

**ЛИ ЛЯН**

**ЛЕДОВАЯ НАГРУЗКА  
НА ГИДРОТЕХНИЧЕСКИЕ СООРУЖЕНИЯ  
С НАКЛОННОЙ ГРАНЬЮ**

05.23.07 – Гидротехническое строительство

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Санкт-Петербург

2014

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет» (ФГАОУ ВО СПбПУ)

**Научный руководитель**

*Шхинек Карл Натанович*

Доктор физико-математических наук, профессор  
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет  
(г. Санкт-Петербург)

**Официальные оппоненты:**

*Литонов Олег Евгеньевич*

Доктор технических наук, главный научный сотрудник  
Федеральное государственное унитарное предприятие  
«Крыловский государственный научный центр»  
(г. Санкт-Петербург)

*Жиленков Александр Георгиевич*

Кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник  
23 Государственный морской проектный институт-филиал  
открытого акционерного общества  
«31 Государственный проектный институт специального строительства»  
(г. Санкт-Петербург)

**Ведущая организация**

Федеральное государственное бюджетное учреждение  
«Государственный Гидрологический Институт»

Защита состоится «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2014 г. в \_\_\_ часов на заседании  
объединенного диссертационного совета ДМ 512.001.01  
при ОАО «ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева»  
по адресу 195220, Санкт-Петербург, ул. Гжатская, 21

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке  
ОАО «ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева»  
и на сайте общества ([www.vniig.rushydro.ru](http://www.vniig.rushydro.ru))

Автореферат разослан «\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2014 г.

Ученый секретарь  
Диссертационного совета  
Кандидат технических наук

Т.В. Иванова

**ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

**Актуальность исследований.** Гидротехнические сооружения с наклонной передней гранью, а так же конической и пирамидальной форм часто используются в ледовых условиях. В настоящее время для расчета ледовой нагрузки на эти сооружения используются решения Ральстона и Кроасдейла и их модификации (СП 38. 13330. 2012, ISO 19906). Однако, оба этих метода имеют ряд недостатков:

а) оба метода квазистатические, между тем иногда процесс взаимодействия имеет динамический характер. Наблюдения показывают, что в ряде случаев динамические нагрузки на наклонные сооружения превосходят квазистатические;

б) несмотря на поправку, сделанную Кроасдейлом для перехода к 3D ситуации, его решение практически остается двумерным;

в) оба решения, в качестве параметра, определяющего разрушение льда, используют предел прочности при изгибе. Опыты с изгибом натурального льда в стесненных условиях показали, что этот предел прочности является недостаточной характеристикой при наличии продольного сжатия;

г) одним из основных параметров, определяющих нагрузку, является скопление льда на поверхности сооружения. Целый ряд исследований показал, что высота нагромождения обломков льда на поверхности сооружения играет решающую роль в значении нагрузки. Оба рассматриваемых решения вводят этот параметр в формулы, но не дают рекомендаций по его определению;

д) много лабораторных опытов и наблюдений в натуральных условиях посвящены оценкам высоты нагромождения обломков льда на поверхности сооружений. Однако, полученные эмпирические формулы носят частный характер, справедливы только для условий наблюдения (например, конкретного угла наклона поверхности сооружения). Необходимо получить решение справедливое для любых условий и обобщающее имеющиеся эмпирические зависимости.

Проблемы расчета взаимодействия льда с гидротехническими сооружениями с наклонной передней гранью определяют актуальность темы.

**Цель диссертационной работы** заключалась в разработке методики оценки ледовой нагрузки на сооружения с наклонной гранью. Для этого требовалось:

1. Осуществить выбор механической модели и критерия разрушения материала льда при его взаимодействии с наклонным сооружением;

2. Создание численных моделей в 3D постановке для исследования динамики воздействия льда на сооружения с наклонными гранями и конические, а также верификация моделей;

3. Проведение обширных численных экспериментов для изучения рассматриваемых проблем;

4. Разработка аналитического решения для определения высоты нагромождения обломков льда на откосы и сооружения с наклонными гранями.

Для достижения поставленной цели решены следующие задачи:

1. Разработана методика численного решения в комплексе ANSYS задач динамики взаимодействия льда с гидротехническими сооружениями и проведена ее верификация.

2. Выполнен анализ предельной несущей способности ледовой плиты при ее взаимодействии с наклонными сооружениями с учетом продольной силы, образующейся в процессе взаимодействия.

3. Выполнен анализ воздействия ледяного поля с сооружениями различной формы и протяженности (плоскость различной ширины и угла наклона, конус, многоугольная пирамида).

4. Разработаны зависимости для определения высоты нагромождения обломков льда на сооружения с наклонными гранями.

#### **Научная новизна работы**

1. Разработана методика моделирования взаимодействия льда и сооружений с наклонной передней гранью на основе комплекса ANSYS. На основании сопоставления ее с данными экспериментов показана ее приемлемость.

2. Впервые исследована предельная несущая способность ледяной плиты при взаимодействии льда с сооружением с наклонной передней гранью.

3. Впервые изучено влияние протяженности фронта сооружения на ледовые нагрузки и выяснено при каких условиях возможно использование 2D схемы.

4. На основе программы ANSYS проведен параметрический анализ и установлено влияние различных параметров льда и сооружений на нагрузку.

5. Впервые получено аналитическое решение для определения высоты нагромождения обломков льда на наклонные сооружения.

#### **Теоретическая и практическая значимость работы**

1. Разработана на основании программного комплекса ANSYS и внедрена численная модель для исследования динамики взаимодействия льда с сооружениями с наклонной гранью в 3D постановке.

2. Впервые для сооружений с наклонными гранями учтено влияние пластической зоны на предельную несущую способность ледяной плиты при ее изгибе

3. Для предложенных типов наклонных сооружений, проведено исследование влияния формы сооружений на нагрузки.

4. Впервые численно проанализировано влияние динамичности процесса взаимодействия на ледовые нагрузки на гидротехнические сооружения с наклонной гранью.

5. Впервые определено различие между 2D и 3D решениями и даны рекомендации определения условий, при которых можно пользоваться 2D решением с поправками к нему.

6. Впервые, на основании аналитического решения, предложены для практического использования формулы и обобщенные графические зависимости, для определения высоты нагромождения обломков льда на откосы и грани сооружений. Показано согласование этой зависимости с данными наблюдений в натуральных условиях.

**Методы исследования:** метод численного моделирования на основе программы ANSYS; аналитическое решение.

**Достоверность** полученных зависимостей определяется согласованием результатов расчетов с данными лабораторных опытов и итогами наблюдений в натуральных условиях.

**Личный вклад автора.** 1. Создана модель моделирования взаимодействия льда и сооружений с наклонной гранью на основе ANSYS; 2. Определено влияние прочности льда при сжатии на предельную несущую способность льда при его действии на сооружение с наклонной гранью; 3. Проведен параметрический анализ и изучено влияние формы сооружения с наклонной гранью на ледовые нагрузки; 4. Предложена аналитическая модель для расчета высоты нагромождения обломков льда на сооружения с наклонной гранью; 5. Исследовано влияние основных параметров сооружения и льда на высоту нагромождения обломков льда на сооружение с наклонной гранью.

**Апробация работы.** Основные защищаемые положения диссертации апробированы на XLI Неделе науки СПбГПУ (2012), на научных семинарах кафедры Водохозяйственное и гидротехническое строительство (2013, 2014), на семинарах 23 ГМПИ (2013, 2014). Результаты исследований использовались при практическом проектировании ОАО ГТ МОРСТРОЙ, Научно-проектной фирмой «Строй-Динамика».

Основные результаты диссертации опубликованы в 4 статьях по перечню ВАК.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, приложения и списка литературы, содержащего 107 наименований. Текст работы изложен на 136 страницах. Диссертация содержит 64 рисунка и 3 таблицы.

#### **Защищаемые положения.**

1. Методика математического моделирования в 2D и 3D постановках процесса взаимодействия льда и сооружения в программе ANSYS; методика расчета ледовой нагрузки на сооружения с наклонной гранью;

2. Определение предельной несущей способности ледяных плит при их взаимодействии сооружениями с наклонными гранями;

3. Результаты параметрического анализа влияния формы сооружений (откосное, коническое, многоугольное) и характеристик льда на ледовые нагрузки;

4. Разработанная аналитическая модель и предлагаемые зависимости для расчета высоты нагромождения обломков льда на сооружения с наклонной передней гранью.

## СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

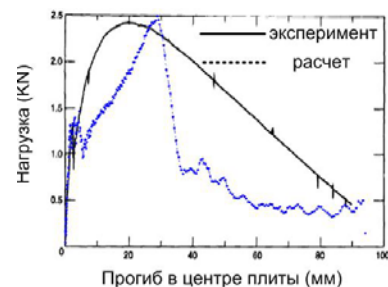
Во введении обоснована актуальность выбранной темы диссертации, сформулированы основанные цели и задачи работы, научная новизна, защищаемые положения, научная и практическая значимость работы.

В первой главе, имеющей обзорный характер, приведен анализ предыдущего исследования по теме диссертационного исследования. Проанализированы работы Wright B., Westls B.R, Ralston T. D., Nevel D. E., Maattanen M., Loset S., Lau M., Li Zhijun, Kato, Yue qianjin, Sodhi, Timco, Irami, Karna T., Frederking R., Croasdale K. R., Афанасьева В. П., Алексеева Ю. Н., Беллендира Е. Н., Коржавина К. Н., Уваровой Е. В., Карулиной М. М., Шаталиной И. Н., Шхинека К. Н. и т. д. Рассмотрены типы гидротехнических сооружений, возводимых на замерзающих акваториях. В разделе связанном с расчетом ледовой нагрузки на сооружение с наклонной передней гранью, рассмотрены методы Кроасдейла и Ральстона, и других. Описана особенность взаимодействия льда с сооружениями с наклонной передней гранью. Обзор литературных источников показывает, что ряд вопросов определения нагрузок на сооружения разработан недостаточно. Проведенный анализ показывает необходимость уточнения ряда положений расчетных методик. Поставлены задачи исследований.

Во второй главе описана методика численного моделирования на основе программы ANSYS для исследования взаимодействия льда с сооружением с наклонной передней гранью. В программе ANSYS при использовании явного метода для решения динамики применяется метод центральных разностей. Для моделирования разрушения материала льда специально установлен критерий разрушения между элементами. Проведены проверки правильности расчетных моделей путем сравнении с экспериментальными исследованиями в работах Sodhi (1988), Frederking и Timco (1985), Sodhi (1985), Irami и Timco (1993) (см. рис. 1). Сопоставление результатов расчетов и опытов показывает, что разработанные модели имеют достаточную надежность для исследования взаимодействия льда с сооружением с наклонной передней гранью.

Третья глава посвящена исследованию предельной несущей способности ледяной плиты при изгибе-сжатии для уточнения нагрузок на сооружение.

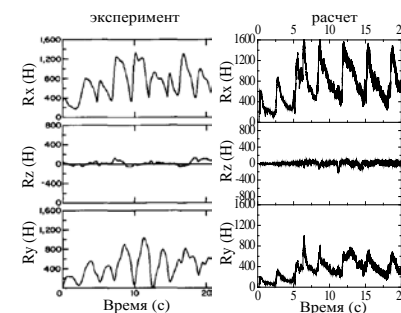
Лед при взаимодействии с наклонным сооружением находится в сжато-изогнутом состоянии, поэтому возникновения трещин, вызванных изгибом, еще не означает полной потери несущей способности плиты. Напряжения, возникающие в сжатой зоне, определяют предельную несущую способность льда, которая может заметно превзойти условия, соответствующие возникновению изгибной трещины. Существование этого явления было установлено в опытах Sodhi. Однако эти опыты были проведены для довольно ограниченного набора продольных сил.



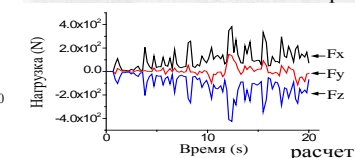
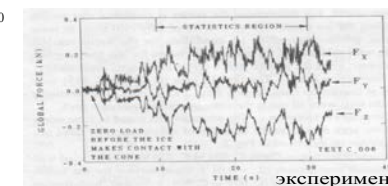
Sodhi (1988)

Результаты эксперимента		
Горизонтальная нагрузка, $H$	Средняя	167
	Максимальная	283
Вертикальная нагрузка, $H$	Средняя	153
	Максимальная	251
Результаты расчета		
Горизонтальная нагрузка, $H$	Средняя	157
	Максимальная	284
Вертикальная нагрузка, $H$	Средняя	149
	Максимальная	270

Frederking и Timco (1985)



Sodhi (1985)



Irami и Timco (1993)

Рис. 1. Сопоставление результатов расчета и экспериментов.

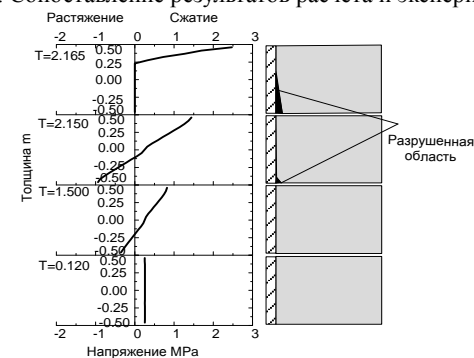


Рис. 2. Распределение напряжений в льде около заделки в разные моменты времени. ( $h=0,92$  м, продольная сила  $F_{\Gamma} = 11,5$ кН)

Для проведения дальнейших расчетов необходимо знать предельную несущую способность ледяной плиты в широком диапазоне изменения продольной силы. С этой целью рассмотрена следующая задача. Рас-

смагивается консольная плита к концу, которой приложены заданные продольная и поперечная нагрузка. Материал плиты упруго-идеально пластическая среда. Задача решается численно в программе ANSYS.

На рис. 2 видно, что в начальный момент времени сжимающие напряжения распределены равномерно в поперечном сечении ( $T=0,120c$ ). С увеличением вертикальной нагрузки в момент 2,150с в растянутой зоне достигается предел прочности на изгиб и образуется трещина. Далее трещина прорастает и в момент 2,165с в сжатой зоне достигается предел прочности на сжатие. Следует отметить, что область разрушения растяжением в этот момент занимает почти 75% площади плиты.

Рис.3. подробно иллюстрирует влияние горизонтальной нагрузки на предельный момент. Вначале наличие этой безразмерной нагрузки ( $F_T$ ) приводит к увеличению несущей способности, но после достижения определенного предела уменьшается, так вследствие значительной продольной силой разрушение начинается в сжатой зоне.  $M_u$  – момент действующий на плиту при упругой работе при достижении в крайнем волокне напряжения, равного прочности при растяжении.  $M_p$  – предельный момент, вызываемый той же предельной силой при дополнительном действии продольной нагрузки,  $w$  и  $h$  ширина и толщина плиты,  $R_c$  и  $R_f$ , пределы прочности льда при сжатии и изгибе соответственно. Принято  $R_c/R_f=2,7$ .

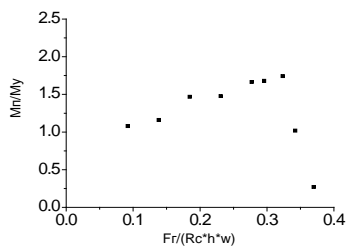


Рис. 3. Зависимость безразмерных параметров  $M_p/M_u$  от отношения  $F_T/R_c \cdot h \cdot w$  для консоли.

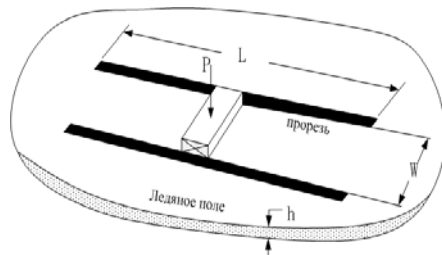


Рис. 4. Схема опыта Соди.

На основе моделирования опыта Соди (см. рис. 4) проведена оценка влияния свойств льда на конечный результат. Основными параметрами льда, влияющими на несущую способность, являются: прочность на изгиб и предельная пластическая деформация. Из численного эксперимента следует, что вариация прочностью льда при изгибе в широких пределах влияет на значение первого пика нагрузки, но практически слабо влияет на предельную несущую способность.

Кроме того, показано, что предельная пластическая деформация влияет, в основном, на спад нагрузки и, по-видимому, слабо влияет на максимальное значение несущей способности. Таким образом, при наличии большой продольной силы основной характеристикой является прочности льда, в дальнейшем, текучесть и предельная пластическая деформация.

**В четвертой главе** рассматривается взаимодействие льда с откосным, коническим, и многоугольным сооружениями.

*Взаимодействие откосных сооружений ограниченной ширины с ледяным полем*

Влияние ограниченной ширины сооружения при взаимодействии льда с откосом показано на рис. 5 и рис. 6. На рис. 5 приведена зависимость безразмерной погонной нагрузки (отнесенной к ширине сооружения) от отношения ширины сооружения к толщине льда. Видно, что с увеличением отношения ширины сооружения к толщине льда безразмерная погонная нагрузка стабилизируется. На рис. 6 показана зависимость безразмерной высоты нагромождения обломков льда от отношения ширины наклонного сооружения к толщине льда. Следует, что с увеличением отношения ширины сооружения к толщине льда безразмерная высота нагромождения обломков льда стабилизируется. 2D решение можно использовать при отношении ширины сооружения к толщине льда больше 40.

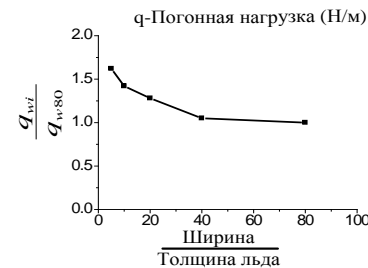


Рис. 5. Зависимость безразмерной погонной горизонтальной нагрузки от отношения ширины сооружения с наклонной гранью к толщине льда. (угол наклона сооружения  $60^\circ$ )

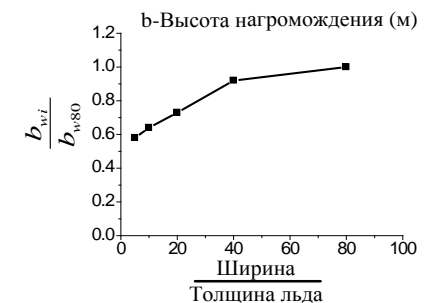


Рис. 6. Зависимость безразмерной высоты нагромождения обломков льда от отношения ширины сооружения с наклонной гранью к толщине льда. (угол наклона сооружения  $60^\circ$ )

*Определение угла наклона огибающей нагромождений обломков.* Далее следует определить значение угла наклона нагромождения обломков льда –  $\theta$ . Для уточнения этого угла было проведено численное моделирование взаимодействия льда с откосным сооружением в программе ANSYS. На рис. 7 представлен пример полученных нагромождений. По результатам

моделирования получено, что при толщине льда 1 м, в диапазоне углов  $30 < \alpha < 75$ , значения угла  $\theta$  может быть аппроксимировано формулой:

$30 \leq \alpha \leq 52 \quad \theta = 5,5(\alpha^\circ)^{\frac{1}{3}} ; \quad 52 < \alpha \leq 75 \quad \theta = 3,0(\alpha^\circ)^{\frac{1}{2}}$ . Угол наклона призмы при навале льда толщиной 0,5 м на сооружение с углом наклона 60 по результату моделирования совпадает с результатом расчета по формуле с погрешностью 4%.

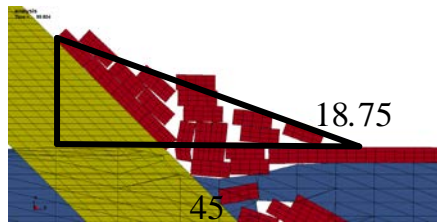


Рис. 7. Нагромождение обломков льда на наклонную поверхность сооружения при разных углах  $\alpha$

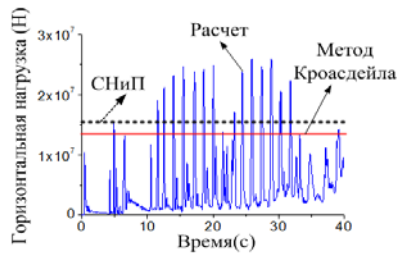


Рис. 8. Сравнение горизонтальных нагрузок с решением Краосдейла и СНиП в процессе взаимодействия льда с сооружением

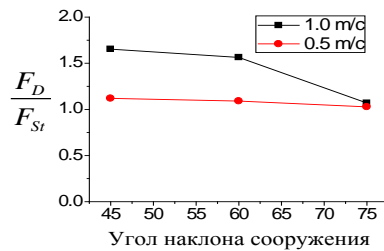


Рис. 9. Зависимость отношения средней динамической нагрузки из 10 пиков к статической нагрузке от угла наклона сооружения. ( $F_D$  – динамическая нагрузка,  $F_{St}$  – статическая нагрузка по методу Краосдейла)

На рис. 8 показано сравнение горизонтальных нагрузок с решением Краосдейла и СНиП в процессе взаимодействия льда с сооружением. Можно видеть, что максимальная динамическая горизонтальная нагрузка превысила значение по методу Краосдейла и СНиП. На рис. 9 представлена зависимость отношения средней динамической нагрузки из 10 пиков к статической нагрузке от угла наклона сооружения. Из рис. 9 следует, что с увеличением угла наклона сооружения отношение средней динамической нагрузки из 10 пиков к статической нагрузке приближается к единице; влияние скорости движения льда на ледовую нагрузку сильнее при скорости 1,0 м/с, чем при скорости 0,5 м/с.

При исследовании взаимодействия льда с откосным сооружением проведены оценка влияния прочности льда при изгибе и толщины льда и угла наклона поверхности сооружения на ледовую нагрузку на сооружение.

*Взаимодействие конического сооружения с ледяным полем.*

Основные этапы процесса взаимодействия льда с сооружением представлены на рис 10.

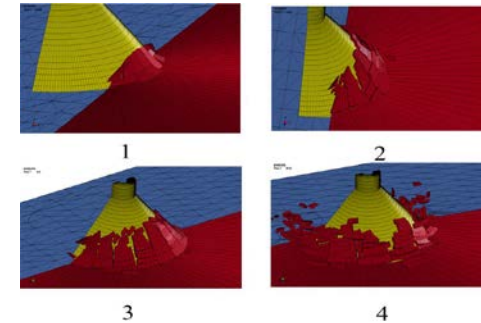


Рис. 10. Фазы взаимодействия льда с коническим сооружением

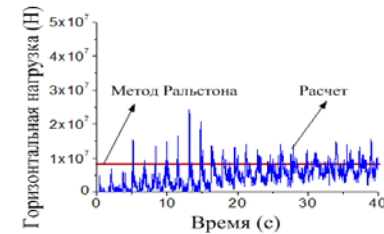


Рис. 11. Сравнение горизонтальных нагрузок с решением Ральстона в процессе взаимодействия льда с сооружением

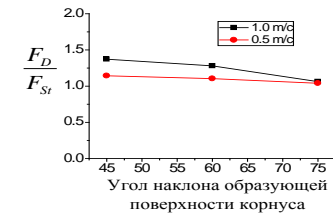


Рис.12. Зависимость отношения средней динамической нагрузки из 10 пиков к статической нагрузке от угла наклона образующей поверхности конуса

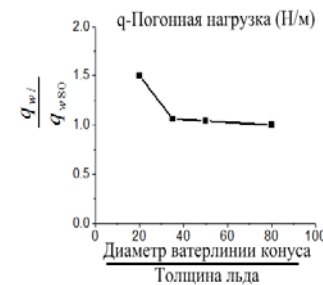


Рис. 13. Влияние диаметра ватерлинии конуса на нагрузки на сооружение

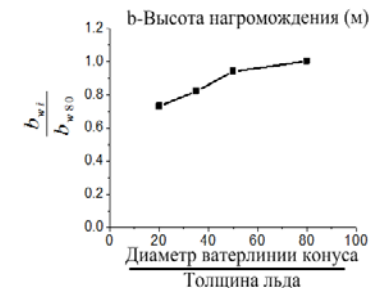


Рис. 14. Погонная нагрузка на поверхность конического сооружения

Из рис. 11 следует, что максимальная горизонтальная нагрузка превысила значение, соответствующее решению по методу Ральстона. Рис. 12 иллюстрирует влияние динамики взаимодействия льда и сооружения.

Диаметр ватерлинии является одним из основных факторов, определяющих нагрузки на сооружения. Результаты исследования влияния диаметра ватерлинии на нагрузку и высоту нагромождения обломков льда представлены на рис. 13 и 14. Можно отметить, что 2D решение можно использоваться при отношении ширины сооружения к толщине льда больше 40.

#### Взаимодействие многоугольного сооружения с ледяным полем

Процесс взаимодействия многоугольного сооружением с ледяным полем подобно процессу взаимодействия конического сооружением.

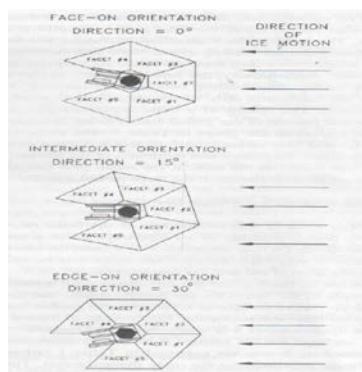


Рис. 15. угол подхода льда к сооружению

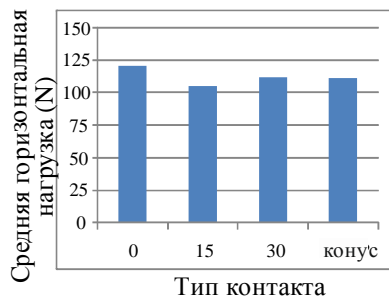


Рис. 16. Сравнение средних горизонтальных нагрузок на многоугольные сооружения с нагрузкой на коническое сооружение

При исследовании взаимодействия льда с многоугольным сооружением интересно рассмотреть типичные углы подхода льда к сооружению  $0^\circ$ ,  $15^\circ$ ,  $30^\circ$  (рис 15). Из рис. 16 следует, что разница направления подхода льда (три угла подхода льда к сооружению) слабо влияет на ледовую нагрузку; при условии одинакового размера конического и многоугольного сооружений средняя ледовая нагрузка на два сооружения имеет подобное значение.

**В пятой главе** определяется высота нагромождения обломков льда образовавшихся в процессе взаимодействия с наклонной поверхностью. Изучение высоты нагромождения обломков льда проводилось Timco, Barker, Кроасдейлом, Алексеевом Ю. Н. и Карулиной М. М.

При процессе взаимодействия льда с наклонной поверхностью момент взлома соответствует максимуму навала. На рис. 17 представлена схема, принятая для расчета высоты нагромождения обломков льда на

наклонной плоскости. Рассматривается плоскость с углом наклона  $\alpha$ . Лед моделируется однородным упругопластическим материалом с модулем упругости  $E$  и коэффициентом Пуассона  $\nu$ , цилиндрической жесткостью  $D$ .

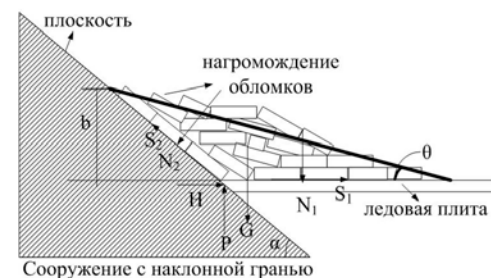


Рис. 17. Расчетная схема

Предполагается, что вначале лед деформируется как упругое тело, но по достижении напряжениями определенного уровня, он становится идеально пластическим (модель Треска). Ледовое поле, движущееся на сооружение, характеризуется толщиной  $h$ , прочностью при изгибе  $R_f$  и при сжатии  $R_c$ . Максимальная высота нагромождения обломков льда имеет высоту  $b$ , угол наклона  $\theta$ , и пористость  $e$ . Горизонтальная сила  $H$  и вертикальная сила  $P$ , образуются как реакция сооружения на действие льда. Предполагается, что обломки будут накапливаться до тех пор, пока они не продавят прилегающее к сооружению ледяное поле и соскользнут вниз.

#### Разрушение ледяной плиты под действием обломков льда

Вырежем из ледяной плиты, плавающей на поверхности воды, плиту единичной ширины и рассмотрим ее напряженное состояние.  $G$  сила тяжести нагромождения обломков льда (нагрузку) может быть представлена в виде (рис. 17)

$$G = \left( \frac{1}{2} \frac{b}{\tan \theta} b - \frac{1}{2} \frac{b}{\tan \alpha} b \right) w \rho_i g (1 - e) \quad (1)$$

здесь  $\rho_i$  – плотность льда;  $g$  – ускорение, вызванное гравитацией;  $w$  – единица ширины.

Из условия равновесия сил, вызванных нагромождением обломков льда в вертикальном и горизонтальном направлениях (рис. 17), следует:

$$N_2 \cos \alpha + S_2 \sin \alpha + N_1 = G \quad (2)$$

$$N_2 \sin \alpha + S_2 \cos \alpha - S_1 = 0 \quad (3)$$

где  $N_1$  – сила, вызванная нагромождением обломков на ледяном поле;  $S_1$  – сила трения обломков льда по поверхности ледяного поля принимаемая равной:  $\mu_i N_1 = S_1$ , где  $\mu_i$  коэффициент трения между обломками и льдом.  $N_2$  – нормальная к поверхности сооружения сила от действия обломков льда на сооружение;  $S_2$  – сила трения обломков льда по поверхности со-



оружия, принимаемая равной:  $\mu_s N_2 = S_2$ ,  $\mu_s$  – коэффициент трения льда по поверхности сооружения.

Начало координат располагается в точке контакта плиты и сооружения. Силы, действующие на поле, могут быть разделены на две части, как это представлено на рисунке 18, *a* и *b*. На рис. 18, *c* и *d* представлена схематизация нагрузок для расчета  $M_1 = N_1 \frac{1}{3} l_H$ ,  $l_H = \frac{b}{\tan \theta} = \frac{b}{\tan \alpha}$ .

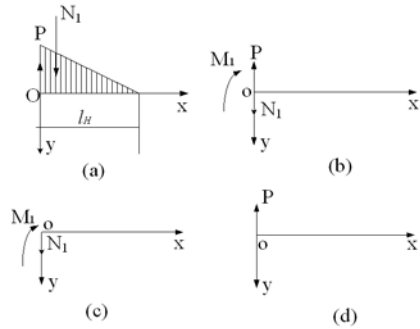


Рис. 18. Расчетная схема.

При использовании условия отсутствия смещения плиты в начале координат ( $x=0$ ,  $y=0$ ), уравнение общего прогиба плиты с учетом влияния воды приобретает следующий вид

$$y = \frac{M_1}{2\beta^2 D} e^{-\beta x} \sin \beta x \quad (4)$$

здесь  $\beta = \frac{1}{l_c} = \left( \frac{Eh^3}{12\rho_w g(1-\nu^2)} \right)^{\frac{1}{4}}$ ,  $l_c$  – характеристическая длина. Тогда момент  $M$  и перерезывающая сила  $Q$  в плите определяются в виде

$$M = \frac{1}{3} N_1 l_H e^{-\beta x} \cos \beta x, \quad (5)$$

$$Q = -\frac{1}{3} N_1 l_H \beta (e^{-\beta x} \cos \beta x + e^{-\beta x} \sin \beta x) \quad (6)$$

Значение координаты, соответствующей максимуму напряжения от изгиба, значение координаты, соответствующей экстремальному напряжению среза, определяются

$$x_\sigma = \frac{3}{4} \pi l_c \quad (7)$$

$$x_{t1} = 0. \quad (8)$$

Таким образом, могут быть получены положения двух сечений, в которых возможно возникновение разрушений. Для определения последовательности разрушения ледяной плиты изгибом или срезом вводятся показатели  $K_1$ ,  $K_2$  и  $K_3$ . В начале ледяной плиты при  $x_{t1} = 0$ , показатель

$$K_1 = \frac{Q}{AR_s} = \frac{\frac{1}{3} N_1 l_H \beta}{AR_s}, \text{ здесь } R_s \text{ – прочность на сдвиг. В сечении } x_\sigma = 0.75\pi l_c, \text{ (соответствующего максимуму изгибающего момента) вводится два показателя:}$$

$$\text{показатель } K_2 = \frac{(|M|/W - H/A)}{R_f}, \text{ характеризующий разрушение при изгибе;}$$

$$\text{показатель } K_3 = \frac{(|M|/W + H/A)}{R_c}, \text{ соответствующий разрушению при сжатии.}$$

Достижение одним из критериев единицы определяет тип разрушения, реализующегося первым. Для выяснения этого типа разрушения, последовательно определяются значения критериев по мере увеличения высоты навала обломков льда, вплоть до достижения одним из них единицы. Значения критериев в зависимости от угла наклона сооружения, приведены на рис. 19.

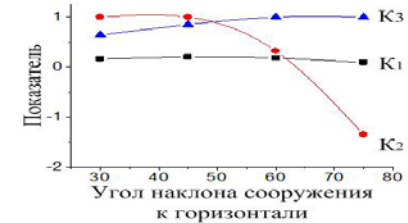


Рис. 19. Значение критериев при разных углах наклона поверхности сооружения к горизонтали

Из рис. 19 следует, что под действием нагромождения обломков льда разрушение срезом (при  $x=0$ ) не происходит. Разрушение плиты при изгибе может реализовываться двумя способами в зависимости от угла наклона плоскости.

Если угол наклона сооружения меньше  $52^\circ$ , показатель  $K_2$  являлся доминирующим, т. е. первым происходит разрушение в растянутой зоне поперечного сечения льда; если этот угол больше  $52^\circ$ , то первым в этом же сечении достигает единицы показатель,  $K_3$  т. е. разрушение происходит в сжатой зоне. В третьей главе отмечалось, что после разрушения от изгиба ледяная плита не теряет несущей способности. В сжатой зоне поперечного сечения плиты возникает пластическая зона. Расчетная схема с учетом наличия пластической зоны представлена на рис. 20.

При последующей деформации частично отколовшегося блока и оставшейся плиты (поля), возможно вторичное разрушение отколовшегося куска. Поэтому вводятся соответствующие следующим типам разрушения



критерии: срезом  $j_1$  при  $x=0$ ; сжатием по площади пластической зоны, до достижения предела пластической деформации  $j_2$ ; скольжением обломавшейся части по другому в пластической зоне по полю в сечении  $x = \frac{3}{4}\pi l_c, j_3$ ; разрушением растяжением в результате изгиба блока  $j_4$ ; или разрушением сжатием при изгибе в сечении  $0 < x_1 < 0.75\pi l_c, j_5$ . Применяя ту же методику, что и раньше, т.е. постепенно увеличивая высоту нагромождения, можно показать, что разрушение отколовшегося блока всегда будет происходить по критерию  $j_4$ . Это значит, что в блоке происходит разрушение в нижней растянутой зоне поперечного сечения. Новая расчетная схема с учетом двух пластических зон представлена на рис. 21.



Рис. 20. Расчетная схема с учетом пластической зоны



Рис.21. Расчетная схема с учетом двух пластических зон

Остается выяснить условие, при котором может произойти разрушение в какой зоне и при каких условиях произойдет окончательное разрушение. Для этого вводятся четыре новых критерия, учитывающие возможность сдвига частей блока друг относительно друга по второй пластической зоне  $j_6$ , или по первой пластической зоне  $j_7$ ; и учитывающие разрушение сжатием во второй пластической зоне  $j_8$ , или разрушение сжатием в первой пластической зоне  $j_9$ .

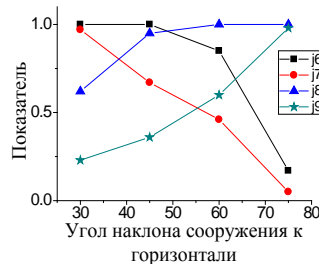


Рис. 22. Значение критериев при разных углах наклона сооружения для модели с двумя пластическими зонами

Из рис. 22 следует, что если угол наклона сооружения меньше  $52^\circ$ , показатель  $j_6$  является доминирующим; если этот угол больше  $52^\circ$ , показатель  $j_8$  будет доминирующим. Это значит, что при углах менее  $52^\circ$  под действием нагромождения обломков льда вторая пластическая зона не мо-

жет поддерживать навал вследствие скольжения, который определяется под нагромождением в момент возникновения первой трещины; при углах более  $52^\circ$  вторая пластическая зона теряет способность поддержания навала вследствие сжатия.

*Определение высоты нагромождения обломков льда*

Для определения высоты навала льда используются следующие уравнения

$$\frac{|M|}{W} - \frac{H}{A} = R_f \quad (9)$$

$$\frac{|M|}{W} + \frac{H}{A} = R_c \quad (10)$$

Обозначая  $z_1 = 0,0223A + \frac{1}{3l_c} \zeta W = 0,0223h + \frac{1}{3l_c} \zeta \frac{h^2}{6}$ ,

$$z_2 = 0,0223A - \frac{1}{3l_c} \zeta W = 0,0223h - \frac{1}{3l_c} \zeta \frac{h^2}{6}$$

$$z_3 = \zeta W + \mu_i W = \left( \frac{\sin \alpha + \mu_s \cos \alpha}{\cos \alpha - \mu_s \sin \alpha} + \mu_i \right) \frac{h^2}{6}, \quad z_4 = 1 + \mu_i \frac{\cos \alpha + \mu_s \sin \alpha}{\sin \alpha + \mu_s \cos \alpha}$$

$$z_5 = 0.5 \rho_i g (1-e) \left( \frac{1}{\tan \theta} - \frac{1}{\tan \alpha} \right)^2, \quad z_6 = 0.5 \rho_i g (1-e) \left( \frac{1}{\tan \theta} + \frac{1}{\tan \alpha} \right)$$

$$z_7 = R_f W A = R_f \frac{h^3}{6}, \quad z_8 = R_c W A = R_c \frac{h^3}{6}$$

Подставляя коэффициенты  $z_1 - z_8$  в уравнения (9) и (10), получим

$$c_1 b^3 + c_2 b^2 + c_3 = 0 \quad (11)$$

здесь  $c_1 = \begin{cases} \frac{z_5 z_1}{z_4} & \alpha \leq 52^\circ \\ \frac{z_5 z_2}{z_4} & \alpha > 52^\circ \end{cases}, \quad c_2 = \begin{cases} -\frac{z_6 z_3}{z_4} & \alpha \leq 52^\circ \\ \frac{z_6 z_3}{z_4} & \alpha > 52^\circ \end{cases}, \quad c_3 = \begin{cases} -z_7 & \alpha \leq 52^\circ \\ -z_8 & \alpha > 52^\circ \end{cases}.$

Дискриминант этого кубического уравнения равен  $\Delta = \left( \frac{p}{3} \right)^3 + \left( \frac{q}{2} \right)^2$ ,

здесь  $p = -\frac{c_2^2}{3c_1^2}, \quad q = \frac{2c_2^3}{27c_1^3} + \frac{c_3}{c_1}.$

Уравнение (11) имеет три корня. Если  $\Delta > 0$ , то уравнение имеет один вещественный и пару комплексно сопряженных корней. Если  $\Delta \leq 0$ , тогда

уравнение имеет три различных вещественных корня. В общем виде эти корни записываются как

$$b_1 = \lambda + \varpi - \frac{c_2}{3c_1}, \quad (12)$$

$$b_2 = -\frac{\lambda + \varpi}{2} + \sqrt{3} \frac{\lambda - \varpi}{2} i - \frac{c_2}{3c_1}, \quad (13)$$

$$b_3 = -\frac{\lambda + \varpi}{2} - \sqrt{3} \frac{\lambda - \varpi}{2} i - \frac{c_2}{3c_1}, \quad (14)$$

где  $\lambda = \left(-\frac{q}{2} + \sqrt{\Delta}\right)^{\frac{1}{3}}$ ,  $\varpi = \left(-\frac{q}{2} - \sqrt{\Delta}\right)^{\frac{1}{3}}$ .

Наименьший положительный вещественный корень из  $\{b_1, b_2, b_3\}$  определяет параметры, соответствующие высоте нагромождения обломков льда на сооружения с наклонными гранями. Для простой оценки высоты нагромождения обломков льда можно использовать рисунок 23.

Для оценки надежности методики расчета высоты нагромождения обломков льда на сооружения с наклонными поверхностями проведено сопоставление о данных и натурных исследований (см. рис. 24). Из рис. 24 следует, что согласованность результатов представляется вполне приемлемой.

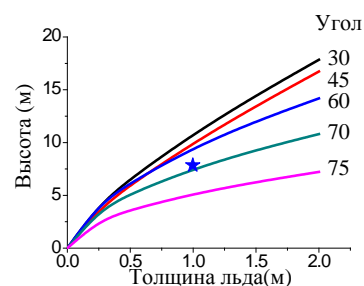


Рис. 23. Высота нагромождения обломков льда на наклонную плоскость сооружения.

★ – численное решение для 2D схемы расчета (угол наклона сооружения 60°, толщина льда 1м). (Прочность льда при изгибе 0,57 МПа; прочность при сжатии 1,71 МПа)

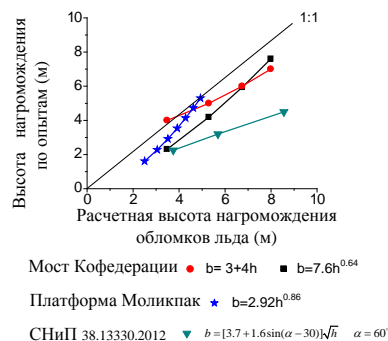


Рис. 24. Сопоставление наших расчетов с результатами формул полученных на основе наблюдений нагромождения обломков льда на Мосту Кофедерации и платформу Моликпак, СП 38.13330.2012

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

### Основные результаты и выводы:

1. Основная особенность процесса взаимодействия льда с наклонными поверхностями состоит в образовании во льду как изгибающих моментов, так и продольного усилия. Это изменяет коренным образом механизм разрушения льда. В результате, после разрушения льдины (вследствие изгиба или сжатия) образуется зона пластичности в месте контакта, сопротивляющаяся дальнейшему разрушению. Далее материал в этой зоне может так же разрушиться.

2. В связи со сложностью процесса взаимодействия на основании комплекса ANSYS разработана программа численного решения задач, связанных с взаимодействием льда с наклонными сооружениями. Верификация программы проведена путем сопоставления результатов расчета с имеющимися экспериментальными данными. Это сопоставление показало хорошее согласование результатов.

3. Получено и проанализировано решение об изгибе и сжатии ледовой плиты и образовании пластической зоны. Расчеты показали развитие разрушений с образованием зоны пластичности. Результаты этого решения согласуются с экспериментами Соди и использованы при анализе последующих задач.

4. В динамике получено решение задач о ледовых нагрузках на откос, конус, шестиугольную пирамиду. Проведен параметрический анализ влияния основных параметров явления (толщины льда, угла наклона сооружения, прочности льда и т. д.) на нагрузки. Проведенное сопоставление "динамических" нагрузок с квазистатическими Кроасдейла и СНИП позволило оценить влияние динамичности явления. Установлена зависимость нагрузок от протяженности сооружения вдоль фронта, тем самым определена разница между 2D и 3D решениями.

5. Получены данные для установления угла наклона огибающей нагромождений обломков  $\theta$  в зависимости от угла наклона откоса сооружения  $\alpha$ . Эта зависимость имеет вид

$$30 \leq \alpha \leq 52 \quad \theta = 5,5(\alpha^\circ)^{\frac{1}{3}}; \quad 52 < \alpha \leq 75 \quad \theta = 3,0(\alpha^\circ)^{\frac{1}{2}}.$$

6. Получено аналитическое решение для определения максимально возможной высоты нагромождения льда на откос. Показано, что существует по меньшей мере два сечения, в которых возможно разрушение ледяного поля (от сжатия при угле наклона сооружения более 52 градуса или растяжения при угле меньше 52 градусов). Вслед за этим, отколовшийся кусок может разрушиться еще. Сопоставление результатов расчета с имеющимися данными наблюдений в натуральных условиях показало их хорошее согласование. Приведены зависимости для расчета высоты нагромождения.

7. Результаты работы могут быть использованы для совершенствования методов расчета ледовых нагрузок на гидротехнические сооружения.

**Рекомендации по оценке ледовой нагрузки на гидротехнические сооружения с наклонной гранью:**

1. При взаимодействии льда и гидротехнического сооружения с наклонной гранью с учетом наличия продольной силы нагрузки на сооружения могут вырасти до двух раз.

2. Угол наклона огибающей нагромождений обломков  $\theta$  в зависимости от угла наклона откоса сооружения  $\alpha$  имеет вид

$$30 \leq \alpha \leq 52 \quad \theta^\circ = 5,5(\alpha^\circ)^{\frac{1}{3}}; \quad 52 < \alpha \leq 75 \quad \theta^\circ = 3,0(\alpha^\circ)^{\frac{1}{2}}.$$

3. При взаимодействии льда и гидротехнического сооружения с наклонной гранью эффективная нагрузка на узкое сооружение больше, чем на широкое сооружение.

4. При динамике взаимодействия льда и гидротехнического сооружения с наклонной гранью нагрузка увеличивалась на 60% при малых углах наклона сооружения.

5. Можно использовать формулу определения высоты навала льда, или упрощенный график высоты навала льда при разных углах и толщинах.

**Публикации**

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1. Ли Лян, Шхинек К.Н. Предельная несущая способность ледяных балок // Инженерно-строительный журнал. 2013. №1(36). С. 65-74.

2. Ли Лян, Шхинек К.Н. Воздействие льда на откосные сооружения // Инженерно-строительный журнал. 2014. №1(45). С. 71–79.

3. Ли Лян, Шхинек К.Н. Воздействие льда на наклонные поверхности сооружений // Гидротехническое строительство. 2014. № 4. С. 35 – 41.

4. Ли Лян, Шхинек К.Н. Разрушение ледяной балки под действием обломков льда, скопившихся на поверхности наклонного сооружения // Гидротехническое строительство. 2014. № 5. С. 27 – 33.

**Благодарность**

Автор выражает искреннюю благодарность научному руководителю, доктору физико-математических наук, профессору кафедры «Водохозяйственное и гидротехническое строительство» Инженерно-строительного института СПбПУ Карлу Натановичу Шхинеку за руководство и помощь в выполнении данной работы.

Типография ФГАОУ ВО СПбПУ  
195251 Санкт-Петербург, Политехническая, 29  
Объем 1,0 п.л. Тираж 100.