

На правах рукописи

Григорьев Игорь Николаевич

ОБОСНОВАНИЕ ПРИНЦИПИАЛЬНЫХ СХЕМ УЗЛА СОПРЯЖЕНИЯ ВО-
ДОКЛИНОВОГО СУДОПОДЪЕМНИКА С ВЕРХНИМ БЬЕФОМ

Специальность 05.23.07 – “Гидротехническое строительство”

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2004

Работа выполнена в Государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет», на кафедре Морских и воднотранспортных сооружений.

Научный руководитель - доктор технических наук,
профессор Гарибин Павел Андреевич

Официальные оппоненты - доктор технических наук,
профессор Колосов Михаил Александрович
кандидат технических наук,
Уварова Екатерина Валентиновна

Ведущая организация - ОАО «Ленморниипроект»

Защита состоится « 15 » февраля 2005 г. в 16 часов 30 минут на заседании диссертационного совета Д 212.229.15 при Государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет» по адресу: 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая 29, Гидрокорпус II, аудитория 411.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке ГОУ «СПбГПУ».

Автореферат разослан « 15 » января 2005 г.

Исполняющий обязанности ученого секретаря
диссертационного совета д.т.н., проф.

Бухарцев В.Н.

Общая характеристика работы

Актуальность диссертации

Внутренние водные пути России являются важнейшей частью транспортной составляющей инфраструктуры государства. Реконструкция и модернизация существующих водных коммуникаций (это направление считается одним из главных в Федеральной целевой программе «Внутренние водные пути России»), а также строительство новых современных транспортных магистралей на основе прогрессивных ресурсосберегающих технологий является одной из первоочередных задач, которые необходимо решить в ближайшее время.

Эффективность использования водного транспорта во многом определяется выбором рациональных типов и конструкций судопропускных сооружений. Установлено, что при благоприятных топографических условиях, и при необходимости сбережения воды наиболее эффективным типом судопропускного сооружения является водоклиновый судоподъемник. В нашей стране до сих пор, не все вопросы, связанные с проектированием, строительством и эксплуатацией водоклиновых судоподъемников, проработаны в полной мере. Это относится и к теоретическим исследованиям узлов сопряжения судоподъемника с верхним бьефом.

Принятие научно-обоснованных решений по выбору конструкции узла сопряжения водоклинового судоподъемника с верхним бьефом позволит сократить время прохождения судов по водному пути.

Цель работы

заключалась в совершенствовании конструкции водоклинового судоподъемника и обосновании возможности применения принципа работы водоклинового судоподъемника в других типах судопропускных сооружений.

Задачи исследования

В соответствии с целью работы были поставлены следующие задачи исследования:

1. Провести анализ возможных конструкций водоклиновых судоподъемников и узлов сопряжения с верхним бьефом, а также конструктивных решений в других типах водосберегающих судопропускных сооружений, применимых для узла сопряжения с верхним бьефом.

2. Провести анализ существующих методов определения гидродинамических процессов в наклонных судоподъемниках и рассмотреть задачу о двух общающихся сосудах, один из которых имеет изменяемую конфигурацию.

3. Получить аналитическое решение для определения формы свободной поверхности в различных вариантах узла сопряжения с верхним бьефом.

4. Определить параметры нового типа парного водосберегающего судопропускного сооружения (шлюз со сберегательным бассейном – водоклиновым судоподъемником).

Научная новизна

1. Впервые получено аналитическое решение для определения гидродинамических явлений в узле сопряжения водоклинового судоподъемника с верхним бьефом, позволяющее обосновать выбор конструкции и габаритные размеры судопропускного сооружения.

2. Разработана методика и получены зависимости для определения параметров нового типа парного водосберегающего судопропускного сооружения

Личное участие автора в получении результатов, изложенных в диссертации, заключалось в постановке и решении задачи по определению гидродинамических явлений в узле сопряжения водоклинового судоподъемника с верхним бьефом при различных начальных и граничных условиях; разработке методики и получении зависимостей для определения параметров нового типа парного водосберегающего судопропускного сооружения.

Достоверность и обоснованность

научных положений и выводов определяется применением фундаментальных законов гидродинамики, известных аналитических зависимостей математической физики, современных численных методов, анализом обоснованности теоретических допущений и связанных с этим погрешностей расчета, а также удовлетворительным качественным и количественным согласованием полученных расчетных данных с экспериментальными и натурными данными, полученными другими авторами.

Практическая ценность работы

Получены зависимости, позволяющие обосновать выбор конструкции и габаритные размеры водоклинового судоподъемника; разработана методика определения параметров нового типа парного водосберегающего судопропускного сооружения, пригодная для использования на стадии проектирования судопропускного сооружения.

Апробация работы

Основные положения диссертационной работы докладывались на Научно-методической конференции СПбГУВК 1998 г.; научных семинарах кафедры МВТС СПбГУ 2000-2003 г.г.; Межвузовской научной конференции СПбГУ 2002 г.; Межвузовской научной конференции СПбГУ 2003 г.

Публикации

По теме диссертации опубликовано 6 печатных работ.

Структура и объем работы

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 103 наименований и приложения. Она содержит 189 страниц, в том числе: 150 страниц основного текста, 70 рисунков и 3 таблицы.

Содержание работы

Во **введении** обоснована актуальность проблемы. Приведена общая характеристика работы.

В **первой главе** приведен обзор и анализ различных конструкций судопропускных сооружений с точки зрения сбережения воды, используемой при шлюзовании судов. Исходя из анализа различных конструкций судопропускных сооружений, наибольшее сбережение воды при шлюзовании судов обеспечивают шлюзы со сберегательными бассейнами и различные типы судоподъемников. Одним из наиболее рациональных типов судоподъемников является водоклиновый судоподъемник, обеспечивающий высокую скорость транспортировки судов и близкое к 100% сбережение воды.

На основе анализа конструкций предложенных другими авторами для водоклиновых и наклонных судоподъемников проведен выбор рациональных конструкций узла сопряжения водоклинового судоподъемника с верхним бьефом. Даны рекомендации по области использования различных конструкций узла сопряжения в зависимости от колебаний уровня воды в верхнем бьефе и глубины воды на пороге. Схемы рациональных узлов сопряжения водоклинового судоподъемника с верхним бьефом приведены в табл.1.

Во **второй главе** приведен обзор и анализ работ отечественных и зарубежных ученых по исследованиям гидродинамических процессов в наклонных судоподъемниках. Задача о наклонных судоподъемниках тесно связана с известной гидродинамической задачей о движении твердого тела, заполненного массой жидкости со свободной поверхностью. Общее решение этой сложной проблемы рассматривалось ранее Н. Н. Моисеевым, Г. Е. Павленко, Э. А. Пережнянко, Л. Н. Сретенским, П. И. Горьковым а также Г. С. Наримановым, Д.Е. Охоцимским, Б.И. Рабиновичем, В. В. Румянцевым на ряде частных примеров.

Исследованиям волновых процессов в наклонных судоподъемниках посвящены работы О. Ф. Васильева, А. А. Атавина, В. П. Сапцина, А. М. Гапеева, А. П. Яненко.

	Тип сопряжения водоклинового судоподъемника с верхним бьефом	Схема сопряжения: <i>1 – дно наклонного лотка; 2-судовозный лоток; 3– передвижной щит; 4–судно; 5–ворота шлюзов (по- лушлюзов); 6 - промежуточные ворота</i>	Рекомендуемая область исполь- зования схемы в зависимости от ($\Delta h/h_l$)	Относительное увеличение глубины воды у передвижного щита ($\Delta H/h_l$)
	2	3	4	5
А	Трансформация геометрии объема водного клина передвижным щи- том		0,2-0,5	0,2-0,6
Б	Тип А при пере- менном угле на- клона судовозного лотка		0,01-0,2	(-0,5)-0,2
В	Тип Б с использо- ванием промежу- точных ворот		0,5-1,5	0,2-0,6
Г	Тип А + шлюз в верхнем бьефе		>1,5	0,2-0,6
Д	Тип Б + Шлюзо- вание в камере на горизонтальном участке судовоз- ного лотка		>1,5	(-0,5)-0,1

Табл.1. Схемы узлов сопряжения водоклин. судоподъемника с верхним бьефом.

Δh – колебания уровня воды в верхнем бьефе; h_l – глубина воды на пороге

ΔH – изменение глубины воды у передвижного щита.

При разработке первого водоклинового судоподъемника Монтеш (1973 г.) были проведены исследования гидродинамических явлений, происходящих в клине воды. Некоторые результаты исследований опубликованы проф. J. Aubert, J. Chabert.

С середины 70-х годов прошлого века исследования гидродинамики водоклиновых судоподъемников проводились и в России, на кафедре «Водные пути и порты» ЛПИ им. М. И. Калинина (СПб ГПУ). Изучению гидродинамики судоподъемника был посвящен комплекс экспериментально-теоретических исследований. Получено аналитическое решение задачи для случая, когда клин воды, свободная поверхность жидкости в котором занимает горизонтальное положение, приобретает переменное во времени ускорение движения. Проведенные исследования позволили дать рекомендации по выбору оптимальных, исходя из обеспечения максимальной пропускной способности судоподъемника, режимов движения шита.

Большой вклад в исследования водоклинового судоподъемника внесли отечественные ученые: А. И. Альхименко, К. Н. Шхинек, М. А. Колосов, Е. В. Уварова, П. А. Гарибин, С. В. Ларионов, В. Я. Кошкин, А. Б. Мошков, Г. В. Симаков, Д. Айгнер, В. Леске. В результате коллективных работ была создана новая модификация водоклинового судоподъемника - полукамерный вариант.

Теоретические исследования гидродинамических явлений, в узле сопряжения судоподъемника с верхним бьефом, в нашей стране до настоящего времени не проводились. Третья глава данной работы посвящена изучению этих явлений.

Рассмотрена задача о двух сообщающихся сосудах, один из которых имеет изменяющуюся конфигурацию. Применению решения данной задачи для определения параметров нового типа парного водосберегающего сооружения посвящена четвертая глава данной работы.

В третьей главе рассмотрена задача о нахождении формы свободной поверхности в узле сопряжения водоклинового судоподъемника с верхним бьефом (рис.1.) при различных начальных и граничных условиях.

В предлагаемом аналитическом решении приняты следующие допущения: поперечное сечение судовозного лотка неизменно по длине; скорости течения жидкости в направлении стен практически отсутствуют; упругостью лотка и передвигного щита можно пренебречь, считая их абсолютно жесткими; уклон дна лотка незначителен (порядка 2-5 %), поэтому, угол наклона лотка α можно принять численно равным значению своего $tg(\alpha)$ и $sin(\alpha)$; движение жидкости двумерное без разрывов сплошности, а сама жидкость однородная и идеальная.

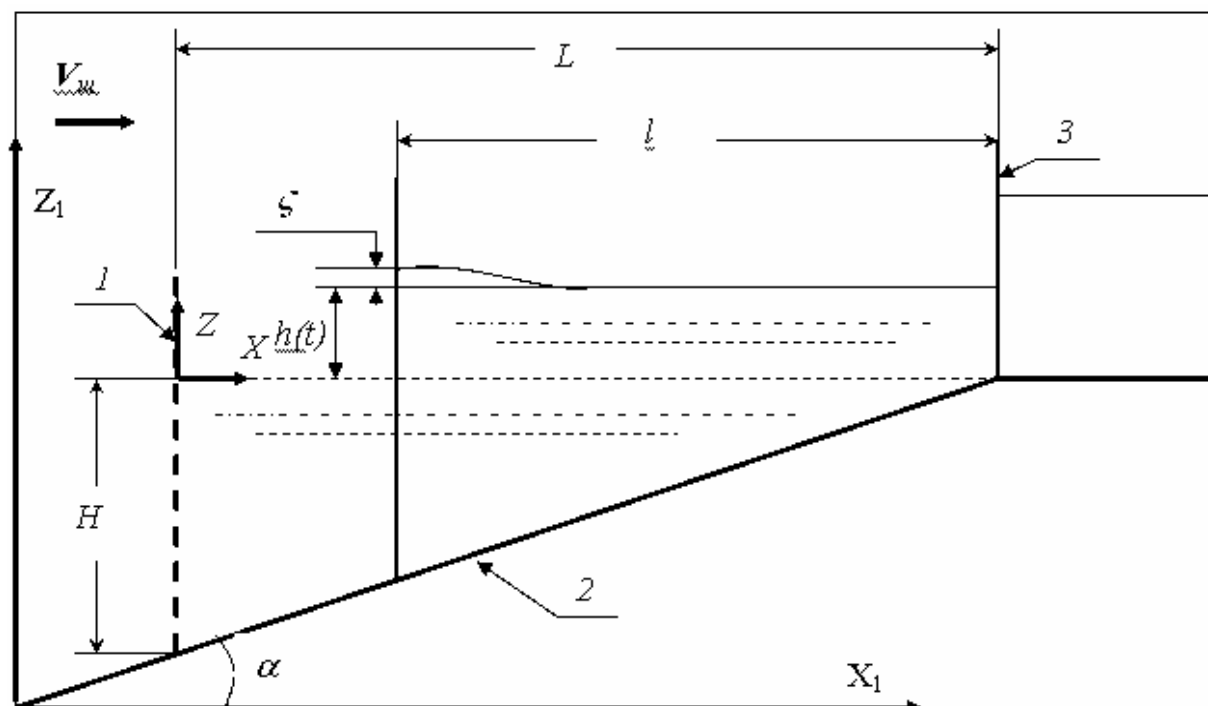


Рис.1. Расчетная схема узла сопряжения водоклинового судоподъемника с верхним бьефом.

1- передвигной щит, 2 – судовозный лоток, 3 - полушлюз

Перемещение передвигного щита судоподъемника рассматривалось в неподвижной системе координат X_1Z_1 . Изменение формы свободной поверхности

отнесено к подвижной системе координат XZ , связанной со щитом. Началом системы координат XZ выбрана точка на передвижном щите на расстоянии H от дна судовозного лотка. Оси системы XZ параллельны соответствующим осям X_1Z_1 и перемещаются поступательно относительно них.

При сделанных допущениях для внутренней области массы жидкости уравнения движения и неразрывности будут иметь вид:

$$a + g \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial t} = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial Vh}{\partial x} = 0, \quad (2)$$

где $h = \zeta + H - \alpha x + h(t) - \frac{at^2\alpha}{2}$ - расстояние от дна судовозного лотка до свободной поверхности. ζ - ордината свободной поверхности, H - уровень воды у передвижного щита в начальный момент времени, α - угол наклона судовозного лотка, V - скорость движения массы воды, $h(t) = \frac{at^2\alpha}{2} \left(L - \frac{at^2}{4} \right) / \left(L - \frac{at^2}{2} \right)$ - изменение уровня свободной поверхности, достигаемое за счет движения передвижного щита относительно ворот верхнего полушлюза, a - ускорение.

Граничные условия на передвижном щите и воротах верхнего полушлюза определялись из условия непротекания жидкости. В качестве начального условия было принято предположение, что в начальный момент времени свободная поверхность находится в состоянии покоя, т.е. параллельна оси X .

Применяя преобразования Лапласа по x и t , для описания формы свободной поверхности было получено уравнение Вольтера второго рода, решение которого, было найдено при помощи метода Пикара (последовательных приближений). Решение получено в виде сходящихся рядов, описывающих прямую и обратную волны, членами которых являются функции Бесселя.

Форма поверхности прямой и обратной волн определяются формулами вида:

$$\zeta(x, t) = \frac{a}{g} e^{\frac{x}{2L}} \left\{ \left(1 + \left(\frac{\alpha}{2\sqrt{\beta}} t \right)^2 \right) \sum_{k=0}^{\infty} \sum_{i=0}^{\infty} \left\{ A_k x J_{2k+1} \left(\frac{\alpha}{2\sqrt{\beta}} t \right) + A_k x J_{2k+3} \left(\frac{\alpha}{2\sqrt{\beta}} t \right) + \dots \right\} \right\} \quad (3)$$

Значения для коэффициентов A_k были получены с точностью до 10^{-6} , установлено, что $A_k \leq 1$. Доказательство сходимости бесконечных рядов (3) проведено исходя из известных соотношений:

$$\sum_{k=0}^{\infty} A_k J_{2k+1}(x) \leq \sum_{k=0}^{\infty} J_{2k+1}(x) = \frac{1}{2} \int_0^x J_0(t) dt < \int_0^{\infty} J_0(t) dt = 1. \quad (4)$$

Анализ бесконечных рядов (3) показал, что для инженерных расчетов можно ограничиться первыми 12 членами ряда. Сравнение найденной формы свободной поверхности с экспериментальными и натурными данными, полученными другими авторами, показало хорошее совпадение по качественным и количественным параметрам.

Аналогичным образом проводилось решение задачи о нахождении формы свободной поверхности в узле сопряжения при движении передвижного щита к нижнему бьефу.

В высоконапорных гидроузлах дожим водного клина передвижным щитом является завершающим этапом движения водоклинового судоподъемника от нижнего бьефа к верхнему. Соответственно форма свободной поверхности и скорость передвижного щита в начальный момент времени будут отличны от нуля. И начальные условия могут быть записаны, как $\zeta(x, 0) = F_{\kappa}(x)$, $\frac{\partial \zeta(x, 0)}{\partial t} = F'_{\kappa}(x)$, где $F_{\kappa}(x)$ - функция, описывающая форму свободной поверхности в начальный момент времени, найденная из решений других авторов. Решение данной задачи проводилось аналогично описанному выше.

Задача о нахождении формы свободной поверхности в узле сопряжения с промежуточным затвором решалась в два этапа. На первом этапе определялась форма свободной поверхности до открытия промежуточного затвора. Второй

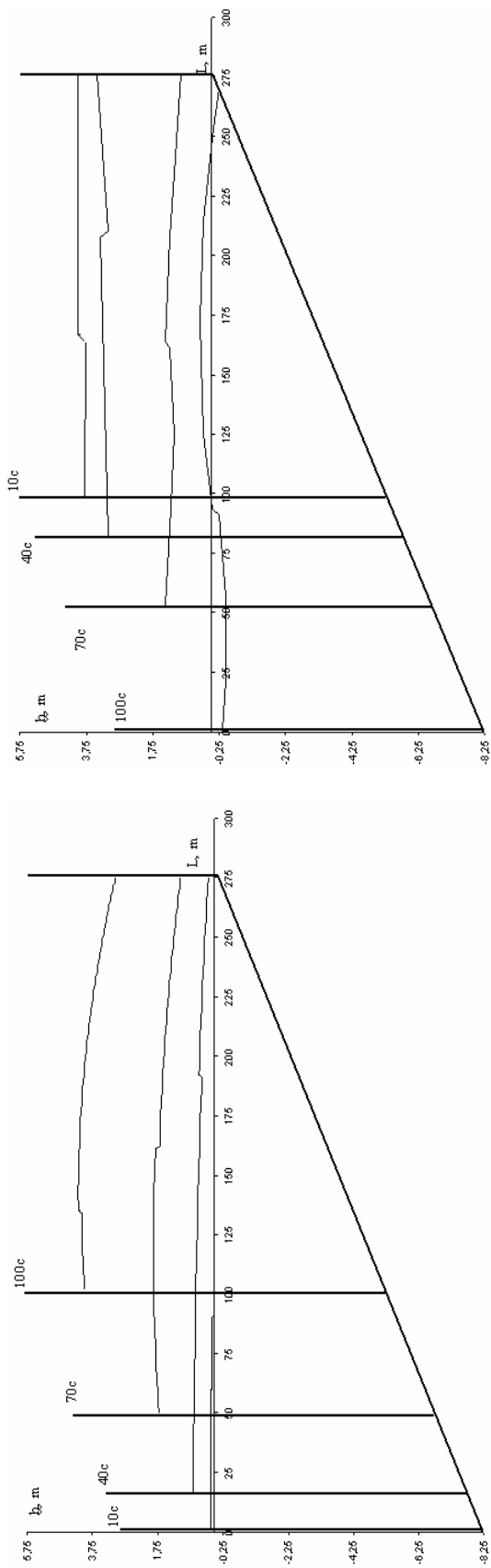
этап решения заключался в нахождении формы свободной поверхности после открытия промежуточного затвора, с учетом данных полученных на первом этапе решения. Решение данной задачи проводилось аналогично, описанному выше.

На рис.2. представлены иллюстративные примеры использования полученного решения для узла сопряжения водоклинового судоподъемника с верхним бьефом, при различных начальных и граничных условиях. Расчеты проводились при $H=8,25m$, $L=275m$, $a=0,02m/c^2$.

Определение изменения уровня свободной поверхности жидкости у передвижного щита показало, что максимальное увеличение (уменьшение) уровня у щита, вызванное волновыми явлениями, составляет не более 7% относительно уровня состояния покоя жидкости при соответствующем положении щита.

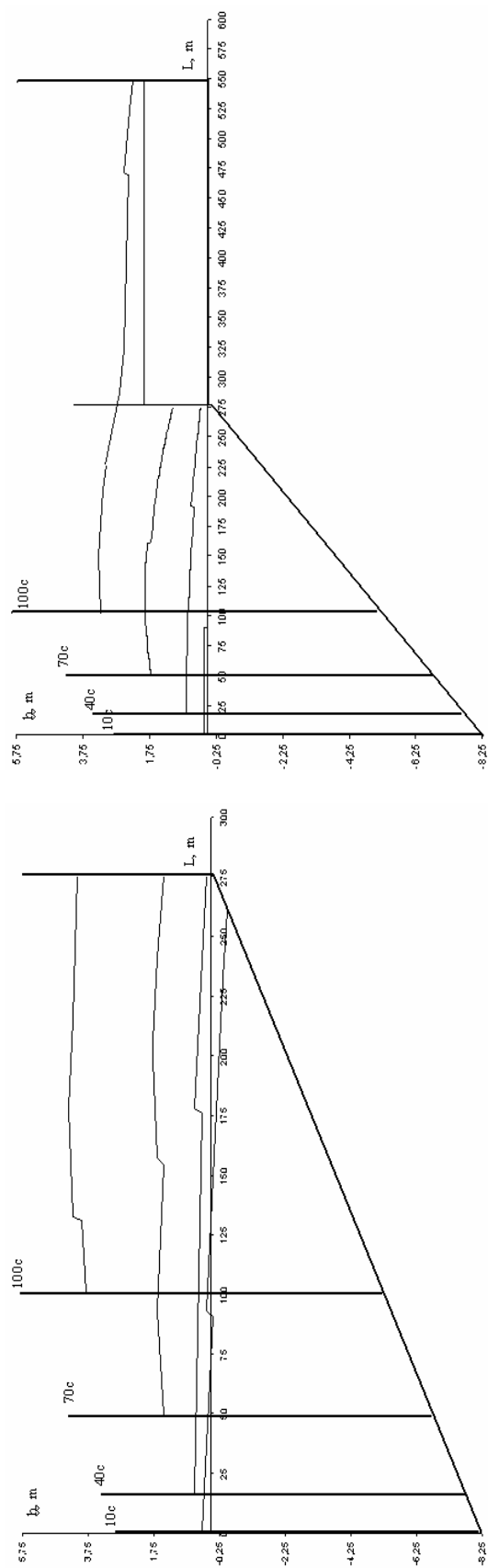
Четвертая глава посвящена определению параметров парного водосберегающего судопропускного сооружения. При больших напорах на шлюз применение водоклинового судоподъемника в качестве сберегательного бассейна позволяет достигнуть почти 100% сбережения воды при шлюзовании (рис.3.). Данная схема может быть реализована благодаря применению промежуточных ворот в наклонном лотке водоклинового судоподъемника.

Принцип работы парного водосберегающего судопропускного сооружения: Передвижной щит ПЩ (рис.3.) в начальный момент времени находится на некотором расстоянии l от ворот B_1 первого отсека наклонного лотка. Пространство между передвижным щитом и воротами B_1 первого отсека заполнено водой, уровень которой совпадает с уровнем l в камере шлюза. Передвижной щит начинает движение в сторону ворот B_2 второго отсека наклонного лотка, одновременно с этим происходит открытие затвора $З_1$. Вода из камеры шлюза по водопроводной системе ВС поступает в первый отсек наклонного лотка (рис.3.А1). Затем открываются ворота B_2 и передвижной щит проходит мимо них и над затвором $З_2$. Затвор $З_1$ начинает закрываться а затвор $З_2$ – открываться



Движение шита к верхнему бьефу.

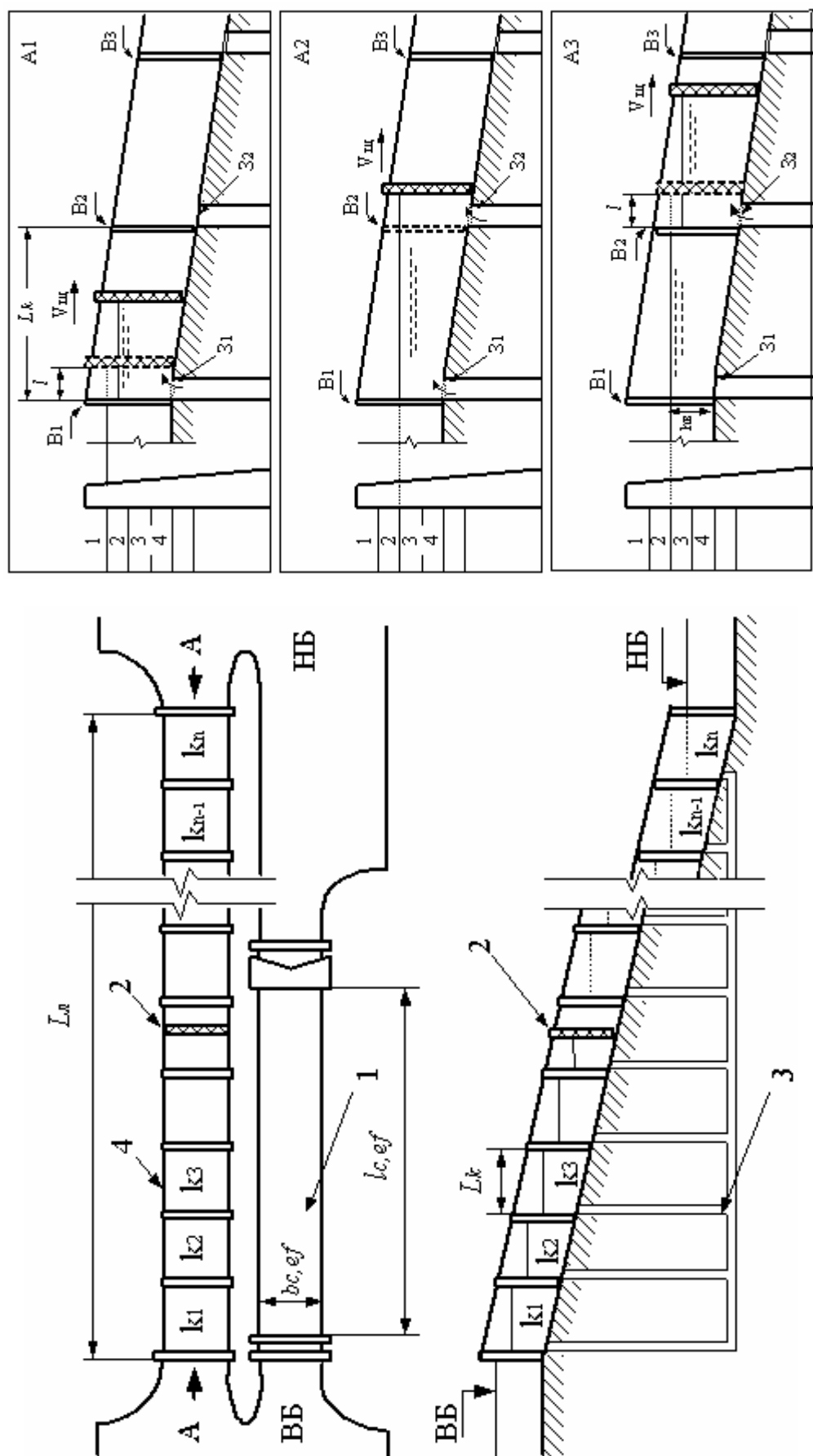
Узел сопряжения в высоконапорном гидроузле.



Движение шита к нижнему бьефу.

Узел сопряжения с промежуточным затвором.

Рис.2. Изменение уровня и формы свободной поверхности в узле сопряжения с верхним бьефом.



Расчетная схема

Принцип работы

Рис.3. Парное водосберегающее судопропускное сооружение с разбиением напора на части.

l - Камера шлюза, 2 - передвижной щит, 3 - водопроводная система, 4 -наклонный лоток, $k_1, k_2, \dots, k_n$ - отсеки наклонного лотка.

расход воды, поступающей в наклонный лоток, при этом должен оставаться практически неизменным (рис.3.А2). Ворота B_2 закрываются, при этом их полное закрытие должно совпасть по времени с закрытием затвора $З_1$, полным открытием затвора $З_2$ и достижением свободной поверхности в камере шлюза уровня 2. Передвижной щит в этот момент будет находиться на расстоянии l от ворот B_2 , таким образом призма воды в камере шлюза, заключенная между уровнями 1 и 2 переместится в первый отсек наклонного лотка (рис.3.А3). Процесс заполнения водой остальных отсеков наклонного лотка полностью аналогичен описанному выше.

В качестве исходных данных при определении параметров парного водосберегающего судопропускного сооружения с разбиением напора на части принимаются: $H_d = H_{\max} - H_{\min}$ - максимально возможный напор в камере шлюза; $V_{ш} = l_{c,ef} b_{c,ef} H_d$ - максимальный объем призмы воды перемещаемой из камеры шлюза в отсеки наклонного лотка; $t_{он}$ - время, за которое максимальная призма воды должна быть перемещена из камеры шлюза в отсеки наклонного лотка; $H_{0ш}$ - практически осуществимая глубина воды у передвижного щита; практически осуществимые режимы движения передвижного щита ($V_{щ}$, α_x - скорость и ускорение передвижного щита). Наиболее оптимальным режимом движения щита является режим, при котором щит проходит мимо промежуточных ворот наклонного лотка с постоянной скоростью, разгоняясь в отсеке k_1 , и останавливается за воротами B_{n+1} . Для поддержания постоянного значения расхода необходимо применение переменного угла наклона дна в отсеках лотка (рис.4.) Предлагаемая методика, основанная на использовании частного случая задачи о двух сообщающихся сосудах, один из которых имеет изменяющуюся конфигурацию, позволяет определить основные параметры парного водосберегающего судопропускного сооружения, а также параметры системы питания. Ниже приведены некоторые результаты, иллюстрирующие применение данной методики.

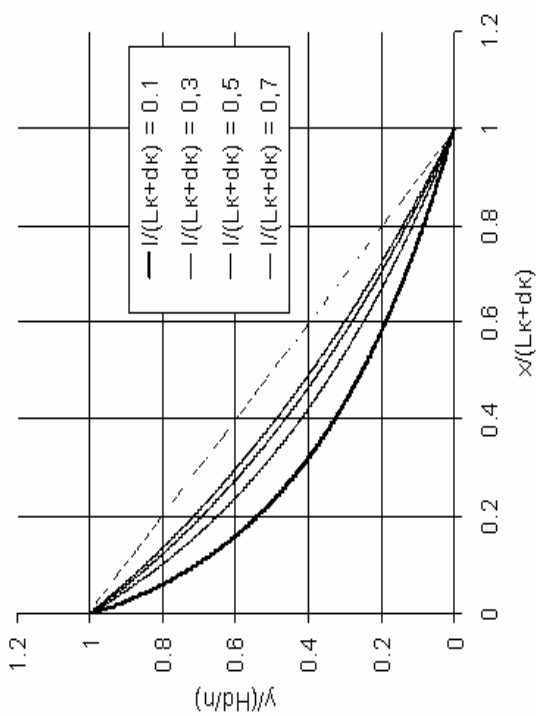


Рис.4. Форма дна отсека лотка с переменным уклоном.

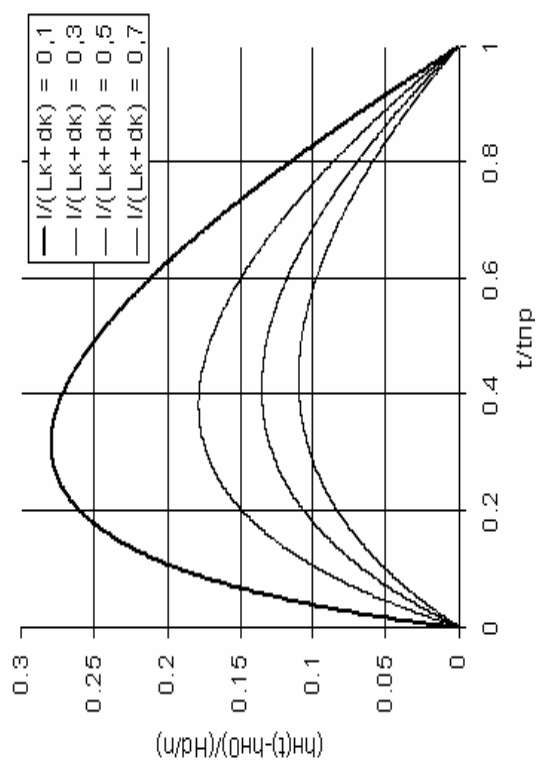
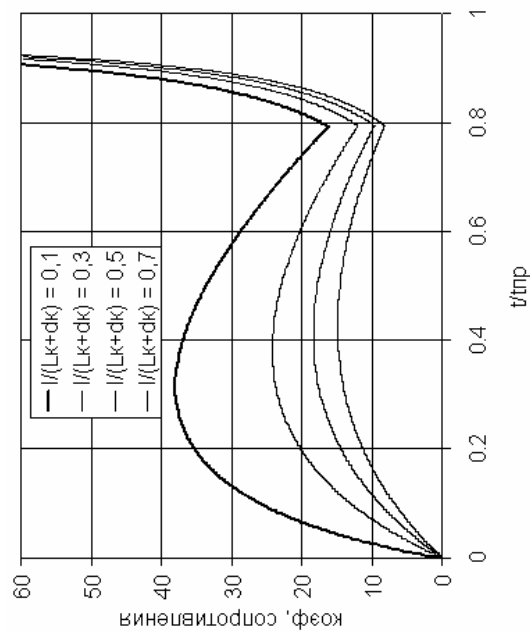
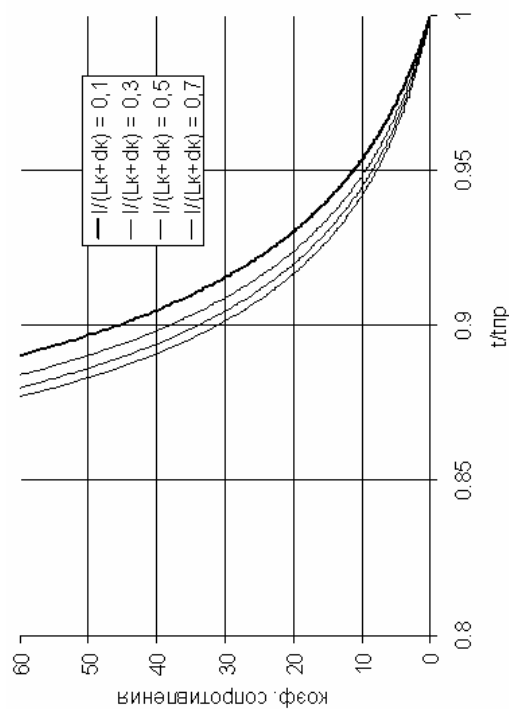


Рис.5. Изменение напора при режиме опорожнения камеры шлюза



k -й затвор



$k+1$ -й затвор

Рис.6. Изменение коэффициента сопротивления затворов при режиме опорожнения камеры шлюза.

Выводы

По результатам проведенных исследований могут быть сделаны следующие основные выводы:

1. Проведена классификация конструкций узла сопряжения водоклинового судоподъемника с верхним бьефом.
2. Определена область применения различных конструкций узла сопряжения в зависимости от колебаний уровня воды в верхнем бьефе.
3. Проведен обзор существующих методов определения гидродинамических процессов в наклонных судоподъемниках. На основании анализа данных методов осуществлена постановка задачи для завершающей стадии движения щита водоклинового судоподъемника (участок сопряжения с верхним бьефом), при различных начальных и граничных условиях.
4. Впервые получено аналитическое решение по определению гидродинамических явлений для различных принципиальных схем узла сопряжения водоклинового судоподъемника с верхним бьефом, позволяющее обосновать выбор конструкции и габаритные размеры судопропускного сооружения.
5. Выявлен частный случай задачи о двух сообщающихся сосудах, один из которых имеет изменяющуюся конфигурацию, делающий возможным, на протяжении значительной части времени протекания процессов наполнения–опорожнения, поддерживать значения напора и расхода постоянными.
6. Разработана методика определения параметров нового типа парного водосберегающего судопропускного сооружения. Получены зависимости позволяющие: по известным размерам камеры шлюза, времени шлюзования и практически осуществимой глубине воды у передвижного щита определить габариты и форму дна наклонного лотка, разбитого на отсеки; необходимый начальный напор между отсеком наклонного лотка и камерой шлюза; степень открытия затворов системы питания в зависимости от положения передвижного щита относительно ворот отсека наклонного лотка.

По теме диссертации опубликованы следующие работы:

1. Гарибин П.А., Григорьев И.Н. Аналитическое решение задачи определения гидродинамических характеристик полускамерного водоклинового судоподъемника.// Тез. Докл. Науч.-метод. Конф. СПбГУВК. Ч.2. СПб., 1998г.- С.138
2. Гарибин П.А., Григорьев И.Н. Определение гидродинамических характеристик полускамерного водоклинового судоподъемника. // Водные пути и гидротехнические сооружения: Сб. науч. Тр СПбГУВК, Ч. II СПб., 2000г.- С. 233-246
3. Гарибин П.А., Григорьев И.Н. Определение параметров движения передвижного щита водоклинового судоподъемника.// Водные пути и гидротехнические сооружения: Сб. науч. Тр СПбГУВК, Ч. II СПб., 2002г.- С. 195-208
4. Гарибин П.А., Григорьев И.Н. Определение формы свободной поверхности жидкости на стадии трансформации водного клина.// Материалы межвузовской научной конференции СПбГТУ, СПб., 2002г.- С. 25-27
5. Гарибин П.А., Григорьев И.Н. Выбор типа сопряжения водоклинового судоподъемника с верхним бьефом // Материалы межвузовской научной конференции СПбГТУ, СПб., 2003г.- С. 26-28
6. Гарибин П.А., Григорьев И.Н. Гидравлический расчет системы питания парного водосберегающего судопропускного сооружения // Материалы межвузовской научной конференции СПбГТУ, СПб., 2003г.- С. 28-30