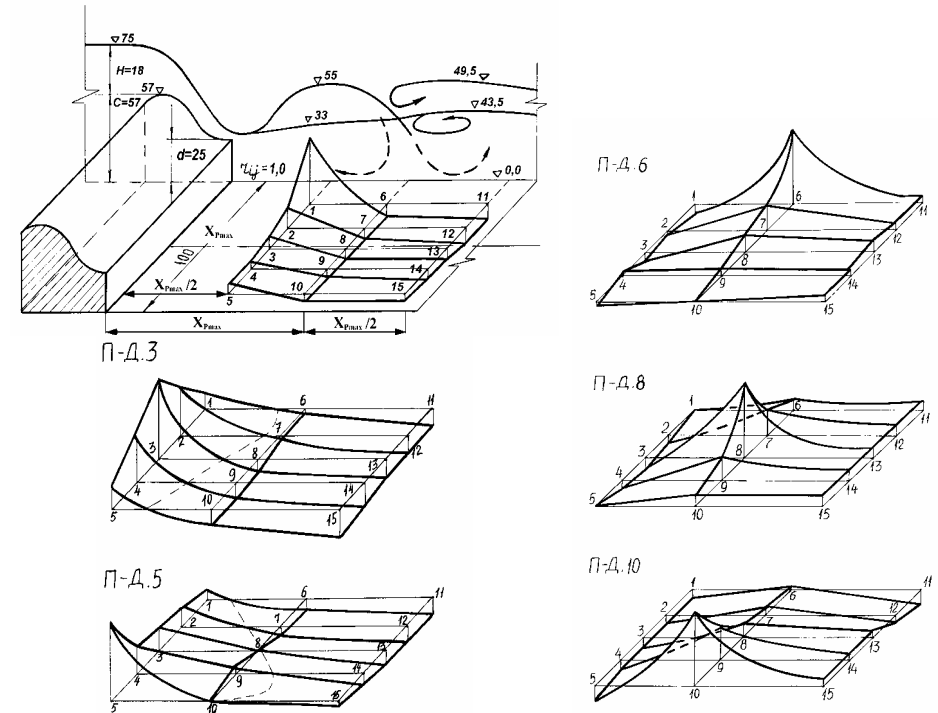


Рис. 14. Графики пространственной корреляции пульсации давления при поверхностно-донном режиме (опыт № 9)

При малых коэффициентах затопления гидравлического прыжка такой подход правомерен, так как толщина плит крепления, определенная из условия их устойчивости при дефицита давления, столь велика, что нагрузка от пульсации давления не вносит каких-либо существенных изменений в требования к толщине и армированию водобоя. При увеличении степени затопления гидравлического прыжка и, как следствие, уменьшение толщины плит крепления влияние нагрузки от пульсации давления на толщину и армирование водобоя возрастает и требует более точного учета.

В соответствии с вышеизложенным, определение нагрузки на крепление от пульсации давления при донном режиме сопряжения бьефов за водосливными плотинами с гладким водобоем при различных степенях затопления гидравлического прыжка является весьма актуальным вопросом.

В связи с вышесказанным, целью данной главы диссертации является изложение полученного экспериментального материала, позволяющего восполнить существующий в данной области недостаток информации, необходимой для проектирования.

Исследования на модели проводились в гидравлическом лотке в лаборатории комплексных исследований гидроузлов и гидротехнических сооружений СПбГТУ в период с 1990 по 1993 гг. Подробное описание экспериментальной установки и измерительной аппаратуры приведено во второй главе диссертации.

Измерения проводились при числах Фруда 22 и 41 при коэффициентах затопления донного гидравлического прыжка 1,0; 1,2; 1,5, в условиях плоской задачи и при установившихся гидравлических режимах. Осциллограммы обрабатывались в учебной вычислительной лаборатории по программам статистической обработки, описанной во второй главе диссертации.

Проверка гипотезы о нормальном законе экспериментального распределения пульсации давления с помощью критерия χ^2 Пирсона показала, что при донном режиме сопряжения бьефов при всех коэффициентах затопления гидравлического прыжка как при $Fr = 22$, так и при $Fr = 41$ наши экспериментальные распределения соответствуют нормальным законам распределения: $As < \pm 0,5$, а $E_k < 1,5$ причем с меньшей надежностью в начале гидравлического прыжка при $K_3 = 1,0$, $As = 1,3$, а $E_k = 6$ в зоне неустойчивого положения вальца, на остальных участках крепления эти значения близки к нулю.

В диссертации приведены графики, отражающие характер изменения стандартов пульсации по длине крепления для различной степени затопления донного гидравлического прыжка ($K_3 = 1,0 \dots 1,5$) при числах Фруда в сжатом сечении $Fr_c = 22$ и 41.

Можно отметить (рис. 15.а), что большее значение максимальный стандарт пульсации по длине крепления (P'_{max}) имеет при степени затопления гидравлического прыжка $K_3=1,2$, причем при $Fr_c=22$ немного выше, чем при $Fr_c=41$, что равно шести скоростным напорам в сжатом сечении $(V_c^2/(2g)) \times 10^{-2}$. При K_3 , равном 1,0 и 1,5, максимальные стандарты пульсации имеют близкие между собой значения и равны приблизительно $4,5 \times 10^{-2}$ скоростным напорам, что несколько меньше значений максимальных стандартов, полученных А.К. Хапаевой для $K_3=1,0$.

Зависимости расстояния до максимальных значений стандартов пульсации давления (рис. 15.б) для различной степени затопления донного гидравлического прыжка, нормированные сжатой глубиной (h_c при $K_3 = 1,0$), показывают, что с увеличением коэффициента затопления зона действия максимального стандарта пульсации давления смещается в сторону водосливной плотины и $X_{P'_{max}}$ убывает от $(10 \dots 12)h_c$ при $K_3 = 1,0$ до $(2 \dots 2,5)h_c$ при $K_3 = 1,5$.

В целом, при рассмотренных коэффициентах затопления донного прыжка уже на расстоянии, равном $(1 \dots 2)$ длины прыжка, стандарты пульсации давления имеют близкие между собой значения (см. рис. 16).

Ниже приведены функции стандартов пульсации давления в точках (среднеквадратичные отклонения от среднего P'), отнесенные к скоростному напору $V_c^2/(2g)$, где V_c - скорость в сжатом сечении при $K_3 = 1,0$, и ко второй сопряженной глубине h_c , зависимости от расстояния до сжатого сечения, отнесенного к длине

прыжка L_n для чисел Фруда Fr , равных 22 и 41 (рис. 16). Для сравнения кривые стандартов пульсации давления в точках для названных чисел Фруда приведены при различных коэффициентах затопления на одном рисунке.

Как видно, при одних и тех же коэффициентах затопления, но при разных числах Фруда эти кривые в пределах точности экспериментов совпадают, т.е. стандарты пульсации не зависят от чисел Фруда в указанном диапазоне. При этом место действия максимума стандарта пульсации давления при увеличении коэффициента затоплений надвигается на водосливную грань и достигает своего наибольшего значения при $K_3 = 1,2$.

В шестой главе приведены экспериментальные данные, о пространственной корреляции и спектральных плотностях, необходимых для построения эпюр нагрузок от пульсации давления. Произведение стандартов пульсации давления на коэффициенты пространственной корреляции R_{ij} , и количество принятых стандартов при заданной вероятности не превышали максимальной величины пульсации давления в точке, дают эпюру нагрузки на водобойную плиту. Изменение положения максимума нагрузки на плите заданного размера позволяет рассчитать и построить огибающую эпюру максимальных изгибающих моментов в плите. На рис. 17 данные о пространственной корреляции обобщены по участкам. В целом можно отметить, что с ростом коэффициента затопления и со смещением точки реализации предполагаемого максимума пульсации давления (коэффициента корреляции, равного 1,0) от начала прыжка к его концу, корреляционная связь увеличивается. При $K_3 = 1,0$ наши данные не противоречат данным Г. А. Юдицкого, В. М. Лятхера.

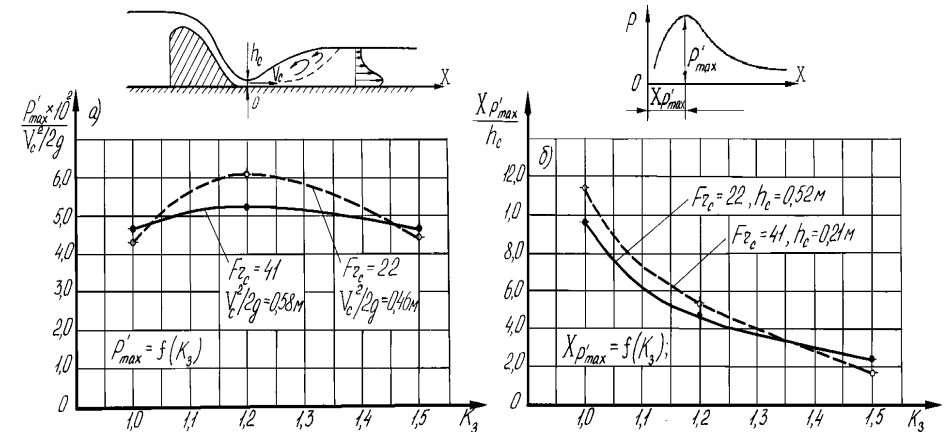


Рис. 15. График зависимости максимальной пульсации давления от степени затопления гидравлического прыжка (а); график расстояний от сжатого сечения до места действия максимального стандарта пульсации давления при различных коэффициентах затопления гидравлического прыжка (б)

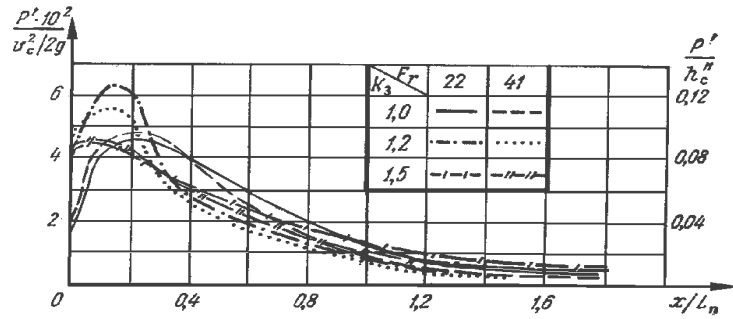


Рис. 16. Зависимость функций стандартов пульсации давления в точках от коэффициента затопления k_3 , гидравлического прыжка и расстояния до сжатого сечения

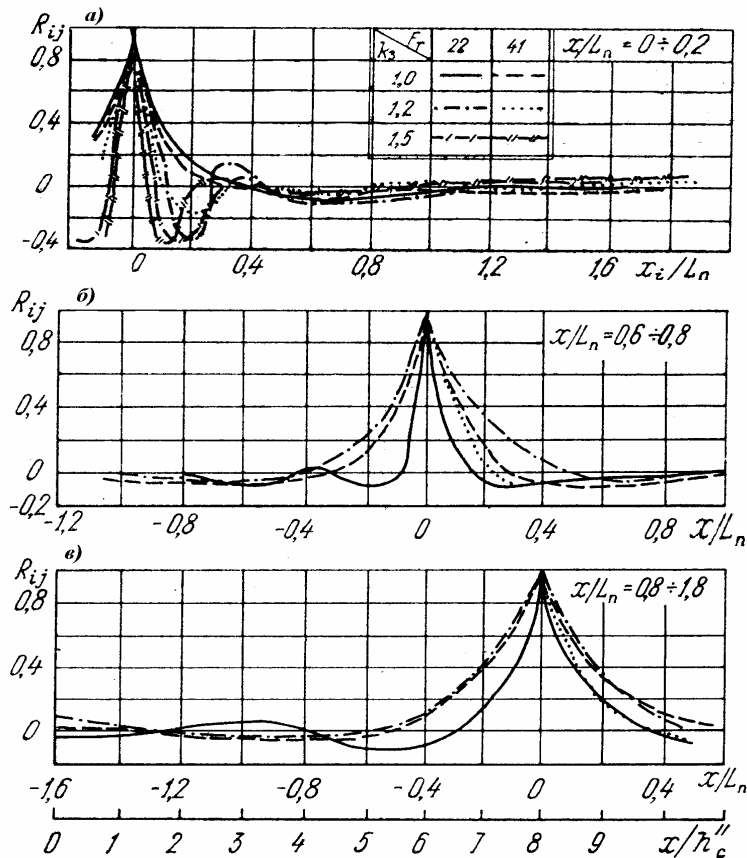


Рис. 17. Зависимость продольной корреляции по участкам от пульсации давления по участкам: а) начало прыжка; б) середина прыжка; в) конец прыжка

Анализ результатов, проведенных на равномасштабных моделях плотин с уступом и без уступа показал, что место действия по частоте максимума спектральной плотности при донном режиме сопряжения за плотиной без уступа (рис.18) на порядок выше, чем за плотиной с уступом при поверхностном и поверхностно-донном режимах сопряжения бьефов (рис.11).

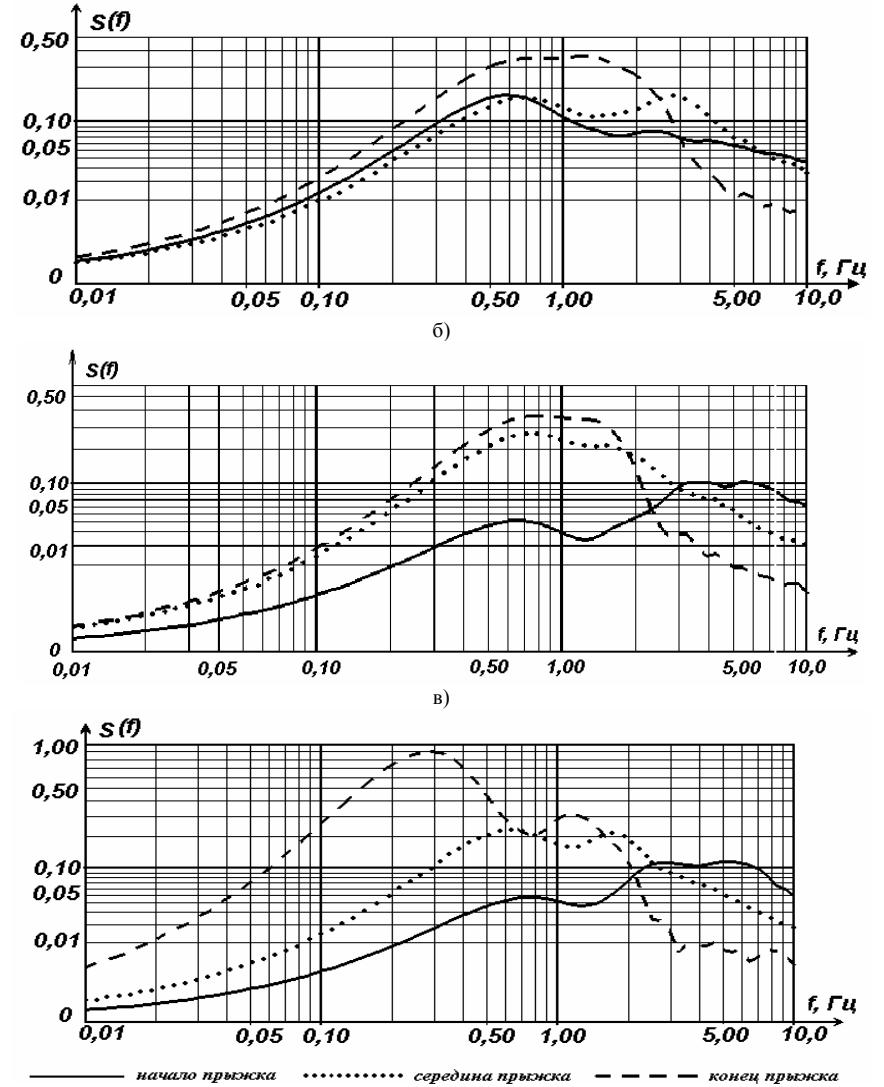


Рис. 18. Спектральные плотности. Режим донный. Опыт 15:

а) $K_3 = 1.0$, б) $K_3 = 1.2$, в) $K_3 = 1.5$

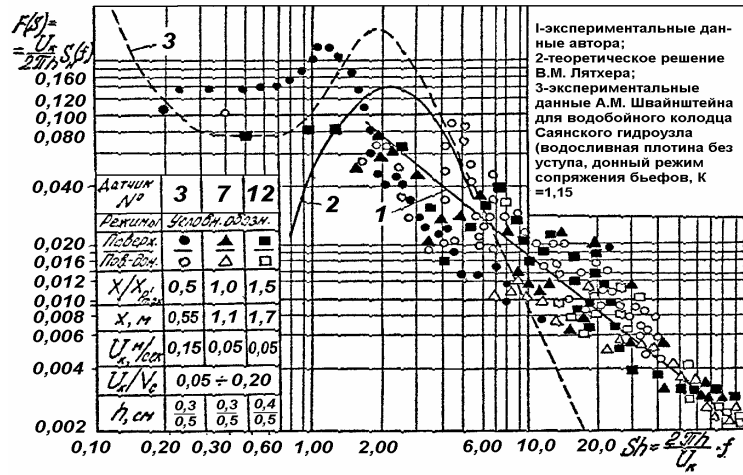


Рис. 19. Обобщенный график спектральной плотности пульсации давления в точках крепления за водосливной плотиной с уступом при поверхностном и поверхностно-донном режимах сопряжения бьефов. h - глубина потока над исследуемой точкой крепления

В седьмой главе приводятся эмпирические формулы, которые позволяют определять гидродинамические нагрузки, действующие на крепления нижнего бьефа за водосбросами при различной степени затопления гидравлического прыжка. Приведена методика определения осредненных нагрузок на крепление дна за водосбросными сооружениями с плавным сопряжением водосливной грани с наклонным водобоем переменной ширины. Рассмотрено сопряжение бьефов за водосливными плотинами с уступом и совмещенными ГЭС, имеющими наклонное дно.

Использование водобоя с обратным уклоном дна для гашения энергии потока в нижнем бьефе за водосбросными гидротехническими сооружениями с плавным сопряжением водосливной грани с водобоем в сравнении с другими типами гасителей может быть весьма перспективным.

Реактивное воздействие наклонного водобоя на поток распределено равномерно по всей его поверхности. Для создания математической модели переменного по ширине наклонного водобоя (пространственная задача) автор использует уравнение изменения количества движения в проекции на горизонтальную плоскость для отсека жидкости, находящейся между сечением 1-1, совпадающим с началом водобоя и сечением 2-2, расположенным в конце. Остальные обозначения см. на рис. 20.

После преобразования полученного уравнения и деления его на h_1 получим в окончательном виде:

$$\eta_d = \frac{-\eta_2^3(3\beta_2 + 1) - \eta_2(-8Fr_1 - \beta_2 - 3) - 8\alpha_2 Fr_1 / \beta_2^y}{2\eta_2^2(1 + \beta_2) + 2\eta_2(1 + \beta_n)}$$

где: $\eta_2 = h_2 / h_1$; $\eta_d = d / h_1$; $Fr_1 = v_1^2 / gh_1$; $\beta_2 = B_1 / B_2$; α - корректив количества движения.

Решим полученное уравнение относительно η_d , задаваясь второй сопряженной глубиной, равной 0,9, от имеющейся по кривой связи глубины нижнего бьефа, и обеспечивающей достаточное затопление гидравлического прыжка по кривой связи. По вышеприведенной методике написана программа расчета “Наклонный водобой донный режим”. Полученные результаты хорошо согласуются с данными других авторов.

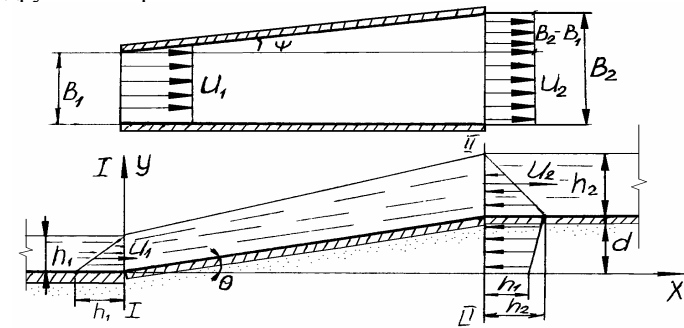


Рис. 20. Расчетная схема наклонного водобоя, переменного по ширине

Рассмотрим сопряжение бьефов за водосливными плотинами с уступом и совмещенными ГЭС, имеющими наклонное дно.

Наклонное дно может влиять как на режимы сопряжения бьефов, так и служить для гашения части энергии сбрасываемого потока, по сравнению с другими видами гасителей.

Для создания математической модели воспользуемся уравнением изменения количества движения для отсека жидкости, находящейся между сечением I-I, совпадающим с началом водобоя, и сечением II-II, расположенным в конце. Остальные обозначения см. на рис. 21.

После преобразования получим уравнение для “длинного” водобоя, когда в точке B_2 давление равно h_2 :

$$\eta_p = \frac{\eta_2(\eta_2 + \eta_a) + \eta_d(1 + \eta_d) - 2Fr(1 + k^2\eta_d - 1/\eta_2)}{1 + 2\eta_d - \eta_a} \quad (1)$$

В случае, если водобой “короткий”, давление в точке B_1 равно h_p уравнение (1) преобразуется в уравнение (2):

$$\eta_p = \frac{(\eta_2^2 + \eta_a^2) + \eta_d(1 + \eta_d) - 2Fr(1 + k^2\eta_d - 1/\eta_2)}{1 + 2(\eta_d - \eta_a)} \quad (2),$$

где: $\eta_2 = h_2/h_1$; $\eta_d = d/h_1$; $\eta_a = a/h_1$; $k = U_1/U_2$; $Fr_1 = U_1^2/gh_1$; $\alpha \approx 1$ - корректив количества движения.

Если найденное h_p близко $d+h_1$, то режим сопряжения бьефов поверхностный - “благоприятный”.

По вышеприведенной методике написана программа расчета “**Наклонный водобой поверхностный режим**”. Полученные результаты хорошо согласуются с данными других авторов.

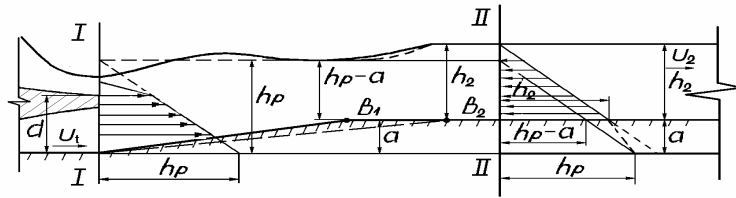


Рис.21. Расчетная схема совмещенной ГЭС с наклонным дном

Приведем эмпирические формулы, которые позволяют определять **гидродинамические нагрузки**, действующие на крепления нижнего бьефа за водосбросами при различной степени затопления гидравлического прыжка (рис. 22)

Можно также воспользоваться графиками (см. рис.23, 24), полученными на основе экспериментальных данных. В эмпирической формуле экспериментальные коэффициенты рассчитаны автором по методу Лагранжа. Все обозначения см. на рис.22.

Была разработана программа, позволяющая рассчитывать осредненную гидродинамическую нагрузку при любом коэффициенте затопления гидравлического прыжка за водосливными плотинами. Результаты расчетов по программе “**Лагранж**” представлены на рис.23, 24.

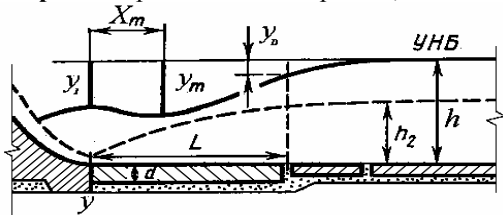


Рис. 22 Расчетная схема

Таблица 1-Экспериментальные данные.

Кз	1.0	1.2	1.5
η_m	0	1.3	1.5
ξ_m	0.89	0.4	0.27
C	0.08	0.13	0.12

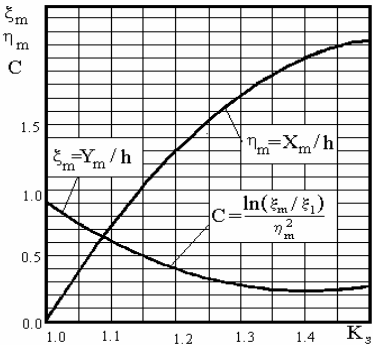


Рис.23. Вычисление коэфф. по формулам Лагранжа

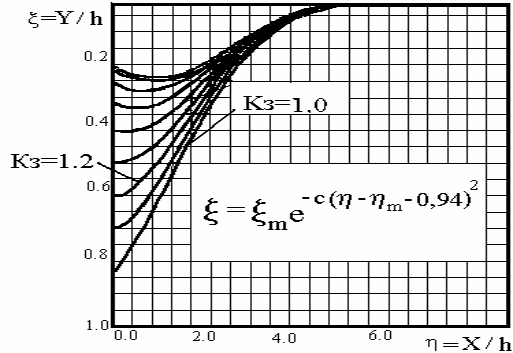


Рис.24. Относительная осреднённая нагрузка при различных коэф. затопления

Пример построения гидродинамической нагрузки и пример расчета водобоя на основе полученных автором данных, приведены на рисунках 25,26.

Построение эпюры нагрузки от пульсации давления, осуществлено в следующей последовательности: 1) по заданным параметрам потока на сходе с уступа, при известных режимах сопряжения бьефов и относительной высоте уступа, с помощью графиков на рис. 4,5,6 найдены стандарты пульсации давления в точках по длине крепления; 2) задавшись значением вероятности превышения максимальной расчетной амплитуды пульсации давления в точке (рис. 3 б), получили ее величину (в примере $P_{0,1\%} = 3,25P'$); 3) известно, что на всех участках

плиты крепления водобоя одновременно реализоваться максимумы пульсаций давлений не могут, поэтому, предположив, что в одной точке это произошло, находим наиболее вероятные их значения на соседних участках как произведение своих расчетных максимумов пульсации давления на коэффициенты продольной и поперечной корреляции, выбранные по графикам на рис. 7,8 для соответствующего участка водобоя, на котором расположена плита.

На этом построение эпюры нагрузки заканчиваем. Далее точку, где реализовался максимум пульсации давления передвигаем по площади плиты, получая самые невыгодные загрузки для рассматриваемого вида расчета крепления (см. рис. 25, 26). Приведенный в диссертации пример расчета плит крепления на прочность и устойчивость при действии пульсационной нагрузки совместно с дефицитом давления и собственным весом плит показал, что в зоне приближения струи к дну толщина водобойных плит при поверхностном режиме на 20 – 25 % меньше, чем при поверхностно-донном, на остальных участках крепления эта разница минимальная.

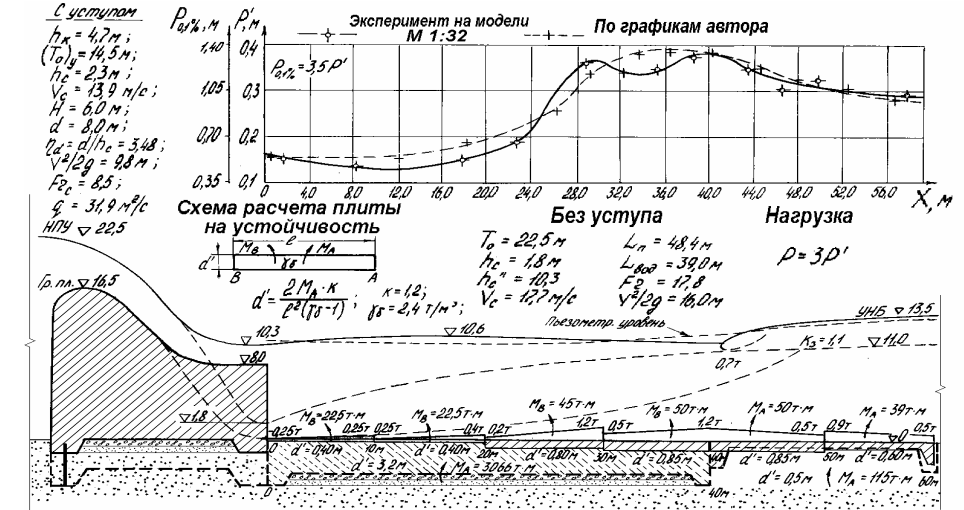


Рис. 25. Расчет плит крепления водобоя на устойчивость от опрокидывающего момента при поверхностном режиме сопряжения бьефов

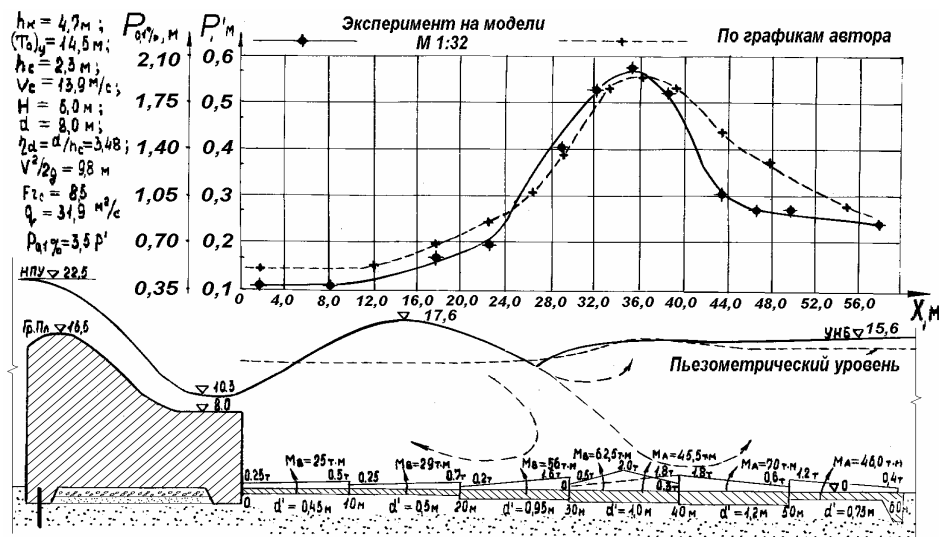


Рис. 26. Расчет плит крепления водобоя на устойчивость от опрокидывающего момента при поверхностно-донном режиме сопряжения бьефов

Сравнение креплений при поверхностном режиме и при донном ($K_3 = 1,0$) показало, что на послепрыжковом участке в обоих случаях толщины плит крепления почти одинаковы, а в зоне прыжка, в среднем, толщина крепления при донном режиме в 2–3 раза больше, чем при поверхностном.

При расчете на прочность изгибающие моменты в плитах водобоя считаем как для балок на упругом основании.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Объективный выбор по требованиям СНиП 2.06.01-86 «Гидротехнические сооружения. Основные положения проектирования» экономически наиболее выгодного режима сопряжения бьефов при проектировании водосбросных гидротехнических сооружений можно достичь только при обоснованной полноте и степени достоверности о воздействии гидродинамической нагрузки на крепление нижнего бьефа, как при поверхностном, так и донном режимах сопряжения бьефов. Это позволит сэкономить капитальные затраты, сократить сроки строительства, обеспечить необходимую безопасность водосбросного гидротехнического сооружения.

Разработанные в данной работе методы расчета и предложенные расчетные зависимости, и их обоснование являются экспериментально-теоретическим развитием важной научной проблемы в гидротехническом строительстве. Результаты работы имеют народно-хозяйственное значение и способствуют удовлетворению требований Федерального закона РФ «О безопасности гидротехнических сооружений».

Основные результаты и выводы

1. Выполненные экспериментальные исследования параметров пульсационной составляющей гидродинамической нагрузки на крепление водобоя за водосливной плотиной с уступом позволяют сделать следующие выводы:

а) при поверхностном и поверхностно-донном режимах сопряжения бьефов водосливной плотины с уступом закон распределения пульсации давления на крепление близок к нормальному;

б) результаты исследований позволяют определить: нагрузки на крепление в диапазоне чисел Фруда от 8,7 до 52,8 при относительных высотах уступа от 3 до 6,5 как при поверхностном, так и при поверхностно-донном режимах сопряжения бьефов;

в) при поверхностно-донном режиме сопряжения бьефов стандарты пульсации давления при одинаковой относительной высоте уступа на 20-30% выше, чем при поверхностном;

г) для нахождения эпюры нагрузки на плиты крепления при поверхностном и поверхностно-донном режиме сопряжения бьефов за водосливной плотиной с уступом предложены графические зависимости продольной, поперечной и пространственной корреляции пульсации давления в точках;

е) для динамического расчета плит крепления, для оценки возможности возникновения резонансных колебаний в плитах крепления в работе приведены функции спектральной плотности;

ж) для определения места действия и величины максимумов пульсации давления, а также для определения изменения стандартов пульсации по длине крепления, как для поверхностного, так и для поверхностно-донного режима предложены эмпирические формулы.

2. Разработанная методика расчета позволяет определять глубину за водосливной плотиной с уступом и совмещенной ГЭС с «коротким» и «длинным» наклонным водобоем, необходимую для создания поверхностного режима.

3. Предложенные зависимости по определению параметров пульсационной составляющей гидродинамической нагрузки на крепление водобоя за водосливной плотиной с донным режимом при различных коэффициентах затопления гидравлического прыжка (от 1,0 до 1,5) при F_r от 22 до 41 позволяют сделать следующие выводы:

а) при коэффициентах затопления от 1,0 до 1,5 экспериментальный закон распределения пульсации давления на крепление близок к нормальному;

б) полученные зависимости позволяют определить: значения максимумов стандартов пульсации и эпюры стандартов пульсации давления по длине крепления для F_r от 22 до 41 и коэффициентах затопления от 1,0 до 1,5;

в) при коэффициенте затопления 1,2 интенсивность пульсации давления в на расстоянии 0,2 длины прыжка достигает своего максимума - 0,06 скоростного напора в сжатом сечении, а при коэффициентах затопления 1,0 и 1,5 - 0,045 скоростного напора. На расстоянии двух длин прыжка при всех коэффициентах затоп-

ления и числах Фрудах интенсивность пульсации давления убывает до 0,005 скоростного напора в сжатом сечении;

г) для определения нагрузки на плиты крепления при донном режиме сопряжения бьефов при различных коэффициентах затопления гидравлического прыжка получены графические зависимости для продольной корреляции пульсации давления;

д) при расчете плит крепления с учетом динамической нагрузки от пульсации давления для проверки возможности возникновения резонансных колебаний плит крепления получены функции спектральной плотности;

е) анализ результатов, проведенных на равномасштабных моделях плотин с уступом и без уступа показал, что место действия по частоте максимума спектральной плотности при донном режиме сопряжения на порядок выше, чем за плотной при поверхностном и поверхностно-донном режимах сопряжения.

4. Полученные для пространственных условий сопряжения бьефов результаты позволяют определять осредненную гидродинамическую нагрузку при различных коэффициентах затопления гидравлического прыжка, а также находить вторую сопряженную глубину на наклонном водобое.

5. Гидродинамическое воздействие потока на водобой совмещенных ГЭС достигает наибольших значений при отсутствии расхода турбины, что позволяет использовать для определения нагрузок на крепление за совмещенными ГЭС результаты исследований нагрузок за плотиной с уступом, полученные автором в данной работе. Результаты исследований применимы для расчета пульсации давления на горизонтальном участке. Применимы они и в случае наличия за уступом участка с обратным уклоном при условии, что он расположен в области донного вальца, т.е. при длине его заложения меньше расстояния от уступа до места падения струи, где стандарт пульсации достигает максимума. При этом высота уступа отсчитывается от горизонтального участка.

6. Полученные данные по пульсации давления при донном режиме могут быть использованы в первом приближении при определении пульсационной нагрузки на наклонное крепление за водосбросными сооружениями с плавным сопряжением водосливной грани с водобоем.

7. Разработаны программные пакеты “Реализация – Лента 2” для обработки экспериментальных данных по пульсации давления методами математической статистики, а также ряд программ по определению осредненных нагрузок “Лагранж”, “Наклонный водобой – донный режим”, “Наклонный водобой – поверхностный режим” и программа «Симвулиди» для определения усилий возникающих в плитах крепления.

Основные положения диссертации опубликованы

в следующих работах автора:

1. Особенности пульсации давления за водосливами с уступом // Гидротехническое строительство. – М., 1986. – №3. – С.26–28. (в соавторстве).

2. Гидротехническим сооружениям и водоналивному колесу Колыванского камнерезного завода – 200 лет // Научно–технические ведомости СПбГПУ. – Санкт-Петербург: Изд–во СПбГПУ, 2003. – №2. – С.89-96.

3. Совершенствование теории и методов расчета гидродинамических воздействий за водосбросными сооружениями при донном режиме сопряжения бьефов // Научно-технические ведомости СПбГПУ. – Санкт-Петербург: Изд-во СПбГПУ, 2004. – №1.

4. Совершенствование теории и методы расчета гидродинамических воздействий за водосбросными сооружениями при поверхностном режиме сопряжения бьефов // Ползуновский вестник. – Барнаул: Изд–во АлтГТУ им.И.И. Ползунова, 2004. – №4. – С.186-201.

5. Физический эксперимент для определения гидродинамических нагрузок за водосбросными сооружениями // Ползуновский вестник. – Барнаул: Изд–во АлтГТУ им.И.И. Ползунова, 2003. – №1–2. – С.143-149.

6. Стенды для экспериментального физического моделирования при исследовании пульсации давления для определения гидродинамической нагрузки от потока на крепление за водосбросными гидротехническими сооружениями // Ползуновский вестник. – Барнаул: Изд-во АлтГТУ им.И.И. Ползунова, 2004. – №1. – С.269–277.

7. К вопросу об определении нагрузки на крепление дна за водосливной плотиной с уступом от пульсации давления// Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. – Л., 1984. – т.170. – С.17–26.

8. Исследование гидродинамического воздействия потока на водобой за плотиной с уступом при поверхностном режиме // Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. – Л.,1985. – т.179. – С.81–83. (в соавторстве).

9. Пульсация давления на крепление дна за водосливной плотиной с уступом. В кн.: Материалы конференции и совещания по гидротехнике / Методы исследования и гидротехнических расчетов водосбросных гидротехнических сооружений. – Л.: Энергоатомиздат, 1985. - С.295-299.

10. Пульсация давления на крепление дна за водосливной плотиной с уступом: Автореф. дис. канд. техн. наук.- Л., 1983.-16с.

11. Пульсация давления на крепление дна за водосливной плотиной с уступом: Дис.. канд. техн. наук. -Л.,1983.-190с.

12. Определение нагрузок на водобойную плиту от пульсации давления при различных затоплениях гидравлического прыжка. В кн.: Материалы конференции и совещания по гидротехнике / Гидравлика гидротехнических сооружений. – Санкт–Петербург: Изд–во ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева, 1993. – С.116–119.

13. Определение нагрузок на водобойную плиту при различных затоплениях гидравлического прыжка. В сб. тез. науч.-техн. совещания / Гидравлика гидротехн. сооружений. – Санкт-Петербург, 1992. – С.35–38 (в соавторстве).

14. Исследование нагрузок на крепление русла за водосливными плотинами с уступом / Труды ЛПИ им М.И. Калинина. – Л.: Изд-во ЛПИ, 1982. – №383. – С.15-20. (в соавторстве).

15. Пульсация давления при различной степени затопления гидравлического прыжка. В кн.: Гидравлика сооружений в жестких и деформирующихся руслах/ Сборник научных трудов ЛПИ им М.И. Калинина. – Л.: Изд-во ЛПИ, 1986. – №415.–С. 27–30(в соавторстве).

16. А.С. СССР №1280081. Стенд для моделирования водосливных гидротехнических сооружений, Бюллетень №48,1986.– 3с.(в соавторстве).

17. А.С. СССР №1518434. Стенд для исследования водотока со струенаправляющей стенкой, Бюллетень №40,1989.–3с. (в соавторстве).

18. А.С. СССР №1668543. Железобетонное покрытие для рисбермы, Бюллетень. №29, 1991. – 4с. (в соавторстве).

19. Расчёт переменного по ширине наклонного водобоя / В сб. тезисов докладов научн-техн. конф. НГАСУ «Охрана природы, гидротехническое строитво, инж. оборуд.». – Новосибирск, 1994. – С.35(в соавторстве).

20. Совершенствование теории и методов расчета гидродинамических воздействий за водосбросными сооружениями / В сб. тез. докл. н-т конф. НГАС «Охрана природы, гидротехническое строительство, инженерное оборудование». – Новосибирск, 1995. –С.35–36.

21. К вопросу об определении осредненного гидродинамического давления за водосливной плотиной с плавным сопряжением водосливной грани с водобоем при различных коэффициентах затопления гидравлического прыжка / В сб. тез. докл. н-т конф. НГАС «Охрана природы, гидротехническое строительство, инженерное оборудование». - Новосибирск, 1996. – Ч.3. – С.40 (в соавторстве).

22. Некоторые особенности пульсации давлений за водосливами с уступом / В сб. тез. Докладов научн-техн. конф. НГАС «Охрана природы, гидротехн. стро, инж. оборудование». - Новосибирск, 1997. – Ч.3 –С.40–41.

23. К вопросу о совершенствовании теории и методов расчёта гидродинамических воздействий за водосбросными сооружениями / В сб. тез. докл. науч.-техн. конф. НГАС «Охрана природы, гидротехническое строительство, инж. оборуд.» -Новосибирск, 1997. – Ч.3. –С.41–42.

24. Современное состояние водных ресурсов Алтайского края и проблемы их эксплуатации при строительстве малых гидроузлов / В сб. «Труды НГАСУ». – Новосибирск: Изд-во НГАСУ, 1999. – Т.2. – №2(4). – С.74–82.(в соавторстве).

25. Обработка экспериментальных данных при исследовании пульсации давления для определения нагрузки от потока на крепление за водосбросными гидротехническими сооружениями при различных коэффициентах затопления гидравлического прыжка (K_3) // В сб. «Труды НГАСУ». – Новосибирск: Изд-во НГАСУ, 2001. – Т.4. – №2(13). – С.135–150.

26. Гидроэнергетика на территории Алтайского края / В сб. материалов междунар. научно-технич. конференции «Современные проблемы гидроэнергетики» 14-15 октября. – Ташкент, 1997. – С.27. (в соавторстве).

27. Методика преподавания курса гидротехнические сооружения с использованием ЭВМ на примере определения осредненных гидродинамических нагрузок на крепление дна за водосбросными сооружениями // Ползуновский вестник – Барнаул: Изд-во АлтГТУ им.И.И. Ползунова, 2004. – №3. – С.144-152.

28. К вопросу об определении нагрузок на водобойную плиту от пульсации давления при различных затоплениях гидравлического прыжка // Вестник алтайской науки – Барнаул: Изд-во АлтГТУ им.И.И. Ползунова, 2001. – №1. – С.227-232.

29. Малая энергетика – решение вопроса энергоснабжения Алтайского края // Вестник алтайской науки – Барнаул: Изд-во АлтГТУ им.И.И. Ползунова, 2004. – №1. – С.62-109. (в соавторстве).

30. Методы расчета крепления нижнего бьефа в виде переменного по ширине наклонного водобоя за водосбросными сооружениями малых гидроузлов // Вестник алтайской науки – Барнаул: Изд-во АлтГТУ им.И.И. Ползунова, 2004. – №1. – С.173-185.

31. В.М. Иванов. Конвективные скорости и обезразмеренные спектральные плотности пульсации давления гидродинамической нагрузки от потока на крепление дна за водосбросными гидротехническими сооружениями при поверхностном, поверхностно-донном и донном режимах сопряжения // Ползуновский вестник. – Барнаул: Изд-во АлтГТУ им.И.И. Ползунова, 2005. – №2. – 9 с.(в печати).

32. В.М. Иванов. Расчет усилий возникающих в балке на упругом основании при распределенной нагрузке по методике И.А. Симвулиди и созданной на ее основе компьютерной программе «Симвулиди» // Ползуновский вестник. – Барнаул: Изд-во АлтГТУ им.И.И. Ползунова, 2005. – №2. – 6 с. (в печати).

