

Система мягкой посадки плавучего затвора судопропускного сооружения С-1 комплекса защитных сооружений Санкт-Петербурга от наводнений

Д.т.н., профессор А.С. Большев;*

к.т.н., доцент С.А. Фролов,

ФГБОУ ВПО Санкт-Петербургский государственный политехнический университет;

главный конструктор В.А. Чернецов,

ЦКБ МТ «Рубин»;

ст. преподаватель Т.В. Филиповская,

ФГБОУ ВПО Санкт-Петербургский государственный политехнический университет

Ключевые слова: плавучий затвор; батопорт; перепад уровней воды; волнение; математическое моделирование; экспериментальные исследования; гидравлический демпфер; упругие демпфирующие опоры

Плавучий затвор судопропускного сооружения С-1 предназначен для перекрытия в случае угрозы наводнения основного судоходного канала в комплексе защитных сооружений (КЗС) Санкт-Петербурга от наводнений.

Исследованиям конструкции затворов и решению проблем, возникающих при их создании, посвящены работы многих авторов [1-8]. Однако условия, в которых должен работать плавучий затвор комплекса защитных сооружений от наводнений, привели к созданию оригинальной конструкции [9-13].

Затвор для судопропускного сооружения С-1 выполнен из двух поворотных створок, шарнирно закрепленных на береговых устоях (рис. 1). Каждая створка состоит из сегментного батопорта, перекрывающего половину сечения канала, и опорной рамы, соединяющей створку с береговым устоем через шарнир. В период между наводнениями батопорты находятся в сухих доковых камерах, расположенных по бокам канала. При необходимости перекрытия судоходного канала доковые камеры заполняются водой и батопорты, имеющие в своем составе отсеки плавучести, всплывают, обеспечивая такое положение створки на плаву, которое гарантирует ее безопасный вывод в канал. Для вывода створки из доковой камеры и последующего заведения используется специальный тягач, который передвигается по рельсовым путям и соединен с батопортом шарнирно закрепленной штангой. После вывода створок в пролет судоходного канала в балластные цистерны батопортов насосами подается вода, батопорты погружаются до порога канала и перекрывают практически полностью его сечение, таким образом, преграждая проход нагонной волны из акватории Финского залива в Невскую губу.

При создании затвора подобного типа российские разработчики столкнулись с необходимостью решения ряда инженерных проблем [14], одна из которых была связана со значительной качкой плавучих створок под действием волнения и течения. Действительно, процесс развития наводнения обычно сопровождается волнением, которое вызывает качку батопортов, обуславливающую возникновение опасных ударов створок о береговые сооружения и морское дно. Кроме того, в процессе перекрытия судоходного канала поток жидкости, движущейся с большой скоростью под днищем плавучих створок, вызывает их автоколебания. В результате возникает эффект раскачивания створок с большой амплитудой, который может привести к возникновению значительных динамических усилий в элементах створки при погружении батопортов и при их посадке на порог.

Таким образом, одной из актуальных задач, поставленной ЦКБ МТ «Рубин» перед коллективом инженерно-строительного факультета (ИСФ) СПбГПУ при проектировании плавучего затвора, являлось обеспечение мягкой посадки при погружении батопортов на порог с целью исключения повреждений конструкций при касании опорными конструкциями батопорта порога и береговой опоры.

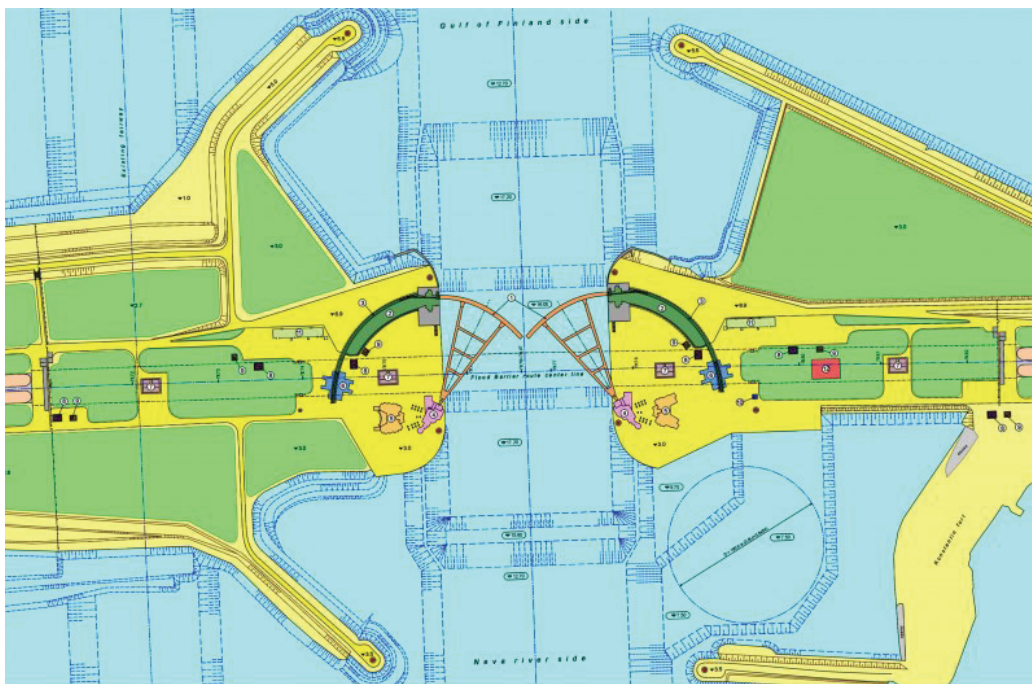


Рисунок 1. План судопропускного сооружения С-1 КЗС Санкт-Петербурга от наводнений

Значительные по амплитуде колебания плавучих батопортов в процессе посадки их на порог, вызванные волнением и течением жидкости, обусловили необходимость разработки специальных устройств, обеспечивающих демпфирование этих колебаний в завершающей фазе погружения батопортов.

Система мягкой посадки каждого плавучего батопорта включала в себя группы гидравлических демпферов и опоры, оснащенные упругими демпфирующими элементами. При погружении батопорта в процессе приближения к дну сначала начинали работать гидравлические демпферы, а затем – упругие демпферы опор.

Математическое моделирование поведения гидравлических демпферов

Гидравлические демпферы широко используются в технике, преимущественно в машиностроении [15]. Эта идея в условиях водной среды реализуется в конструкции, использующей в качестве рабочей жидкости демпфера морскую воду. Гидравлический демпфер конструктивно выполнялся в виде направляющего цилиндра с внутренним поршнем (рис.2). Внутренний диаметр направляющего цилиндра составлял 1200 мм, длина направляющего цилиндра – 1800 мм, максимальный вылет поршня из направляющего цилиндра – 1500 мм. Масса подвижного поршня составляла приблизительно 3,2 т. Допустимый ход поршня – 500 мм, по завершении которого должно реализовываться эффективное торможение с заданными в технических требованиях параметрами. Для обеспечения этого в стенках направляющего цилиндра выполнены сквозные отверстия. В процессе вдавливания поршня через эти отверстия происходит перетекание жидкости.

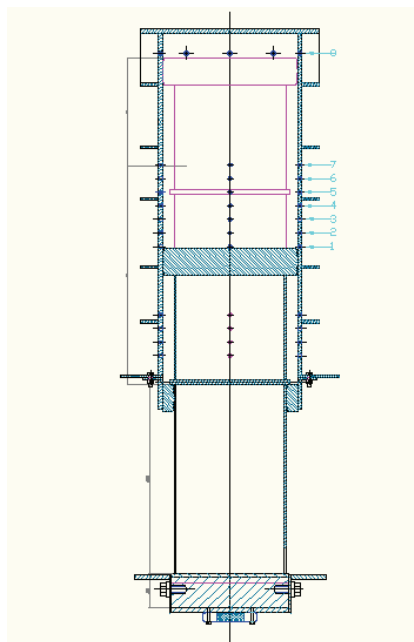


Рисунок 2. Вид поршневого демпфера в сборе со штатным расположением калиброванных отверстий

Водопропускные отверстия в сочетании с зазором между поршнем и корпусом цилиндра гидравлического демпфера определяют энергетические способности демпфера. Чем меньше общая площадь, через которую жидкость истекает из корпуса демпфера, тем больше сила реакции демпфера при движении штока относительно корпуса. Конструкция поршневого демпфера содержит избыточное число водопропускных отверстий, распределенных по поверхности его корпуса, часть из которых может быть перекрыта специальными заглушками. Таким образом, создается возможность выбрать расположение и число открытых водопропускных отверстий. При реализации этой возможности во внимание принимались следующие ограничения, сформулированные ЦКБ МТ Рубин:

- максимально допустимые усилия в поршневом демпфере не должны превышать 170 тс;
- максимально допустимые усилия в опорах должны находиться в пределах 700 тс;
- поршневые демпферы должны оказывать существенное влияние на поведение батопортов в широком диапазоне скоростей их движения.

Следует отметить, что максимальные скорости движения штока демпфера следует ожидать в начале его внедрения в корпус, когда система мягкой посадки только начинает воздействовать на батопорт. Минимальные скорости движения должны достигаться в конце рабочего хода штока, непосредственно перед «передачей» веса батопорта на упругие опоры. В этой связи для эффективной работы демпфера целесообразно обеспечить такие площади водопропускных отверстий в начальной и конечной фазе движения штока, чтобы демпфер сохранял достаточную жесткость на широком диапазоне скоростей движения штока. Для количественной оценки числа и расположения открытых водопропускных отверстий осуществлялась двухуровневая процедура оптимизации.

На первом этапе сотрудниками инженерно-строительного факультета СПбГПУ выполнялась грубая оценка перспективных вариантов характеристик поршневого демпфера. Для этого использовалась простейшая одномерная математическая модель работы демпфера, которая может быть получена тривиальным путем (с учетом истекания жидкости под давлением через судопропускные отверстия [16]) при движении батопорта с заданной начальной скоростью и торможении его группой гидравлических демпферов:

$$(M + \lambda)\ddot{Z} + \frac{1}{2}\rho n S_{sh} \zeta K^2(\zeta) \dot{Z}^2 = 0, \quad (1)$$

где M – масса батопорта; λ – вертикальная присоединенная масса батопорта; Z – вертикальное перемещение батопорта; ζ – перемещение штока относительно корпуса демпфера; S_{sh} – вертикальная проекция площади штока; ζ – коэффициент сопротивления (в качестве начальной оценки коэффициент сопротивления принимался $\zeta = 1,0$); $K(\zeta)$ – отношение площади S_{sh} к суммарной площади истечения жидкости через водопропускные отверстия и зазор между штоком и корпусом демпфера; n – число гидравлических демпферов.

На первом этапе оптимизации ставилась задача приблизительной оценки вида характеристики $K(\zeta)$, дающей наиболее широкую по диапазону перемещений ζ примерно одинаковую реакцию группы демпферов и позволяющей в наибольшей степени затормозить батопорт к моменту достижения предела рабочего хода штока.

На основании решения уравнения движения (1) с помощью методов численного интегрирования [17,18] для движения плавучей створки затвора, оснащенной шестью гидравлическими демпферами, при оценочной начальной скорости 0,5 м/с, синтезирована оптимальная характеристика демпфера, представленная в табл.1. Из рис. 3 (решение (1) с учетом параметров демпфера из табл.1) видно, что существенная реакция демпфера обеспечивается в диапазоне перемещений штока от 0 до 500 мм. При этом максимальная сила, приходящаяся на каждый демпфер, не превышает 1,0 МН. В конце движения группа демпферов уменьшает скорость движения батопорта до 10 см/с.

Таблица 1. Характеристика демпфера с ходом 500 мм

ζ	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
$K(\zeta)$	90	130	160	220	250	250

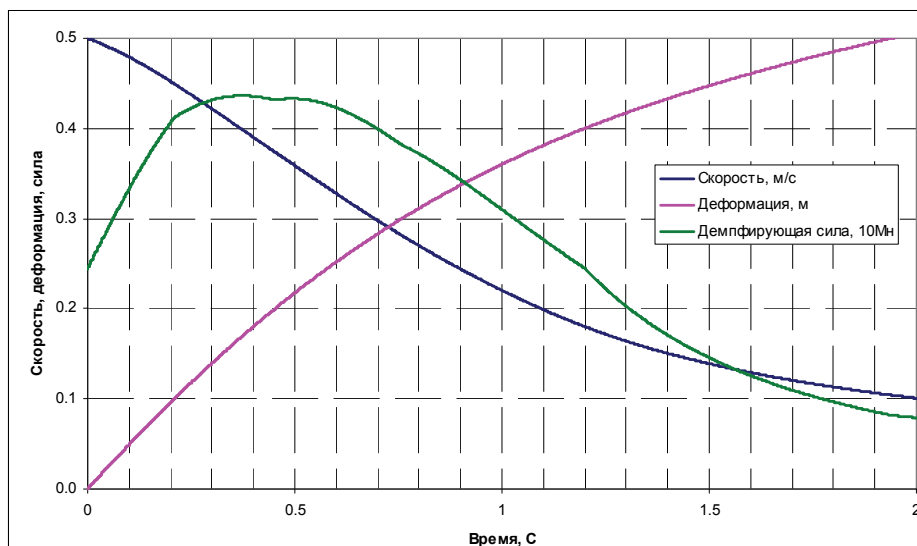


Рисунок 3. Движение группы демпферов с ходом 500 мм при движении батопорта по инерции

Результаты, полученные авторами на одномерной модели, дают определенные ориентиры для оптимального расположения открытых отверстий. Однако для окончательного решения вопроса было необходимо учесть особенности движения батопорта под действием внешних сил и принять во внимание дискретность расположения водопропускных отверстий, распределенных равномерно вдоль образующей цилиндрического корпуса с шагом 100мм.

Дискретность расположения водопропускных отверстий приводит к ступенчатому характеру изменения функции $K(\zeta)$, при котором ее значение плавно изменяется по мере прохождения оконечностью штока ряда отверстий с одинаковой вертикальной отметкой и остается неизменным при движении в пространстве между этими рядами. Создать ступенчатую функцию $K(\zeta)$, близкую к оценочным характеристикам, представленным в табл. 1, не представило особых затруднений.

Учет реального движения батопорта при выборе оптимального расположения водопропускных отверстий является более сложной задачей. Дело в том, что в процессе посадки батопорта на порог батопорт совершает сложное движение в различных степенях свободы. Средняя скорость его приближения к порогу, определяемая интенсивностью заполнения балластных цистерн, оказывается значительно меньше скоростей колебательного движения, вызванного воздействием волнения и срывом вихрей от потока жидкости. В результате этого расчетные скорости движения батопорта, а значит, и скорости движения штока поршневого демпфера, в основном определяются качкой батопорта, имеющей нерегулярный характер. В этих условиях при выборе наилучших характеристик демпфера нельзя опираться исключительно на результаты одномерного анализа при движении батопорта по инерции.

Исходя из вышеизложенных соображений, в процессе проектирования для конечного выбора расположения открытых водопропускных отверстий авторский коллектив ИСФ осуществлял следующие действия:

- выбирались возможные варианты расположения открытых водопропускных отверстий, обеспечивающие характеристики поршневого демпфера, близкие к оценкам, полученным на одномерной модели;
- многократно выполнялось математическое моделирование посадки батопорта на порог с помощью ПК "Anchored Structures" [19,20] при экстремальном перепаде уровней и волнении с повторяемостью 1 раз в сто лет;
- выполнялась статистическая обработка усилий в демпферах и упругих опорах при посадке батопорта на порог с использованием гидравлических демпферов с альтернативными характеристиками;
- по результатам анализа выбирался вариант расположения водопропускных отверстий.

Выбор вариантов расположения открытых водопропускных отверстий, обеспечивающих характеристики поршневого демпфера, близкие к оценкам, полученным на одномерной модели, осуществлялся на основе табл. 1 так, чтобы альтернативные характеристики имели отклонение в область увеличения или уменьшения сил реакции по отношению к оценочному оптимуму. В дальнейшем, говоря о демпферах с различными системами водопропускных отверстий, будем характеризовать их числом открытых отверстий в каждом вертикальном ярусе: $n_1, n_2, n_3, n_4, n_5, n_6, n_7$, где n_i – число отверстий, открытых в ярусе i . Первый ярус соответствует верхней отметке штока в полностью выдвинутом положении. Каждый следующий ярус смещен относительно предыдущего на 100 мм.

Для получения надежных результатов по экстремальным значениям усилий в опорах и гидравлических демпферах каждый из моделируемых x вариантов посадки повторялся многократно. Полученные усилия подвергались статистической обработке (вычислялось математическое ожидание и дисперсия). Максимальные значения усилий рассчитывались с учетом распределения Стьюдента [21]:

$$F_{\max} = \bar{F} + t_{p,N} \sigma_F, \quad (2)$$

где F_{\max} – оценка максимального значения усилия;

\bar{F} – математическое ожидание максимального значения усилия, полученного в результате проведения N численных экспериментов;

σ_F – среднеквадратическое отклонения усилия, полученное в результате проведения N численных экспериментов;

$t_{p,N}$ – коэффициент Стьюдента при выбранной доверительной вероятности P [22] и известном числе опытов N .

Сводные результаты моделирования посадки батопорта с различными вариантами демпферов, представленные в табл. 2, содержат математическое ожидание (МО), среднеквадратическое (SKO) отклонение и максимальные значения усилий (MAX), определенные для каждого демпфера (1,2...6) и для групп демпферов ($\Sigma 1-3$, $\Sigma 4-6$). При этом при назначении коэффициента Стьюдента выбиралась доверительная вероятность $P = 0,8$. Число экспериментальных посадок батопорта на порог, по которым осуществлялся анализ, составило 400 опытов. На основании этого исследования был выбран вариант расположения открытых отверстий, выделенный в таблице.

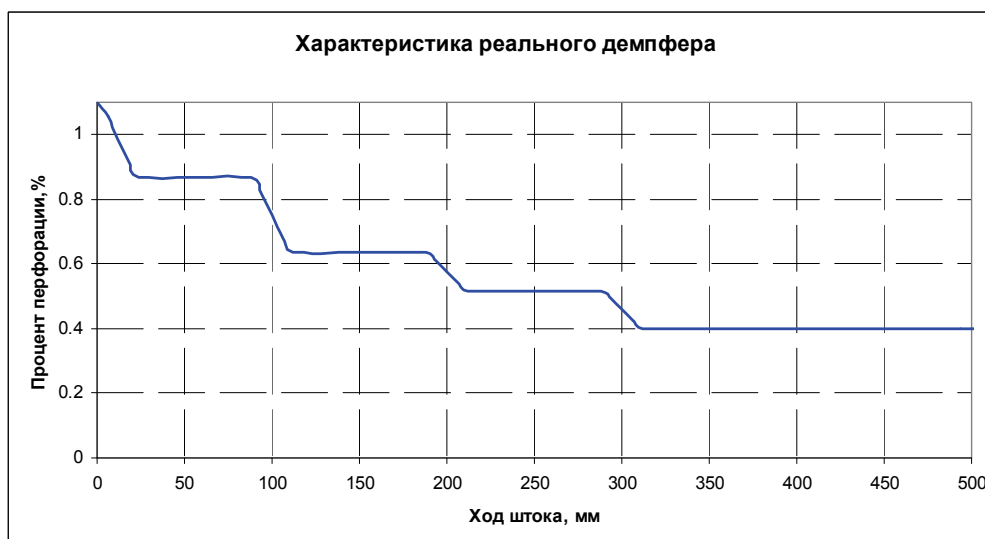


Рисунок 4. Зависимость относительной перфорации корпуса демпфера с ходом 500 мм от внедрения штока при $n_1, n_2, n_3, n_4, n_5, n_6, n_7 - 4, 4, 2, 2, 0, 0, 0$

Таблица 2. Усилия в демпферах и опорах (в кН) при посадке батопорта на порог

Ход – 50 см, число открытых отверстий $n_1, n_2, n_3, n_4, n_5, n_6, n_7$ - 3322000								
Недемп.	$\Sigma 1-3$	1	2	3	4	5	6	$\Sigma 4-6$
МО	6030	755	734	712	587	603	618	5063
SKO	1132	671	647	623	475	488	502	671
МАХ	7482	1616	1564	1511	1196	1229	1261	5923
Ход – 50 см, число открытых отверстий $n_1, n_2, n_3, n_4, n_5, n_6, n_7$ - 4222000								
МО=	6035	697	678	658	567	583	597	5084
SKO=	1053	622	599	577	466	480	494	612
МАХ=	7385	1494	1446	1398	1164	1198	1231	5870
Ход – 50 см, число открытых отверстий $n_1, n_2, n_3, n_4, n_5, n_6, n_7$ - 4322100								
МО=	5964	619	604	581	481	499	507	5058
SKO=	1003	523	506	480	377	395	402	569
МАХ=	7250	1289	1254	1196	964	1006	1022	5788
Ход – 50 см, число открытых отверстий $n_1, n_2, n_3, n_4, n_5, n_6, n_7$ - 4332100								
МО=	6007	634	619	594	482	501	510	5087
SKO=	978	506	491	468	369	389	399	526
МАХ=	7261	1283	1247	1194	956	1000	1021	5761
Ход – 50 см, число открытых отверстий $n_1, n_2, n_3, n_4, n_5, n_6, n_7$ - 4422000								
МО=	5977	659	641	622	532	546	560	5077
SKO=	908	581	561	540	422	434	447	549
МАХ=	7141	1404	1361	1314	1073	1102	1133	5781
Ход – 50 см, число открытых отверстий $n_1, n_2, n_3, n_4, n_5, n_6, n_7$ - 4432100								
МО=	5941	702	684	657	502	522	531	5039
SKO=	950	589	571	545	367	385	393	542
МАХ=	7159	1458	1415	1355	972	1015	1034	5734

Экспериментальные исследования опытного образца гидравлического демпфера

Для окончательной проверки работоспособности демпферов и проверки расположения открытых водопроточных отверстий сотрудниками инженерно-строительного факультета СПбГПУ были организованы экспериментальные исследования опытного образца гидравлического демпфера.

Полномасштабные испытания опытных образцов поршневых демпферов мягкой посадки батопортов сегментного затвора проведены в камере гидросилового стенда полигона филиала ОАО «26 ЦНИИ».

Нагрузка на демпфер формировалась путем суммирования веса подвижных элементов конструкций экспериментальной установки (рамы, балок, набора крепления вставки и демпфера, платформы для балластных грузов и системы их подвеса) и веса балластных грузов, расположенных на платформах. Опыты, согласно требованиям технического задания, выполнялись при последовательном увеличении действующей на него нагрузки, составляющей 50 т, 100 т и 150 т. При каждом уровне нагружения имитировались условия штатного и экстремального режимов посадки батопорта на порог. В штатном режиме расчетная линейная скорость в момент контакта демпферов с порогом составляет $\sim 0,3 \div 0,4$ м/с, при экстремальных режимах $\sim 0,7$ м/с. Для воспроизведения в опытах таких величин линейной скорости в исходном положении демпфера варьировалась величина зазора между подвижным поршнем и днищем гидробака.



Рисунок 5. Монтаж опытного образца гидродемпфера

В табл. 3 приводится сопоставление данных, полученных расчетным путем с помощью разработанной авторами математической модели поршневого демпфера, и данных, полученных экспериментально. Сопоставляемыми параметрами является конечная скорость движения штока демпфера и время, за которое он продавливается.

Таблица 3. Сопоставление расчетных и экспериментальных параметров демпфера с ходом 500 мм при начальной скорости движения 0,5 м/с

19 т	Расчетная асимптота скорости	0,11
	Экспериментальная асимптота скорости	0,105
	Расчетное время продавливания	3,3
	Экспериментальное время продавливания	3,0
50 т	Расчетная асимптота скорости	0,18
	Экспериментальная асимптота скорости	0,16
	Расчетное время продавливания	2,0
	Экспериментальное время продавливания	2,0
100 т	Расчетная асимптота скорости	0,25
	Экспериментальная асимптота скорости	0,25
	Расчетное время продавливания	1,42
	Экспериментальное время продавливания	1,30
150 т	Расчетная асимптота скорости	0,30
	Экспериментальная асимптота скорости	0,26
	Расчетное время продавливания	1,15
	Экспериментальное время продавливания	1,2

Расчетные и экспериментальные данные практически совпадают, что свидетельствует о работоспособности гидравлических демпферов и адекватности использованной математической модели их работы (расхождение расчетных и экспериментальных параметров в пределах 10%).

Экспериментальные исследования демпфирующих элементов упругих опор

Наряду с гидравлическими демпферами использовались упругие демпфирующие элементы, размещенные на специальных опорах. Характеристики идеальных упругих опор были предложены авторским коллективом ИСФ на основе серийных расчетов посадки батопорта на порог с помощью методов математического моделирования в ПК "Anchored Structures", созданном сотрудниками кафедры «Гидротехническое строительство» (сертификат Морского Регистра Судоходства РФ №12.00874.314).

Большев А.С., Фролов С.А., Чернецов В.А., Филиповская Т.В. Система мягкой посадки плавучего затвора судопропускного сооружения С-1 комплекса защитных сооружений Санкт-Петербурга от наводнений

В ЦКБ МТ «Рубин» была разработана конструкция податливой части опоры в виде, представленном на рис. 6.

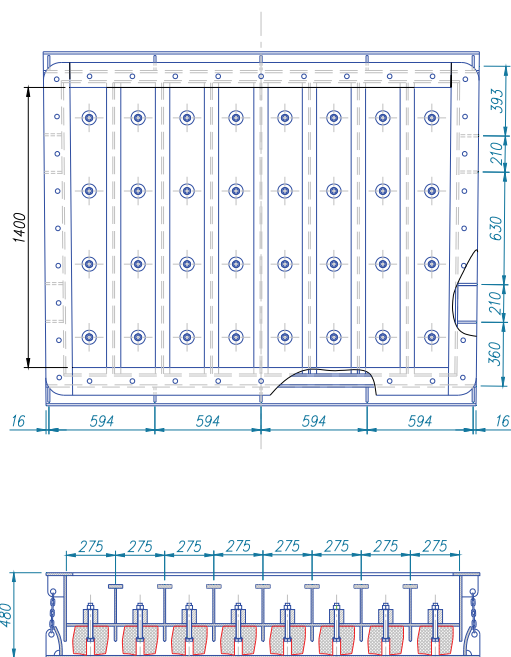


Рисунок 6. Конструкция опор

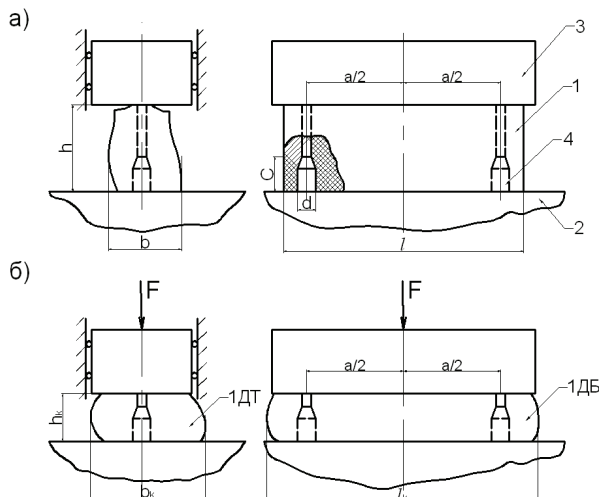
В ходе исследования круг вопросов, представляющих интерес для оценки деформированного состояния податливого элемента, был несколько расширен; рабочая программа испытаний при этом включала:

- определение деформации бруса не только в направлении рабочего усилия, но и в поперечных направлениях;
- оценку ужесточающего влияния болтовых фиксаторов, предусмотренных конструкцией рамы в системе мягкой посадки батопорта;
- оценку запаздывания деформаций на фазе выдержки бруса под нагрузкой (прямая ползучесть) и на фазе отдыха (обратная ползучесть).

Испытывались резиновые бруски (габаритные размеры $b \times h \times l = 140 \times 170 \times 450$ мм, форма поперечных сечений брусков имела вид неправильного четырехугольника).

Сжатие образцов осуществлялось (рис. 7) между двумя жесткими плитами: в интервале 0-10 тс – в испытательной машине FPZ-100 с автоматической записью диаграммы деформирования $F - \Delta h$, а в интервале 0-125 тс – в прессе ПММ-125 с прямым периодическим измерением характерных размеров бруса на различных уровнях нагружения.

Рисунок 7. Схема установки и вид образца в испытательной машине на начальной (а) и конечной (б) стадиях эксперимента:
1 – образец (резиновый брус); 2 – плита неподвижная; 3 – плита подвижная;
4 – шпилька-фиксатор; 1ДБ – боковой вид деформированного образца;
1ДТ – вид деформированного образца с торца



Деформацию в рабочем направлении Δh оценивали по диаграмме деформирования $F - \Delta h$ с точностью $\pm 0,1$ мм, а деформации Δb и Δl в поперечных направлениях определяли по результатам прямых измерений на образце посредством мерительной линейки; точность при этом составляла ± 1 мм.

Для выявления масштаба эффектов запаздывания деформаций провели два выборочных испытания на прямую ползучесть (на базе 15 суток) и обратную ползучесть (в течение 3 суток).

Чтобы проиллюстрировать неоднородность деформирования при испытании, на боковой и торцевой поверхностях бруса были предварительно нанесены контрастным маркером сетчатые линии; форму указанных линий фиксировали фотоаппаратом на начальной и конечной стадиях опыта (рис. 8).

На основании проведенных испытаний была установлена деформационная характеристика упругого элемента опор, представленная на рис. 9.

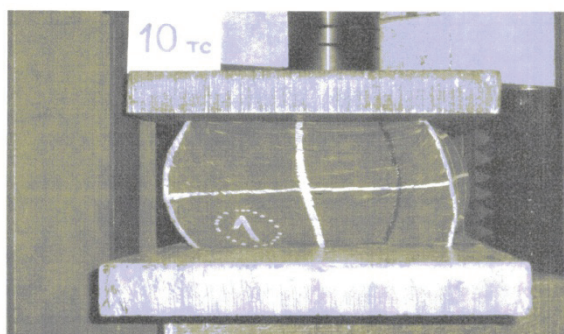


Рисунок 8. Вид резинового бруса в процессе испытания

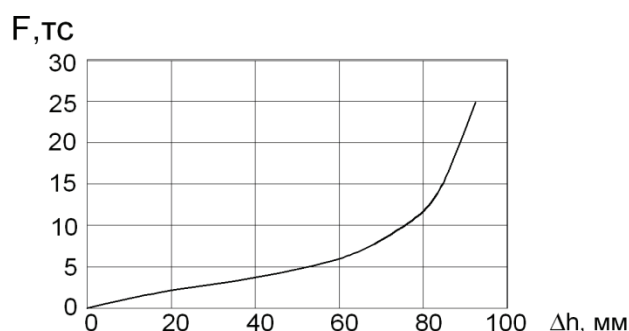


Рисунок 9. Зависимость осадки резинового бруса от нагрузки

С учетом конструкции опор и их основных размеров (рис. 6) на основании выполненного экспериментального исследования были сформулированы следующие выводы:

- при максимальной проектной нагрузке каждый брус, входящий в состав опоры, будет деформироваться независимо от других брусьев, т.к. максимальные поперечные деформации не превосходят значения зазора между брусьями;
- общая сила реакции, создаваемая опорой, определяется суммой реакций отдельных брусьев;
- деформационные характеристики опор полностью восстанавливаются за период времени отстоя батопортов в доковой камере.

В этой связи в качестве расчетной характеристики собственной жесткости опор можно принять экспериментальную характеристику жесткости фрагмента бруса, умноженную на отношение общей длины резиновых брусьев опоры к длине испытанного фрагмента бруса.

Жесткость опор с учетом характеристик материала и размеров контактной площадки была максимально приближена к идеальной жесткости, выявленной ранее путем математического моделирования посадки батопорта на порог.

Заключение

Выполненные авторами расчеты погружения батопортов на порог, дополненные данными экспериментальных исследований опытного образца гидравлического демпфера и демпфирующих элементов упругих опор, позволили правильно определить параметры балластной системы и системы стабилизации для обеспечения требования по времени и скорости посадки батопортов на порог.

Проведенные на КЗС пусконаладочные испытания затвора судопропускного сооружения С-1 подтвердили правильность результатов экспериментальных исследований и расчетов. Серьезной проверкой работоспособности батопорта и правильности принятых технических решений отчасти были наводнения 2011 года. Фактически было подтверждено, что вывод и посадка батопортов в потоке воды происходили устойчиво, амплитуды вертикальных колебаний батопортов при этом не превышали расчетных и экспериментальных значений, а завершающая фаза посадки батопортов происходила мягко, без заметных соударений.

Большев А.С., Фролов С.А., Чернецов В.А., Филиповская Т.В. Система мягкой посадки плавучего затвора судопропускного сооружения С-1 комплекса защитных сооружений Санкт-Петербурга от наводнений

Литература

1. Erbisti P.C.F. Hydraulic Gates: The State of Art // Water Power Dam Construction. 1981. April. Pp. 43-48.
2. Petitjean M.A. Evolution technologique des barrages mobiles // La Houille blanche. 1981. №2-3. Pp. 141-144.
3. Bhargava V.P., Narasimhan, S. Pressure Fluctuations on Gates // J. of Hydraulic Res. 1991. Vol. 27. Pp. 215-231.
4. Cassidy J. Gated Spillway and other controlled release facilities, and dam safety // ICOLD Beijing congress Q79. 2000. Pp. 735-778.
5. Giszas H. Sturmflutschutz: Herausforderungen und Sicherheitskonzept (Protection against storm floods: Challenges and safety concept) // HTG-Kongress. Stuttgart, 17-20.09.2003. Pp. 125-131.
6. Sourne, H., Rodet J.C., Clanet C. Crashworthiness Analysis of a Plane Lock Gate Impacted by Different River Ships // PIANC Bull. 2003. №113. Pp. 105-113.
7. Sehgal C. Selection Criteria for Gates and Operating Equipment for Spillway // ICOLD, Beijing Congress, Q79. 2000. Pp. 275-298.
8. Wieland W. Seismic Aspects of Dam // Proceedings of 21 Congress on Large Dams (ICOLD), June. 2003. Montreal, Canada. Vol. 3. Question 83. Pp. 1291.
9. Афремов А.Ш., Смолина Н.А. Разработка математической модели динамики и исследование движения батопорта при погружении на порог судопропускного сооружения С-1 в условиях волнения // Труды ЦНИИ им. акад. А. Н. Крылова. 2009. №44. С. 53-68.
10. Афремов А.Ш., Житнюк А.П., Левченко В.Н., Митрофанов Е.Ф., Смолина Н.А. Исследование гидродинамики батопорта судопропускного канала С-1 защитного комплекса Санкт-Петербурга от наводнений на основе созданной экспериментальной установки циркуляционного бассейна и разработка обводов, обеспечивающих безопасность их эксплуатации // Труды ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова. 2009. №44. С. 33-52.
11. Судольский Г.А., Алексеевская М.В. Гидравлические исследования работы сегментного батопорта судопропускного сооружения С-1 комплекса защитных сооружений Санкт-Петербурга от наводнений // Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. 2006. Т. 245. С. 93-100.
12. Василевский А.Г. Участие ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева в создании комплекса защитных сооружений Санкт-Петербурга от наводнений // Гидротехническое строительство. 2011. №9. С. 88-94.
13. Купреев В.В., Сухоруков А.Л., Чернецов В.А. Математическое моделирование динамики плавучего затвора при посадке на порог // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2008. Т. 1. №2. С. 57-66.
14. Большев А.С., Климович В.И., Чернецов В.А. Исследование и доработка плавучего затвора судопропускного сооружения С-1 Комплекса защиты Санкт-Петербурга от наводнений // Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. 2012. Т. 266. С. 109-131.
15. Дербаремдикера А.Д. Гидравлические амортизаторы автомобилей. М.: Машиностроение, 1969. 132 с.
16. Гиргидов А.Д. Механика жидкости и газа. СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2002. 544 с.
17. Бахвалов Н. С., Жидков Н. П., Кобельков Г. М. Численные методы. М.: Бином, 2001. 630 с.
18. Каханер Д., Моулер К., Нэш С. Численные методы и программное обеспечение. М.: Мир, 2001. 575 с.
19. Большев А.С., Фролов С.А., Михаленко Е.Б. Математическое моделирование поведения морских плавучих сооружений // Труды СПбГПУ. 2007. №502. С. 252-274.
20. Большев А.С., Фролов С.А. Программный комплекс «Anchored Structures» для моделирования поведения морских плавучих заякоренных сооружений // Труды XII Всероссийской научно-практической конференции МОРИНТЕХ-ПРАКТИК. 2011. С. 82-86.
21. Боровков А.А. Математическая статистика. Новосибирск: Институт математики, 1997. 772 с.
22. Адлер Ю.П., Маркова Е.В., Грановский Ю.В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. М.: Наука, 1976. 278 с.
23. Павлов П.А., Паршин Л.К., Мельников Б.Е., Шерстнев В.А. Соппротивление материалов. СПб.: Лань, 2007. 592 с.

**Александр Станиславович Большев, Санкт-Петербург, Россия*

Тел. раб.: +7(812)297-59-54; эл. почта: bolshev@cef.spbstu.ru

© Большев А.С., Фролов С.А., Чернецов В.А., Филиповская Т.В., 2012

Большев А.С., Фролов С.А., Чернецов В.А., Филиповская Т.В. Система мягкой посадки плавучего затвора судопропускного сооружения С-1 комплекса защитных сооружений Санкт-Петербурга от наводнений

doi: 10.5862/MCE.35.13

The damping system for floating caisson of C-1 navigation pass of St.-Petersburg flood protection barrier

A.S. Bolshev, S.A. Frolov, T.V. Filipovskaya,
Saint-Petersburg State Polytechnical University, Saint-Petersburg, Russia;
V.A. Chernetsov,
CDB ME "Rubin", Saint-Petersburg, Russia
+7(812)297-59-54; e-mail: bolshev@cef.spbstu.ru

Key words

floating caisson; floating dam; water level difference; sea roughness; mathematical modeling; experimental research; hydraulic damper; elastic damper support

Abstract

Floating caisson of navigation pass C-1 is designed for shutdown in case of threat of flooding the main ship canal in St.-Petersburg flood protection barrier. Conditions, in which the floating caisson must work, resulted in creation of a special design.

Research results of floating caisson damping system of C-1 navigation pass are presented in the study. Substantial vibrations of floating dams in the process of putting it on the threshold caused by wave disturbance and flow determined the necessity of the development of special devices, providing damping these oscillations in the final phase of the dam immersion. Soft-landing system of each floating dam involved the groups of hydraulic dampers and supporting structures, equipped with damping elements.

The data received by mathematical modeling and by means of physical experiment are stated. The investigation became the basis for the developing and perfecting the floating caisson damping system elements during the ship canal C-1 shutdown.

Commissioning tests confirmed the validity of the research results and calculations.

References

1. Erbisti P.C.F. Hydraulic Gates: The State of Art. *Water Power & Dam Construction*. 1981. April. Pp. 43-48.
2. Petitjean M.A. Evolution technologique des barrages mobiles. *La Houille blanche*. 1981. No. 2-3. Pp. 141-144.
3. Bhargava V.P., Narasimhan, S. Pressure Fluctuations on Gates. *J. of Hydraulic Res.* 1991. Vol. 27. Pp. 215-231.
4. Cassidy J. Gated Spillway and other controlled release facilities, and dam safety. *ICOLD Beijing congress Q79*. 2000. Pp. 735-778.
5. Giszas H. Sturmflutschutz: Herausforderungen und Sicherheitskonzept (Protection against storm floods: Challenges and safety concept). *HTG-Kongress*. Stuttgart, 17-20.09.2003. Pp. 125-131.
6. Sourne H., Rodet J.C., Clanet C. Crashworthiness Analysis of a Plane Lock Gate Impacted by Different River Ships. *PIANC Bull.* 2003. No. 113. Pp. 105-113.
7. Sehgal C. Selection Criteria for Gates and Operating Equipment for Spillway. *ICOLD Beijing Congress Q79*. 2000. Pp. 275-298.
8. Wieland W. Seismic Aspects of Dam. *Proceedings of 21 Congress on Large Dams (ICOLD)*. June 2003. Montreal, Canada. Vol. 3. Question 83. Pp. 1291.
9. Afremov A.Sh., Smolina N.A. *Trudy TSNII im. Akad. A.N.Krylova*. 2009. No. 44. Pp. 53-68. (rus)
10. Afremov A.Sh., Zhitnyuk A.P., Levchenko V.N., Mitrofanov Ye.F., Smolina N.A. *Trudy TSNII im. Akad. A.N.Krylova*. 2009. No. 44. Pp. 33-52. (rus)
11. Sudolsky G.A., Alexeevskaya M.V. *Izvestiya VNIIG im. B.Ye. Vedeneeva*. 2006. No. 245. Pp. 93-100. (rus)

Bolshev A.S., Frolov S.A., Chernetsov V.A., Filipovskaya T.V. The damping system for floating caisson of C-1 navigation pass of St.-Petersburg flood protection barrier

12. Vasilevskiy A.G. *Gidrotekhnicheskoye stroitelstvo*. 2011. No. 9. Pp. 88-94. (rus)
13. Kupreyev V.V., Sukhorukov A.L., Chernetsov V.A. *Fundamentalnaya i prikladnaya gidrofizika*. 2008. Vol. 1. No. 2. Pp. 57-66. (rus)
14. Bolshev A.S., Klimovich V.I., Chernetsov V.A. *Izvestiya VNIIG im. B.Ye. Vedeneeva*. 2012. No. 266. Pp. 109-131 (rus)
15. Derbaremdikera A.D. *Gidravlicheskiye amortizatory avtomobiley* [Hydraulic shock absorbers cars]. Moscow: Mashinostroyeniye, 1969. 132 p. (rus)
16. Girgidov A.D. *Mekhanika zhidkosti i gaza* [Fluid and gas mechanics]. St.Petersburg: SPbSTU, 2002. 544 p. (rus)
17. Bakhvalov N.S., Zhidkov N.P., Kobelkov G.M. *Chislennyye metody* [Numerical methods]. Moscow: Binom, 2001. Pp. 363—375 (rus)
18. Kakhaner D., Mouler K., Nesh C. *Chislennyye metody i programmnoye obespecheniye* [Numerical methods and software]. Moscow: Mir, 2001. 575 p. (rus)
19. Bolshev A.S., Frolov S.A., Mikhailenko Ye.B. *Trudy of SPbSTU*. St. Petersburg: SPbSTU, 2007. No. 502. Pp. 252-274. (rus)
20. Bolshev A.S., Frolov S.A. *Proceedings of XII Conference MORINTEKH-PRAKTIK*. 2011. Pp. 82-86. (rus)
21. Borovkov A.A. *Matematicheskaya statistika* [Mathematical statistics]. Novosibirsk: Institutmatematiki, 1997. 772 p. (rus)
22. Adler YU.P., Markova Ye.V., Granovskiy Yu.V. *Planirovaniye eksperimenta pri poiske optimalnykh usloviy* [Design of experiments in the search of optimal conditions]. Moscow: Nauka, 1976. 278 p. (rus)
23. Pavlov P.A., Parshin L.K., Melnikov B.Ye., Sherstnev V.A. *Soprotivleniye materialov* [Strength of Materials]. St. Petersburg : Lan, 2007. 592 p. (rus)

Full text of this article in Russian: pp. 103-112