

На правах рукописи

Бондарчук Максим Александрович

**РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ ЗАЩИТЫ ПРИБРЕЖНЫХ
ТЕРРИТОРИЙ В УСТЬЯХ РЕК ОТ НАГОННЫХ ЯВЛЕНИЙ**

05.23.07 - Гидротехническое строительство

05.23.16 – Гидравлика и инженерная гидрология

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Москва – 2003

Работа выполнена в Московском государственном строительном университете.

Научный руководитель – доктор технических наук, профессор
Правдивец Юрий Петрович.

Научный консультант – доктор технических наук, профессор
Боровков Валерий Степанович.

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Асарин Александр Евгеньевич

кандидат технических наук
Самарин Владимир Федорович

Ведущая организация – Всероссийский научно-исследовательский институт
гидротехники им. Б.Е. Веденеева, г. Санкт-Петербург.

Защита диссертации состоится 16 декабря 2003 г. в 17⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д 212.138.03 при Московском государственном строительном университете по адресу: г. Москва ул. Спартаковская д. 2/1 ауд. 212.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке университета.

Автореферат разослан « » октября 2003 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

 В.С. Боровков

2003-А
16099

ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Устьевые участки крупных рек, впадающих в моря, являются наиболее плотно населенными районами земного шара. Обилие пресной воды, плодородие почвы, богатство рыбных ресурсов, скрещение речных и морских путей – это весьма важные факторы освоения этих территорий. Вместе с тем устья многих крупных рек гораздо чаще, чем другие прибрежные районы, оказываются во власти грозных стихийных сил природы - нагонных наводнений.

В последние десятилетия в ряде государств мира продолжают активные развитие и освоение приморских территорий (в основном примыкающих к устьевым участкам крупных рек), в том числе находящихся в зонах периодического затопления во время нагонных и приливных колебаний уровней. Защита осуществляется путем возведения ограждающих сооружений (преимущественно земляных дамб) с судо- и водопропускными отверстиями. Но из-за высокой стоимости строительных работ и дальнейших эксплуатационных затрат не удается приступить к выполнению многих защитных комплексов или закончить их строительство, например в Санкт - Петербурге и Венеции. Поэтому обеспечение необходимой надежной защиты территорий от воздействия моря с помощью специальных гидротехнических сооружений при строительстве которых наносится минимальный ущерб природе и которые не требуют больших эксплуатационных затрат, является актуальной задачей. В данной работе рассмотрена возможность создание такого гидротехнического комплекса путем строительства судо- и водопропускных сооружений без перекрытия пролета либо частичным перекрытием пролета по высоте с использованием недорогих затворов из мягких оболочек.

Цель и задачи исследований. Цель работы заключается в разработке новых компоновочных решений судо- и водопропускных сооружений для защиты прибрежных территорий и городов от нагонных явлений на основании результатов комплексных модельных гидравлических исследований и аналитических расчетов. Для достижения поставленной цели решены следующие задачи:

- аналитическими расчетами и физическими экспериментами обоснована возможность использования для защиты от нагонных явлений судо- и водопропускных сооружений без установки затворов либо с частичным перекрытием отверстия затворами из мягких оболочек;
- экспериментально выявлены взаимосвязи геометрических и гидравлических характеристик судо- и водопропускных сооружений (коэффициенты местного сопротивления на отдельных участках и коэффициент расхода m);
- определены гидравлические условия работы предлагаемых компоновочных решений в различных режимах, установлены ограничения,

обеспечивающие допустимый режим судоходства, и скоростные режимы, исключая повреждение конструкций;

- предложены компоновочные решения, упрощающие конструкции ряда проектируемых и строящихся сооружений

Научная новизна работы заключается в следующем:

- предложена возможность осуществления защиты устьевых участков рек от нагонных явлений путем ограничения поступающего расхода с помощью судо- и водопропускных сооружений в ограждающем комплексе, параметры которых определяются из условия допустимого подъема уровня в защищаемой акватории с учетом реального гидрографа нагона;

- при решении задачи о развитии нагонной ситуации в защищаемой акватории посредством составления упрощенных балансовых уравнений выявлено значительное влияние коэффициента расхода m на получаемые результаты;

- определены факторы, влияющие на коэффициент расхода судо- и водопропускных сооружений; экспериментально установлены характер и степень этого влияния; получены данные для расчета коэффициента расхода m при различных геометрических параметрах;

- получено соотношение уровней в защищаемой акватории и на выходе из сооружения, что значительно упрощает решение задачи распространения нагонных явлений в защищаемой акватории;

- показана возможность применения для ряда городов, которые наиболее всего подвержены воздействию нагонных наводнений, предлагаемых двух компоновочных схем для ситуации в районе г. Калининграда и схемы с ограничением высоты отверстия затворами из мягких оболочек в защитных сооружениях г. Санкт – Петербурга.

На защиту выносятся:

- данные расчетно–теоретических и экспериментальных исследований, компоновочно–конструктивных решений, которые позволяют ограничить нагонный расход, проходящий через сооружения, без превышения критического уровня в защищаемой акватории;

- результаты обоснования и расчета пропускной способности предлагаемых компоновочных решений: без ограничения высоты отверстия или с его частичным ограничением затворами из мягких оболочек;

- методика выбора компоновочных схем судо- и водопропускных сооружений в составе защитного комплекса на основе прогнозирования развития ситуации при нагонном явлении.

Достоверность основных научных исследований, рекомендаций и выводов подтверждается результатами численных экспериментов, согласующимися с данными натуральных наблюдений; совпадением расчетных данных по

определению пропускной способности судо- и водопропускных сооружений с данными лабораторных экспериментов.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы были доложены на 6-й научно-технической конференции студентов и молодых ученых (МГСУ, г. Москва).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 4 статьи.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, выводов, списка литературы, приложений. Работа содержит 202 страницы, в том числе 44 таблицы, 64 иллюстрации. Список литературы состоит из 171 наименования, из них 18 на иностранных языках.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Первая глава посвящена обзору современного состояния вопроса обеспечения защиты городов, расположенных в устьевых участках рек, от нагонных явлений в нашей стране и за рубежом. Существующие технические решения были воплощены или находятся на стадии возведения в таких районах как западная часть Голландии, устье р. Эльбы (г. Гамбург), устье р. Темзы (г. Лондон), Венеция, устье р. Невы (г. Санкт – Петербург), устье р. Преголь (г. Калининград). За последнее время усилилось внимание многих исследователей к изучению вопроса упрощения конструкции защитных сооружений, которое исключает развития катастрофических последствий нагона для защищаемой территории города.

На основании анализа предлагаемых и реализуемых проектов отмечены существенные положительные достижения в борьбе с нагонными явлениями:

- рассмотренные технические решения успешно выполняют задачу защиты ограждаемой территории от неблагоприятных природных явлений;
- после ввода в эксплуатацию разработанные конструкции обеспечивают сохранение природного и экологического баланса;
- защитные комплексы способствуют решению ряда дополнительных хозяйственных задач (например, замыкание кольцевой автодороги г. Санкт-Петербурга, создание новых территорий для освоения и т.д.);
- математические модели прогнозирования развития нагонных явлений в акватории позволяют удовлетворительно оценить предстоящую обстановку.

Выявлен также и ряд недостатков:

- относительно высокая стоимость традиционных технических решений не позволяет закончить строительство либо приступить к выполнению ряда объектов (например, Санкт-Петербург, Венеция);
- громоздкие конструктивные решения затворов судо- и водопропускных сооружений усложняют их строительство и дальнейшую эксплуатацию;
- сооружения рассчитаны только на постоянное закрытие во время неблагоприятных явлений (судоходство полностью прекращается), что приводит к снижению грузооборота;
- недостаточные знания о гидравлических характеристиках сооружений (коэффициенты местного сопротивления и коэффициент расхода m) приводят к необходимости лабораторных исследований каждого из предлагаемых решений.

Возможно избежать отмеченные негативные моменты в существующих системах защиты от нагонных явлений путем регулирования ширины судо- и водопропускных сооружений в составе защитного комплекса без перекрытия отверстия либо с частичным перекрытием по высоте, что позволяет уменьшить экономическую часть проекта. В связи с чем в конце главы сформулированы цель данной работы и задачи диссертационных исследований.

Вторая глава диссертации посвящена разработке новых компоновочных схем, решению задачи развития нагонных явлений в отгораживаемой акватории и выявлению факторов, влияющих на решение этой задачи и гидравлические параметры сооружения. Как было отмечено в первой главе, в состав существующих технических решений по защите городов от подтопления нагонными водами входят дамбы, отгораживающие часть акватории, судо- и водопропускные сооружения. Предлагается отказаться от использования на ряде сооружений затворов, полностью перекрывающих отверстие, или с частичным уменьшением высоты судо- и водопропускного сооружения с использованием мягких оболочек.

Для обоснования предлагаемых конструктивных решений необходимо произвести расчет развития нагонного явления, а именно определение режима повышения уровня в защищаемой акватории.

Судо- и водопропускное сооружение без затвора может рассматриваться как водослив с нулевым порогом и боковым сжатием потока. Для определения расхода, проходящего через отверстие, воспользуемся формулой расхода через водослив

$$Q = m \cdot b \cdot \sqrt{2 \cdot g} \cdot h_{(1)0}^{3/2}, \quad (1)$$

где m – коэффициент расхода; b – ширина сооружения; $h_{(1)0} = H_0$ – уровень на подходе к сооружению с учетом скоростного напора.

Основываясь на ряде допущений для решения поставленной задачи, было предложено следующее уравнение, в дальнейшем называемое балансовым:

$$(Q_0 + Q_p + Q_r) \cdot \Delta t + m \cdot b \cdot \sqrt{2 \cdot g} \cdot H_0^{3/2} \cdot \Delta t = \Omega \cdot \Delta h, \quad (2)$$

где Δt – рассматриваемый малый период времени; Δh – изменение уровня в защищаемой акватории за период времени Δt ; Ω – площадь водного зеркала защищаемой акватории в рассматриваемый период времени; $Q_0 + Q_p + Q_r = const$; Q_p – расход реки; Q_r – расход поверхностного стока, не входящий в расход реки; Q_0 – осадки (снег, дождь). Из-за сложности реального рельефа акватории площадь Ω следует определять на каждом i -том шаге расчета в зависимости от величины $\sum_1^{i-1} \Delta h_i$.

Уравнение (2) не может быть проинтегрировано аналитически, поэтому для его решения применяется численно пошаговый метод.

На основе анализа натуральных измерений рассмотрена возможность замены сложной формы естественного гидрографа нагона в Финском заливе более простой – в виде треугольника, у которого фаза развития нагона длится $1/3$ времени общей продолжительности нагона, а фаза спада нагона соответственно $2/3$, что с достаточной степенью приближения соответствует реальным гидрографам нагонных явлений (рис. 2). Рассматривалось решение для г. Санкт – Петербурга, так как значения коэффициентов расхода m его судо- и водопропускных сооружений известны точно (рис. 1).

Произведенная оценка погрешности в полученных результатах, которая составляет максимум 3,8%, (см. рис. 2), позволила сделать вывод о том, что замена естественного гидрографа более простым представляется возможной. Это предложение значительно упрощает и автоматизирует дальнейший анализ повышения уровня в акватории на основе уравнения (2). Полученные значения темпа нарастания скорости течения через судо- и водопропускные сооружения на каждом шаге интегрирования (составляют максимум 0,1% от величины ускорения свободного падения g) показали, что влияние сил инерции незначительно и в дальнейшем может не учитываться.

Для выявления степени влияния коэффициента расхода m сооружения, входящего в формулу (2), на расчетное прогнозирование были выполнены тестовые расчеты на основе уравнения (2) с использованием упрощенного гидрографа для г. Санкт - Петербурга.

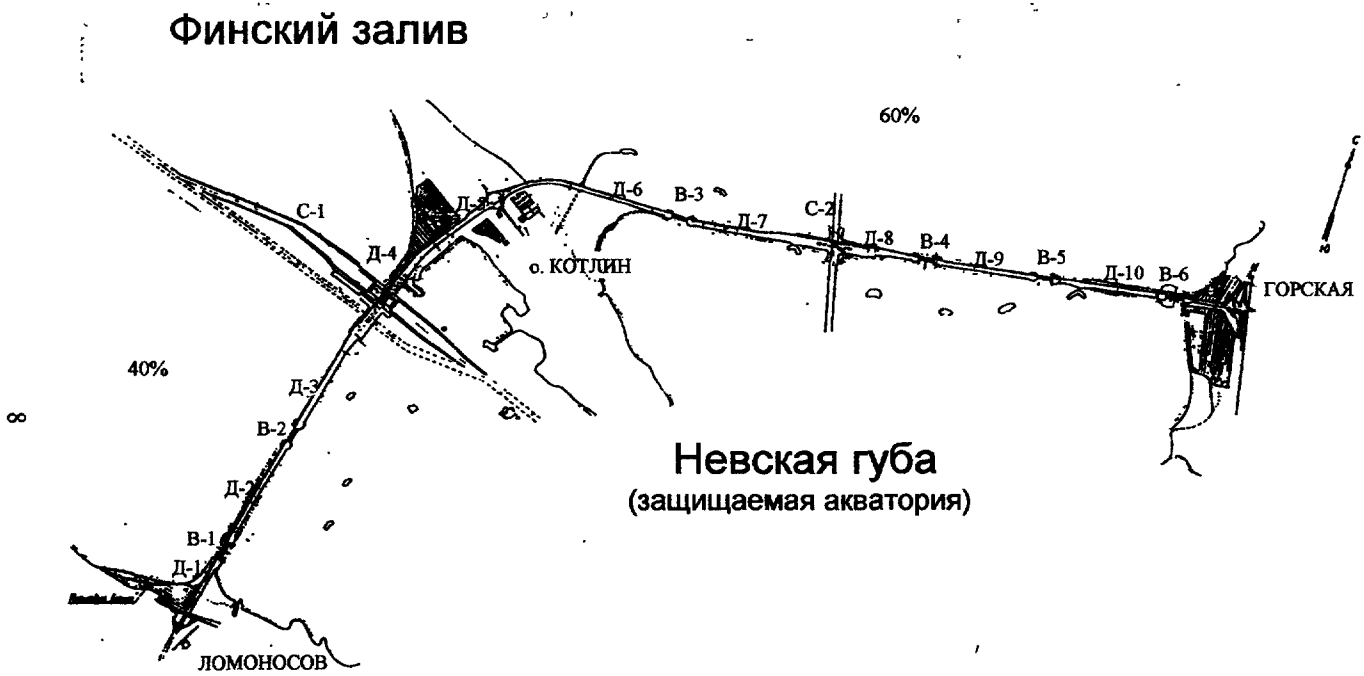


Рис. 1. Защитные сооружения г. Санкт-Петербурга:
 В-1...В-6 – водопропускные отверстия; Д-1 ... Д-10 – защитные дамбы; С-1 и С-2 – судопропускные сооружения

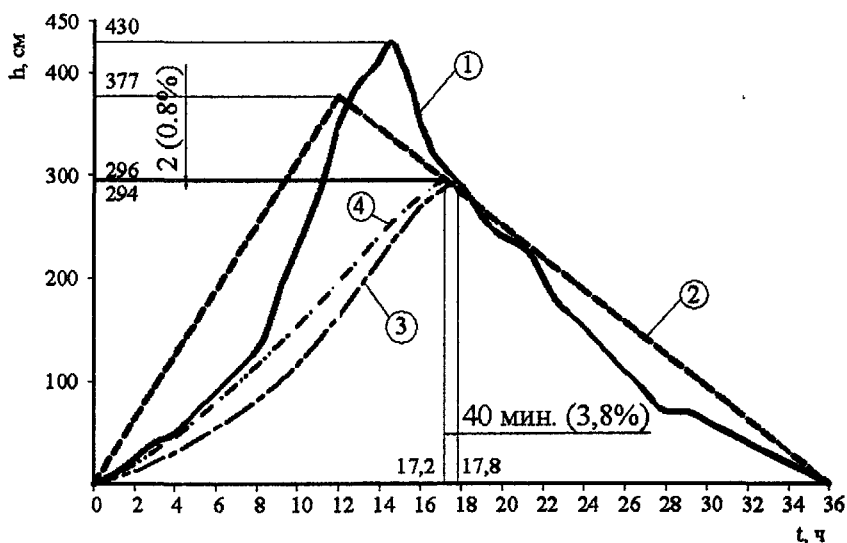


Рис. 2. Развитие нагонной ситуации при естественном и упрощенном гидрографе для защитных сооружений г. Санкт – Петербурга: 1 – естественный ход уровня в Финском заливе; 2 – упрощенный ход уровня в Финском заливе; 3 – рассчитанный ход уровня в Невской губе по естественному ходу уровня в Финском заливе; 4 – рассчитанный ход уровня в Невской губе по упрощенному ходу уровня в Финском заливе

К рассмотрению приняты следующие значения коэффициента m : известные коэффициенты расхода (m – величина переменная) для существующих сооружений, которые использованы в работах К.С. Попова, А.Б. Векслера, Л.В. Мошкова, С.А. Кузьмина, Я.З. Маневича при обосновании защитного комплекса г. Ленинграда; переменный коэффициент расхода с максимальным значением $m=0,385$, который приведен в работах И.В. Лебедева, С.В. Избаша при исследовании пионерного перекрытия потока; коэффициент $m=0,385$ постоянный (сооружение работает как водослив с широким порогом), который указан в работах А.С. Офицера, В.В. Смылова, Ф.И. Пикалова, Ю.А. Ибад-Заде, А.Р. Березинского, Р.Р. Чугуева, И.И. Агроскина; коэффициент $m=0,49$ постоянный (сооружение работает как водослив практического профиля), который отражен в работах О.Г. Затворницкого, Б.И. Сергеева, П.М. Степанова, Б.Б. Шумакова. Данные результатов расчета представлены на рис. 3.

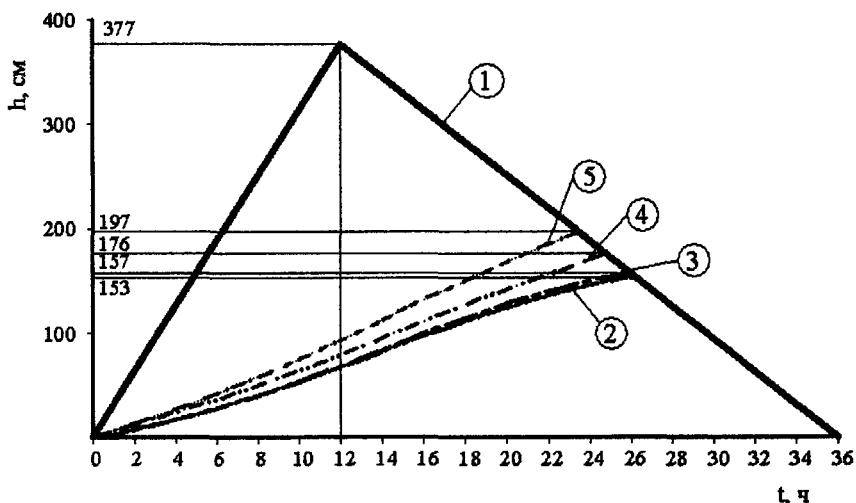


Рис. 3. Варианты развития нагонных явлений в защищаемой акватории г. Санкт-Петербурга при различных методах определения коэффициента расхода m : 1 – упрощенный ход уровня в Финском заливе; 2 – рассчитанный ход уровня в Невской губе переменном m ($m_{\max}=0,354$); 3 – рассчитанный ход уровня в Невской губе при переменном m ($m_{\max}=0,385$); 4 – рассчитанный ход уровня в Невской губе при постоянном $m=0,385$; 5 – рассчитанный ход уровня в Невской губе при постоянном $m=0,490$

Результаты расчета показали значительное влияние коэффициента расхода m на развитие нагонной ситуации в защищаемой акватории. В связи с этим вторая часть главы посвящена определению факторов, влияющих на данный коэффициент.

Далее были подвергнуты анализу данные, полученные при решении уравнения Сен-Венана и (2) для защитных сооружений Санкт-Петербурга. Необходимо отметить, что уравнение Сен-Венана использовалось при моделировании явлений в устье р. Невы и прогнозировании подъема уровня. Данное уравнение имеет ряд существенных недостатков: не учитываются приточность реки и ее влияние на превышение уровня, сложное очертание поймы (предполагается наличие прямоугольного зеркала с постоянной шириной). Как показывают расчеты, данные, полученные при решении уравнения Сен-Венана, на 10% меньше, чем при решении уравнения (2). Это связано с тем, что приточность р. Невы не была учтена, так как пойма имеет в основном прямоугольное очертание и площадь водного зеркала можно считать постоянной. Дополняя при решении уравнения Сен-Венана отметки уровней в

каждом шаге превышением от расхода реки, получаем разницу в результатах по сравнению с уравнением (2) порядка 2%. Эти результаты говорят о том, что при решении задачи распространения нагонных явлений в защищаемой акватории возможно с достаточно высокой степенью точности использовать более простое уравнение (2).

Рассмотрим уравнение для прогнозирования развития нагонной ситуации в акватории после выравнивания уровней. В данный период времени течение через отверстие будет происходить из защищаемой акватории в залив, и уравнение (2) примет следующий вид:

$$(Q_o + Q_p + Q_r) \cdot \Delta t - m \cdot b \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot h_o^{3/2}} \cdot \Delta t = \Omega \cdot \Delta h. \quad (3)$$

Для подтверждения предложенных к рассмотрению компоновочных решений без установки затворов в сооружениях или с установкой затворов из мягких оболочек для регулирования высоты отверстия рассматриваются две расчетные схемы, представленные на рис. 4 и 5. Для данных двух случаев необходимо точное знание коэффициента расхода m .

Из уравнения Бернулли для сечений 1-1 и 5-5 (рис. 4 и 5) было установлено, что выражение для коэффициента расхода m имеет следующий вид:

$$m = \frac{1}{\sqrt{\alpha_5 + \zeta_{1-3} + \zeta_{3-5}}} \cdot \frac{h_5}{h_{100}} \cdot \sqrt{1 - \frac{h_5}{h_{100}}}, \quad (4)$$

где ζ_{1-3} - коэффициент местного сопротивления на участке 1-3; ζ_{3-5} - коэффициент местного сопротивления на участке 3-5; α_5 - коэффициент Кориолиса в сечении 5-5; h_5 - уровень в сечении 5-5 (на выходе из сооружения);

$$h_{100} = h_1 + \alpha_1 \cdot \frac{V_1^2}{2 \cdot g}, \quad (5)$$

где h_1 - уровень в сечении 1-1 (гидрограф нагона); V_1 - скорость в сечении 1-1; α_1 - коэффициент Кориолиса в сечении 1-1.

Анализ формулы (4) показал, что наибольшее влияние на коэффициент m оказывает изменение параметра $\frac{h_5}{h_{100}}$, хотя величина $R = \alpha_5 + \zeta_{1-3} + \zeta_{3-5}$ также оказывает заметное влияние. На рис. 6 представлены возможные значения коэффициента m при различных $\frac{h_5}{h_{100}}$ и R .

Становится очевидно, что коэффициент расхода m зависит от параметров

$$\frac{h_5}{h_{100}}, \zeta_{1-3}, \zeta_{3-5}.$$

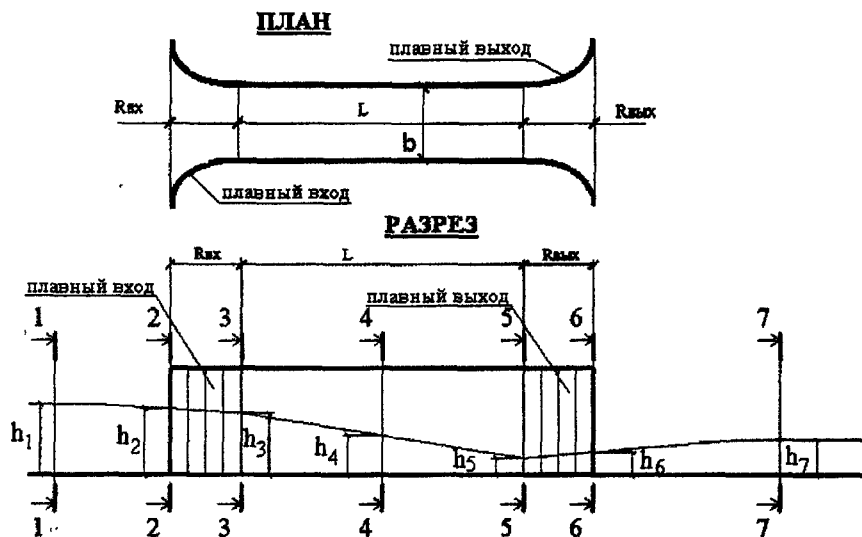


Рис. 4. Расчетная схема без установки затворов

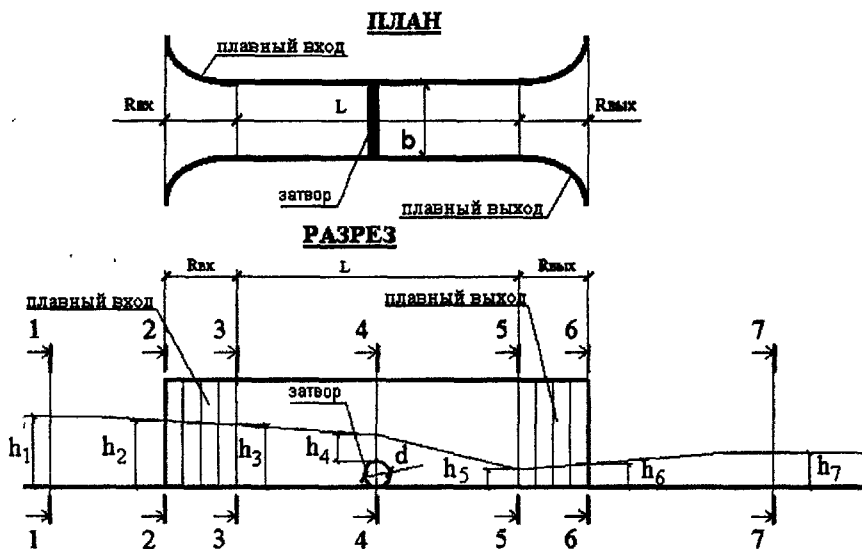


Рис. 5. Расчетная схема с затвором из мягкой оболочки

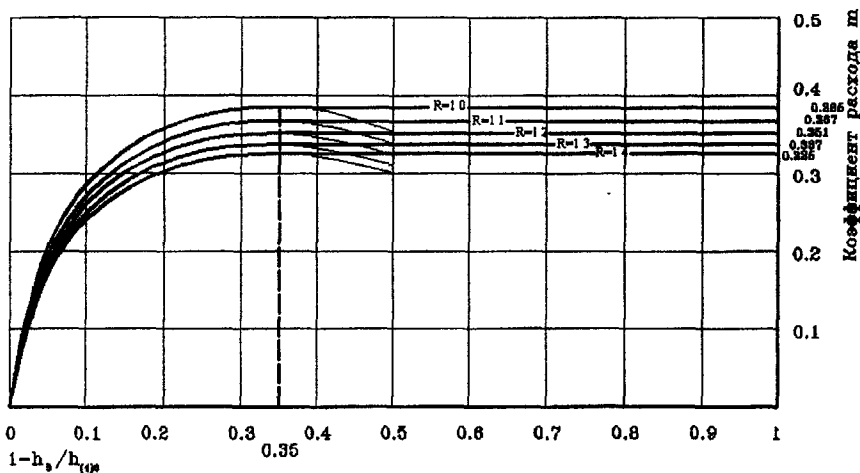


Рис. 6. График изменения коэффициента расхода m

Определим факторы, влияющие на выявленные параметры, входящие в выражение (4). Принимая во внимание, что в условиях плавного входа на участке 1-3 и безотрывного обтекания при большом радиусе скругления значительная часть потерь связана с потерями на трение, тогда

$$\zeta_{1-3} = f\left(\lambda_3; \frac{R_{\text{вх}}}{b}; \frac{b}{h_3}\right), \quad (6)$$

где $R_{\text{вх}}$ – осредненный радиус входа (если очерчен по эллипсу).

Для расчетной схемы (рис. 4) течение на участке 3–5 является неравномерным. Следуя обычной практике расчета неравномерных течений, потери напора на участке 3-5 определяем так же, как при равномерном течении. Тогда получаем, что

$$\zeta_{3-5} = f\left(\lambda_5; \frac{L}{b}; \frac{b}{h_5}\right), \quad (7)$$

где L – длина участка 3-5.

Отметим, что коэффициент ζ_{3-5} для расчетной схемы, представленной на рис. 5, состоит из двух составляющих $\zeta_{3-5} = \zeta_{3-4} + \zeta_{4-5}$, где коэффициент потерь ζ_{3-4} является коэффициентом потерь при внезапном сужении струи в сечении 4-4, ζ_{4-5} является коэффициентом потерь при расширении струи после прохождения стесненного сечения 4-4. Анализируя составляющие коэффициентов ζ_{3-4} , ζ_{4-5} , запишем параметры, входящие в зависимость для ζ_{3-5} :

$$\zeta_{3-5} = f\left(\lambda_5; \frac{L}{b}; \frac{d}{h}; \frac{h}{h_3}; \frac{h}{h_4}; \frac{b}{h_5}; \frac{h_3 - h_4}{h}; \frac{h_3 - h_4}{h}\right). \quad (8)$$

Таким образом, мы записали ряд функциональных зависимостей (6, 7, 8), которые имеют большой набор исходных параметров. Поэтому в ходе лабораторных исследований необходимо выявить факторы, которые могут влиять на коэффициент потерь на участке 1-3 и 3-5 для расчетных схем, показанных на рис. 4 и 5.

В главе третьей рассмотрены вопросы, связанные с физическим моделированием течений через судо- и водопропускные сооружения. Подробно рассмотрены основные условия подобия и приведены необходимые масштабные коэффициенты.

Течение через рассматриваемые сооружения происходит под действием сил тяжести и сопротивления, что требует подобия по числам Рейнольдса

$Re = \frac{v \cdot l}{\nu} = idem$ и Фруда $Fr = \frac{v^2}{g \cdot l}$. Как известно, одновременное выполнение

критериев Рейнольдса и Фруда требует экспериментирования с жидкостями различной вязкости, что затруднительно. Поэтому обычно в качестве основного критерия подобия принимают число Фруда, предполагая наличие значительных чисел Рейнольдса, которые попадают в область автомодельности.

Далее были выявлены основные геометрические соотношения существующих судо- и водопропускных сооружений. Отношение длины прямого участка сооружения L к его ширине b находится в пределах $1/6 - 1/1$, отношение уровня первоначального наполнения h к ширине сооружения b меняется в пределах $0,01 - 0,1$ в зависимости от ширины b . Входная часть чаще всего очерчивается по эллипсу с соотношением малого и большого радиусов $1/2$, аналогично и на выходе из сооружения, что позволяет обосновать параметры гидравлической модели.

Лабораторные исследования выполнялись на экспериментальной установке (рис. 7), включающей канал 1, в который устанавливается испытуемая модель 2 (рис. 8). Тарировка установки производилась на треугольном водосливе с углом раскрытия 90° .

Модель судо- и водопропускного сооружения состоит из двух одинаковых частей (рис. 8). В модели ширина отверстия изменялась путем уменьшения участка A (рис. 8). В процессе опытов использовалось также местное сопротивление округлой формы (данная форма наиболее близка к конфигурации затворов с оболочками из мягких тканей), высота которого соответствует $1/4, 1/2, 3/4, 1/1$ от первоначального наполнения h . Место установки сопротивления в модели показано на рис. 7.

В конце главы приведена методика проведения серии экспериментов и определена точность полученных результатов. При перепаде уровней манометров диафрагмы ошибка может составить максимум 5,3%, а при измерении уровня в сечениях 1-1 - 7-7 погрешность составит порядка 4,1%.

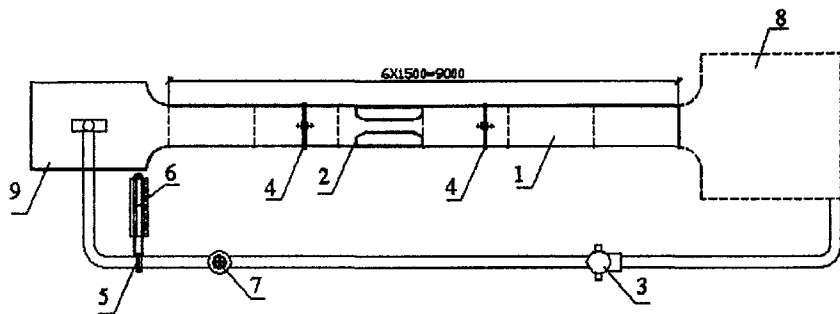


Рис. 7. Схема экспериментальной установки:

1 – экспериментальный канал; 2 – треугольный водослив; 3 – насос;
4 – уровнемер; 5 – измерительная диафрагма; 6 – дифференциальный манометр; 7 – вентиль; 8 – приемный бак; 9 – распределительный бак

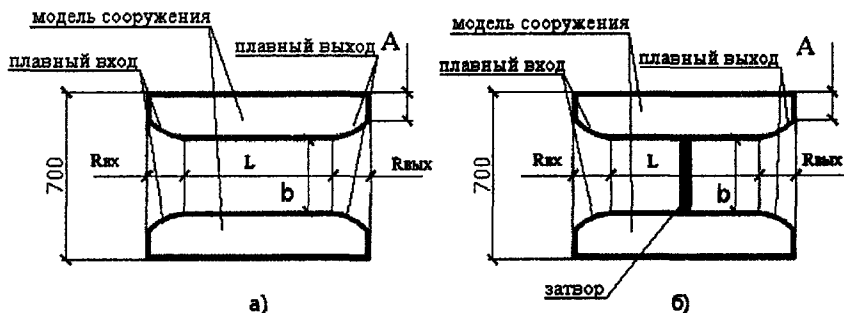


Рис. 8. Модели:

а - для расчетного случая по рис. 4;
б - для расчетного случая по рис. 5

В четвертой главе рассмотрены результаты экспериментальных исследований. Прежде всего получена связь уровня в акватории h_7 с уровнем на выходе из прямого участка h_5 , необходимым для определения расхода, проходящего через сооружение, и может быть представлена в виде

$$\frac{h_{(1)0} - h_5}{h_{(1)0}} = f\left(\frac{h_{(1)0} - h_{(7)0}}{h_{(1)0}}\right).$$

На основании опытных данных было установлено, что зависимость имеет линейный характер

$$y = k \cdot x, \quad (8)$$

где $y = \frac{h_{(1)0} - h_5}{h_{(1)0}}$; $x = \frac{h_{(1)0} - h_{(7)0}}{h_{(1)0}}$. Значение коэффициента k необходимо

принимать по графикам, представленным на рис. 9.

Одной из основных задач модельных исследований являлись получение и проверка функциональной связи коэффициента расхода m и $\frac{h_s}{h_{(0)0}}$, которая отражена в уравнении (4) и приведена на рис. 6. Установлено, что зависимость (4) справедлива при соотношении $1 - \frac{h_s}{h_{(0)0}} \leq 0,35$.

При соотношении $1 - \frac{h_s}{h_{(0)0}} \geq 0,35$ значение коэффициента m согласно рис. 6 принимается постоянным и не зависящим от соотношения $\frac{h_s}{h_{(0)0}}$. Значение коэффициента m в этом случае можно вычислить по формуле (4) при значении $1 - \frac{h_s}{h_{(0)0}} = 0,35$. Наличие местного сопротивления, регулирующего высоту отверстия, заметно снижает значение коэффициента m при равных условиях.

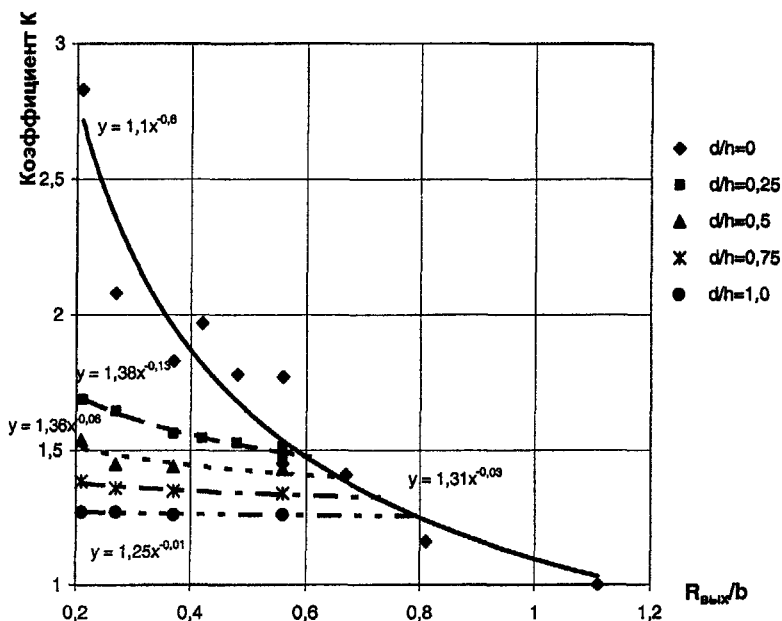


Рис. 9. Коэффициент k уравнения (8)

Для решения задачи распространения в защищаемой акватории нагонных явлений наибольший интерес представляет знание зависимости коэффициента расхода m от величины $1 - \frac{h_{(7)0}}{h_{(1)0}}$. Однако, для определения расхода по формуле

(1) удобнее применять ширину сооружения b , так как при очень большой ширине акватории B поток на выходе из сооружения распределяется не по всей ее ширине. В данной работе задача распределения потока по ширине акватории не рассматривалась.

Анализ опытных данных позволил выявить основные параметры, влияющие на коэффициенты потерь на участке 1-3 (рис. 10) и 3-5 (рис. 11). Установлено, что на значения коэффициентов ζ_{1-3}, ζ_{3-5} в основном оказывают влияние геометрические параметры сооружения. При этом величина коэффициента ζ_{1-3} зависит только от радиуса входного оголовка $R_{вх}$ и ширины сооружения b в сечении 3-3 (рис. 4, 5), а ζ_{3-5} - от длины L и ширины b прямого участка 3-5 (рис. 4, 5).

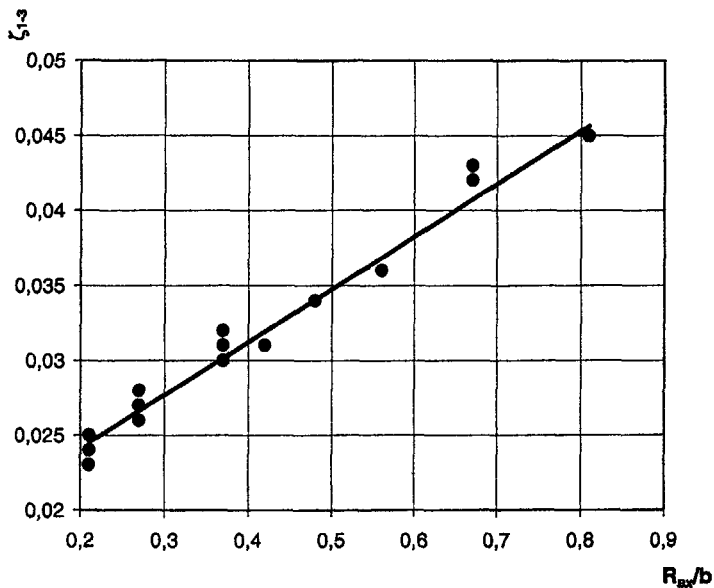
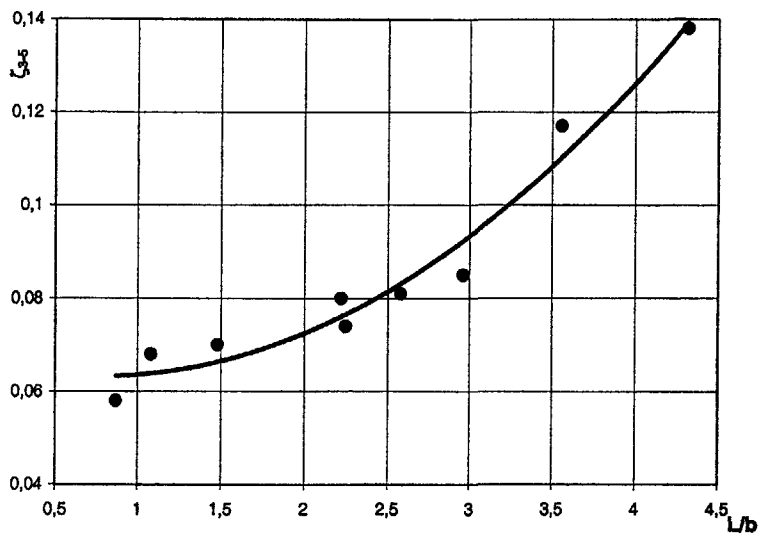
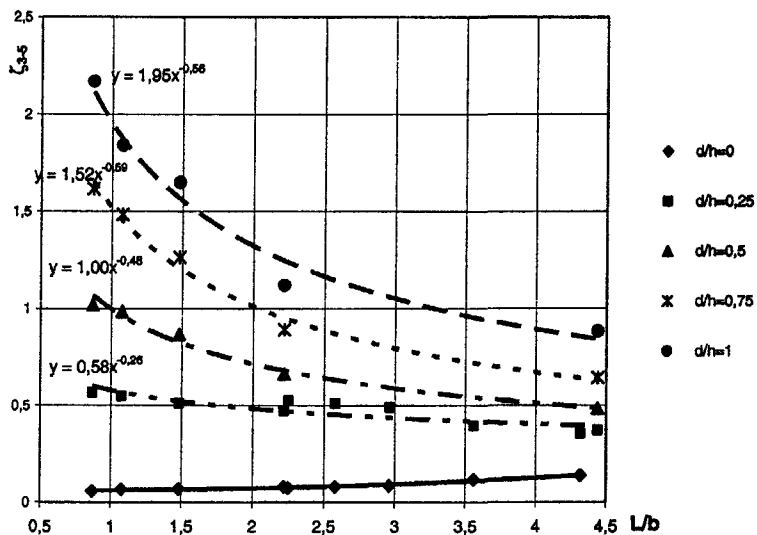


Рис. 10. Коэффициент потерь на участке 1 - 3



a)



б)

Рис. 11. Коэффициент потерь на участке 3-5 при $d/h=0$ (а); коэффициенты потерь на участке 3-5 (б)

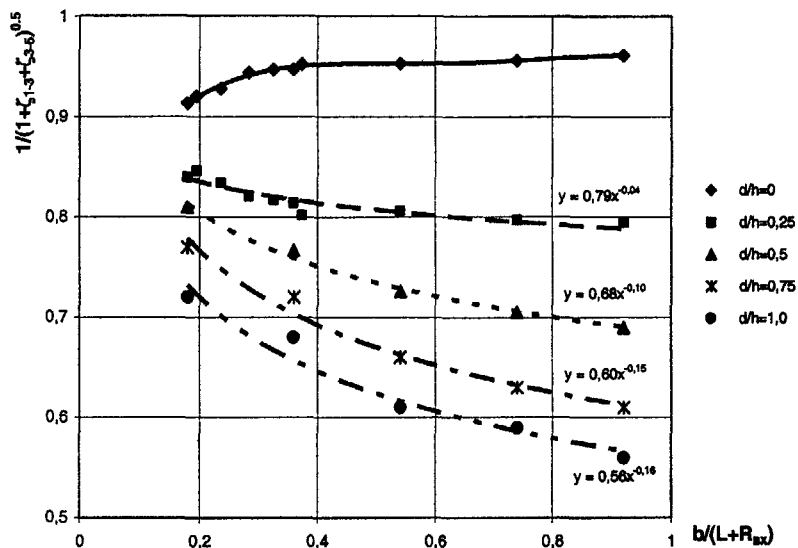


Рис. 12. Коэффициент потерь на участке 1-5

Результаты, полученные на рис. 10, 11, можно представить в виде рис. 12. Данный график позволяет сразу определить коэффициент потерь на участке 1-5.

Были исследованы режимы течения в сооружениях, при различных значениях числа Fr .

Для схемы без затвора (рис. 4) наблюдается спокойный режим течения, без образования волн до $Fr=0,14$. При больших числах Фруда появляются косые волны (вплоть до $Fr=0,28$). При $Fr>0,28$ образуются возмущения на выходе с постепенно затухающими волнами. При $Fr>1$ наблюдается формирование гидравлического прыжка.

Для схемы с затвором (рис. 5) были получены следующие режимы течений. Спокойный режим течения без образования волн наблюдался до $Fr=0,12$. При больших числах Фруда появляются косые волны (вплоть до $Fr=0,22$). При дальнейшем увеличении чисел Fr образуются возмущения на выходе с постепенно затухающими волнами. При $Fr>1$ наблюдается формирование гидравлического прыжка.

Из условия осуществления судоходства следует рекомендовать значения Fg , которые не приводят к началу образования волнения, т.е. $Fg < 0,14$. Данные рекомендации способствуют продлению периода навигации, что, в свою очередь, повышает грузооборот.

Таким образом, на основе выполненных экспериментов получены все необходимые данные для расчета развития нагонных явлений в защищаемой акватории по уравнениям (2), (3). При этом появляется возможность с использованием расчетных методов исследовать возможность применения в составе защитного комплекса судо- и водопропускных сооружений без установленных затворов или с частичным регулированием высоты отверстия затворами из мягких оболочек.

В пятой главе рассмотрены основные конструкции и условия работы предлагаемых компоновочных схем. Единственным ограничением использования мягких оболочек является обеспечение необходимой высоты отверстия, иначе говоря, высоты наполнения затвора. Проверим возможность использования предлагаемых технических решений математическим расчетом развития нагонной ситуации для двух районов России – г. Калининграда и г. Санкт – Петербурга.



Рис. 13. Расположение створа проектируемого комплекса защитных сооружений г. Калининграда

Для защиты г. Калининграда от нагонных явлений предлагается устройство ограждающей защитной дамбы, которая отгораживает часть залива (рис. 13). Отгороженная акватория необходима для создания аккумулирующего объема. В дамбе рекомендуется предусмотреть судо- и водопропускную часть, так как город имеет порт. К рассмотрению принимается устройство судопропускной части без затвора (рис. 4). Водопропускная часть необходима для пропуска расхода половодья без прекращения судоходства и снижения времени опорожнения акватории. Для условий г. Калининграда расчетный нагон принят 1% обеспеченности и при длительности 21 час подъем уровня в заливе перед сооружениями составляет 1,9 м. При этом глубина на входе сооружения составляет 9 м (необходимое условие судоходства) и расход реки $150 \text{ м}^3/\text{с}$. Решая балансовое уравнение (2), получаем, что для обеспечения безопасного подъема уровня в районе города необходима ширина судопропускного отверстия 40 м (причем по условию пропуска судов нам необходимо иметь ширину 36 м). Отметим, что радиусы на входе и выходе 20 м обеспечат подъем уровня защищаемой акватории на 0,95 м. Поэтому в дальнейших расчетах были приняты радиусы 40 м, при этом превышение составит 0,9 м, что не опасно для города.

Далее рассмотрено устройство судопропускной части с затвором из мягкой оболочки (рис. 5). Основной задачей при решении уравнения (2) является определение высоты оболочки при заданных ширинах отверстия, которая обеспечит подъем уровня в акватории не более 0,9 м. Были получены следующие результаты: 1) ширина сооружения $b=50 \text{ м}$, диаметр оболочки $d=2,5 \text{ м}$; 2) $b=55 \text{ м}$, $d=4,5 \text{ м}$; 3) $b=60 \text{ м}$, $d=6,5 \text{ м}$; 4) $b=65 \text{ м}$, $d=9,0 \text{ м}$. Данные результаты дают возможность, основываясь на прогнозах развития грузооборота порта города, подобрать необходимую ширину отверстия на расчетный период эксплуатации сооружения, минимум 50 лет. Также возможно использование варианта судопропускного сооружения без затвора (рис. 4) с шириной $b=40 \text{ м}$, длиной $L=160 \text{ м}$ и радиусами входа и выхода 40 м. Все результаты расчетов представлены на рис. 14.

Решая балансовое уравнение (3), получаем суммарную ширину водопропускных отверстий 400 м, при средней глубине в заливе 3 м. Судоходство можно начинать сразу после завершения нагона. Предлагается проектирование восьми водопропускных отверстий шириной 50 м с использованием в качестве затворов мягких оболочек диаметром 5 м. Схему расположения отверстий в плане необходимо уточнить в ходе анализа естественных течений в заливе и обеспечения сохранения существующего экологического равновесия.

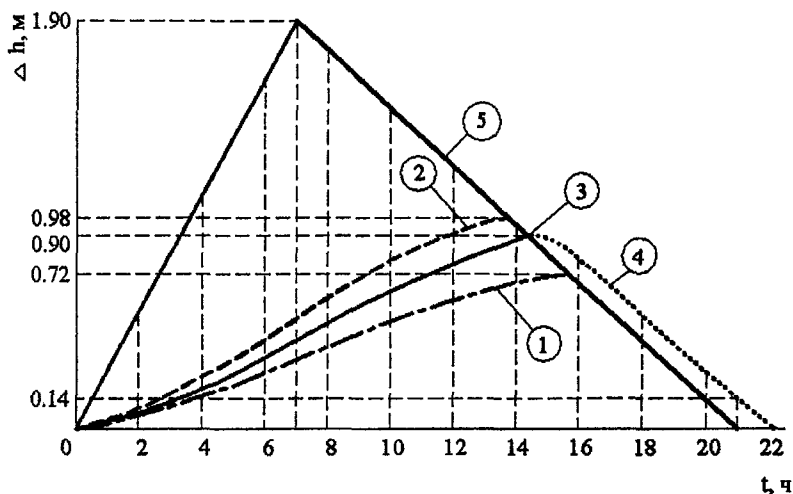


Рис. 14. Развитие нагонной ситуации в районе г. Калининграда:

- 1 – $b=30$ м, $h=9$ м, $d/h=0$;
- 2 – $b=50$ м, $h=9$ м, $d/h=0$;
- 3 – $b=40$ м, $h=9$ м, $d/h=0$; $b=50$ м, $h=9$ м, $d=2,3$ м, $d/h=0,25$;
 $b=55$ м, $h=9$ м, $d=4,5$ м, $d/h=0,50$; $b=60$ м, $h=9$ м, $d=6,8$ м, $d/h=0,75$;
 $b=65$ м, $h=9$ м, $d=9,0$ м, $d/h=1,00$;
- 4 – ширина водосбросных отверстий 400 м, глубина 3 м, $d/h=0$;
- 5 – гидрограф нагона

Рассмотрим схему работы предлагаемого комплекса с судопропускным сооружением без затвора (рис. 4), а водопропускные - с затворами (рис. 5). При отсутствии угрозы затопления все отверстия открыты. При поступлении прогноза о возможном подъеме уровня в заливе перед сооружениями более чем 0,9 м водопропускные отверстия общей шириной 400 м закрываются, остается открытым только судопропускное отверстие шириной 40 м. После прохождения пика нагона и выравнивания уровней все сооружения открываются. При варианте судопропускного сооружения с затвором (рис. 5) предлагается следующая схема работы. При отсутствии угрозы затопления все отверстия открыты. Оболочка судопропускного сооружения находится на дне в сложенном положении на рис. 15. При поступлении прогноза все водопропускные отверстия закрываются. Только при начале нагона оболочка судопропускного пролета наполняется и занимает рабочее положение, соответствующее рис. 16. После прохождения пика нагона и выравнивания уровней все отверстия открываются, оболочка уходит в положение, соответствующее рис. 15, и судоходство возобновляется.

▽ Уровень в сооружении

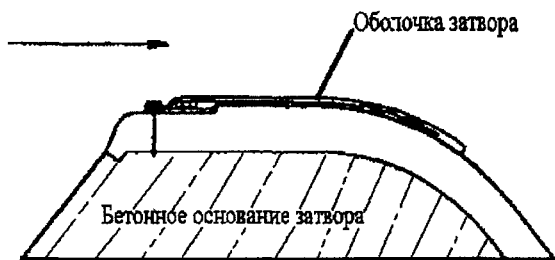


Рис. 15. Расположение затвора во время судоходства

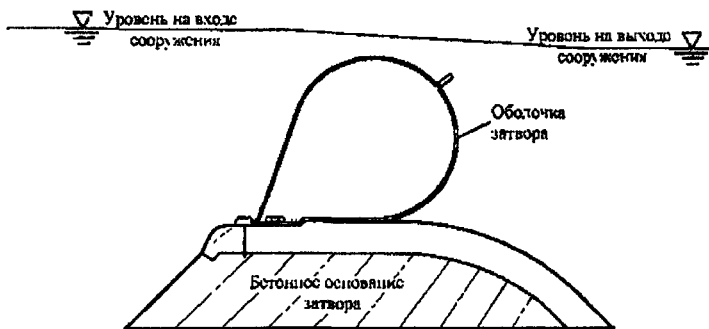


Рис. 16. Рабочее положение затвора

С использованием полученных данных и предлагаемого метода расчета была проанализирована существующая ситуация на защитном комплексе г. Санкт – Петербурга. Так как уже построены все водопропускные сооружения и на них установлены затворы, а судопропускные сооружения находятся в котлованах в высокой степени готовности, то изменение их геометрических параметров вряд ли возможно.

Параметры сечения судопропускного сооружения С-1 составляют $200(b) \times 16(h)$ м, а С-2 – $110(b) \times 7(h)$ м (рис. 1, 4 и 5). Расчетная продолжительность нагона с обеспеченность 0,1% - 15 часов, при подъеме уровня перед сооружениями на 4,55 м расход реки постояен и равен $2500 \text{ м}^3/\text{с}$. Безопасный для города подъем уровня будет составлять не более 1,6 м. Анализируя возможность использования конструктивных решений судопропускных отверстий без затворов (рис. 4) с помощью уравнения (2), мы

получили следующие результаты. Безопасный подъем уровня возможен только при открытом С-2, который составит 0,89 м. Однако скорость потока на выходе из сооружения достигает 18 м/с, что не позволяет рекомендовать данный вариант, потому что ограждающие конструкции рассчитаны на скорость потока 12 м/с и стоимость сегментного затвора сооружения С-1 велика.

Рассмотрим конструктивные решения с применением в судопропускных сооружениях затворов из мягких оболочек (рис. 5). В этом случае основной задачей на основе решения балансового уравнения (2) является подбор оптимальной высоты отверстия в судопропускных сооружениях. При установке затвора на С-1 диаметром 12 м, а на С-2 – 7 м превышение уровня составит 1,85 м. По этой причине не представляется возможным одновременное решение судопропускных отверстий С-1 и С-2 по схеме рис. 5. Предлагается оставить затвор на сооружении С-2, как предусмотрено проектом, а на сооружении С-1 построить четыре секции по 50 м каждая с затворами диаметром 12 м из мягких оболочек, с устройством устоев между секциями для размещения технологического оборудования. В этом случае максимальный уровень составляет необходимые 1,6 м и скорость на выходе составляет 6 м/с, что не приведет к разрушению конструкций стен. Ширина секции 50 м не вызовет проблем с судоходством, но позволит маневрировать затворами таким образом, чтобы при меньших уровнях нагона перекрывать не все четыре секции, а меньше. Можно рекомендовать данный вариант судопропускного сооружения С-1 с затворами (рис. 5) шириной 200 м, длиной 200 м, глубиной на входе 16 м и диаметром оболочки 12 м к применению в существующем проекте защиты города.

Рассмотрен возможный вариант геометрических параметров сооружений С-1, С-2, который мог быть принят на стадии обоснования проекта защиты с использованием мягких оболочек (рис. 5). Расчеты на основании уравнения (2) показали, что для С-1 необходимо отверстие 100 м при глубине на входе 16 м и диаметре оболочки 4 м. При таком диаметре устройство промежуточных устоев не требуется. Для сооружения С-2 ширина принимается 100 м при глубине на входе 7 м и диаметре оболочки 4 м. В этом случае подъем уровня в акватории составит 1,55 м. При этом скорости на выходе С-1 и С-2 составляют соответственно 8,5 и 8 м/с.

Выполнена проверка режима опорожнения через все судо- и водопропускные сооружения на основе решения уравнения (3). Полученные результаты показывают, что при этом имеет место задержка в опорожнении акватории, составляющая не более 3 часов. Это вызвано тем, что судо- и водопропускные сооружения работают при меньших напорах, чем в фазе нарастания нагона, поэтому опорожнение происходит медленнее. После выравнивания уровней следует открыть не только затворы водопропускных

сооружений, но и судопропускных. Результаты расчета представлены на рис. 17.

Рассмотрим принцип работы предлагаемого технического решения защитного комплекса. При отсутствии угрозы нагона все судо- и водопропускные сооружения открыты. Затвор в судопропускном сооружении С-1 и находится на дне (рис. 15), а С-2 убран в нишу. При поступлении информации о возможном нагоне все водопропускные сооружения закрываются, судопропускные отверстия открыты. Судоходство продолжается. При начале нагона затвор С-1 наполняется (рис. 16), а С-2 поднимается, судоходство прекращается. После прохождения пика нагона и выравнивания уровней в акватории и заливе все водо- и судопропускные сооружения открываются, затвор С-1 приводится в положение, соответствующее рис. 15. Судоходство возобновляется.

Выполненные расчетные обоснования показали целесообразность применения предложенных компоновочных решений (рис. 4, 5) для защиты от нагонных подтоплений. Простота эксплуатации, возможность быстрого развертывания и применение в стесненных условиях позволяют рекомендовать данные компоновочные решения к рассмотрению в дальнейших проектах.

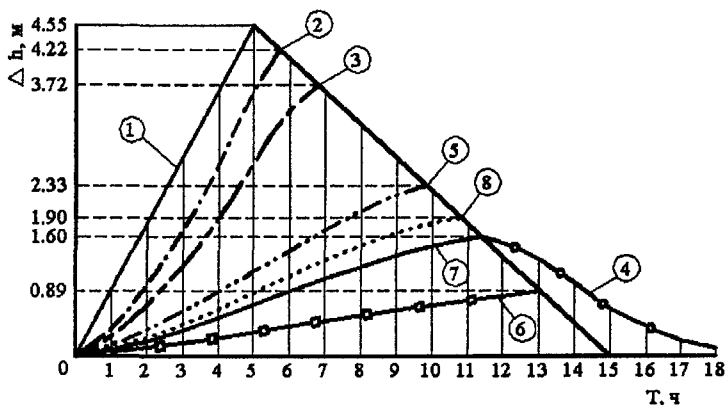


Рис. 17. Развитие нагонной ситуации в районе г. Санкт – Петербурга:

1 – гидрограф нагона; 2 – существующие отверстия суммарной площадью 13700 м^2 ; 3 – проектные отверстия суммарной площадью 9610 м^2 , все открыты; 4 – проектные отверстия суммарной площадью 9610 м^2 , опорожнение; 5 – сооружение С-1 ($200 \times 16 \text{ м}$) без затвора, $d/h=0$; 6 – сооружение С-2 ($100 \times 7 \text{ м}$) без затвора, $d/h=0$; 7 – сооружение С-1 ($200 \times 16 \text{ м}$) с затвором диаметром 12 м , $d/h=0,75$; сооружение С-1 ($100 \times 16 \text{ м}$) с затвором диаметром 4 м , $d/h=0,25$ и сооружение С-2 ($100 \times 7 \text{ м}$) с затвором диаметром 2 м , $d/h=0,25$; 8 – сооружение С-1 ($200 \times 16 \text{ м}$) с затвором диаметром 12 м , $d/h=0,75$ и сооружение С-2 ($100 \times 7 \text{ м}$) с затвором диаметром 7 м , $d/h=1,00$

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. На основе анализа материалов по реализуемым и проектируемым сооружениям для защиты от нагонных явлений устьевых участков рек, впадающих в моря, выдвинуто предложение о возможности осуществления защиты от нагонных явлений ограничением поступающего расхода вторжения с помощью судо- и водопропускных отверстий. Предложена методика определения пропускной способности таких отверстий, учитывающая гидрограф нагона, морфометрию защищаемой акватории, речной расход и геометрию отверстия.

2. Предложены новые компоновочные схемы судо- и водопропускных сооружений: без перекрытия пролета и с частичным регулирование высоты отверстия путем установки затворов из мягких оболочек.

3. Разработана математическая модель для расчета нагонных явлений на основе балансового дифференциального уравнения. Выполненное сопоставление результатов расчета на основе предлагаемой модели с данными численного интегрирования уравнения Сен-Венана и с результатами натурных измерений показало приемлемую точность предлагаемой математической модели.

4. Для оценки пропускной способности предлагаемых компоновочных решений в рамках предложенной математической модели возможно применение теории водослива.

5. Анализ решений задачи развития нагонных явлений в защищаемых акваториях с использованием балансовых уравнений выявил значительное влияние коэффициента расхода отверстий на результаты расчетов превышения уровня.

6. Установлено, что форма гидрографа с соотношением времени продолжительности фазы повышения уровня нагона к фазе спада 1:2 без существенного снижения точности расчетов колебаний уровня может быть рекомендована к использованию при математическом моделировании для условий Балтийского моря.

7. На основе выполненных экспериментов доказано, что коэффициент расхода водопропускных отверстий в основном зависит от соотношения отметок уровней за и перед сооружением и коэффициентов местных сопротивлений, которые зависят от геометрических параметров сооружения. Вид этих зависимостей установлен экспериментально и представлен в форме удобной для практического использования.

8. Экспериментально установлены соотношения уровней в защищаемой акватории и на выходе из прямого участка водопропускных

отверстий, что значительно упрощает решение задачи определения расхода, пропускаемого сооружением.

9. Доказана эффективность расчетной схемы без перекрытия пролета затвором для применения в качестве судопропускного сооружения в составе защитного комплекса г. Калининграда, а расчетной схемы с затворами из мягких оболочек – для применения в судопропускных сооружениях г. Санкт – Петербурга. На основе выполненного анализа показано, что применение предлагаемых компоновочных схем ведет к снижению затрат на строительство защитных комплексов.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. **Бондарчук М.А.** Выбор оптимальной площади сечения водопропускного фронта в проекте защитных сооружений г. Санкт – Петербурга от наводнений // Материалы 6-й научно – практической конференции студентов и молодых ученых. М.: МГСУ, 2003. С. 20-26.

2. **Бондарчук М.А.** Оценка метеорологической, геоморфологической и гидрологической ситуации при ветровых нагонах в устье р. Нева (г. Санкт – Петербург) и выработка предложений по недопущению опасных превышений уровня воды в пределах города // Материалы 6-й научно – практической конференции студентов и молодых ученых. М.: МГСУ, 2003. С. 31-36.

3. **Бондарчук М.А.** Оценка метеорологической, геоморфологической и гидрологической ситуации при ветровых нагонах в устье р. Преголь (г. Калининград) и выработка предложений по недопущению опасных превышений уровня воды в пределах города // Материалы 6-й научно – практической конференции студентов и молодых ученых. М.: МГСУ, 2003. С. 26-31.

4. **Бондарчук М.А.** Технические решения и условия эксплуатации сооружений для защиты от ветровых нагонов г. Калининграда в устье р. Преголь // Гидротехническое строительство. 2003. № 9. С. 28-30.

**КОПИ – ЦЕНТР св. 77:07:10429 Тираж 100 экз.
тел. 185-79-54**

**г. Москва м. Бабушкинская ул. Енисейская 36 комната №1
(Экспериментально-производственный комбинат)**

2003-A
16099

16099