

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕОРИИ И МЕТОДОВ РАСЧЕТА ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ ЗА ВОДОСБРОСНЫМИ СООРУЖЕНИЯМИ ПРИ ПОВЕРХНОСТНОМ РЕЖИМЕ СОПРЯЖЕНИЯ БЬЕФОВ

В.М. ИВАНОВ

В Федеральном законе РФ “О безопасности гидротехнических сооружений”, принятом Государственной Думой 23 июня 1997 г. сказано, 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 данной работе излагаются результаты экспериментально-теоретических исследований по определению таких нагрузок для средне- и низконапорных гидроузлов.

Целью работы было создание новых методов расчета и обоснованных расчетных зависимостей, базирующихся на основе комплексных экспериментальных исследований, которые позволили бы определить гидродинамическую нагрузку 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.

ПОЛЗУНОВСКИЙ ВЕСТНИК № 4 2004

сливной плотиной с уступом при поверхностном и поверхностно-донном режимах. Что дает возможность достичь оптимального выбора конструкций водосбросных сооружений и режимов сопряжения бьефов и тем самым повысить безопасность гидротехнических сооружений.

Решались следующие:

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

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

Эти 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 изучении 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.

Экспериментальные исследования, результаты которых приведены в работе, выполнены на современных гидравлических стендах, в том числе и разработанных автором (А.С. СССР N 1280081 и N 1518434), по современным методикам в гидравлических и гидротехнических лабораториях, 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 науч-

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕОРИИ И МЕТОДОВ РАСЧЕТА ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ ЗА ВОДОСБРОСНЫМИ СООРУЖЕНИЯМИ ПРИ ПОВЕРХНОСТНОМ РЕЖИМЕ СОПРЯЖЕНИЯ БЬЕФОВ

но-исследовательских институтах (ВНИИГ). Оценка погрешности прямых и косвенных измерений в среднем находится в пределах 2 - 5% и позволяет сделать заключение о достоверности полученных результатов.

В результате проделанной работы впервые получены данные, представленные в виде расчетных зависимостей и графиков, которые позволяют 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:

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 взаимокорреляционные функции пульсации давления в точках;

ж) функции спектральной плотности пульсации давления.

С использованием созданных математических моделей и программного обеспечения к ним произведены расчеты осредненных гидродинамических нагрузок при вышеперечисленных конструкциях плотин и режимах сопряжения бьефов.

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 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, а также при создании плана реконструкции Пермского гидроузла, а также при реконструкции гидротехнических сооружений Колыванской каменнорезной фабрики и водоналивного колеса.

Материалы этой работы вошли:

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

2. "Энергетическая стратегия Сибири" разработанная РАН и утвержденная в июле 1997 г. в Новосибирске.

3. "Концепция развития энергетики Алтайского края на период до 2010 г." утвержденная администрацией края 4.11.97 г. горда Барнаула.

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

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

Основные разделы работы докладывались:

- на научных семинарах кафедры гидротехнических сооружений СПбГПУ и НГАСУ (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 базе 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.

Анализ современного состояния изучаемой темы, на основе краткого обзора литературы показывает, что вопросы в работах ряда авторов: М.Н. Беляшевского, Л.И. Божича, В.И. Букреева, О.Ф. Васильева, М.А. Данилова, А.А. Ивойлова, Д.И. Исаева, С.А. Кузьмина, Е.П. Кудрявцева, В.М. Лятхера, Л.В. Мошкова, М.А. Михалева, Н.Л. Преображенского, А.Н. Рахманова, М.С. Фомичева, Н.В. Халтурина, А.К. Хапаевой, А.М. Швайнштейна, Г.А. Юдицкого - надо учитывать при постановке задачи исследований и определении круга проблем, требующих решения. На рис.1а представлены типы режимов сопряжения бьефов за водосливной плотиной с уступом.

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 достаточное для проектирования других типов водосливов с уступом.

Поэтому в данной работе были 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 водосливом 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 требует данных о стандартах и спектрах пульсации скорости. Вклад волновой компоненты в спектр пульсации давления на дно требуется учитывать отдельно.

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 водоемом: он имеет приблизительно такой же уровень пульсации давления; 2) 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, что сокращает область его применения.

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 - Офицера.

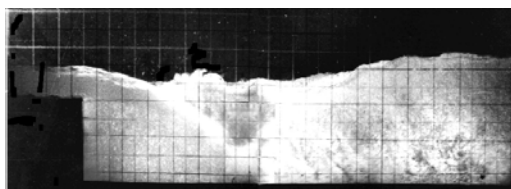
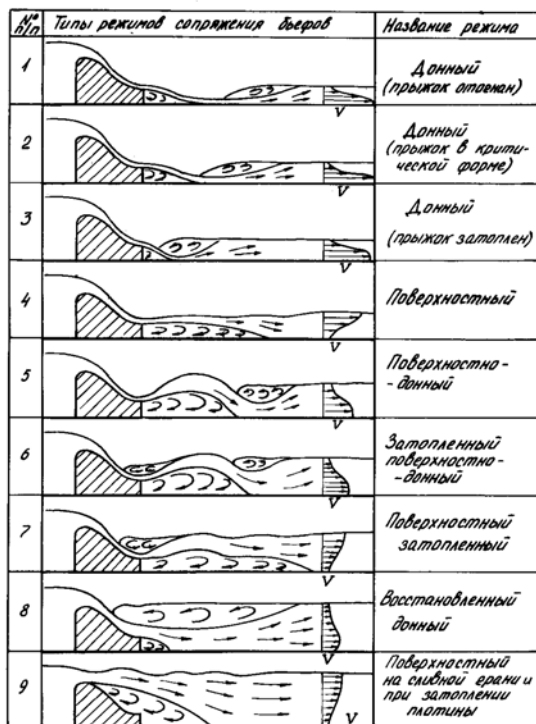
СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕОРИИ И МЕТОДОВ РАСЧЕТА ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ ЗА ВОДОСБРОСНЫМИ СООРУЖЕНИЯМИ ПРИ ПОВЕРХНОСТНОМ РЕЖИМЕ СОПРЯЖЕНИЯ БЬЕФОВ

Во избежание искажений при измерении пульсации давления в нижнем бьефе из-за вибрации лотка, колебаний плит днища, а

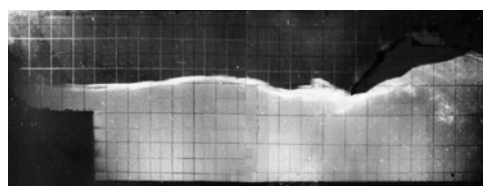
также колебаний воды в лотке на собственной частоте были предусмотрены различные мероприятия.

а)

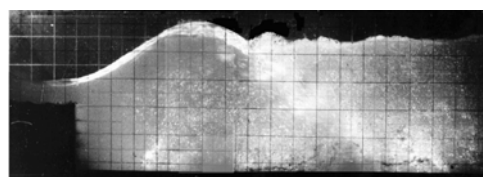
Типы режимов сопряжения бьефов



3. Донный (затопленный)



4. Поверхностный



5. Поверхностный - донный

б)

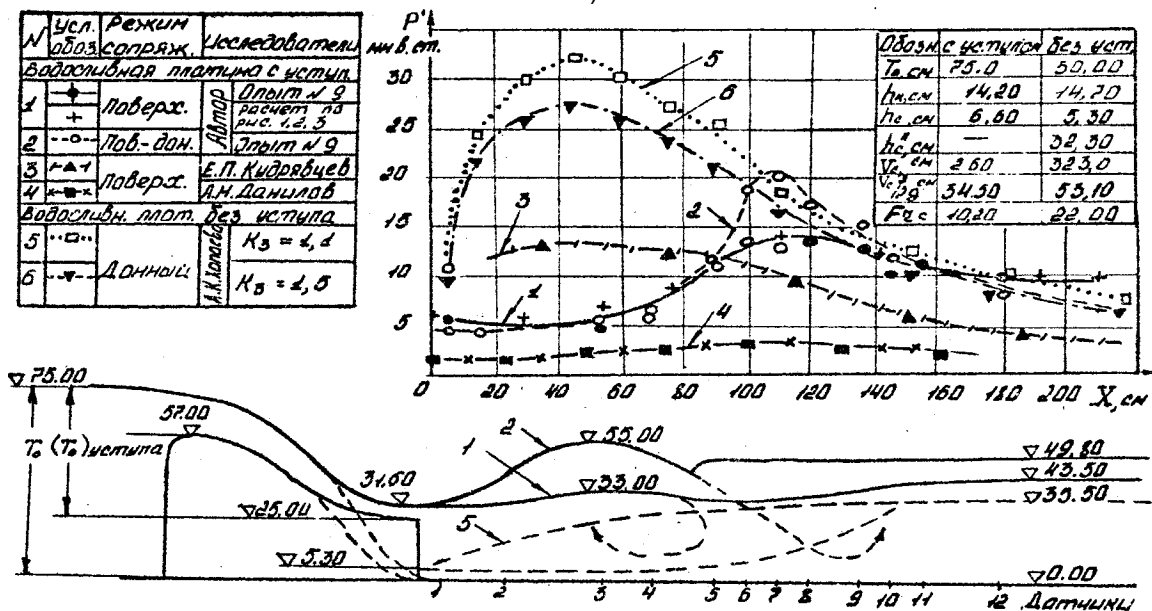


Рис.1. а) Типы режимов сопряжения бьефов за водосливной плотиной с уступом, б) Стандарты пульсации давления в точках по длине крепления в зависимости от типа водосливной плотины и режима сопряжения бьефов (опыт 9)

Измерение пульсации давления в точках крепления производилось датчиками тензометрического типа, крепившимися заподлицо с днищем лотка 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 измерения 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) одновременные дифференциальные и интегральные законы распределения

$$q(P_i) = \frac{t_i}{T}; \quad F(P_i) = \sum_{j=0}^i q(P_j)$$

где t_i - время прибывания в i -м классом интервале;

3) коэффициенты асимметрии и эксцесса

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

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

4) автокорреляционная и нормированная автокорреляционная функции

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

$$R_H(\tau) = R(\tau) / D;$$

где τ - интервал корреляции;

5) взаимокорреляционная и нормированные взаимокорреляционные функции

$$R_{ij}(\tau) = \frac{1}{T - \tau} \int_0^{T-\tau} [P_i(t) - \bar{P}_i] [P_j(t + \tau) - \bar{P}_j] dt;$$

$$R_{ij}(\tau)_H = R_{ij}(\tau) / (P'_i \cdot P'_j);$$

где i, j - точки, для которых определяют взаимокорреляционные функции;

6) нормированная автоспектральная плотность

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

где f - частота пульсации давления.

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

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

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.

Далее в работе приводятся результаты исследования пульсации давления в точках крепления дна за водосливной плотиной с уступом при поверхностном и поверхностно-

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕОРИИ И МЕТОДОВ РАСЧЕТА ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ ЗА ВОДОСБРОСНЫМИ СООРУЖЕНИЯМИ ПРИ ПОВЕРХНОСТНОМ РЕЖИМЕ СОПРЯЖЕНИЯ БЬЕФОВ

донном режимах сопряжения бьефов. Например, см. рис.16. Опираясь на исследования предыдущих 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 уступа до места действия максимального стандарта пульсации давления, в первом приближении равное длине донного вальца.

Условие образования надежного поверхностного режима при минимальной высоте уступа выбрано по таким соображениям.

1. Увеличение высоты уступа ведет к расширению зоны существования поверхностного режима и уменьшению пульсации давления на крепление, но одновременно это 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 сразу же 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.

Эти факторы с точки зрения оптимизации по стоимости нужно рассматривать в сумме, отыскивая ее минимум. Точность определения статистических характеристик процесса зависит от длины записи реализации (времени наблюдения). В работе осуще-

ствлена оценка необходимой длины реализации, при которой ошибка вычисления стандарта пульсации давления составляет менее 5% при 95% обеспеченности различными теоретическими способами и методом подбора. Необходимая для анализа длина реализации 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 наше экспериментальное распределение может быть аппроксимировано нормальным законом (см. рис. 2а - графики построены в логарифмических координатах), причем с меньшей надежностью в зоне приближения струи ко дну, в конце донного вальца, т.е. в зоне интенсивной турбулентности. В указанной зоне также возрастают значения коэффициентов асимметрии (до 0,5) и эксцесса (до 1,0). На остальных участках крепления эти значения близки к нулю (рис. 2б).

На рис. 2в приведена вероятность превышения максимальных относительных значений пульсации давления при нормальном законе распределения.

На рис. 3а 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 ко дну также отодвигается от уступа.

На рис. 3б 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. 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. 3в 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, 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 до 0,3 своих максимальных значений. Полученный нормальный закон распределения значений пульсации давления в точках крепления за водосливной плотиной с уступом (рис. 2а,б,в), а также приведенные данные об изменении стандартов по длине крепления (рис. 3а,б,в), позволяют с заданной вероятностью находить максимальные амплитуды пульсации давления как при поверхностном, так и при поверхностно-донном режимах сопряжения бьефов.

На рис. 1б показаны кривые изменения пульсации давления по длине крепления при поверхностном режиме, рассчитанные для параметров нашего опыта 9 по графикам Кудрявцева Е.П. и Данилова М.А. Как видно из рисунка, данные Кудрявцева Е.П., совпадая по величине стандарта пульсации давления, сдвинуты по месту действия их максимума в сторону уступа. Это можно объяснить наличием в опытах Кудрявцева Е.П. на модели совмещенной ГЭС ступеньки, которая как бы сдвигала уступ в сторону верхнего бьефа.

Данные Данилова М.А. по пульсации давления на плиты крепления, совпадая по месту действия максимума с данными исследований, приведенными в нашей работе, не дают значений пульсации давления в точках.

Интересные выводы дает сравнение значений стандартов пульсации давления в опыте №9 при условии отсутствия уступа (донный затопленный прыжок, коэффициент затопления $K_3=1,1 \dots 1,5$) и с уступом (поверхностный и поверхностно-донный режимы) - см. рис. 1б. В данном опыте расчет стандартов пульсации давления при отсутствии уступа произведен для $K_3=1,1$ с использованием

графиков Хапаевой А.К., а при $K_3=1,5$, для сравнения в первом приближении, дополнительно использован коэффициент уменьшения максимальной амплитуды пульсации давления на плиту водобоя Юдицкого Г.А., равный 0,85. О максимальных стандартах пульсации давления можно сказать следующее (рис. 1б): 1) при донном режиме максимум пульсации действует вдвое ближе к плотине; 2) при поверхностном режиме максимум стандартов пульсации давления вдвое меньше, чем при донном, даже при коэффициенте затопления донного прыжка $K_3=1,5$; 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.

Далее в работе изложены результаты корреляционного и спектрального анализа пульсации давления в характерных точках по длине крепления (рис. 4,5). анализ кривых изменения значений расстояния до первого нуля продольной корреляционной функции x_0 (рис. 4а) 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. 5а). Отношение $|x_0/\tau_0|$ - 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 , и далее остается постоянной. Знание спектральной плотности (рис. 5 б,в), конвективной скорости и глубины над рассматриваемой точкой крепления (рис. 1б, 6б), позволило получить обобщенный график спектральной плотности (рис. 6а), который можно использовать для приближенных расчетов при проверке необходимости учета динамического приложения нагрузки, а также при оценке возможности резонанса плит крепления. Из анализа спектральных плотностей на рис. 5б,в 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 $(-5/3)$.

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕОРИИ И МЕТОДОВ РАСЧЕТА
ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ ЗА ВОДОСБРОСНЫМИ СООРУЖЕНИЯМИ ПРИ
ПОВЕРХНОМ РЕЖИМЕ СОПРЯЖЕНИЯ БЬЕФОВ

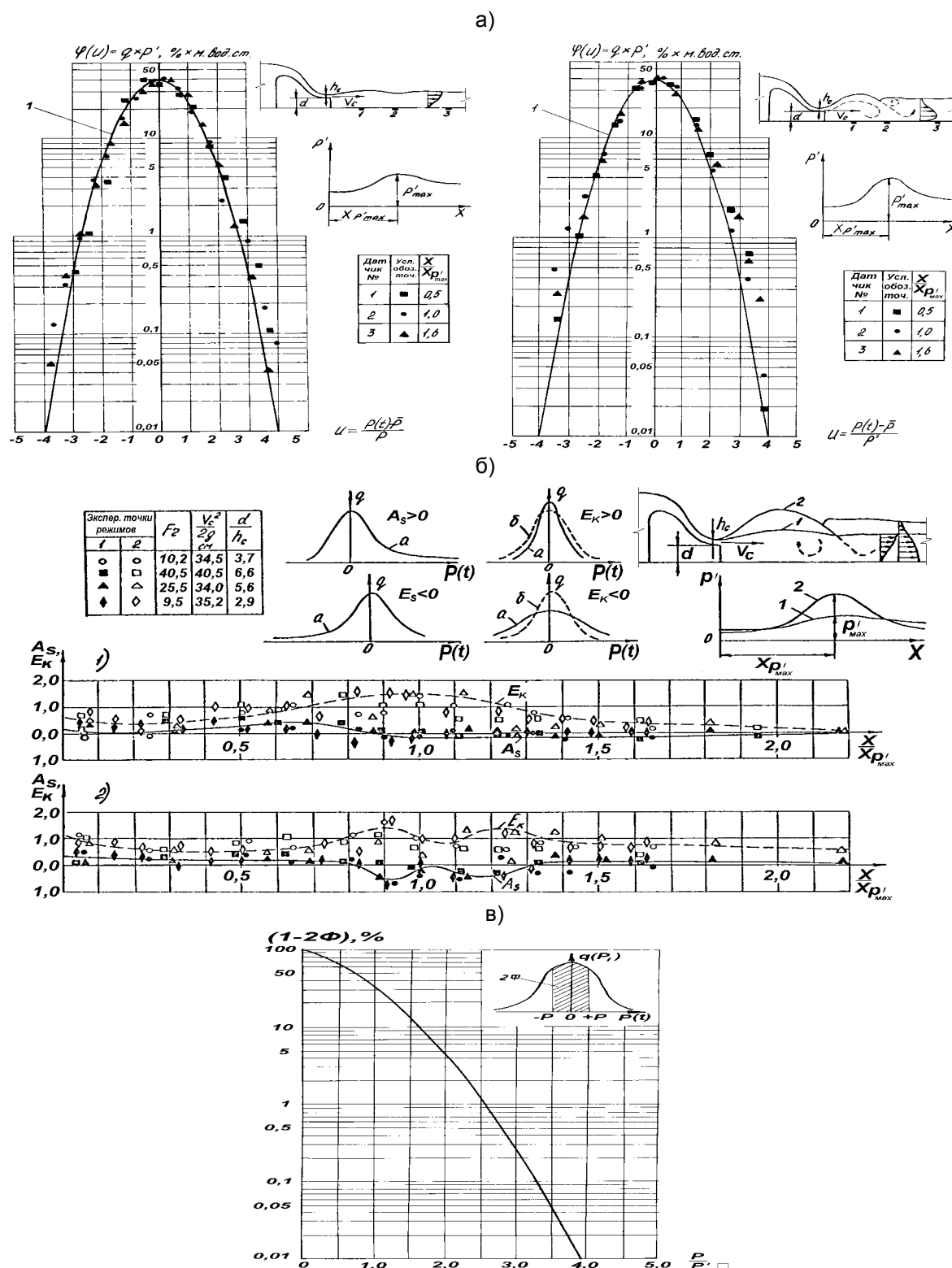


Рис.2.а) Распределение вероятностей пульсации давления за водосливной плотиной с уступом при поверхностном и поверхностно-донном режиме сопряжения бьефов (опыт № 1, 9). 1 – нормальный закон распределения; б) распределение по длине прыжка коэффициентов асимметрии (A_s) и эксцесса (E_k) для поверхностного (1) и поверхностно-донного (2) режимов сопряжения бьефов. Схемы кривых экспериментального распределения - (а) и теоретического - нормального (б); в) вероятность превышения максимальных относительных значений пульсации давления при нормальном законе распределения

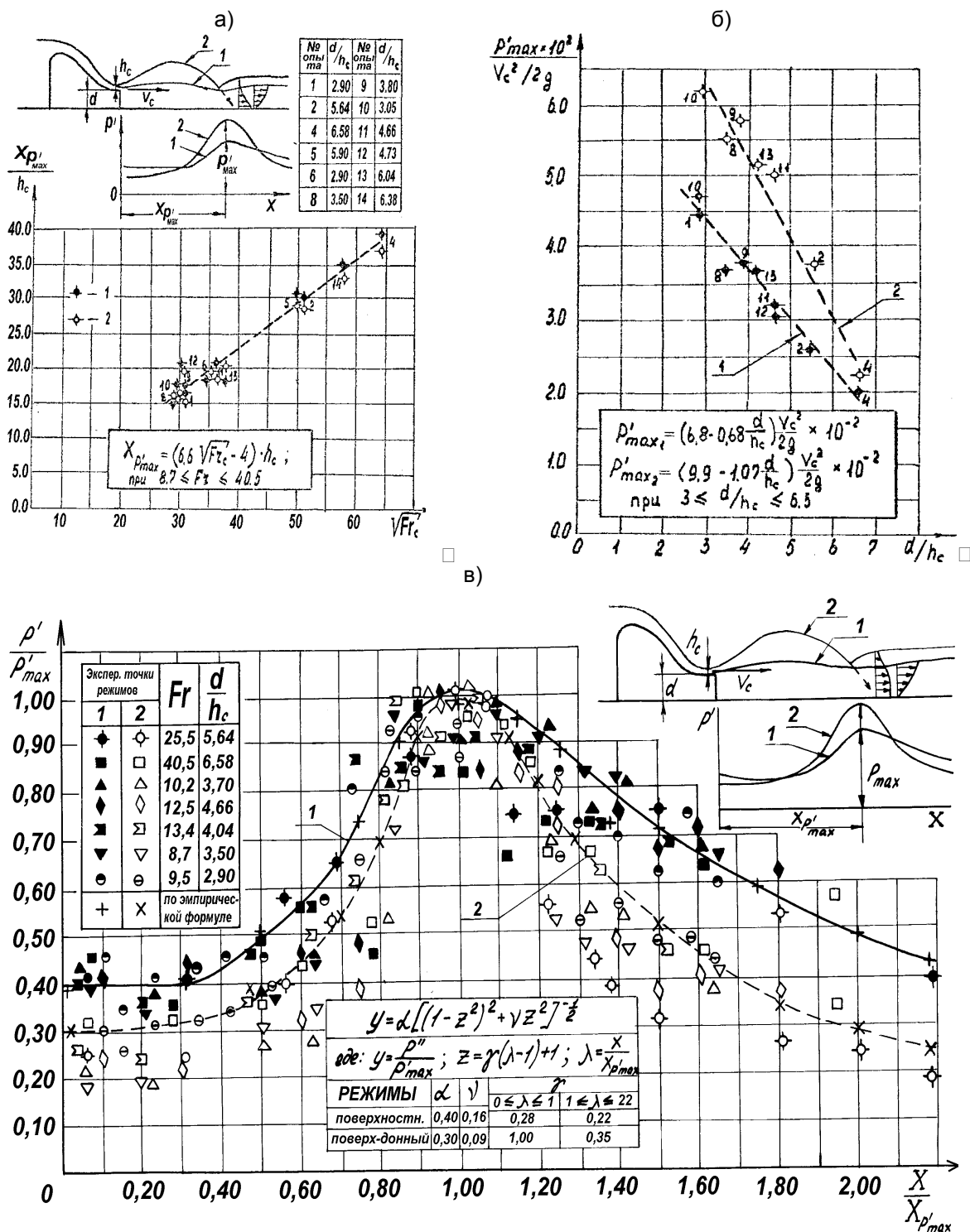


Рис.3. а) График зависимости расстояний от уступа до места действия максимальных стандартов пульсации давления в точках крепления при поверхностном (1) и поверхностно-донном (2) режимах сопряжения бьефов от числа Фруда; б) График зависимости максимальных стандартов пульсации давления в точках крепления за водосливной плотиной с уступом при поверхностном (1) и поверхностно-донном (2) режимах сопряжения бьефов от относительной высоты уступа; в) 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



Рассмотрим особенности пульсации давления за водосливной плотиной с уступом. Анализ экспериментальных данных показывает, что распределение стандартов пульсации давления имеет два “горба” (кривая 2 на рис. 6.б,а).

Первый “горб” находится в зоне выхода на дно слоя смешения 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 на рис. 6.в следует, что если в зоне первого максимума пульсации давления на крепление дисперсия турбулентной составляющей значительно больше дисперсии волновой, то уже в области второго максимума дисперсия волновой составляющей пульсации давления больше дисперсии турбулентной. Из всего сказанного следует, что для определения пульсационной нагрузки на водобой за водосливыми плотинами с уступом надо пользоваться результатами данной работы.

Рассмотрим пульсации давления за водосливами с уступом в пространственных условиях. Как ранее было отмечено, для определения эпюры нагрузки на водобойную плиту необходимы: 1) при решении плоской задачи - функции продольной корреляции (рис. 4а); 2) при решении условно пространственной задачи - функции продольной и поперечной корреляции (рис. 4а, 4б). Квазистатическое (условно статическое) загрузке водобойной плиты гидродинамической нагрузкой строится в предположении, что в какой-то точке плиты водобоя реализовался редкий расчетный максимум пульсации давления, тогда в остальных точках плиты наиболее вероятным будет свое максимальное расчетное значение пульсации давления, 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 коэффи-

циенты корреляции пульсации давления. Строго говоря, такое построение приближенное. 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. Приведем **пример построения** эпюры нагрузки от пульсации давления и пример расчета водобоя на основе полученных автором данных. Построения эпюры нагрузки от пульсации давления, осуществлено в следующей последовательности:

1) по заданным параметрам потока на сходе с уступа при известном режиме сопряжения бьефов и относительной высоте уступа с помощью графиков на рис. 3а,б,в найдены стандарты пульсации давления в точках по длине крепления;

2) задавшись значением вероятности возможного превышения максимальной расчетной амплитуды пульсации давления в точке (рис. 2в) получили ее величину (в примере $P_{\square\square} = \square\square P'$);

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 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. 7а,б). Приведенный 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 ко дну толщина водобойных плит при поверхностном режиме на 20-25% меньше, чем при поверхностно-донном, на остальных участках крепления эта разница минимальная. Сравнение крепления при поверхностном режиме и при донном ($K_3 = 1,0$) (рис. 7а) показало, что на послепрыжко-

вом 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.

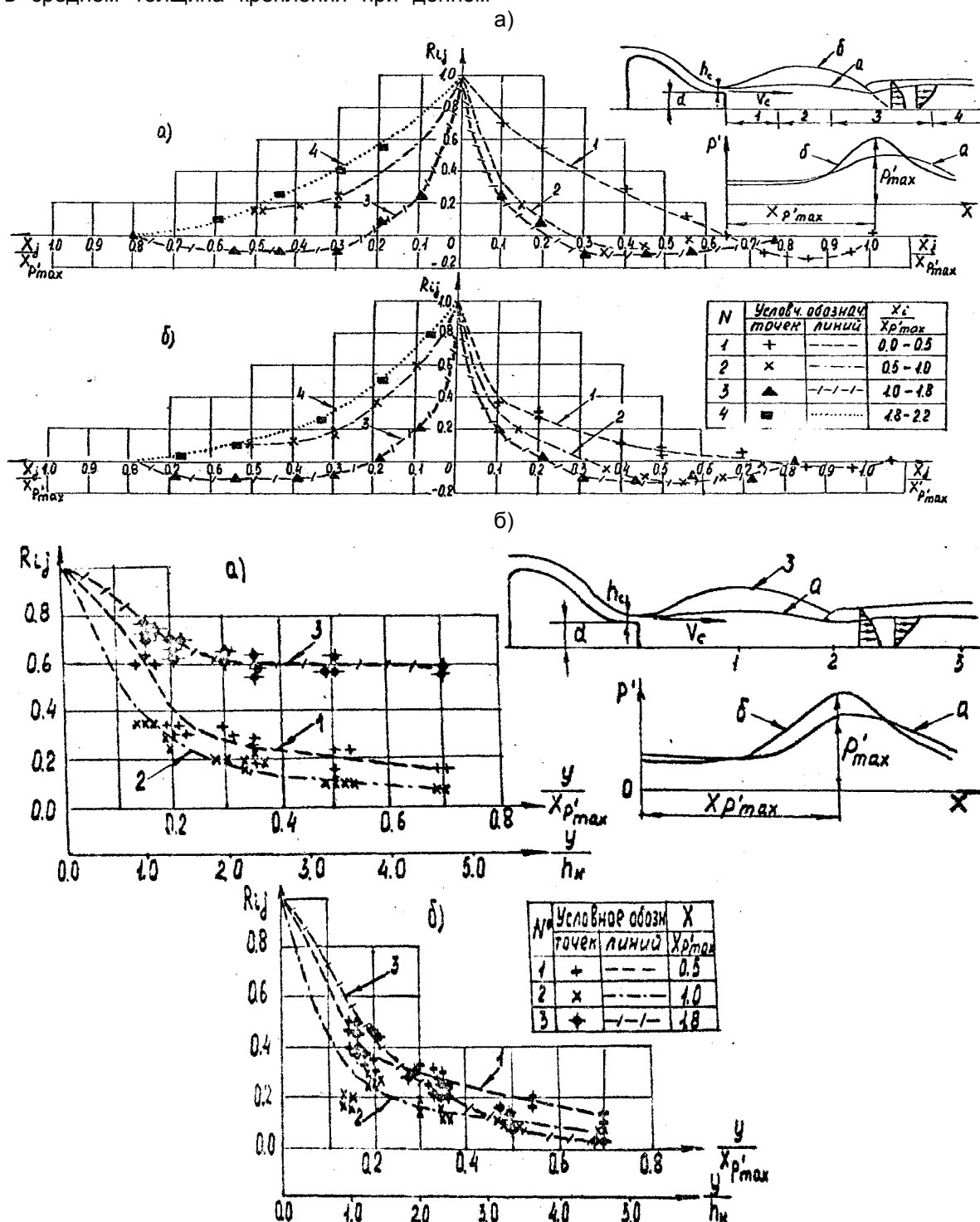


Рис.4. а) Графики продольных корреляционных функций пульсации давления в точках крепления за водосливной плотиной с уступом при поверхностном (а) поверхностно-донном (б) режимах сопряжения бьефов; б) графики поперечных корреляционных функций пульсации давления в точках крепления за водосливной плотиной с уступом при различных режимах сопряжения бьефов: (а) поверхностном; (б) поверхностно-донном; Y - поперечная к потоку координата

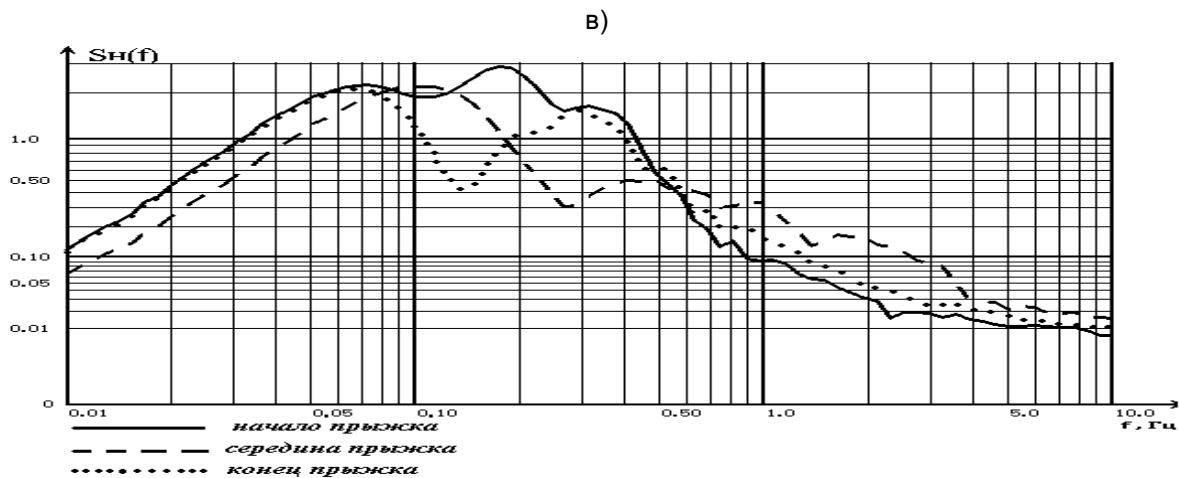
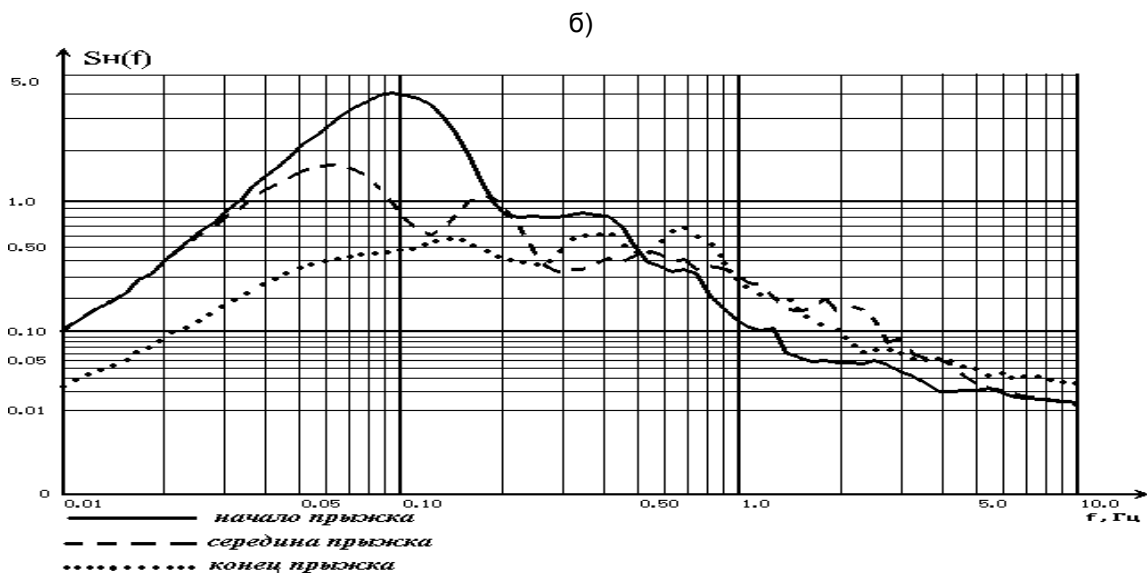
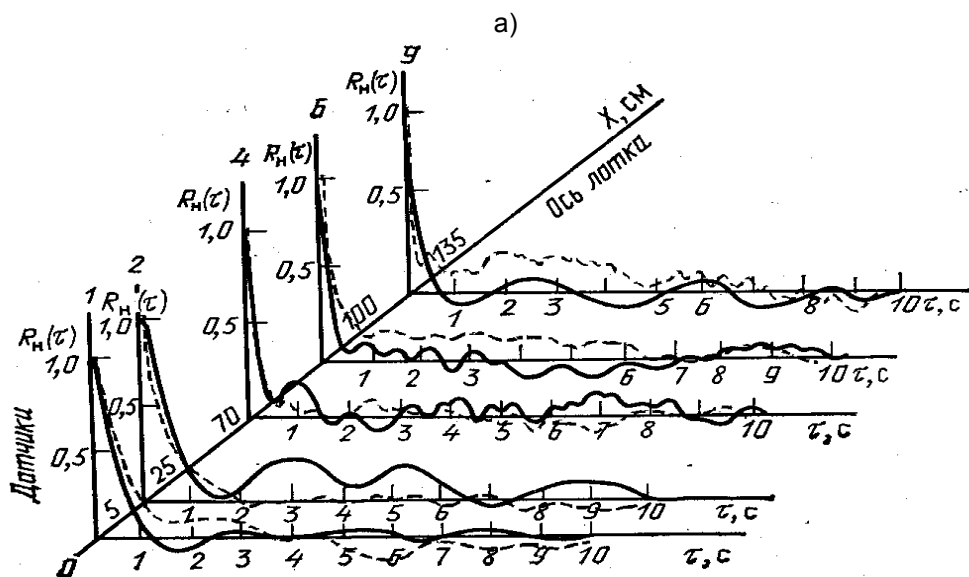


Рис. 5. а) Нормированные автокорреляционные функции пульсации давления, опыт № 9: — режим-поверхностный; - - - -поверхностно-донный; б) спектральные плотности. Опыт № 9. Поверхностный режим; в) спектральные плотности. Опыт № 9. Поверхностно-донный режим

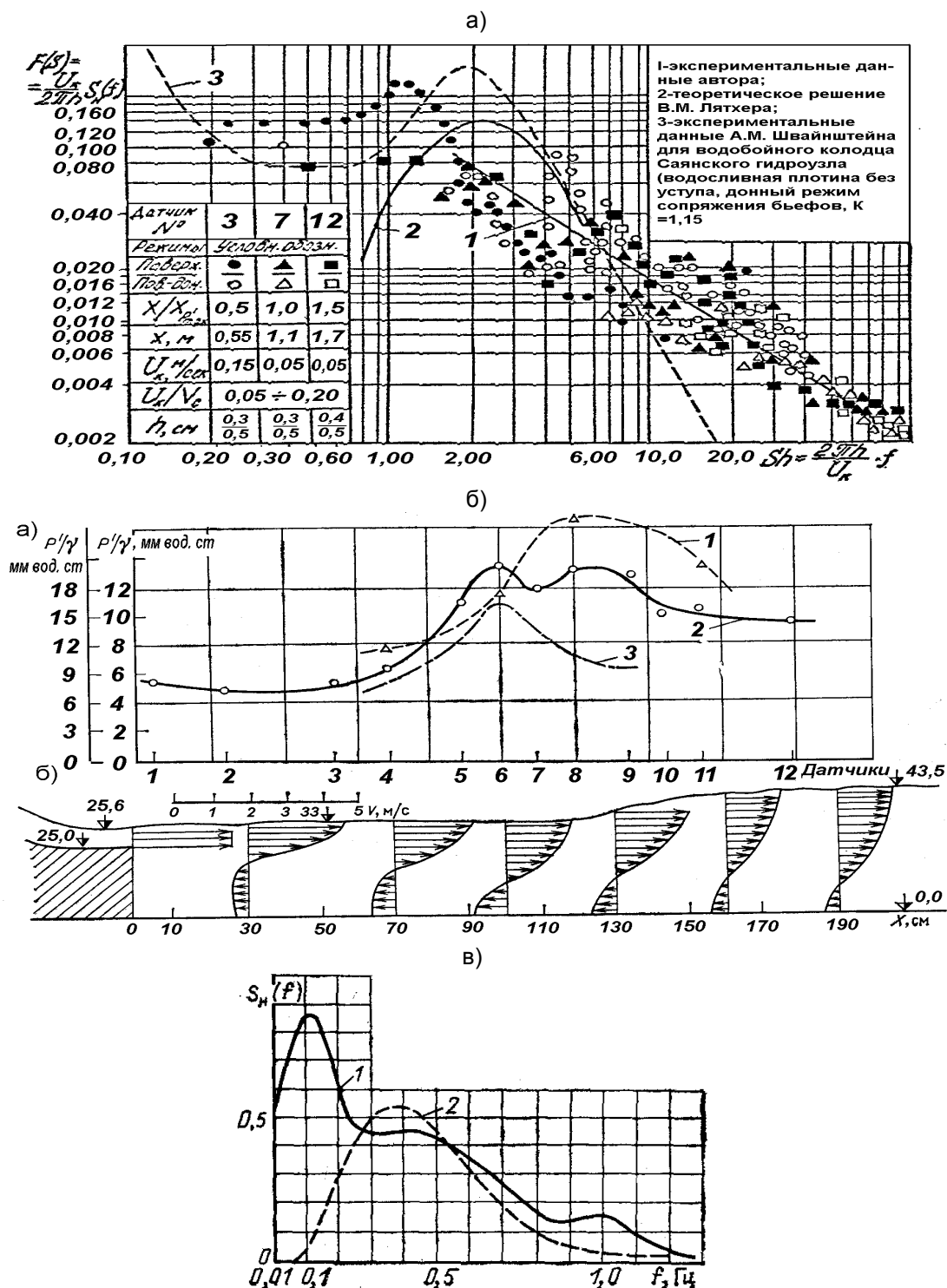
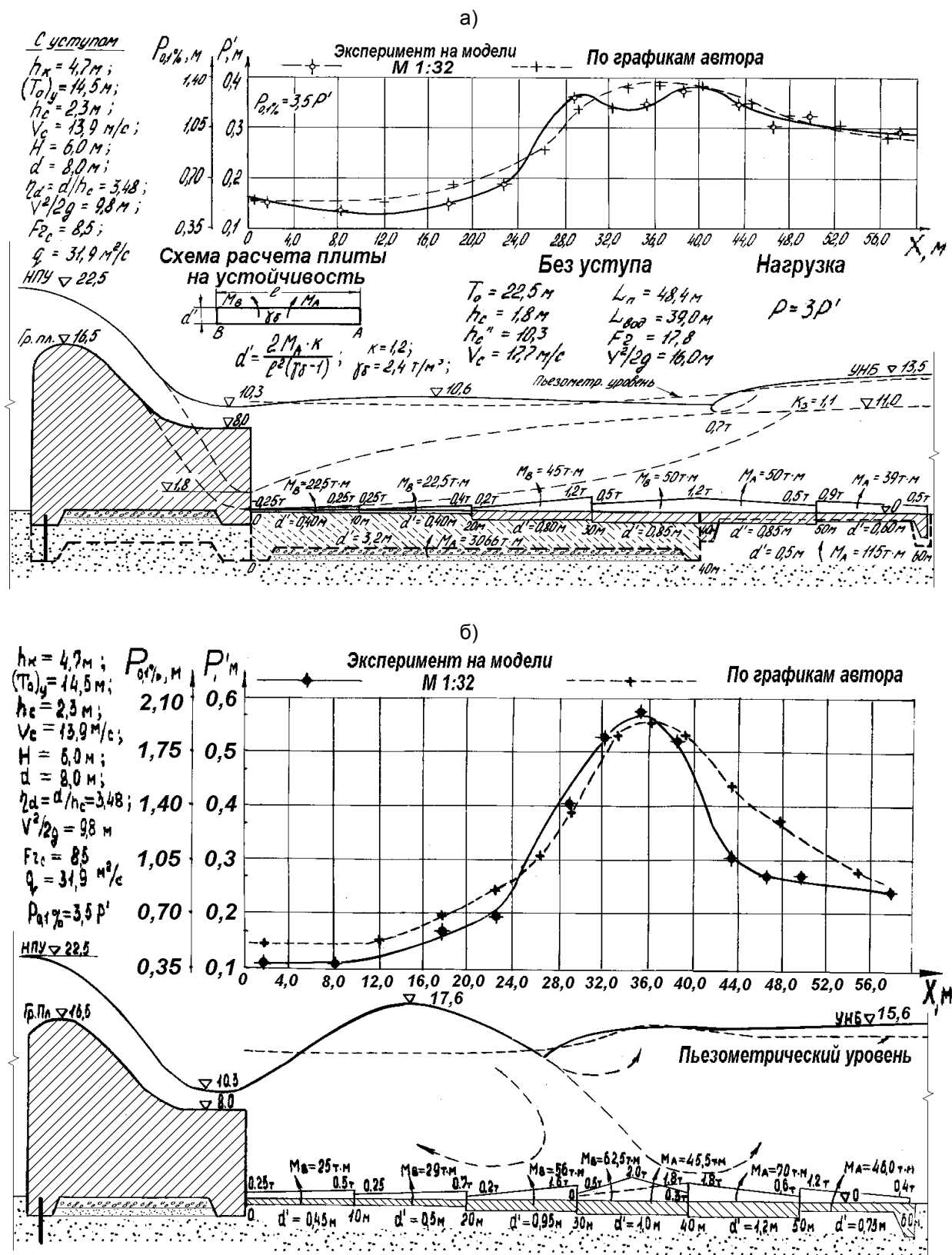


Рис. 6. а) Обобщенный график спектральной плотности пульсации давления в точках крепления за водосливной плотиной с уступом при поверхностном и поверхностно-донном режимах сопряжения бьефов: h - глубина потока над исследуемой точкой крепления; б) поверхностный режим за плотиной с уступом: а - интенсивность пульсации давления и свободной поверхности; 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); в) спектральная плотность пульсации давления: 1-измеренная по датчику 7; 2 - рассчитанная по В.М. Лятхеру

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕОРИИ И МЕТОДОВ РАСЧЕТА
ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ ЗА ВОДОСБРОСНЫМИ СООРУЖЕНИЯМИ ПРИ
ПОВЕРХНОСТНОМ РЕЖИМЕ СОПРЯЖЕНИЯ БЬЕФОВ





При расчете на прочность изгибающие моменты в плитах водобоя считаем как для балок на упругом основании, для чего была разработана и написана программа расчета "Симвулиди".

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Объективный выбор по требованиям СНиП 2.06.01-86 «Гидротехнические сооружения. Основные положения проектирования» экономически 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 зависи-



мости 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".

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Иванов В.М., Мухаммадеев М.М. Особенности пульсации давления за водосливами с уступом // Гидротехническое строительство, 1986, №3 -С.26-28. (в соавторстве)
2. Иванов В.М., Томашевский Б.А. Исследование гидродинамического воздействия потока на водобой за плотиной с уступом при поверхностном режиме // Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева, Т.179. 1985. -С.81-83. (в соавторстве)
3. Иванов В.М. К вопросу об определении нагрузки на крепление дна за водосливной плотиной с уступом от пульсации давления // Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева, Т.170, 1984. С.17-26.