УДК 627.8

DOI: 10.17673/Vestnik.2015.03.9

В.М. ИВАНОВ Т.Ю. ИВАНОВА

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ РАСЧЕТА ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ ЗА ВОДОСБРОСНЫМИ СООРУЖЕНИЯМИ ПРИ ДОННОМ РЕЖИМЕ СОПРЯЖЕНИЯ БЬЕФОВ

IMPROVING METHODS OF CALCULATING HYDRODYNAMIC LOADS FOR WATER OUTLETS AT THE BOTTOM MODE OF POOLS BLENDING

Излагаются результаты разработки новых методов расчета гидродинамических нагрузок на крепление за водосливной плотиной применительно к плотине, имеющей плавное сопряжение водосливной грани с водобоем, для различных коэффициентов затопления гидравлического прыжка при донном режиме. В результате обработки данных экспериментальных исследований получены расчетные величины и графики, которые при решении плоской и пространственной задач позволяют определять осреднённую гидродинамическую нагрузку на крепление от пульсации давления при различных коэффициентах затопления гидравлического прыжка, а также находить вторую сопряженную глубину на наклонном водобое.

Ключевые слова: методы расчёта, гидродинамические нагрузки, водосбросные сооружения, водосливная плотина, экспериментальные исследования, пульсация давления, коэффициент затопления, гидравлический прыжок.

Оптимизация конструкций водосброса и режимов сопряжения бьефов в целях повышения безопасности гидротехнических сооружений требует точного определения гидродинамической нагрузки на крепление за водосливной плотиной [1-12]. В настоящей статье излагаются результаты разработки новых методов расчета таких нагрузок применительно к плотине, имеющей плавное сопряжение водосливной грани с водобоем, для различных коэффициентов затопления гидравлического прыжка при донном режиме [1].

В частности, в результате математико-статистической обработки данных экспериментальных исследований впервые получены расчетные величины и графики, которые при решении плоской и пространственной задач позволяют определять нагрузку на крепление от пульсации давления. К ним относятся: The article presents the results of new methods of calculating hydrodynamic loads on the fastening of a spillway dam. The dam described has a smooth blending of its spillway face and its apron. Different submergence coefficients of the hydraulic jump at the bottom mode are calculated. The research yielded calculation values and graphs which make possible to estimate the average hydrodynamic load on the fastening with account of pressure pulsations at different submergence coefficients of the hydraulic jump as well as to estimate the second sequent depth on a upturned apron.

Key words: methods of calculating, hydrodynamic loads, water outlet, spillway dam, pilot research, pressure pulsations, submergence coefficient, hydraulic jump.

 а) расстояние от уступа до места действия максимальных стандартов пульсации давления;

б) величина максимальных стандартов пульсаций давления;

в) значения стандартов пульсации давления в точках по длине крепления;

г) значения рассчитанных с заданной вероятностью максимальных пульсаций давления в точках;

д) функции продольной, поперечной и пространственной корреляции пульсаций давления в точках;

е) авто- и взаимно-корреляционные функции пульсации давления в точках;

ж) функции спектральной плотности пульсации давления.

Созданные математические модели и программное обеспечение к ним позволили произвести расчеты осредненных гидродинамических нагрузок для названных выше конструкций плотины и режимов сопряжения бьефов.

Комплексное выполнение гидравлических и статических расчетов при проектировании крепления в нижнем бьефе водосливных плотин на нескальных 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 [1].

В настоящее время задачи назначения отметки поверхности водобоя и определения его толщины должны решаться путем технико-экономического сравнения вариантов, что закреплено нормативным документом СНиП 33-01-2003. Это не всегда выполнимо, так как проектировщик должен обладать как можно более достоверной и полной информацией по определению нагрузок от сбрасываемого потока на крепления нижнего бьефа за водосбросными гидротехническими сооружениями при всех известных или хотя бы наиболее распространенных конструкциях и режимах сопряжения бьефов. Принимаемое заглубление водобоя при коэффициенте затопления К₃ = 1,05 – 1,10 лишь гарантирует устойчивое затопление прыжка, но получаемая при этом толщина водобоя далека от оптимальной (это показано на конкретном примере расчета на рис. 1).

В рассматриваемом в [1] примере затраты на бетонное крепление существенно уменьшаются с увеличением коэффициента затопления прыжка и достигают минимального значения при $K_3 = 1,4$, при этом толщина крепления уменьшается 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, поскольку составляет не более 10 % нагрузки от дефицита давления и вполне покрывается принимаемым коэффициентом запаса.

При малых коэффициентах затопления гидравлического прыжка такой подход правомерен, так как толщина плит крепления, определенная из условия их устойчивости при дефиците 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, уменьшении толщины плит крепления влияние нагрузки от пульсации давления возрастает и требует более точного учета.

Из изложенного следует, что 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. Частично он был рассмотрен в работах Г.А.Юдицкого, где предлагается при расчете на устойчивость водобоя в диапазоне $K_3 = 1,2-1,5$ осредненную по площади крепления нагрузку от пульсации давления уменьшать приблизительно на 15 %, а информации о пульсационной нагрузке в точках нет.

В настоящей статье предлагается к использованию обработанный экспериментальный материал, позволяющий восполнить существующий в данной области недостаток информации, необходимой для проектирования [2]. Исследования на модели выполнены в гидравлическом лотке в лаборатории комплексных исследований гидроузлов и гидротехнических сооружений АлтГТУ. Подробное описание экспериментальной установки и измерительной



Рис. 1. Расчет плит крепления водобоя на устойчивость от опрокидывающего момента при донном режиме сопряжения бьефов (расчет в соответствии с рекомендациями)



Рис. 2. Распределение стандарта пульсации давления по длине крепления при различной степени затопления донного гидравлического прыжка в опытах с различными значениями *Fr, V_c, L_n* (указаны на рис. а, б)

аппаратуры приведено в [3-4]. Измерения проводились при числах Фруда 22 и 41 и коэффициентах затопления донного гидравлического прыжка 1,0; 1,2; 1,5 в установившихся гидравлических режимах применительно к условиям плоской задачи. Осциллограммы обрабатывались в учебной вычислительной лаборатории по программам статистической обработки.

На рис. 2, а, б приведены графики, отражающие характер изменения стандартов пульсации P' по длине крепления X для различной степени затопления донного гидравлического прыжка ($K_3 = 1,0-1,5$) при числах Фруда в сжатом сечении Fr_{cr} равных 22 и 41. Можно заметить (рис. 3, а), что несколько большее значение максимальный стандарт пульсации по длине крепления (P'_{max}) имеет при степени затопления гидравлического прыжка $K_3 = 1,2$, причем при $Fr_c = 22$ он на 20 % выше, чем при $Fr_c = 41$, что равно шести скоростным напорам в сжатом сечении ($V^2_c/2g$)×10⁻². При $K_{3'}$ равном 1,0 и 1,5, максимальные стандарты пульсации давления имеют близкие между собой значения и равны приблизительно 4,5×10⁻² скоростным напорам.

Нормированные по сжатой глубине h_c при $K_3 = 1,0$ зависимости расстояния от сжатого сечения до места возникновения максимальных значений

В.М. Иванов, Т.Ю. Иванова



Рис. 3: а – график зависимости максимальной пульсации давления от степени затопления гидравлического прыжка; б – график расстояний от сжатого сечения до места действия максимального стандарта пульсации давления при различных коэффициентах затопления гидравлического прыжка; в – зависимость функций стандартов пульсации давления в точках от коэффициента затопления K, гидравлического прыжка и расстояния до сжатого сечения

стандартов пульсации давления $X_{p'max}$ (рис. 3, б) при различной степени затопления донного гидравлического прыжка показывают, что с увеличением коэффициента затопления зона действия максимального стандарта пульсации давления смещается в сторону водосливной плотины и $X_{p'max}$ убывает от (10–12) h_c при $K_3 = 1,0$ до (2–2,5) h_c при $K_3 = 1,5$.

В целом же при рассмотренных коэффициентах затопления донного прыжка уже на расстоянии, равном одной-двум длинам прыжка, стандарты пульсации давления имеют близкие между собой значения (см. рис. 2, 3, в).

На рис. 3, в приведены функции стандартов пульсации давления в точках 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 в зависимости от расстояния до сжатого сечения X, отнесенного к длине прыжка $L_{n'}$ для чисел Фруда Fr, равных 22 и 41. Для сравнения эти зависимости даны для различных коэффициентов затопления.

Как видно из рисунков, 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 с увеличением коэффициента затопления надвигается на водосливную грань и достигает своего наибольшего значения при K₁ = 1,2.

Проверка гипотезы о нормальном законе 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 полученные нами экспериментальные распределения соответствуют нормальному закону распределения. *A_s* < ±0,5, а *E_k* < 1,5, причем с меньшей надежностью в начале гидравлического прыжка при *K₃* = 1,0. *A_s* = 1,3, а *E_k* = 6 в зоне неустойчивого положения вальца. На остальных участках крепления эти значения близки к нулю (рис. 4, а, б).

Далее путем обработки экспериментальных данных нами была получена информация о пространственной корреляции и спектральных плотно-



Рис. 4. Распределение статистических характеристик пульсаций давления по длине прыжка для различных коэффициентов затопления гидравлического прыжка: а – коэффициентов асимметрии A_s при Fr = 22; б – коэффициентов асимметрии A_s при Fr = 41; в – вероятностей превышения максимальных относительных значений пульсации давления при нормальном законе распределения

стях, необходимая для построения эпюр нагрузок в зависимости от пульсации давления. Произведение стандартов пульсации давления на коэффициенты пространственной корреляции *R*_{ij} и количество принятых стандартов при заданной вероятности не превышения максимальной величины пульсации давления в точке (см. рис. 4, в) дает 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. 5 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.

Анализ кривых изменения значений расстояния до первого нуля продольной корреляционной функции x_0 (рис. 5) позволяет сделать вывод о том, что размеры вихрей, которые существенно влияют на пульсации давления в точках крепления, с удалением от сжатого сечения увеличиваются, достигают максимума в конце донного вальца и за ним, причем с ростом коэффициента затопления размеры вихрей также увеличиваются. Аналогичная картина наблюдается для значений времени до первого нуля автокорреляционных функций τ_0 (рис. 6, а).

Из анализа спектральных плотностей пульсации давления на рис. 7 видно, что максимум находится в области низких частот от 0,05 до 0,2 Гц, а от 0,2 до 10 Гц турбулентная составляющая убывает по закону (-5/3). Из этого графика видно также, что максимум смещается в сторону низких частот от начала прыжка к концу и с увеличением коэффициента затопления.

Поясним порядок построения эпюр нагрузки от пульсации давления и пример расчета водобоя на основе полученных автором данных.

Построение эпюры нагрузки от пульсации давления осуществляется в следующей последовательности: 1) по заданным параметрам потока на сходе с уступа и относительной высоте уступа при известном режиме сопряжения бьефов с помощью графиков на рис. 4, а, б, в находят стандарты пульсации давления в точках по длине крепления; 2) задавшись значением вероятности возможного превышения максимальной расчетной амплитуды пульсации давления в точке (рис. 3, в), получают ее величину (в примере $P_{0.1\%}$ =3,25P'); 3) поскольку на всех участках



Рис. 5. Зависимость продольной корреляции пульсации давления по участкам: а – начало прыжка; б – первая четверть прыжка; в – середина прыжка; г – конец прыжка; д – за прыжком

плиты крепления водобоя одновременно реализоваться максимумы пульсаций давлений не могут, то, предположив, что в одной точке это произошло, находим наиболее вероятные их значения на соседних участках как произведение их расчетных максимумов пульсации давления на коэффициенты продольной и поперечной корреляции, выбранные по графикам на рис. 6, 7 для соответствующего участка водобоя, на котором расположена плита.

На этом построение эпюры нагрузки заканчивают. Далее точку, где реализовался максимум пульсации давления, передвигают по площади плиты, получая самые невыгодные загружения для рассматриваемого вида расчета крепления. При расчете на прочность изгибающие моменты в плитах водобоя считают как для балок на упругом основании, для чего автором была разработана и написана программа.

Полученные зависимости для определения параметров пульсационной составляющей гидродинамической нагрузки на крепление водобоя за водосливной плотиной с донным режимом при различных коэффициентах затопления гидравлического прыжка позволяют сделать следующие выводы:

 При коэффициентах затопления от 1,0 до 1,5 экспериментальный закон распределения пульсации давления на крепление близок к нормальному. 2. Зависимости дают возможность определить: значения максимумов стандартов пульсации и эпюры стандартов пульсации давления по длине крепления для *Fr* от 22 до 41 и коэффициентов затопления *K*₃ от 1,0 до 1,5.

3. При коэффициенте затопления K₃ = 1,2 интенсивность пульсации давления на расстоянии 0,2 длины прыжка достигает своего максимума (0,06 скоростного напора в сжатом сечении). На расстоянии двух длин прыжка при всех коэффициентах затопления и Фрудах интенсивность пульсации давления убывает до 0,005 скоростного напора в сжатом сечении.

4. Для определения нагрузки на плиты крепления при донном режиме сопряжения бьефов при различных коэффициентах затопления гидравлического прыжка получены зависимости для продольной и поперечной корреляции пульсации давления.

5. При расчете плит крепления с учетом динамической нагрузки от пульсации давления для проверки возможности возникновения их резонансных колебаний получены функции спектральной плотности пульсации давления.

6. Анализ результатов, проведенных на равномасштабных моделях плотин с уступом и без уступа, показал, что максимум спектральной плотности при донном режиме сопряжения на порядок выше, чем







Рис. 7. Спектральные плотности пульсации давления: а – $\rm K_3$ = 1,0; б – $\rm K_3$ =1,2; в – $\rm K_3$ =1,5

при поверхностном и поверхностно-донном режимах сопряжения.

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

Разработаны программные пакеты для обработки экспериментальных данных по пульсации давления и по определению осредненных нагрузок.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Иванов В.М., Кузьмин С.А. Пульсация давления при различной степени затопления гидравлического прыжка // Гидравлика сооружений в жестких и деформирующихся руслах: Сб. научных трудов / ТЛПИ. Л., 1986. № 415. C. 27-30.

2. Иванов В.М., Рожков П.В., Иванова Т.Ю., Пчелинцев С.Г. Обработка экспериментальных данных пульсации давления за водосбросными гидротехническими сооружениями // Вестник СевКавГТУ. Ставрополь, 2012. Nº4(23). C. 80-85.

3. Иванов В.М., Мухаммадеев М.М. Особенности пульсации давления за водосливами с уступом // Гидротехническое строительство. М., 1986. № 3. С. 26-28.

4. 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. Л., 1984. С. 17-26.

5. Иванов В.М. Совершенствование теории и методов расчета гидродинамических воздействий за водосбросными сооружениями: дис. ... д.т.н. СПб., 2005. 398 с.

Об авторах:

ИВАНОВ Владимир Михайлович

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой теплотехники, гидравлики и водоснабжения, водоотведения

Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова 656038, Россия, г. Барнаул, пр. Ленина, 46 E-mail: tgvv@mail.ru

ИВАНОВА Татьяна Юрьевна

кандидат технических наук, доцент кафедры теплотехники, гидравлики и водоснабжения, водоотведения Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова 656038, Россия, г. Барнаул, пр. Ленина, 46 E-mail: trodivilina@mail.ru

6. Бальзанников М.И. Анализ результатов обследований деформации тела грунтовой плотины руслового гидроузла // Вестник СГАСУ. Градостроительство и архитектура. 2015. № 1(18). С. 62-70. DOI: 10.17673/ Vestnik.2015.01.11.

7. Михасек А.А. Результаты исследования технологии возведения противофильтрационных элементов в плотинах проливкой быстротвердеющими материалами // Вестник СГАСУ. Градостроительство и архитектуpa. 2011. № 1. C. 96-98. DOI: 10.17673/Vestnik.2011.01.19.

8. Евдокимов С.В., Дормидонтова Т.В. Критерии оценки надежности и технического состояния гидротехнических сооружений // Вестник СГАСУ. Градостроительство и архитектура. 2011. № 2. С. 105-109. DOI: 10.17673/Vestnik.2011.02.23.

9. Евдокимов С.В., Дормидонтова Т.В. Оценка надежности гидротехнических сооружений // Вестник СГАСУ. Градостроительство и архитектура. 2012. № 1(5). С. 49-53. DOI: 10.17673/Vestnik.2012.01.12.

10. Евдокимов С.В. Проблемы безопасности строительства энергетических установок, аккумулирующих нетрадиционные (возобновляемые) источники энергии // Вестник СГАСУ. Градостроительство и архитектура. 2012. Nº 2(6). C. 68-74. DOI: 10.17673/Vestnik.2012.02.13.

11. Леонов О.В., Романов А.А., Евдокимов С.В. Анализ сейсмических условий района расположения Жигулевской ГЭС // Вестник СГАСУ. Градостроительство и архитектура. 2011. № 2. С. 109-112. DOI: 10.17673/ Vestnik.2011.02.24.

12. Романов А.А., Леонов О.В., Евдокимов С.В. Сейсмостойкость грунтов основания и конструкций основных сооружений Жигулевской ГЭС // Вестник СГАСУ. Градостроительство и архитектура. 2011. № 4. С. 66-70. DOI: 10.17673/Vestnik.2011.04.13.

© Иванов В.М., Иванова Т.Ю., 2015

IVANOV Vladimir

doctor of Engineering Science, Professor, Head of the Thermotechnics, Hydraulics and Water Supply, Wastewater Chair Altai State Technical University n.a. I.I. Polzunov 656099, Russia, Barnaul, Lenin Avenue, 46 E-mail: tgvv@mail.ru

IVANOVA Tatyana

PhD in Engineering Science, Associate Professor of the Thermotechics, Hydraulics and Water Supply, Wastewater Chair Altai State Technical University n.a. I.I. Polzunov 656099, Russia, Barnaul, Lenin Avenue, 46 E-mail: trodivilina@mail.ru

Для цитирования: Иванов В.М., Иванова Т.Ю. Совершенствование методов расчета гидродинамических воздействий за водосбросными сооружениями при донном режиме сопряжения бьефов // Вестник СГАСУ. Градостроительство и архитектура. 2015. № 3 (20). С. 64-72.

For citation: Ivanov V.M. Ivanova T.Yu. Improving methods of calculating hydrodynamic loads for water outlets at the bottom mode of pools blending // Vestnik SGASU, Gradostroitelstvo i arhitektura [Vestnik of SSUACE. Town Planning and Architecture]. 2015. Nº 3 (20). Pp. 64-72.