

На правах рукописи

Гарибин Павел Андреевич

ВОДНОТРАНСПОРТНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МАЛЫХ ВОДОТОКОВ

Специальность: 05.23.07 - Гидротехническое строительство

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Санкт-Петербург
2003

Работа выполнена в Санкт – Петербургском государственном
политехническом университете

Официальные оппоненты:

Доктор технических наук, профессор	И.О. Алексеев;
Доктор технических наук, профессор	В.Н. Бухарцев;
Доктор технических наук, профессор	Ю.П. Правдивец.

Ведущая организация: ОАО «Ленгидропроект»

Защита состоится 4 ноября 2003 г. в 16 часов на заседании диссертационного совета Д 212.229.15 в Санкт – Петербургском государственном политехническом университете по адресу: 195251, Санкт – Петербург, Политехническая ул., 29, гидрокорпус-II, ауд. 411.

С диссертацией можно ознакомиться в Фундаментальной библиотеке СПбГПУ.

Автореферат разослан « » октября 2003 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
доктор технических наук, профессор

А.Е. Андреев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Речной транспорт и водные пути на территории России имеют длительную историю развития. Сложившаяся к концу девятнадцатого столетия воднотранспортная система обеспечивала перевозку более 30 % грузов. В двадцатом веке образовалась и успешно функционировала Единая глубоководная система европейской части страны. Объемы перевозок водным транспортом увеличились на порядок, хотя удельная доля в суммарном грузообороте уменьшилась до 6 %. Следует отметить, что в странах ЕС в настоящее время среднее значение этого показателя составляет 12 %.

В настоящее время в России протяженность эксплуатируемых водных путей составляет примерно 110 тыс. км. На современном этапе развития водного транспорта в нашей стране первоочередной задачей является его сохранение, модернизация и реконструкция. Тот факт, что водные перевозки наименее трудо- и энергоемки, а гидроэнергетический потенциал наших рек используется всего лишь на 10 %, показывает насущную необходимость строительства транспортно-энергетических гидроузлов. Развитие гидроэнергетики и водного транспорта позволило бы не только сберечь запасы топлива, но и существенно уменьшить объемы перевозок топливных грузов.

В проблему стабилизации и развития системы обеспечения транспортировки грузов входят задачи совершенствования всей инфраструктуры транспортного обслуживания с соблюдением принципов «от двери до двери» и «точно в срок». Здесь на первое место выступает создание равных стартовых транспортно-коммуникационных условий хозяйствования за счет выравнивания транспортной составляющей коммерческих рисков и обеспечения жизнедеятельности населения независимо от места проживания.

В связи с вышеизложенным, разработка основ и методов принятия технических решений по расширению сферы обслуживания водного транспорта за счет воднотранспортного освоения малых рек и выбор рациональных типов и конструкций судопропускных сооружений являются решением важной народнохозяйственной проблемы, новым достижением в области научного обоснования проектирования гидротехнических объектов.

Актуальность рассматриваемых проблем подтверждается тематикой государственных научно-технических программ, в соответствии с которыми выполнялась диссертационная работа:

- Федеральная целевая программа «Внутренние водные пути России» на 1996 – 2000 гг.;
- РМНТП «Развитие транспортной составляющей инфраструктуры Северо-Западного региона России» на 1994 – 2000 гг.;
- «Провести исследования на крупномасштабной модели, разработать на их основе и представить в Минводхоз СССР, Минэнерго СССР, Минречфлот РСФСР рекомендации по применению и проектированию бескамерных

судоподъемников на трактах переброски стока», «Разработать новый тип бескамерного судоподъемника типа “Водяной клин”» – проблема 0.55.08, задание 01.03. 1978 – 1985 гг.

Цель работы. Целью настоящих исследований являлась разработка научно обоснованных предложений по обеспечению эффективности функционирования, сохранности и созданию новых рациональных типов судопропускных сооружений объектов воднотранспортных систем, включающая:

- разработку научно - обоснованной методологии улучшения судоходных условий малой реки;
- ретроспективный анализ шлюзостроения на низконапорных гидроузлах;
- выбор рационального типа судопропускного сооружения для строящихся транспортно-энергетических гидроузлов на малых реках.

Указанная цель достигалась посредством постановки и решения ряда задач:

- Формирование системы ценностей, критериев и ограничений; анализ и оценка традиционных способов улучшения путевых условий; предложения по улучшению судоходных условий с использованием сооружений с наполняемыми элементами; разработка рекомендаций по методике принятия технических решений; постановка оптимизационной задачи для системы транспортное средство – судопропускное сооружение;
- Сбор данных о конструкциях и исследованиях низконапорных шлюзов; качественно-описательный анализ систем питания шлюзов малого напора; анализ конструктивных решений и оценка структурной надежности шлюза; разработка оценки шлюза на основе факторного анализа; разработка рекомендаций по перспективным типам систем питания;
- Построение дерева целей увеличения пропускной способности наклонного судоподъемника; выбор конструктивных решений по важнейшим элементам судоподъемника; проведение лабораторных исследований гидромеханических процессов полускамерного водоклинового судоподъемника; исследование нестационарных процессов в клине воды судоподъемника с помощью аналитических методов; разработка рекомендаций по определению области использования полускамерных водоклиновых судоподъемников.

Методы исследований. В работе наряду с обобщением и анализом литературных источников использованы результаты проведенных натурных исследований судопропускных сооружений европейской части РФ. Для аналитической оценки технического состояния эксплуатируемых конструкций применялись методы теории вероятности, теории упругости и математическое моделирование.

Для решения поставленных в работе задач по изучению водоклиновых судоподъемников использовались теоретические и экспериментальные методы. Теоретические исследования выполнялись с помощью методов гидродинамики. Экспериментальные исследования проводились на специально созданной модели.

Так как исследуемые процессы носили неустановившийся во времени характер, то для их фиксации были разработаны автоматически действующие измерительные системы. При обработке экспериментальных данных применялись методы теории вероятности и математической статистики.

Научная новизна работы заключается в следующем:

- сформирована система ценностей, критериев и ограничений, позволяющая оценить эффективность гидротехнических объектов на малых водотоках;
- разработана функциональная схема системы качества транспортной услуги;
- на базе статистической обработки результатов комплексных обследований отечественных судопропускных сооружений разработан вероятностный метод оценки остаточного ресурса камеры шлюза;
- проведена факторная оценка систем питания камер судоходных шлюзов и предложен критерий оценки качества системы питания;
- установлены закономерности изменения свободной поверхности жидкости транспортируемой в водоклиновом судоподъемнике на различных этапах движения;
- определены области применения рекомендаций по назначению параметров движения щита в эксплуатационных режимах;
- разработана математическая модель процесса транспортировки клина жидкости в различных модификациях водоклиновых судоподъемников.

Личный вклад в решение проблемы. Диссертация является результатом многолетних (с 1977 г. по настоящее время) исследований автора, которые проводились им в СПбГПУ.

Приведенные в диссертационной работе результаты исследований были получены соискателем при разработке и решении задач по отдельным темам, заданиям и проблемам, в которых автор принимал участие в качестве соисполнителя, ответственного исполнителя и научного руководителя.

Практическая значимость проведенных исследований заключается в следующем: разработан инженерный аппарат, дающий возможность обоснованно принимать как концептуальные, так и технические решения по гидротехническим сооружениям в процессе проектирования и эксплуатации низконапорных гидроузлов на малых реках. На основании результатов научных исследований решены ключевые вопросы проектирования новых типов судопропускных сооружений – водоклиновых судоподъемников.

Результаты исследований использованы в опытно-конструкторских и проектных работах в Ленгидропроекте, Ленгипроречтранс, ЦМКБ «Алмаз», СКБ «Ленгидросталь», и отражены в учебных пособиях [12, 13, 17, 20, 26, 43, 44].

Результаты работы используются в учебном процессе инженерно-строительного факультета СПбГПУ и гидротехнического факультета СПбГУВК при изучении дисциплин «Сооружения водного транспорта», «Речные воднотранспортные сооружения», «Гидротехнические сооружения комплексного и отраслевого назначения».

На защиту выносятся следующие основные результаты работы:

- система ценностей, критериев и ограничений для оценки эффективности гидротехнических объектов на малых водотоках;
- схема системы качества транспортной услуги;
- метод оценки остаточного ресурса камеры шлюза;
- новые концептуальные положения по определению состава, типа и конструктивных элементов гидротехнических сооружений на малых реках;
- новая факторная оценка систем питания камер судоходных шлюзов;
- особенности гидромеханических явлений в водоклиновом судоподъемнике на различных этапах движения;
- универсальная методика назначения основных параметров водоклиновых судоподъемников в составе низконапорных гидроузлов;
- математическая модель процесса транспортировки клина жидкости в различных модификациях водоклиновых судоподъемников.

Достоверность результатов проведенных исследований подтверждается соответствием полученных данных существующим научным представлениям, опубликованным результатам и концепциям других авторов, проверкой разработанных методик в натурных и лабораторных условиях и на математических моделях с помощью апробированных компьютерных технологий. Научные положения и выводы обоснованы, так как они базируются на известных и общепринятых научных теориях и методах, используемых при исследовании, и являются их прямым продолжением и развитием.

Апробация работы. Основные положения работы докладывались и представлялись на конференциях, координационных совещаниях, семинарах по гидротехнике: II НТК по эксплуатации и долговечности портовых и судоходных ГТС (Ленинград, 1983 г.); НТК «Научные проблемы современного энергетического машиностроения и их решение» (Ленинград, 1988 г.); ВМК «Комплексная компьютеризация учебного процесса в высшей школе» (Ижевск, 1989 г.); ВНК «Проблемы проектирования, строительства, реконструкции и технической эксплуатации воднотранспортных ГТС» (Москва – Одесса, 1989 г.); ВНК «Задачи инженерной геологии в реставрации и сохранении памятников истории и культуры» (Рязань, 1993 г.); XIX МК «Современные проблемы изучения берегов» (СПб., 1995 г.); РНТК «Инновационные наукоемкие технологии для России» (СПбГТУ, 1995 г.); НМК СПбГУВК – СПбГТУ по судопропускным сооружениям, посвященная столетию со дня рождения Н.А. Семанова (СПб., 1997 г.); НТК «Фундаментальные исследования в технических университетах» (СПб., 1997 г.); РНТК СПбГУВК, посвященная 200-летию государственного управления водными коммуникациями России (СПб., 1998 г.); конференция «Транстерминал, логистика, склад "99» (СПб., 1999 г.); МНТК «Акватерра» (СПб., 1999 г.); НМК СПбГУВК, посвященная 190-летию транспортного образования (СПб., 1999 г.); на ежегодных научно-технических конференциях профессорско-преподавательского состава СПбГПУ (1978–2000 гг.), СПбГУВК (1985–2001 гг.), ДВГТУ (1979, 1983 и

1989 гг.). Кроме того, результаты работы в виде цикла лекций докладывались в Германии - TU Dresden (1985 г.), Польше TU Gdansk (1988 г.), Китае Tsinghua U, Beijing (1998 г.), Wuhan YRSRI, компании «The Three Gorges».

Публикации. По теме диссертации опубликовано 46 научных работ, издано 7 учебных пособий, выпущено 17 научно-технических отчетов, получено одно авторское свидетельство.

Структура и объем работы. Диссертация (в I томе) объемом 299 страниц, включая 95 рисунков, 23 таблицы, список литературы из 254 позиций и приложения.

Автор благодарит д-ра физ.-мат. наук, профессора К.Н. Шхинека, д-ра техн. наук, профессора С.Г. Шульмана, д-ра техн. наук, профессора А.М. Гапеева, д-ра техн. наук, профессора С.А. Кузьмина за научные консультации и ценные советы при постановке некоторых задач.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность работы, сформулированы цели и задачи исследований, их новизна, реализация и апробация. Дан краткий критический анализ рассматриваемой проблемы.

Решению проблемы комплексного использования рек, в частности малых водотоков, возникающей при активном водопользовании, посвящены работы таких отечественных ученых, как А.Е. Андреев, А.А. Беляков, Ю.И. Бик, В.М. Ботвинков, В.Н. Бухарцев, О.Ф. Васильев, Ю.С. Васильев, А.Б. Векслер, В.И. Виссарионов, А.М. Гапеев, Г.Л. Гладков, К.В. Гришанин, В.В. Дегтярев, В.В. Елистратов, Н. В. Зарубаев, Д.А. Ивашинцов, М.А. Колосов, С.А. Кузьмин, В.И. Масликов, А.Л. Можевитинов, П.С. Непорожний, Ю.И. Николаенко, Ю.П. Правдивец, И.С. Румянцев, В.М. Селезнев, Б.Н. Сергеев, Д.В. Стефанишин, М.П. Федоров, П.Р. Хлопенков, С.Г. Шульман, Д.С. Щавелев.

Особо актуальной является оценка состояния всего комплекса гидротехнических сооружений, особенно судопропускных. Вопросам оценки технического состояния и безопасности водотранспортных гидротехнических сооружений посвящены работы И.О. Алексеева, А.И. Альхименко, Г.А. Андреева, Б.В. Балашова, Ю.П. Беличенко, Н.Д. Беляева, А.Я. Будина, А.Г. Василевского, Б.Ф. Горюнова, Д.А. Ивашинцова, И.Н. Иващенко, М.А. Колосова, В.Д. Костюкова, М.Л. Кузьмицкого, С.Н. Левачева, В.В. Малаханова, Г.В. Мельника, А.Б. Мошкова, Р.М. Нарбута, Г.А. Садовского, А.С. Соколова, Ю.Н. Фомина, А.П. Черепяхина, В.К. Штенцеля, С.Г. Шульмана, К.Н. Шхинека, А.М. Юделевича.

Большая и полезная работа по изучению и обобщению опыта эксплуатации проделана рядом проектных и научно-исследовательских организаций. К их числу относятся ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева, Гидропроект им. С.Я. Жука, Ленгидропроект, Гипроречтранс, Ленморниипроект, Московская государственная академия водного транспорта, Новосибирская академия водного транспорта, Санкт – Петербургский государственный университет водных коммуникаций.

Весомый вклад в решение проблемы создания комплексной классификации малых рек внесли работы С.П. Бударина, Н.А. Доманевского, В.П. Зачесова, В.В. Звонкова, А.К. Корчагина, Г.М. Матлина, А.В. Михайлова А.В Огневского, А.П. Панюкина, Б.В Полякова, В.М. Родевича, Н.И. Фаворина, Р.Д. Фролова, А.И. Чекренева, А.М. Черняева.

В **первой главе**, состоящей из двух разделов, рассмотрен широкий круг вопросов, связанных с методологией научного обоснования необходимости реконструкции, модернизации или строительства новых судопропускных сооружений в составе низконапорных воднотранспортных систем.

В разделе 1 разработана система ценностей, критериев и ограничений для сопоставительной оценки вариантов использования и выбора типа гидротехнических объектов на малых водотоках. Воднотранспортные сооружения предложено характеризовать *функциональной, инженерно-конструктивной, архитектурно-художественной и исторической* ценностями.

При определении земельной квоты для водохозяйственного объекта на малой реке рекомендуется использовать два известных критерия землепользования: *критерий сохранения разнообразия экосистем бассейна и энергетический*. В качестве *критерия допустимого водохозяйственного использования малого водотока* рекомендуется принимать значение *минимально необходимого расхода* для обеспечения воспроизводства биологических ресурсов и поддержания удовлетворительного санитарно-биологического состояния реки.

Предложен принцип выбора варианта конструкций воднотранспортных гидротехнических сооружений, основанный на использовании методов системного анализа и теории принятия решений. На примерах показано, что цель может быть успешно достигнута за счет:

- *ориентации на минимум целевой функции*, являющейся оценкой конкретного варианта конструкций;
- представления о состоянии системы и ходе процесса в виде топологических схем, например *дерева целей*;
- *формализации* взаимосвязи конструкций с природными и иными факторами посредством построения *дереьев отказов*;
- представления отдельных этапов процесса в виде *матриц решения*;
- ограничения числа принятых к рассмотрению *приоритетных критериев* – тремя, а *оптимизационных критериев* задачи – пятью.

Приоритетные критерии

- минимум полных капиталовложений во все объекты, включая прогнозирование, проектирование, эксплуатацию, изменения функций, предполагаемые аварии;
- максимум безопасности и надежности конструкций при установленных затратах;
- максимум финансовых прибылей и минимум экологических ущербов.

Оптимизационные критерии

- минимум материальных затрат;
- минимум стоимости рабочей силы;
- максимум надежности;
- максимум безопасности эксплуатации;
- минимум времени транспортной услуги.

Для устойчивого функционирования и развития природно-технической системы необходимо оптимизировать затраты на ее управление. В разделе 2 процесс *управления качеством* в сфере водного транспорта рассмотрен как составная часть деятельности по предоставлению *услуги*, гарантирующей полное удовлетворение запросов потребителя, благодаря внедрению *системы качества* на основе МС ИСО серии 9000. С этой целью разработана функциональная схема *системы качества транспортной услуги* (рис. 1).

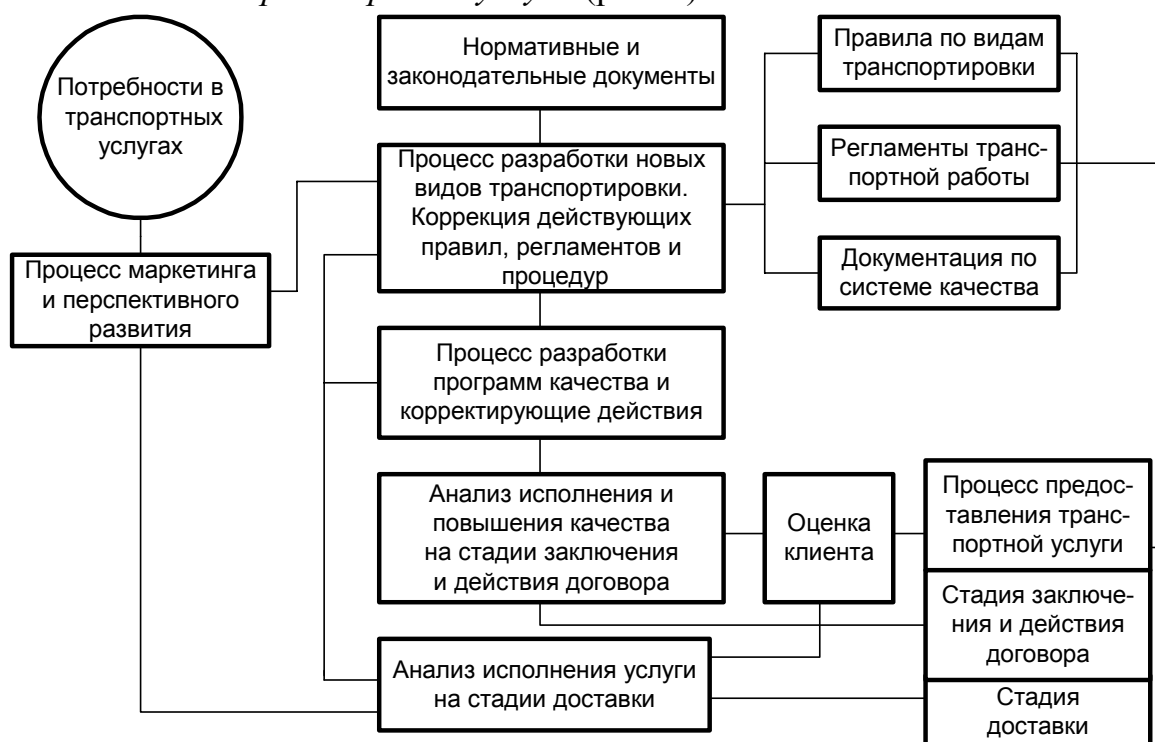


Рис. 1. Функциональная схема системы качества транспортной услуги

Контролепригодность основных строительных элементов судопропускных сооружений рекомендуется оценивать по интегральным показателям. На примере Воткинского шлюза показано, что наиболее контролепригодными являются результаты створных наблюдений за отклонением верха стен камер. На базе статистической обработки результатов комплексных обследований разработаны вероятностный метод оценки остаточного ресурса камеры шлюза. Для информационного обеспечения исследований разработан автоматизированный банк данных.

Вторая глава, состоящая из трех разделов, посвящена выбору рационального состава гидротехнических сооружений для освоения малых рек.

В результате проведенного анализа современного экономического состояния внутреннего водного транспорта России установлено следующее:

- сеть малых водотоков в России *используется в транспортных целях* не более чем на 1–2 % от своего потенциала, а грузооборот *сельскохозяйственных перевозок*, даже в районах интенсивного земледелия и животноводства, не превышает 1–5 % от общего грузооборота водного транспорта;

- целесообразность транспортного освоения малых рек должна определяться сопоставлением результатов изменения экологии природного объекта и экономических последствий использования его *как природного ресурса*;
- *транспортные функции* реки носят характер *инфраструктуры*, т. е. являются обеспечивающими для решения социальных задач и производства;
- результатом развития инфраструктуры является *внеотраслевой экстернальный* по отношению к водному транспорту эффект, учитывающий внешние затраты при организации перевозок по *вновь создаваемой транспортной сети*;
- малые реки в части их *транспортного использования* являются более «*экологически чистыми*», чем магистральные реки.

На основе систематизации научно-технических и проектно-конструкторских разработок, а также анализа результатов эксплуатации действующих гидротехнических объектов выявлено, что при транспортном освоении малого водотока могут иметь место следующие виды внеотраслевого эффекта:

- *от развития новых районов*;
- *от увеличения перевозок на магистральном водном пути*, если малая река будет использована как *подъездной путь*;
- в *энергетике* – зарегулирование речного стока создает условия для развития малой энергетики;
- *от развития рыбного промысла и прудового рыбоводства*;
- *от увеличения рентной стоимости земельного и водного фондов региона*; в результате этого местный бюджет пополнится доходами от аренды или продажи объектов природопользования;
- *экологический* – изменение гидрологических характеристик водотока будет способствовать рационализации сезонного распределения речного стока, тем самым природный объект будет *восстановлен* как часть природной среды; в экономическом измерении это проявится в повышении его *рентной стоимости*;
- *рекреационный*, включая *водный туризм и спортивное рыболовство*;
- *от водопользования*;
- *создания противопаводковых и противопожарных систем*.

Предлагается объединение малых водотоков в единую сеть с созданием веерных водохранилищ на их притоках.

Раздел 2 посвящен определению параметров судопропускных сооружений на малых реках. Выполненная оценка возможности использования различных типов судов на малых реках показывает:

- на реках ниже II класса использование водоизмещающих судов и толкаемых составов с осадкой менее 1 м нецелесообразно вследствие *низкого* (10–15 %) *коэффициента утилизации* водоизмещения этих судов;
- перспективными судами для перевозок по рекам 0 – I классов являются суда на *воздушной подушке (СВП) скегового типа* и с определенными ограничениями буксируемые контейнеры, особенно *гибкие оболочки*;

- определение размерений судов следует производить по разработанной в диссертации блок-схеме *оптимизации основных характеристик судов и судопропускного сооружения*, включающей в себя как подсистему имитационную модель судна.

В разделе 3 проведен краткий анализ способов улучшения судоходных условий на малых реках. Обоснована целесообразность обеспечения судоходных габаритов малых рек за счет реализации *низконапорной схемы шлюзования*. Установлено, что наиболее рациональным способом улучшения судоходных условий является *сезонное шлюзование* с использованием *разборных плотин*, что создает базу для *комплексного использования* потенциала малой реки. Показано, что *путевые работы* могут дать положительный эффект только в ограниченных случаях. Анализ опыта эксплуатации и проектно-конструкторских разработок подтверждает перспективность использования для строительства воднотранспортных сооружений и конструкций наполняемых оболочек из гибких синтетических материалов.

В качестве судопропускных сооружений на малых реках с небольшими расходами воды рекомендовано использование *транспортных судоподъемников*. Установлено, что в случае опережающего развития водного туризма, наиболее рациональным является применение *водоклиновых судоподъемников*, способных производить безопасный пропуск спортивных судов различных размерений, осуществляя их транспортировку на плаву.

В **третьей главе** рассмотрены традиционно используемые на малых реках судоходные шлюзы. Проведена систематизация судопропускных сооружений *низконапорных шлюзованных систем* России и стран СНГ по компоновочным, конструктивным и эксплуатационным признакам. По результатам ретроспективного анализа и перспектив развития установлено следующее:

- основным типом камер судоходных низконапорных шлюзов являются *камеры с отдельностоящими стенами и водопроницаемым днищем*, возводимые с использованием местных строительных материалов;
- наиболее целесообразны головы шлюзов *с гасительными устройствами*;
- для ускорения судопропуска и обеспечения безаварийности движения судов в подходных каналах целесообразно использовать существующие технические предложения по *автоматической швартовке* и *поперечному перемещению судов* с применением *причально-наводочных устройств*.

Проведен факторный анализ систем питания камер судоходных шлюзов. Предложен *вероятностный критерий оценки качества* системы питания, определяемый с использованием метода экспертных оценок как *произведение частных факторов: эффективности работы гасительных устройств, металлоемкости конструкций ворот и затворов, с учетом особенностей конструкций и эксплуатации сооружений*. Определены области применения различных систем питания. На основании результатов факторного анализа установлено, что наиболее рациональными являются (рис. 2):

- 1) система наполнения камеры из-под плоских подъемно-опускных ворот при наличии экрана, колодца и балочной решетки;
- 2) система комбинированного наполнения камер из-под плоского опускаемого затвора с переливом воды через гребень при наличии экрана, камеры гашения и балочной решетки;
- 3) система наполнения камеры из-под плоских подъемных ворот с удлиненной камерой гашения.

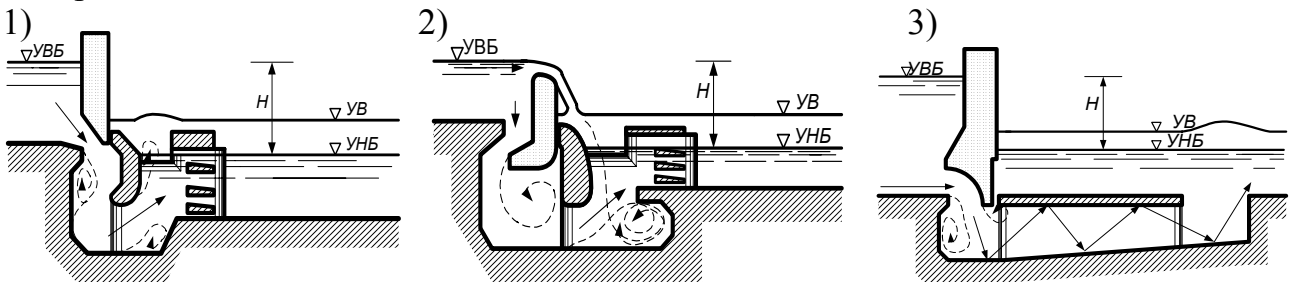


Рис. 2. Перспективные схемы систем питания камер низконапорных шлюзов

В четвертой главе, состоящей из двух разделов, рассмотрены новые подходы к конструированию водоклиновых судоподъемников, проведен анализ современного состояния вопроса об исследованиях гидродинамических явлений в наклонных судоподъемниках.

Основными элементами бескамерного водоклинового судоподъемника являются: железобетонный судовозный лоток, соединяющий верхний и нижний бьефы; передвижной щит, перекрывающий лоток и перемещающий в нем клин воды с судном; полушлюз в верхней части лотка (рис. 3).

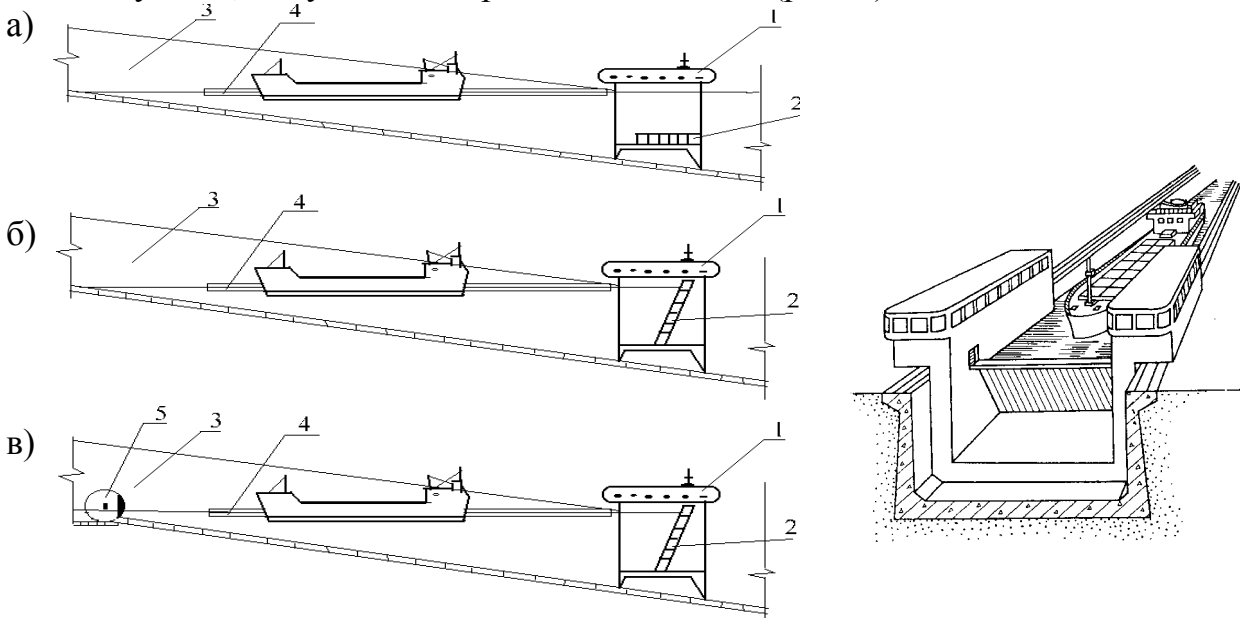


Рис. 3. Процесс транспортировки судна в водоклиновом судоподъемнике:

- а) вход судна в клин воды судоподъемника из нижнего бьефа; б) транспортировка судна из бьефа в бьеф; в) выход судна через полушлюз в верхнем бьефе
- 1 – передвижной щит; 2 – ворота щита; 3 – наклонный лоток; 4 – понтоны; 5 – полушлюз ВБ.

Впервые в мировой практике специалистами СПбГПУ (головная организация по проблеме 0.55.08, задание 01.03 ГКНТ), Ленгидропроекта им. С.Я. Жука и СКБ «Ленгидросталь» разработан новый вариант бескамерного водоклинового судоподъемника для *транспортировки крупнотоннажных* (водоизмещением 5000 т) *судов*, принципиально отличающийся от французского конструкцией передвижного щита. Пропуск судов в клин воды судоподъемника осуществляется через *клапанные ворота в щите*, что позволяет транспортировать суда с любыми надводными габаритами (см. рис. 3).

По результатам опытно-конструкторских проработок оптимальным вариантом конструкции уплотнений щита признано предложенное в ходе работ *катящееся уплотнение с прижимом стального обрезиненного валика за счет гидростатического давления воды*. Его отличительной особенностью является то, что сам валик крепится на консоли, соединяясь со щитом шарнирно.

Проведенными исследованиями были обоснованы значения *строительных допусков*: отклонения от средних зазоров между щитом и лотком, составивших 40 мм по всему периметру, можно считать допустимыми, если они находятся в пределах +15 мм для горизонтального уплотнения и +20 мм по высоте стен (для лотка судоподъемника с поперечными размерами лотка 7,5×2 м.).

Логическим продолжением работ явилось создание проекта новой более эффективной модификации бескамерных водоклиновых судоподъемников, получивших, в связи с характерной конструкцией передвижного щита, название *полукамерные*.

Полукамерные водоклиновые судоподъемники, имеют ряд существенных преимуществ перед бескамерными судоподъемниками, которые впервые реализованы во Франции, Монтеш – 1973 г., Фонсеранн – 1985 г.:

- более приспособлены к возведению на слабых грунтах и могут быть использованы в широком диапазоне изменения напоров;
- передвижной щит в виде полукамеры улучшает гидромеханику перемещаемой массы воды, создавая тем самым условия для ускорения судопропуска;
- высота стен лотка снижается на 20 – 40% по сравнению с бескамерным вариантом, что приводит к снижению капитальных затрат на возведение наклонного лотка не менее чем на 40 – 50%;
- при использовании трапецеидальных лотков, представляющих собой судовозные дороги, аналогичные по конструкции и сопоставимые по стоимости с покрытиями автомобильных магистралей являются наиболее рациональным типом судопропускных сооружений для малых рек.

Водоклиновый судоподъемник является *модификацией продольных наклонных* судоподъемников с транспортировкой судов между бьефами *на плаву*. В разделе 2 рассмотрено современное состояние вопроса об исследованиях гидродинамических явлений в камерах наклонных судоподъемников.

Общим решением этой сложной проблемы плодотворно занимались отечественные ученые: Н.Н. Моисеев, Г.Е. Павленко, П.И. Горьков, В.В. Румянцев,

Л.Н. Сретенский, Э.А. Пережняко, В.Н. Тищенко, Г.С. Нариманов, Д.Е. Охоцимский, Б.И. Рабинович, В.И. Похабов. Из работ зарубежных ученых заслуживают внимания исследования J. de Ries, G. Willems, (для судоподъемника Ронкьер, Бельгия), M. Vlcek (для судоподъемника Орлик, Словакия), J. Aubert, J. Chabert, P. Chaussin, M. Cancelloni (для судоподъемника Монтеш, Франция), J. Monteil, J. Donnarel, L.M. Parizot (для судоподъемника Фонсеранн, Франция).

Для крупнейшего отечественного Красноярского судоподъемника волновые процессы в камере при наличии судна были исследованы О.Ф. Васильевым, который первым рассмотрел эту задачу в тесной связи с известной гидродинамической задачей о движении твердого тела, заполненного массой жидкости со свободной поверхностью на которой находится плавающий объект. Разработанная им теория получила дальнейшее развитие в работах А.А. Атавина, А.М. Гапеева, В.П. Сапцина, А.П. Яненко и других.

Исследования гидродинамических явлений в бескамерных водоклиновых судоподъемниках в России проводились автором в период 1978 – 1980 гг. в рамках решения актуальной в то время проблемы переброски части стока сибирских рек в бассейн Аральского моря. На кафедре «Водные пути и порты» ЛПИ им. М.И. Калинина (СПбГПУ).

Как показали проведенные экспериментальные исследования, решение французских исследователей с использованием допущений теории длинных волн дает несколько заниженные значения амплитуд колебаний водной поверхности, особенно на начальной стадии движения. На следующем этапе изучение гидродинамики судоподъемника проводилось теоретически (аналитически и методами математического моделирования). Причем в отличие от предыдущих постановок задачи допущение о пренебрежении вертикальной составляющей ускорения движения частиц жидкости не принималось. В результате было получено решение задачи для случая, когда клин воды, свободная поверхность жидкости в котором занимает горизонтальное положение, приобретает переменное во времени ускорение движения.

В качестве допущений было принято, что поперечное сечение судовозного лотка неизменно по длине, а скорость течения жидкости в направлении стен практически отсутствует. Угол наклона лотка α считался малым. Было рассмотрено двумерное движение жидкости без разрывов сплошности. Одновременно с этим предполагалось, что сама жидкость однородная, идеальная. Движение жидкости изучалось в подвижной полярной системе координат, жестко связанной (перемещающейся вместе) с передвижным щитом. При сделанных допущениях для внутренней области массы жидкости справедливо уравнение Лапласа. Задача была решена в потенциалах. Граничные условия были получены с использованием интеграла Коши, а также динамического дифференциального уравнения несжимаемой жидкости в форме Эйлера. Решение уравнения Лапласа было произведено методом разделения переменных. На основании проведенных экспериментально-теоретических исследований гидромеханических процессов, происходящих в транспортируемом клине жидкости бескамерного водоклинового

судоподъемника, были даны рекомендации по выбору оптимальных, по условиям стоянки транспортируемых судов, режимов движения щита в зависимости от напора на гидроузел.

До проведения настоящих исследований рекомендации по определению параметров полускамерных водоклиновых судоподъемников отсутствовали. В связи с чем по уже апробированной методологии впервые был проведен комплекс экспериментально-теоретических работ по изучению гидродинамических явлений в этом сооружении.

Пятая глава посвящена экспериментальным исследованиям полускамерных водоклиновых судоподъемников, которые выполнялись в лаборатории кафедры морских и воднотранспортных сооружений СПбГПУ на специально созданной для этих целей установке, включающей: наклонный лоток; разъемные опоры лотка; тележки со щитом; электродвигатель с редуктором и ведущий шкив с концевыми выключателями; ведомый шкив с натяжными устройствами; тяговый трос.

В соответствии с техническими возможностями лаборатории был принят линейный масштаб исследований 1:50 (для крупногабаритных речных судов водоизмещением 5000 т).

При проведении экспериментов использовалась автоматизированная система научных исследований. Колебания уровня воды в клине измерялись емкостными волномерами; усилия в швартовых связях – тензометрическими динамометрами; горизонтальные перемещения судна – потенциометрическими датчиками перемещений; сила удара – также тензометрическими датчиками; давление жидкости на щит на различных глубинах определялось тензометрическими датчиками мембранного типа.

На основе метода анализа размерностей были установлены характерные параметры, отражающие физическую сущность рассматриваемых процессов, определены критерии подобия и получено расширенное критериальное уравнение. После анализа физики процесса был сделан вывод о том, что при проведении лабораторных гидродинамических исследований водоклиновых судоподъемников с достаточной для практических целей точностью возможно приближенное моделирование по критерию Фруда $Fr = idem$.

Экспериментальные исследования эксплуатационных режимов работы полускамерного водоклинового судоподъемника проводились с целью выявления физических закономерностей, происходящих в объеме воды (с судном и без него), транспортируемом передвижным щитом-полускамерой, и нахождения значений гидродинамических характеристик (продольных присоединенных масс жидкости), определение которых аналитическим путем не дает необходимой точности. Соответственно они состояли из трех этапов:

- исследование волновых явлений, возникающих в полускамере воды при транспортировке без судна;
- исследование гидродинамических воздействий на транспортируемые суда;
- определение присоединенных масс жидкости.

Два первых этапа тесно взаимосвязаны друг с другом как с точки зрения эксплуатации (оба имеют место при реальной работе судоподъемника), так и с точки зрения методики проведения экспериментов. Было установлено, что при отсутствии в судоподъемнике судна имеют место максимально возможные при данном режиме движения колебания водной поверхности. По разработанной на стадии исследования бескамерного варианта методике была проведена серия опытов, в которых варьировались два параметра: длина горизонтальной части полукамеры (рассматривались три различных значения: $l=0,25l_s$; $l=0,30l_s$; $l=0,40l_s$, где l_s – расчетная длина судна) и степень наполнения объема водой. В качестве тестовой задачи при конкретном наполнении рассматривался бескамерный вариант, который сопоставлялся с ранее проведенными сериями.

Во всех случаях с уменьшением глубины наполнения наблюдалось снижение высоты образовавшейся волны, но зависимость не имела ярко выраженного характера. Высота бугра воды у щита увеличивалась плавно, и одновременно имело место заметное образование бугров в месте окончания горизонтальной части полукамеры. В результате исследований установлено, что в пределах «ковша» форма водной поверхности (очертание возвышения водной поверхности над спокойным уровнем) имела существенно более пологое очертание, чем в бескамерном варианте.

Исследования, как и для бескамерного варианта, проводились при уклоне судовозного лотка $\alpha = 0,03$, что позволило сопоставлять полученные результаты. При глубине воды у щита $h=1,3s$ было проведено две серии по 50 опытов. Проведенные расчеты позволили обоснованно принять для конечных результатов экспериментальных исследований предельное значение суммарной погрешности $\pm 10\%$ с доверительной вероятностью 0,95.

Исследовался только начальный – равноускоренный (равнозамедленный) – участок движения передвижного щита вверх (вниз) в диапазоне ускорений a_x от $0,022$ до $0,04 \text{ мс}^{-2}$, при этом достигались значения скоростей $3,0 - 3,5 \text{ мс}^{-1}$. Здесь и далее данные приведены в пересчете на натуру.

На втором этапе исследований изучался процесс транспортировки расчетного судна. Было проведено три серии: при жестком раскреплении судна с коэффициентами жесткости соответственно $c_x=55,5 \text{ Нм}^{-1}$ и $c_x=13,5 \text{ Нм}^{-1}$ (рис. 4).

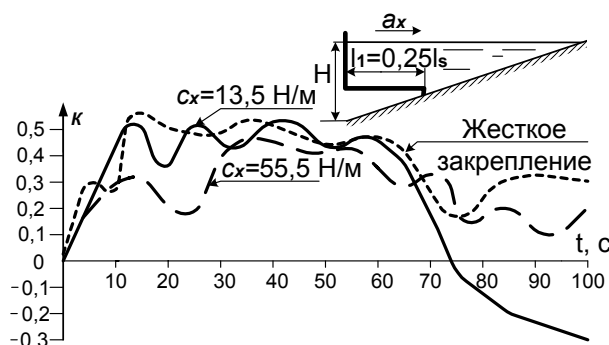


Рис. 4. Процесс волнообразования в полукамерном водоклиновом судоподъемнике при транспортировке судна с различными жесткостями швартовых связей

Здесь $K = \frac{\zeta g}{La_x}$, где ζ – ордината свободной поверхности м, м; t – время

действия ускорения, с; L – длина клина воды, м.

Установлено, что максимальное значение возвышения уровня воды у торцевой части щита полукамеры (рис. 5) в нормальном эксплуатационном режиме несущественно зависит от жесткости швартовых связей судна, хотя период его наступления разный и несколько более поздний, чем плоского щита. Зависимость максимального возвышения уровня воды у щита над спокойным положением от длины полукамеры l_i также незначительна.

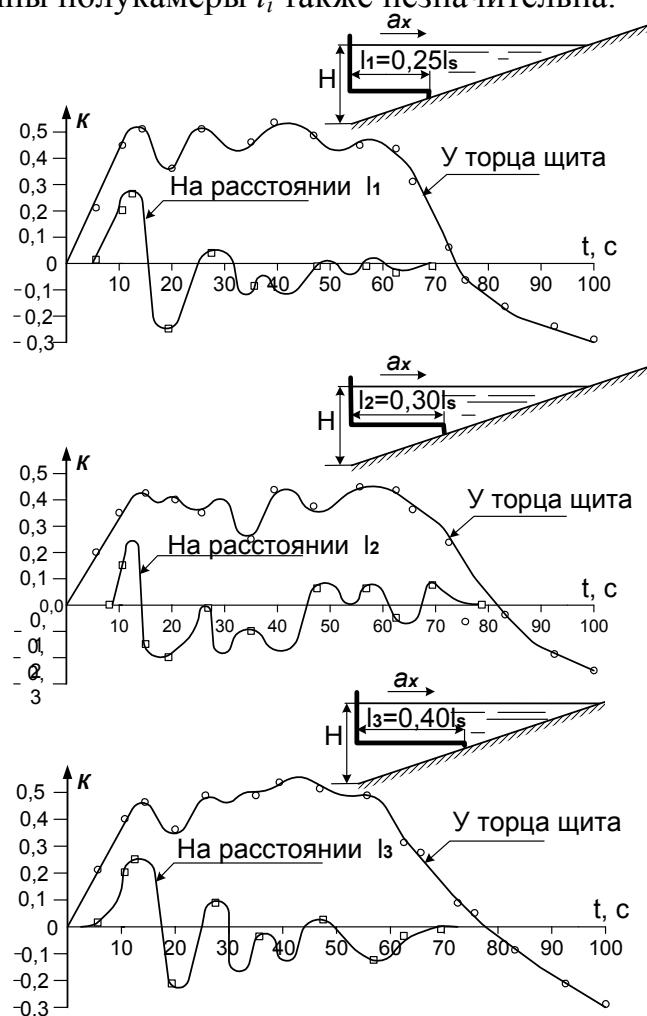


Рис. 5. Влияние длины полукамеры на процесс волнообразования в при эксплуатационных режимах движения с судном $c_x=13,5 \text{ Нм}^{-1}$

При этом нет четко выраженного периода движения с одинаковой высотой у щита, что имеет место при транспортировке пустого клина без судна. Наличие судна не только уменьшает высоту водяного бугра, но и увеличивает частоту колебаний водной поверхности. Гидродинамическая сила существенным образом зависит от жесткостных характеристик швартовой связи (рис 6). Полученные значения максимальных величин силы на 10 – 20 % меньше, чем в аналогичных опытах для бескамерного варианта судоподъемника.

Горизонтальные перемещения судна обуславливались величиной приложенного ускорения. В рассмотренном диапазоне изменения значений ускорения ($a_x=0,015 - 0,03 \text{ мс}^{-2}$) были зарегистрированы следующие максимальные значения перемещений: $c_x=13,5 \text{ Нм}^{-1} \pm \Delta x = 1,2 \text{ м}$, а при $c_x=55,5 \text{ Нм}^{-1}$ $\Delta x = 0,5 \text{ м}$, $-\Delta x = 1,2 \text{ м}$. Эти значения имели место в начале процесса движения.

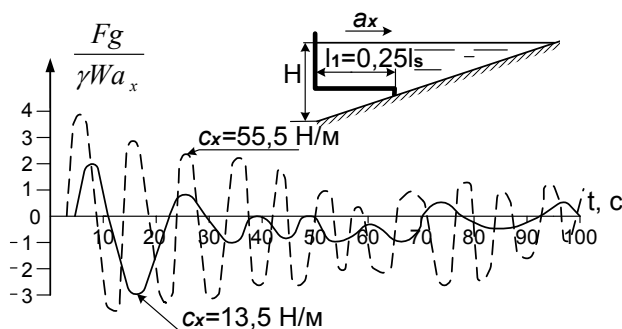


Рис. 6. Изменения гидродинамической силы F в зависимости от жесткости швартовой связи (W – водоизмещение расчетного судна)

Продольная горизонтальная сила, действующая на судно при жестком закреплении, достигает значения 1000 – 1200 кН. Поэтому сделан вывод о нецелесообразности использования жесткой связи судна со щитом. Установлено, что при изменении жесткости швартовки в четыре раза имеет место примерно двукратное изменение действующей на судно гидродинамической силы.

Целью третьего этапа исследований было экспериментальное определение влияния параметров судоподъемника (уклона лотка, конфигурации щита, стенок лотка, глубины воды в клине) на величину присоединенной массы. На модели водоклинового судоподъемника судно раскреплялась с помощью пружин различной жесткости и подвешивалось к опоре. В качестве регистрирующего индикатора использовался тензометрический датчик усилий. Фиксация результатов производилась на светолучевом осциллографе Н-115.

Значения присоединенных масс определялись по зависимости

$$\lambda_{11} = \frac{\tau_w^2}{\tau_a^2} - 1, \quad (1)$$

где τ_w , τ_a – периоды собственных колебаний судна в воде и воздухе.

Результаты экспериментов представлены в виде графиков зависимости коэффициента присоединенных масс λ_{11} от безразмерного параметра νs ; здесь ν – волновое число, $\nu = \omega^2 / g$; s – статическая осадка судна в полном грузу. Исследовались три уклона судовозного лотка $i=0,02; 0,03; 0,04$. При этом для каждого из них рассматривались три глубины наполнения клина водой, характеризующиеся параметром $h/s=1,2; 1,41; 1,56$ (обозначения на рис. 7) и, кроме того, варьировалась длина полумакары l_{sc} , что в свою очередь определялось параметром $l_{sc}/l_s=0,2; 0,3; 0,4$.

Анализ экспериментальных данных позволил сделать вывод о несущественности изменения λ_{11} в рассматриваемом диапазоне изменения уклонов, что является характерным для всех модификаций данного типа судоподъемника. Однако для полускамерного варианта значения λ_{11} в зависимости

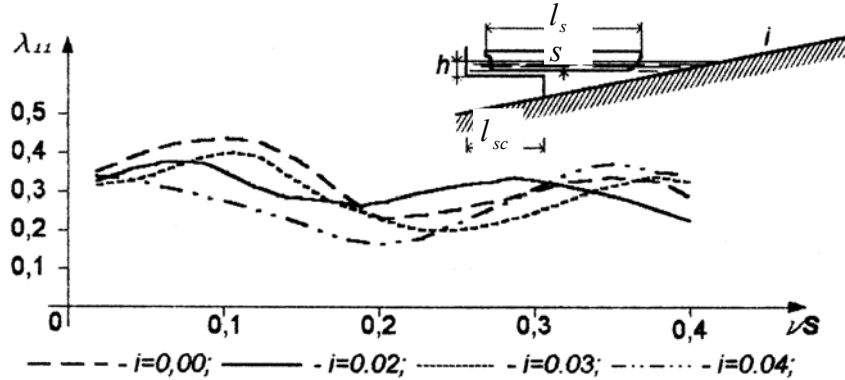


Рис. 7. График зависимости $\lambda_{11} = f(i)$ при $l_{sc}/l_s = 0,3$ ($i = 0,02 - 0,04$, $h/s = 1,2$; $i = 0$, $h/s = 2,0$)

от νs ($h/s = 1,2 - 1,56$; $i = 0,02 - 0,04$, $l_{sc}/l_s = 0,3$) для исследуемого расчетного судна на 10 – 20 % превосходят аналогичные показатели бескамерного прототипа и составляют 0,18 – 0,42 против 0,15 – 0,35. Изучение влияния конфигурации полускамеры на значение λ_{11} производилось при значениях $h/s = 1,2$, $i = 0,03$ для соотношений $l_{sc}/l_s = 0,2$; 0,3; 0,4. Результаты опытов показали несущественность влияния указанного фактора на изменение λ_{11} . Разброс значений λ_{11} при рассматриваемых значениях νs составляет не более 5 – 7 %, что не превышает погрешности исследований. Изучение влияния стенок лотка на λ_{11} проводилось в гидравлическом лотке с уклоном дна $i \cong 0$ при $h/s = 2,0$. Установлено, что наличие боковых стенок приводит к увеличению λ_{11} , особенно при малых значениях νs (до значения 0,05), чем при тех же параметрах в неограниченном бассейне. Влияние боковых стенок для прямоугольного лотка при значениях $b_s/b_c \leq 0,52$, где значения λ_{11} совпадают со значениями на неограниченной акватории. Для трапецеидальных лотков значения λ_{11} меньше (на 7 – 12%) для малых νs , чем для вертикальных стен, а влияние стенок при значениях $b_{cl}/b_c \geq 1,5$ перестает сказываться. Наличие торцевой стенки-щита уменьшает значение λ_{11} (5 – 10 %).

Результаты проведенных исследований могут быть распространены на большой класс речных судов, для которых безразмерные соотношения размерений l_s/b_s , b_s/s близки соответствующим параметрам исследованного судна.

В **шестой главе** приведено аналитическое решение задачи о движении клина воды со свободной поверхностью по наклонной плоскости. Ранее автором для решения задачи о волнообразовании в бескамерном водоклиновом судоподъемнике были применены различные – как аналитические, так и численные – методы. Проведенный анализ рассмотренных ранее аналитических методов, применительно к решению задачи об определении гидродинамических

$$\frac{\partial \varphi(0, z)}{\partial x} [\sigma(z) - \sigma(z-h)] + \frac{\partial \varphi(l, z)}{\partial x} [\sigma(z-h) - \sigma(z-H-h)] = V_{uy}, \quad (3)$$

на горизонтальной части AB протяженностью l

$$\frac{\partial \varphi(x, h)}{\partial z} [\sigma(x) - \sigma(x-l)] = 0, \quad (4)$$

на дне судовозного лотка

$$\frac{\partial \varphi}{\partial z} [\sigma(x-l) - \sigma(x-L)] \Big|_{z=H+h-\alpha x} = 0, \quad (5)$$

на свободной поверхности

$$\frac{\partial \varphi}{\partial z} = \frac{1}{g} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} \Big|_{z=0}. \quad (6)$$

Граничное условие в точке уреза D было определено из предположения равенства нулю в ней гидродинамического давления жидкости:

$$\frac{\partial \varphi(L, z)}{\partial t} = 0. \quad (7)$$

При решении системы (2), (3 – 7) полагалось, что потенциал φ изменяется по гармоническому закону с частотой колебаний Ω :

$$\varphi(x, z, t) = \varphi(x, z) e^{i\Omega t}. \quad (8)$$

Кроме того, предполагалось, что скорость движения щита также изменяется по гармоническому закону:

$$V_{uy} = V_0 e^{i\Omega t} \quad (9)$$

В качестве начальных условий было принято

$$\frac{\partial \varphi(0, z, 0)}{\partial x} [\sigma(z) - \sigma(z-h)] + \frac{\partial \varphi(l, z, 0)}{\partial x} [\sigma(z-h) - \sigma(z-H-h)] = V_{uy}, \quad (10)$$

$$\zeta(x, z, 0) = 0. \quad (11)$$

В зависимостях (3) – (11) были приняты следующие обозначения: V_{uy} – скорость перемещения передвижного щита; V_0 – максимальная амплитуда скорости; $\sigma(x)$ и $\sigma(z)$ – единичная функция Хевисайда по соответствующей координате; L – длина клина воды по свободной поверхности в невозмущенном состоянии; ζ – ордината свободной поверхности.

В ходе решения к уравнению (2) и граничным условиям (3 – 7) были последовательно применены преобразование Лапласа по переменной z и конечное преобразование Фурье по x . В дальнейшем в качестве периода T было принято L – расстояние OD до точки уреза. После решения системы уравнений изображений с учетом физики происходящих процессов было осуществлено обратное преобразование Лапласа и Фурье и получено выражение для искомого потенциала φ . Определение выражения для нахождения ординаты свободной поверхности жидкости по известному значению потенциала скорости было произведено по зависимости

$$\zeta = \int_0^t \frac{\partial \varphi}{\partial z} dt \Big|_{z=0}. \quad (12)$$

В качестве тестового варианта задачи об определении гидродинамических характеристик полускамерного водоклинового судоподъемника была рассмотрена задача определения ординаты уровня воды у щита в бескамерном водоклиновом судоподъемнике.

По серии проведенных сопоставительных расчетов было установлено, что метод интегральных преобразований применительно к задаче о волнообразовании в водоклиновом судоподъемнике дает результаты, хорошо согласующиеся с данными экспериментальных исследований и решениями других авторов (рис. 9), что свидетельствует о корректности данной математической модели.

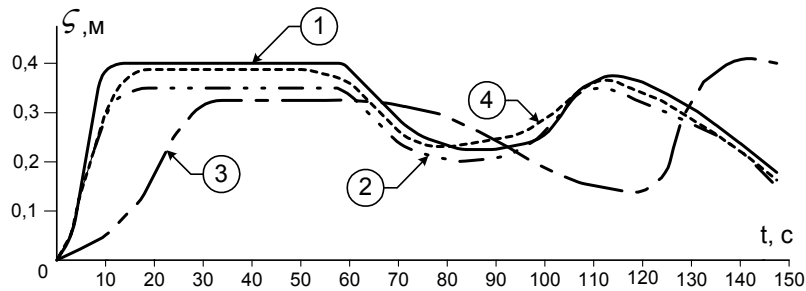


Рис. 9. Изменение уровня воды у щита
(время движения с ускорением $t_n=150$ с, $V_0=3$ мс⁻¹, $L=250$ м)

1 – эксперимент; 2 – метод разделения переменных; 3 – решение французских авторов; 4 – метод интегральных преобразований

В результате аналитического решения была получена зависимость для установления профиля волновой поверхности в клине воды, транспортируемом в полускамерном водоклиновом судоподъемнике в случае движения передвижного щита с постоянным ускорением, приложенным мгновенно:

$$\begin{aligned} \zeta = & \frac{2V_0 t_n}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} \left\{ (-1)^{n+1} \frac{\left(1 - \cos\left(\frac{\pi n}{t_n} t\right)\right)}{n^2} \left[\frac{1}{2} \left(1 + e^{\left(-\frac{2K_m h}{L}\right)}\right) \left(\sin\left(2K_m \frac{x}{L}\right)\right) \right]_{0 \leq x < l; 0 \leq z < h} + \right. \\ & + \left\{ \left[\frac{1}{2} \left(1 + e^{\left(-\frac{2K_m h}{L}\right)}\right) \left(\sin\left(2K_m \frac{x}{L}\right)\right) \right]_{0 \leq z < h} + \right. \\ & \left. \left. + \left[\frac{1}{2} \left(e^{\left(-\frac{2K_m h}{L}\right)} + e^{\left(-\frac{2K_m (h+H)}{L}\right)}\right) \left(\sin\left(2K_m \frac{x}{L}\right)\right) \right]_{h \leq z \leq h+H} \right\}_{l \leq x \leq L} \right\}. \end{aligned} \quad (13)$$

Для установления профиля волновой поверхности при движении передвижного щита с переменным ускорением была определена производная ζ по времени R , если считать ускорение единичным. После применения теоремы свертывания было получено решение для любого закона изменения возмущающего воздействия, в нашем случае ускорения. Оно было использовано для исследования случая, когда постоянное ускорение получается путем линейного возрастания от 0 до a_x за период времени T :

$$a_x(t) = At \quad \text{при} \quad 0 \leq t \leq T, \quad (14)$$

$$a_x(t) = AT \quad \text{при} \quad t \geq T; \quad (15)$$

$$\zeta = \begin{cases} \sum_{n=1}^{\infty} A_n \left[\frac{t}{T} - \frac{1}{\omega_n T} \sin \omega_n t \right] & \text{при} \quad 0 \leq t \leq T, \\ \sum_{n=1}^{\infty} A_n \left[\cos \omega_n (t - T) - \frac{1}{\omega_n T} \sin(\omega_n T) \right] & \text{при} \quad t \geq T, \end{cases} \quad (16)$$

где

$$A_n = \frac{2}{\pi \omega_n} AT (-1)^{n+1} \frac{1}{n} \sum_{m=1}^{\infty} \left\{ \left[\frac{1}{2} \left(1 + e^{\left(\frac{-2K_m h}{L} \right)} \right) \left(\sin \left(2K_m \frac{x}{L} \right) \right) \right]_{0 \leq x < l; 0 \leq z < h} + \right. \\ \left. + \left[\frac{1}{2} \left(1 + e^{\left(\frac{-2K_m h}{L} \right)} \right) \left(\sin \left(2K_m \frac{x}{L} \right) \right) \right]_{0 \leq z < h} + \right. \\ \left. + \left[\frac{1}{2} \left(e^{\left(\frac{-2K_m h}{L} \right)} + e^{\left(\frac{-2K_m (h+h+H)}{L} \right)} \right) \left(\sin \left(2K_m \frac{x}{L} \right) \right) \right]_{h \leq z \leq h+H} \right\}_{l \leq x \leq L}. \quad (17)$$

С целью определения корректности решения, используя теорему Лейбница и интегральный признак Коши, была доказана сходимость входящих в (16) – (17) бесконечных рядов. Установлено, что ряды по m с достаточной для инженерных целей точностью сходятся в зависимости от параметров судоподъемника при количестве членов ряда $m = 200-500$. Необходимая точность суммирования ряда по n достигается при $n \geq 40$.

Аналитическим путем установлено, что на малых реках практическую значимость имеет только режим движения передвижного щита, при котором значение ускорения $0,015 < \alpha_x < 0,05 \text{ мс}^{-2}$ достигается мгновенно. Оптимальным, с точки зрения обеспечения максимальной пропускной способности, будет такой режим, при котором судно преодолеет расчетный напор H_d (перемещаясь по горизонтали на расстояние L_d) за минимальное время режима движения t_m с обязательным соблюдением благоприятных условий стоянки. Из данного режима движения определяется взаимосвязь между исходным значением $L_d = H_d / \alpha$ (где α – варьируемый уклон судовозного лотка), нормируемым t_m и искомыми (варьируемыми) параметрами a и t_n по зависимости

$$a t_n t_m - a t_n^2 = L_d. \quad (18)$$

Условия стоянки судна в судопропускном сооружении считаются благоприятными при соблюдении следующего условия

$$P_{max} < P_{дон}, \quad (19)$$

где $P_{дон}$ – допустимое усилие в швартовых тросах; P_{max} – максимальное усилие в швартовых связях, вызванное гидродинамической силой, действующей на судно в процессе транспортировки. Проведенные исследования показали, что для водоклинового судоподъемника в первом приближении P_{max} может быть приравнено своей горизонтальной составляющей, найденной $P_1 - P_2$ как разница

давления воды P_1 и P_2 на торцевые оконечности судна. Наиболее неблагоприятным с точки зрения условий стоянки судов является случай, когда у торцевой части судна, находящейся у щита, уровень воды поднялся на ζ_{max} (рис. 10), а у противоположной части судна вода находится в невозмущенном состоянии $\zeta = 0$. Анализ результатов численного моделирования показал, что максимальное значение возвышения водной поверхности над спокойным уровнем ζ_{max} в рассматриваемом диапазоне уклонов имеет место при $t/t_n \approx 0,23$.

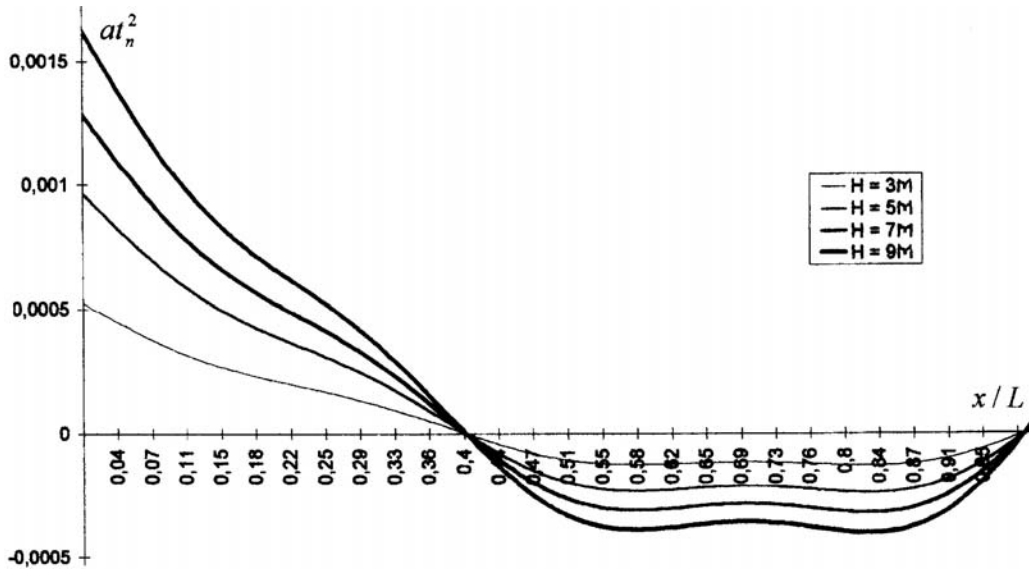


Рис. 10. Профиль волновой поверхности при $t/t_n = 0,23$

Расчеты (см. рис. 11.) по определению профиля волновой поверхности при различных H показали, что такая расчетная схема правомерна для рассматриваемых режимов движения. С учетом малости периода колебаний судна было использовано упрощенное выражение для определения P_{max} :

$$P_{max} = P_1 - P_2 = 0,5 \cdot \zeta_{max} \cdot (\zeta_{max} + 2s) \cdot b_s \cdot \gamma_w, \quad (20)$$

где b_s — ширина судна, м; γ_w — удельный вес воды, $\text{т} \cdot \text{м}^{-3}$, s — грузовая осадка судна, м. Входящее в (19) допускаемое продольное натяжение тросов $P_{дон}$ определялось по данным А.В. Михайлова, полученным из анализа условий отстоя судов в камерах шлюзов, с учетом корректирующего коэффициента 0,9, рекомендованного О.Ф. Васильевым для судоподъемников:

$$P_{дон} = W/n_{дон} \quad (21)$$

где $W = \delta \cdot l_s \cdot b_s \cdot s \cdot \gamma_w$, W — весовое водоизмещение судна, (δ — коэффициент полноты водоизмещения; для грузовых судов внутреннего плавания $\delta = 0,75 - 0,9$), $n_{дон} = 3,0 W^{2/3}$ — коэффициент пропорциональности. Тогда, с учетом сделанных допущений и обоснований, условие (19) правомерно переписать в виде:

$$\zeta_{max} \leq \zeta_{дон}. \quad (22)$$

Значения $\zeta_{дон}$ можно определить из (20) и (21), приравняв его ζ_{max} :

$$\zeta_{дон} = s \left(\sqrt{1 + \frac{2\delta l_s}{s n_{дон}}} - 1 \right), \quad (23)$$

где l_s , s , δ , $n_{дон}$ являются исходными данными, не зависящими от параметров режима движения.

Исходя из вышеизложенного была разработана методика определения параметров движения, которая заключается в следующем:

- по заданным размерениям l_s , b_s , s и δ определяется водоизмещение W судна;
- находится $n_{дон}$ и затем с помощью формулы (23) определяется $\zeta_{дон}$;
- задается глубина воды у щита H (определяемая в зависимости от H_d и уклона местности) и по полученному в работе графику определяется $A_H = \zeta_{max}/a \cdot (t_n)^2$;
- по уже определенному значению $\zeta_{дон}$ находится величина $a \cdot (t_n)^2$;
- вычисляются $L_d = H_d/\alpha_i$ и коэффициент $B_\alpha = \frac{L_d}{at_n^2} + 1$;
- по величине B_α в зависимости от варьируемых значений a находится минимальное время $(t_m)_{min}$, где $t_m = B_\alpha \sqrt{\frac{L_d}{a(B_\alpha - 1)}}$;
- по найденным значениям a , B_α , L_d определяются V_0 и $t_n = \sqrt{\frac{L_d}{a(B_\alpha - 1)}} = \frac{t_m}{B_\alpha}$.

Результаты расчетов для всего реального диапазона изменения параметров водоклиновых судоподъемников обобщены в виде графиков (рис. 11).

При этом из аналитического решения, согласующегося с проведенными экспериментальными исследованиями, установлено, что для одного и того же расчетного судна при глубине воды у торца щита полукамеры $H_{ПВС} = 0,33-0,66 H$ (где H – глубина воды у щита бескамерного судоподъемника для аналогичных условий) и при длине полукамеры $l=0,25-0,33 L$ можно использовать формулу для определения ζ для бескамерного судоподъемника с заменой H на $H_{ПВС}$:

$$\zeta = \frac{V_0 t_n}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} \left[(-1)^{n+1} \frac{1 - \cos\left(\frac{\pi n}{t_n} t\right)}{n^2} \left[\left(1 + e^{\left(-\frac{2K_m H_{ПВС}}{L}\right)}\right) \sin\left(2K_m \frac{x}{L}\right) \right] \right]. \quad (24)$$

Графически зависимости максимальных возвышений свободной поверхности ζ_{max} от глубины воды у щита H и $H_{ПВС}$ для полукамерного судоподъемника представлены на четверти I рис. 11, где по оси абсцисс отложено расстояние от точки соприкосновения водной поверхности со щитом до дна лотка. В четверти II даны графики $at_n^2 = f(A_H)$ при $\zeta_{дон}$ для наиболее распространенных типов существующих судов. В четверти III – вспомогательные кривые $B_\alpha = f(\alpha, at_n^2)$, где α дискретно изменяется от 0,02 до 0,05. В четверти IV располагаются кривые, отражающие связь $t_m = f(B_\alpha, H_d, a, \alpha)$. В качестве расчетных (имеющих необходимую для практики точность) прилагаются графики, где допускается линейное интерполирование значений при рассмотрении ускорений, отличных от $a = 0,01; 0,03; 0,05 \text{ м} \cdot \text{с}^{-2}$. В данном случае в четверти IV (см. рис.11) приведен иллюстративный пример для конкретных параметров: напор на гидроузел $H_d=5 \text{ м}$ и принятое ускорение движения щита $a = 0,01 \text{ м} \cdot \text{с}^{-2}$.

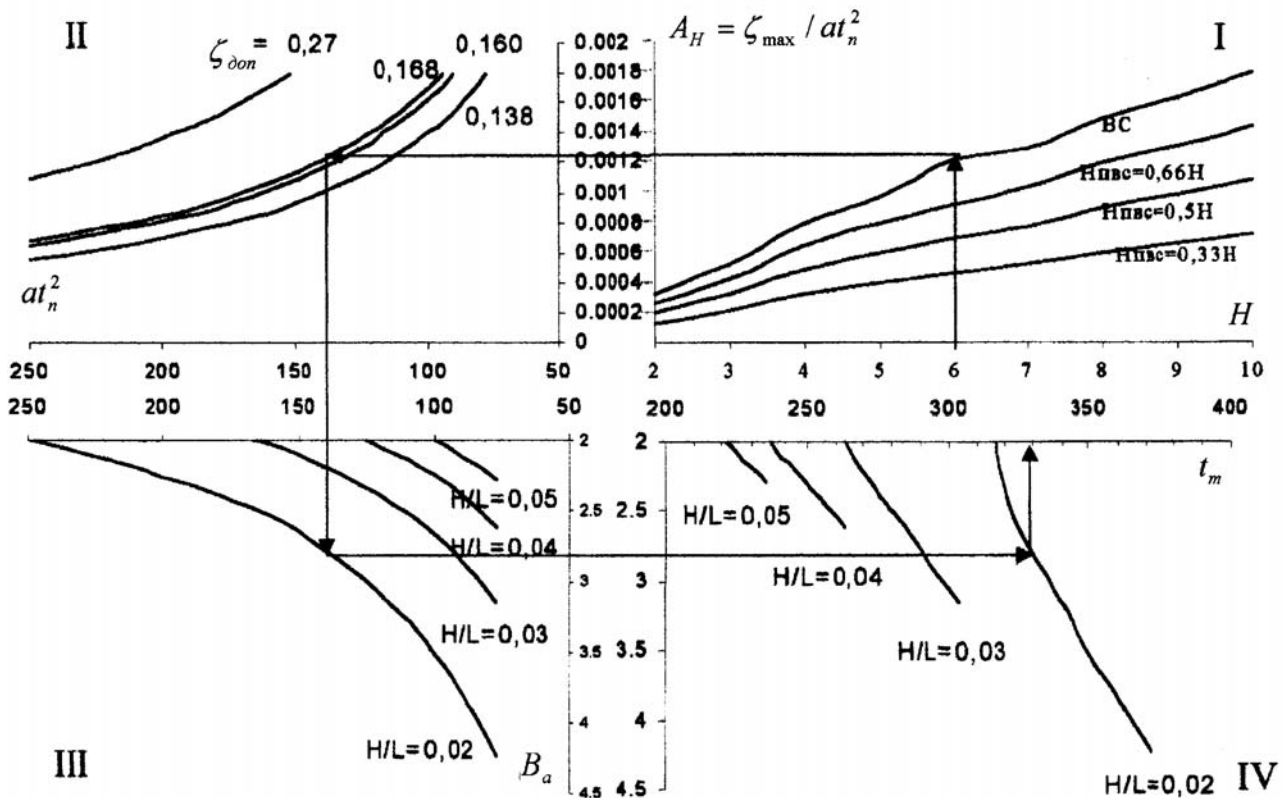


Рис. 11. Определение допустимых параметров движения

Использование графиков позволяет существенно упростить работу проектировщика на уровне принятия технического решения о выборе расчетных параметров любой модификации водоклиновых судоподъемников. Ход решения показан стрелками соответствующего направления (см. рис. 11).

В конце главы приводится постановка задач и рекомендации по определению формы свободной поверхности жидкости на стадии трансформации водяного клина:

- на участке сопряжения с верхним бьефом;
- для использования водоклинового судоподъемника в качестве водосберегающего судопропускного сооружения.

В первом случае была решена задача о нахождении формы свободной поверхности жидкости при движении щита водоклинового судоподъемника к воротам полушлюза верхнего бьефа с трансформацией клина воды на участке сопряжения (рис.12).

Перемещение щита судоподъемника рассматривалось в неподвижной декартовой системе координат X^1Z^1 . Изменение формы свободной поверхности было отнесено к подвижной системе координат XZ , связанной со щитом. Началом системы координат XZ была выбрана точка на передвигном щите на расстоянии $H + \Delta H$ от дна судовозного лотка.

Уравнения количества движения и неразрывности, для внутренней области жидкости записаны в виде

$$\frac{\partial Vh}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(V^2 h + g \frac{h^2}{2} \right) + (g\alpha + a)h = 0, \\ \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial Vh}{\partial x} = 0, \quad (25)$$

где H – глубина воды у щита в начальный момент времени; a – ускорение; S – пройденное щитом расстояние; V – скорость движения массы воды; h – глубина воды в момент времени t ; ΔH – изменение начальной глубины у щита при его перемещении на высоту $S\alpha$.

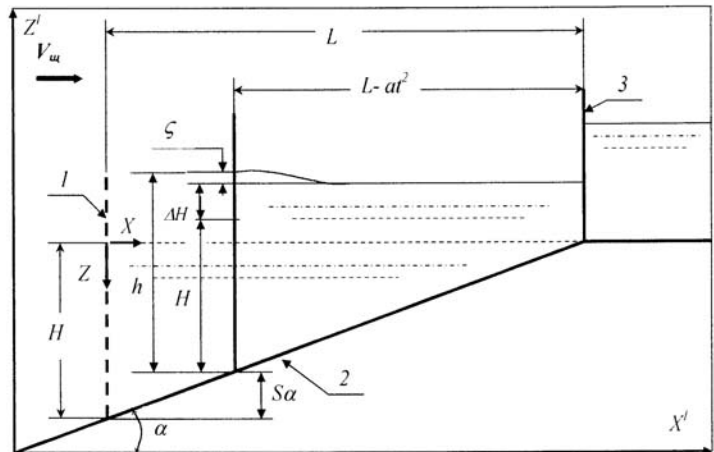


Рис. 12. Расчетная схема трансформации водного клина на участке сопряжения с верхним бьефом
1 – передвижной щит, 2 – судовозный лоток,
3 – полушлюз верхнего бьефа

Граничные условия определялись из условия непротекания жидкости:

- на передвижном щите
$$\frac{\partial \zeta(0, t)}{\partial x} = \frac{a}{g}, \quad (26)$$

- на воротах полушлюза верхнего бьефа
$$\frac{\partial \zeta(x_B, t)}{\partial x} = 0, \text{ где } x_B = L - S. \quad (27)$$

В качестве начального условия было принято допущение, что в начальный момент времени свободная поверхность находится в состоянии покоя, т. е.

справедливы следующие выражения:
$$\zeta(x, 0) = 0, \quad \frac{\partial \zeta(x, 0)}{\partial t} = 0 \quad (28)$$

Исходя из того, что система (25) аналогична системе уравнений газовой динамики изоэнтропического течения идеального газа с показателем адиабаты $\nu = 2$, для решения задачи был использован известный алгоритм решения задач подобного типа. Посредством введения в рассмотрение переменной Римана, и с использованием преобразования Лежандра, была получена система уравнений Эйлера–Пуассона–Дарбу. Однородное решение системы уравнений выражается посредством гипергеометрических функций, которые после алгебраических преобразований были приведены к однородным дифференциальным уравнениям.

В результате анализа полученных зависимостей была доказана корректность применения расчетных уравнений в линеаризованном виде. Решение было использовано для сравнительного анализа гидромеханических параметров различных конструкций узла сопряжения водоклинового судоподъемника с верхним бьефом, на основе которого были разработаны рекомендации по выбору типа узла сопряжения в зависимости от колебаний уровня воды в верхнем бьефе. Следует отметить, что при конструировании узла сопряжения необходимо максимально полно использовать одно из важнейших преимуществ данного типа судоподъемника – возможность согласовывать уровень воды в клине и верхнем бьефе за счет трансформации объема водного клина передвижным щитом.

Для водосберегающего парного судопропускного сооружения (рис. 13) решение было получено с помощью теории длинных волн. Для внутренней области жидкости водяного клина уравнения движения и неразрывности были записаны в виде

$$a + g \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial t} = 0, \quad (29)$$

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial Vh}{\partial x} = 0, \quad (30)$$

где $h = \zeta + H - \alpha x + \Delta H - 0,5aat^2$ – расстояние от дна лотка до свободной поверхности; ζ – ордината свободной поверхности; (H – глубина воды у передвижного щита в начальный момент времени); V и a – соответственно скорость и ускорение перемещения щита; (ΔH – изменение уровня свободной поверхности, достигаемое за счет движения передвижного щита относительно ворот верхнего полушлюза; Q – расход жидкости через выпуски распределительной системы питания).

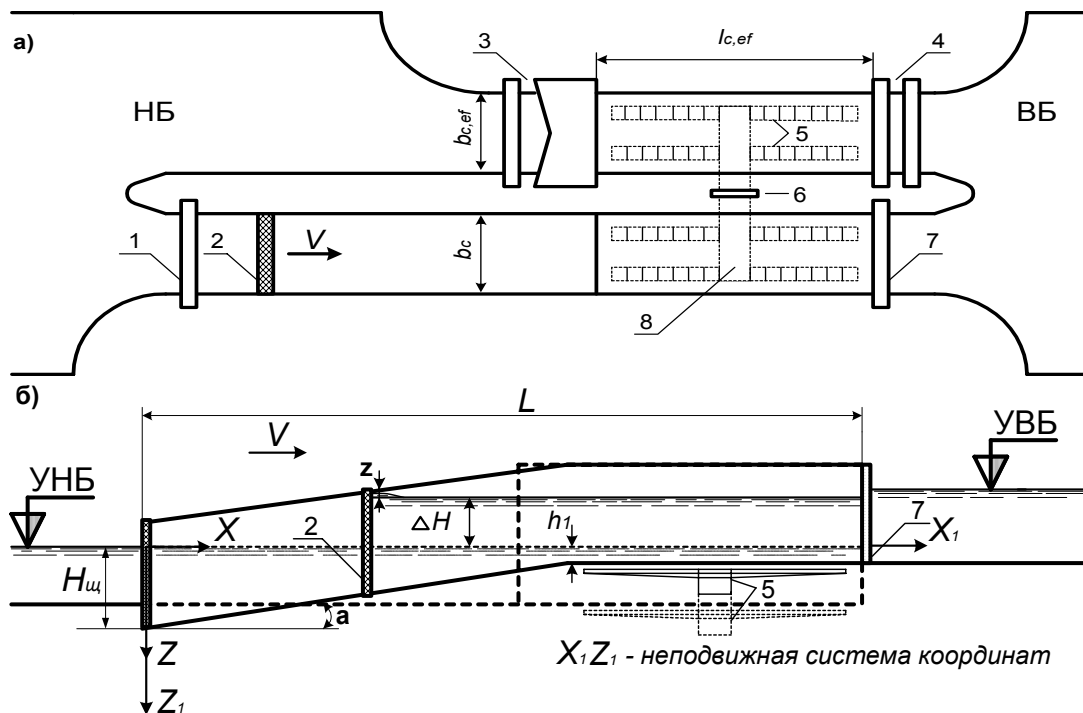


Рис. 13. Парное водосберегающее судопропускное сооружение:

а) – конструктивная схема; б) – расчетная схема

1 – нижний полушлюз ; 2 – передвижной щит; 3 – нижняя голова шлюза; 4 – верхняя голова шлюза; 5 – система питания; 6 – затвор галереи перепуска 8; 7 – верхний полушлюз

Дополнительно к традиционным в данной постановке задачи допущениям было сделано предположение о том, что выпуски распределительной системы питания равномерно расположены по горизонтальной части сопрягающего участка судоподъемника, и отток воды через них не влияет на волновые явления на свободной поверхности жидкости.

Граничные условия на передвижном щите и воротах верхнего полушлюза были найдены из условия непротекания воды на твердых стенках, а в качестве начальных условий было принято допущение о том, что при $t = 0$ свободная поверхность находится в состоянии покоя.

С использованием преобразования Лапласа по x, t для описания формы свободной поверхности было получено уравнение Вольтера второго рода, решение которого было найдено при помощи метода Пикара. Выражение для определения ординат свободной поверхности ζ было получено в виде рядов.

Конструкция парного водосберегающего судопропускного сооружения позволяет регулировать расход воды в перепуске за счет движения передвижного щита. Для данного случая выражение для расхода было записано в виде

$$Q = \mu_0 \omega \sqrt{2gh_n}, \quad (31)$$

где μ_0 – коэффициент расхода системы перепуска; ω – расчетная площадь галереи перепуска; $h_n = f(V)$ – разница уровней воды в шлюзе и судоподъемнике.

Для определения оптимальных режимов движения передвижного щита предлагается следующая последовательность действий. Длина свободной поверхности воды в судоподъемнике L в начальный момент времени определяется из геометрических соображений, в предположении равенства ширины камеры шлюза и судовозного лотка. При этом для обеспечения безопасной стоянки судна в водяном клине длина свободной поверхности должна удовлетворять условию:

$$\frac{VtH_{щ} - 0.5(Vt)^2 \sin \alpha}{(L + l_{c,ef} - Vt)} + H_{щ} - l_{c,ef} \sin \alpha \geq h_n \quad (32)$$

В результате расчетов для реальных параметров судопропускных сооружений было установлено, что практическую значимость имеет только режим движения передвижного щита, при котором номинальное значение ускорения достигается мгновенно $0,015 < \alpha_x < 0,05 \text{ мс}^{-2}$. Для определения параметров режима движения (α_x и V) были использованы зависимости:

$$\begin{aligned} 2L - Vt_1 &= \sqrt{2gH_{щ}} t_1, \\ 2L - Vt_1 - Vt_2 &= \sqrt{2gH_{щ}} t_2, \\ 2L - Vt_1 - Vt_2 - Vt_3 &= \sqrt{2gH_{щ}} t_3 \text{ и т. д.,} \end{aligned} \quad (33)$$

где t_1, t_2, t_3, \dots – соответственно время прихода фронта отраженной первой, второй, третьей и последующих волн к передвижному щиту.

Оптимальный режим движения рекомендовано определять из условия минимизации колебательных явлений в трансформируемом клине воды.

Заключение

Транспортные функции реки носят характер инфраструктуры, т. е. являются обеспечивающими для решения социальных задач и производства. Результатом развития инфраструктуры является внеотраслевой экстернальный по отношению к водному транспорту эффект. Целесообразность транспортного освоения малых рек определяется сопоставлением результатов изменения экологии природного

объекта и экономических последствий использования его как природного ресурса. Малые реки в части их транспортного использования являются более «экологически чистыми», чем магистральные. В результате проведенного анализа современного состояния внутреннего водного транспорта России установлено, что сеть малых водотоков в России используется в транспортных целях не более чем на 1–2 % от своего потенциала, а грузооборот сельскохозяйственных перевозок не превосходит 1–5 % от общего грузооборота водного транспорта.

1. На основе систематизации научно-технических и проектно-конструкторских разработок, а также анализа результатов эксплуатации действующих объектов выявлено, что при транспортном освоении малого водотока могут иметь место следующие виды внеотраслевого эффекта: от развития новых районов; от увеличения перевозок на магистральном водном пути; от производства энергии; от создания противопаводковых и противопожарных систем; от развития рыбного промысла и прудового рыбоводства; от увеличения рентной стоимости земельного и водного фондов региона; экологический; рекреационный, включая водный туризм и спортивное рыболовство; от водопользования.

2. Процесс управления качеством в сфере обслуживания водного транспорта рассмотрен как составная часть деятельности по предоставлению услуги, гарантирующей полное удовлетворение запросов потребителя. С этой целью разработана функциональная схема системы качества транспортной услуги.

3. Сформирована система ценностей, критериев и ограничений для оценки эффективности гидротехнических объектов на малых водотоках. Водотранспортные сооружения предложено характеризовать функциональной, инженерно-конструктивной, архитектурно-художественной и исторической ценностями. При определении земельной квоты и критерия допустимого водохозяйственного использования малого водотока для водохозяйственного объекта на малой реке рекомендуется использовать критерии сохранения общего разнообразия экосистем бассейна, энергетический и значение минимально необходимого расхода для обеспечения воспроизводства биологических ресурсов и поддержания удовлетворительного санитарно-биологического состояния реки. Предложен принцип выбора варианта конструкций водотранспортных гидротехнических сооружений, основанный на использовании методов системного анализа и теории принятия решений. Показано, что число принятых к рассмотрению приоритетных критериев может быть ограничено тремя, а оптимизационных критериев задачи – пятью.

4. Обоснована эффективность обеспечения судоходных габаритов малых рек за счет реализации низконапорной схемы шлюзования. Установлено, что наиболее рациональным способом улучшения судоходных условий является сезонное шлюзование. Путевые работы целесообразны только в ограниченных случаях.

5. Выполнена оценка возможности использования различных типов судов на малых реках. Определение размерений судов предложено производить по разработанной в диссертации блок-схеме совместной оптимизации основных характеристик судов и судопропускного сооружения.

6. Составлена общая характеристика судопропускных сооружений низконапорных шлюзованных систем России и стран СНГ и выполнен подробный анализ их компоновочных, конструктивных и эксплуатационных особенностей, на основании которого установлено следующее: основным типом камеры низконапорных шлюзов является камера с отдельностоящими стенами и водопроницаемым днищем; наиболее целесообразны головы шлюзов с гасительными устройствами; наиболее перспективны сооружения и конструкции из гибкого синтетического материала; для ускорения судопропуска и обеспечения безопасности движения судов в подходных каналах целесообразно использование технических предложений по автоматической швартовке и поперечному перемещению судов с применением причально-наводочных устройств.

7. Проведена инженерно-конструктивная факторная оценка систем питания камер судоходных шлюзов. Предложен общий вероятностный критерий оценки качества, определяемый как произведение частных факторов: эффективности работы гасительных устройств, металлоемкости конструкций ворот и затворов, с учетом особенностей конструкций и эксплуатации сооружений.

8. Выявлено, что действующие рекомендации по обеспечению безопасности базируются на экспертной оценке риска аварий гидротехнических сооружений. С использованием результатов статистической обработки данных комплексных обследований ряда отечественных шлюзов разработан вероятностный метод оценки эксплуатационной надежности камеры шлюза.

9. В качестве судопропускных сооружений на реках с небольшими расходами воды рекомендованы транспортные судоподъемники. Установлено, что в случае превентивного развития водного туризма, наиболее рациональным является применение водоклиновых судоподъемников, способных производить безопасный пропуск судов различных размерений, осуществляя их транспортировку наплаву.

10. Проведены фундаментальные экспериментально-теоретические исследования гидромеханических процессов, происходящих в транспортируемом клине жидкости полукамерного водоклинового судоподъемника, позволившие установить закономерности процесса формирования колебательных явлений.

11. Разработана методика расчета параметров судоподъемника, на основе комбинированного операционного метода, которая позволила найти решение задачи в ограниченной области сложной конфигурации с особыми точками. Корректность методики подтверждена решением тестовых задач и результатами экспериментальных исследований. Даны рекомендации по выбору оптимальных режимов движения щита в зависимости от напора на гидроузел. Аналитически установлено, что на малых реках практическую значимость имеет режим движения щита, при котором ускорения $0,015 < \alpha_x < 0,05 \text{ мс}^{-2}$ достигаются мгновенно.

12. Исходя из аналитического решения задачи по определению формы свободной поверхности жидкости на стадии трансформации водного клина, даны рекомендации по выбору типа сопряжения судовозного лотка с верхним бьефом.

Разработана методика гидравлического расчета водосберегающего парного судопропускного сооружения, в котором лоток водоклинового судоподъемника, одновременно с судопропуском, выполняет функции сберегательного бассейна.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах автора:

1. Результаты лабораторных исследований гидромеханических процессов при эксплуатации клинового судоподъемника // Гидротехнические сооружения: Межвузовский сб. / ДВПИ. Владивосток, 1980 С. 130-136.

2. Перспективы применения бескамерных водоклиновых судоподъемников // Гидротехническое строительство. М.: Энергоиздат, 1981. № 12. С. 26-28 (соавторы Симаков Г.В., Мошков А.В.).

3. Моделирование гидромеханических процессов водоклинового судоподъемника // Гидротехнические сооружения: Межвузовский сб. / ДВПИ. Владивосток, 1981 С. 121-128.

4. Проведение исследований на крупномасштабной модели, разработка и представление в Минводхоз СССР, Минэнерго СССР, Минречфлот РСФСР рекомендаций по применению и проектированию бескамерных судоподъемников на трактах переброски стока // Аннотации научно-исследовательских работ, завершенных в 1979 г. № ГР 79023774. ЛПИ. Л., 1981. С. 6. (соавтор Симаков Г.В.).

5. Об определении присоединенных масс жидкости для судов в водоклиновом судоподъемнике судоподъемника // Гидротехнические сооружения: Межвузовский сб. / ДВПИ. Владивосток, 1984 С. 60-67.

6. Некоторые результаты лабораторных исследований эксплуатационных режимов работы водоклинового судоподъемника // Гидротехнические сооружения / ДВГУ. Владивосток, 1986. С. 63-70.

7. Наклонный бескамерный судоподъемник: А.с. № 1270210. СССР, 1986 (соавтор Головин А.В.).

8. Аналитическое решение задачи о транспортировке судна в водоклиновом судоподъемнике // Гидротехнические сооружения / ДВГУ. Владивосток, 1986. С. 48-55 (соавтор Шхинек К.Н.).

9. Рациональные конструкции водоклиновых судоподъемников // Гидротехническое строительство. М.: Энергоатомиздат, 1988. № 7. С. 10-14. (соавторы Симаков Г.В., Шхинек К.Н., Мошков А. В.).

10. Пропускная способность шлюзов и судоподъемников: Метод. указания к курсовому и дипломному проектированию / ЛПИ. Л., 1988. 54 с (соавтор Мошков А.В.).

11. Гидродинамические исследования водоклинового судоподъемника // Гидравлика водохозяйственных объектов: Тр. ЛПИ. 1988. № 424. С. 31–35 (соавтор Шхинек К.Н.).

12. Судходные каналы: Учеб. пособие / СПбГТУ. СПб., 1991. 94 с. (соавторы Марченко Д.В., Мошков А.В.).

13. Гидродинамические исследования воднотранспортных гидротехнических

сооружений: Учеб. пособие / СПбГТУ. СПб., 1993. 76 с. (соавтор Большев А.С.)

14. Методология оценки надежности зданий и сооружений исторических территорий // Тез. докл. НПК по вопросам реставрации (памяти Г.М. Штендера). Новгород, 1993. С. 15-18 (соавторы Свечников Е.Л., Соколов В.А.).

15. Вероятностный подход к определению надежности камеры судоходного шлюза на основе диагностической информации // Тез. докл. РНТК «Инновационные наукоемкие технологии для России». Ч. 1. СПб: Изд – во СПбГТУ, 1995. С. 46 (соавтор Симакова И.В.).

16. Организация судоходства по малым рекам и водоемам. // Там же. С. 47 (соавтор Симаков Г.В.).

17. Гидротехнические сооружения на реке Волге: Учеб. пособие / СПбГТУ. СПб., 1996. 64 с. (соавторы Мошков А.Б., Немчинов В.В.).

18. Водотранспортное освоение малых рек // Тез. докл. Всероссийской науч.-метод. конф. СПбГУВК. СПб., 1994. С. 89-90 (соавтор Гапеев А.М.).

19. Методология оценки эксплуатационной надежности судоходных шлюзов // Там же. С. 93.

20. Сооружения водного транспорта: Учеб. пособие. СПб.: Изд – во СПбГТУ, 1995. 83 с. (соавторы Беляев Н.Д., Загрядская Н.Н.).

21. Экологический аспект водотранспортных освоений малых рек // Материалы НТК «Фундаментальные исследования в технических университетах». СПб: Изд – во СПбГТУ, 1997. С 92 – 93.

22. Вероятностный метод оценки состояния камер шлюзов по данным створных наблюдений // Гидротехническое строительство. 1998. № 11. М.: Энергопрогресс. С. 21 – 24.

23. Водные пути и гидротехнические сооружения Волго-Балта: Учеб. пособие / СПбГУВК. СПб., 1998. 121 с. (соавторы Гапеев А.М., Ключев В.В.).

24. Эксплуатационная надежность камер парных судоходных шлюзов // Энергетика. Гидротехника: Тр. СПбГТУ, 1998. № 475. С.110-116.

25. Аналитическое решение задачи определения гидравлических характеристик полуканального водоклинового судоподъемника // Тез. докл. науч.-метод. конф. СПбГУВК. Ч. 2. СПб., 1998. С. 138 (соавтор Григорьев И.Н.).

26. Путевые работы на водном транспорте. Учеб. пособие. СПб.: Изд – во СПбГТУ, 1998. 87 с. (соавтор Беляев Н.Д.).

27. Разработка рационального состава комплекса гидротехнических сооружений для освоения сети малых рек и каналов в Северо-Западном регионе России (проект 2.2): Отчет заключ. за 1997-1999 гг. по РМНТП «Развитие транспортной составляющей инфраструктуры С-3 региона России.» № ГР 01990004573, 26.11.99. 46 с.

28. Транспортное использование сети малых рек и каналов для перевозки грузов // Транспортный клуб. 1999. Вып. № 2. С. 22-23 (соавтор Тимохин Г.М.).

29. О влиянии работы судовых движителей на размыв дна внутригородских водных путей Санкт-Петербурга // Тез. докл. на Междунар. научн.-техн. конф. «Акватерра». СПб., 1999. С. 25-26 (соавтор Беляев Н.Д.).

30. Совершенствование конструкций и методов расчета водоклиновых судоподъемников // Тез. докл. Науч.-метод. конф., посвященной 190-летию транспортного образования. Ч. 1. / СПбГУВК, СПб., 1999. С.50-52.

31. Системный подход к использованию потенциала малых рек // Там же. С. 43-45 (соавтор Расторгуев И.Е.).

32. Методология научного обоснования необходимости реконструкции, модернизации или строительства новых судопропускных сооружений // Там же. С. 54-56.

33. О выборе рационального состава ГТС для транспортного освоения малых рек // Там же. С.23-25 (соавтор Расторгуев И.Е.).

34. Техничко-экономические аспекты транспортного строительства на малых реках // Водные пути и гидротехнические сооружения: Сб. науч. тр. СПбГУВК, Ч. II. СПб., 2000. С. 201-223 (соавторы Гапеев А.М., Расторгуев И.Е.).

35. Полукамерные водоклиновые судоподъемники // Там же. С. 224-232.

36. Определение гидродинамических характеристик полукамерного водоклинового судоподъемника // Там же. С. 233-246 (соавтор Григорьев И.Н.).

37. Опыт проектирования и эксплуатации нижних подходных каналов шлюзов на внутренних водных путях России // Там же. С. 247-261 (соавторы Альхименко А.И., Колосов М.А.).

38. Оценка размывающего воздействия судовой струи на русла внутригородских водных путей Санкт-Петербурга // Там же. С. 262-277 (соавтор Беляев Н.Д.).

39. Системы питания камер низконапорных судоходных шлюзов // Водные пути и гидротехнические сооружения: Сб. науч. тр. СПбГУВК, СПб., 2002. С 117-124 (соавтор Гапеев А.М.).

40. Конструктивные, гидравлические и эксплуатационные особенности систем питания камер судоходных шлюзов для малых рек // Там же. С. 125-134 (соавтор Гапеев А.М.).

41. Определение параметров движения передвижного щита водоклинового судоподъемника // Там же. С. 195-208 (соавтор Григорьев И.Н.).

42. Определение формы свободной поверхности жидкости на стадии трансформации водного клина //Материалы межвузовской науч. конф. СПбГТУ, СПб., 2002. С. 25-27 (соавтор Григорьев И.Н.).

43. Гидротехнические сооружения. Судоходные шлюзы (системы наполнения и опорожнения камер): Учеб. пособие / СПбГУВК. СПб., 2002. 82 с. (соавтор Гапеев А.М.).

44. Речные судоходные шлюзы: Учеб. пособие. СПб.: Изд – во СПбГПУ, 2002. 104 с. (соавтор Гапеев А.М.).

45. Факторный анализ головных систем питания судоходных шлюзов // Межвузовский сб. науч. тр. / МГСУ. М., 2002. С. 130-137 (соавтор Гапеев А.М.).