



В.А. Политько, И.Г. Кантаржи, К.П. Мордвинцев

ЛЕДОВЫЕ НАГРУЗКИ НА МОРСКИЕ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИЕ СООРУЖЕНИЯ

Учебное пособие



СТРОИТЕЛЬСТВО

Министерство образования и науки Российской Федерации
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ СТРОИТЕЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

В.А. Политько, И.Г. Кантаржи, К.П. Мордвинцев

ЛЕДОВЫЕ НАГРУЗКИ НА МОРСКИЕ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИЕ СООРУЖЕНИЯ

Учебное пособие

Москва 2016

УДК 627.224
ББК 38.77
П50

Рецензенты:

кандидат технических наук *С.Н. Левачев*,
профессор кафедры гидравлики и гидротехнического строительства НИУ МГСУ;
кандидат физико-математических наук *О.А. Вербицкая*,
главный специалист отдела исследований гидрометеорологии и льдов
ООО «Арктический научно-проектный центр шельфовых разработок»;
доктор технических наук *Т.Э. Уварова*,
доцент кафедры гидротехники, теории зданий и сооружений
Дальневосточного федерального университета (ДВФУ)

Политько, Валентин Александрович.

П50 Ледовые нагрузки на морские гидротехнические сооружения :
учебное пособие / В.А. Политько, И.Г. Кантаржи, К.П. Мордвинцев ;
М-во образования и науки Рос. Федерации, Нац. исследоват.
Моск. гос. строит. ун-т. Москва : Изд-во Моск. гос. строит. ун-та,
2016. 88 с.

ISBN 978-5-7264-1408-9

Приведены сведения об основных параметрах и характеристиках льда, о механике разрушения льда и особенностях его воздействия на гидротехнические сооружения. Рассмотрены основные положения определения ледовых нагрузок на гидротехнические сооружения, факторы, влияющие на ледовую нагрузку, основные расчетные случаи. Отдельная глава посвящена методам защиты портовых и шельфовых сооружений от ледовых воздействий. Расчет ледовой нагрузки рассмотрен на примерах.

Для студентов магистратуры направления подготовки 08.04.01 Строительство и аспирантов направления 08.06.01 Техника и технологии строительства, дисциплины «Строительство морских сооружений», «Гидротехнические сооружения водного транспорта и морских промыслов».

УДК 627.224
ББК 38.77

ISBN 978-5-7264-1408-9

© Национальный исследовательский
Московский государственный
строительный университет, 2016

Предисловие

Ледотехническим аспектам строительства гидротехнических сооружений в последнее время уделяется все больше внимания ввиду растущего объема деятельности человека в северных широтах. Одной из причин повышенного интереса к Крайнему Северу является его богатый ресурсный потенциал. В российском сегменте Крайнего Севера расположены крупнейшие мировые запасы природного газа. При этом большая его часть залегает на шельфе арктических морей. Помимо природного газа в арктической зоне сосредоточены большие запасы драгоценных и редкоземельных металлов, железа, фосфора, медно-никелевых руд и других важных ресурсов [1]. Еще одним важным аспектом растущей деятельности в северных широтах является восстановление Северного морского пути, связывающего страны Европы и европейскую часть России с Дальним Востоком и азиатскими рынками, что в последние годы стало технически и экономически обоснованным [2].

Арктика интересна России как с экономической, так и с геополитической и хозяйственной точек зрения. Для освоения ее ресурсов и обеспечения круглогодичной навигации по Северному морскому пути требуются развитие инфраструктуры, модернизация и возведение новых портовых сооружений, строительство уникальных ледостойких нефтегазопромысловых гидротехнических сооружений и других объектов.

Большую часть года в акваториях Крайнего Севера присутствуют ледовые образования различных форм. Методы прогнозирования ледовых условий и алгоритмы определения нагрузок от ледовых воздействий в этом случае становятся важными факторами обеспечения безопасности морских операций.

Освоение территорий Крайнего Севера связано со значительными затратами и высокой степенью риска. Экономичность и надежность гидротехнических сооружений в значительной мере зависят от корректности определения нагрузок, которые они воспринимают в течение всего срока эксплуатации. Как правило, в северных районах ледовые нагрузки превышают значения суммы всех остальных нагрузок и являются определяющими при проектировании конструкций гидротехнических сооружений.

Многочисленные лабораторные и полевые испытания физико-механических и других свойств льда, проведенные за последние годы, в некоторой степени пролили свет на физику льда, его прочность и механику разрушения.

Различными специалистами в области изучения льда был предложен ряд эмпирических формул для определения ледовых нагрузок. Многие из этих формул до сих пор используются в инженерной практике для определения расчетных ледовых нагрузок. С активным развитием компьютерных технологий и программ на базе метода конечных элементов стало возможным сделать следующий шаг в области исследования ледовых процессов и воздействий на гидротехнические сооружения путем комплексного анализа, учитывающего физику льда, характеристики сооружения, гидродинамические эффекты и другие условия.

В пособии дается общая информация о физике и механике льда, изложены основные положения по расчету ледовых нагрузок, принятые в российских нормах, а также представлен краткий анализ мероприятий, направленных на снижение ледовых нагрузок и воздействий.

1. ЛЕД. ЕГО ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ И ХАРАКТЕРИСТИКИ

1.1. Общие положения

Для качественной оценки воздействия льда на гидротехнические сооружения требуется различная ледовая информация, характерная для конкретного района [3]. В течение нескольких последних десятилетий проведено большое количество исследований по сбору данных о льдах в ключевых арктических районах. Результаты исследований опубликованы в многочисленных научных журналах, сборниках конференций, ежегодных обзорах гидрометеорологических процессов в Северном Ледовитом океане, выполняемых институтом ААНИИ. В приложении к международному стандарту ISO 19906 [4] также представлена некоторая информация о ключевых параметрах льда для основных мировых акваторий.

Основной перечень исследуемых параметров ледового покрова для различных стадий освоения шельфовых районов определен нормативными документами СП 11-114—2004 [5] и ISO 19906 [4], однако он может быть расширен в соответствии с требованиями организаций, осуществляющих проектирование шельфовых сооружений. Данные нормативы выделяют следующие ключевые характеристики льда:

- морфометрические параметры (размеры, толщины льдин; габариты торосов и др.) и внутреннюю структуру ледовых образований;
- динамические характеристики ледового покрова (скорости и розы дрейфа льда) и пространственные распределения ледовых образований;
- физико-механические свойства льда.

Важным также является исследование возможности появления в акватории айсбергов, установление их морфометрических и динамических параметров.

К современным методам наблюдений за морфометрическими характеристиками ледового покрова в первую очередь относят методы сбора информации с помощью снимков различного расширения искусственных спутников Земли, аэрофотосъемки, лазерного профилирования верхней и нижней поверхности льда, а также прямых измерений [6; 7]. Определение динамических характеристик ледяного покрова (скорости и направления дрейфа ледовых полей и айсбергов) выполняется, как правило, при помощи высокоточной спутниковой навигационной системы путем опре-

деления географических координат льдины или айсберга через равностоящие интервалы времени [8]. Физико-механические свойства льда определяются при помощи полевых испытаний.

Согласно положениям ISO 19906 [4], в случае отсутствия данных по некоторым ледовым параметрам для рассматриваемого района в целях предварительных расчетов могут быть приняты (или экстраполированы) результаты исследований, выполненных в районах со схожими климатическими, гидрологическими и ледовыми условиями. Полезным инструментом для восполнения отсутствующих данных может быть также численное моделирование, которое предоставляет возможность получить отдельные ледовые характеристики с использованием системы моделей циркуляции океана и гидротермодинамических моделей динамики ледового покрова [9–11].

1.2. Структура льда. Процессы образования льда

1.2.1. Структура льда

Лед состоит из тех же базовых элементов, что и обычная вода (H_2O), т.е. из молекул водорода и кислорода. Форма льда, которая встречается в природе на планете Земля, называется Ih (обычный гексагональный кристаллический лед). Каждый атом кислорода O находится в центре тетраэдра с еще четырьмя атомами кислорода, расположенными в вершинах тетраэдра, как показано на рис. 1. Кристаллы льда расположены в параллельных базисных плоскостях, расстояние между которыми составляет примерно 7,37 ангстрема (рис. 2, а). Главная ось симметрии кристалла (ось C) перпендикулярна базисным плоскостям. Она, как правило, имеет вертикальное направление и совпадает с направлением теплового потока. Гексагональная структура расположения атомов льда внешне напоминает медовые соты, аккуратно положенные друг на друга (рис. 2) [12].

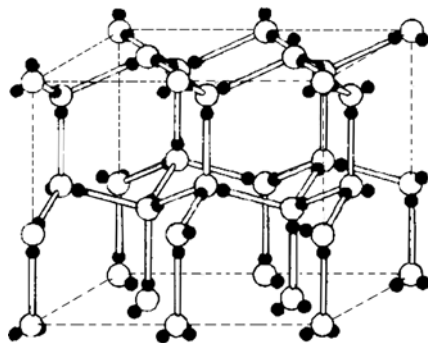


Рис. 1. Атомная структура обычного льда Ih [12]

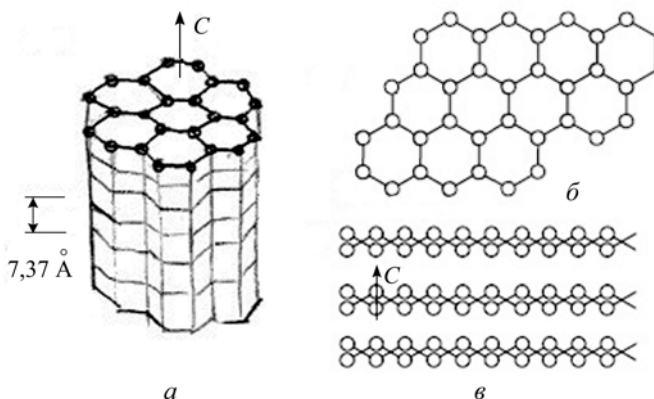


Рис. 2. Схематическая структура кристаллов льда:
 а — изометрия; б — вид сверху; в — вид сбоку [13]

Как видно из рис. 1 и 2, *в*, связей между базисными плоскостями относительно немного. Поэтому лед наиболее слабый между его базисными плоскостями. Иногда кристаллическую структуру льда сравнивают с колодой карт, плохо склеенных друг с другом. Карты можно сдвинуть относительно друг друга достаточно небольшим усилием, но если сжимать колоду, она проявляет большую прочность [13]. В итоге, это приводит к анизотропии прочностных характеристик льда (в основном прочности на сжатие σ_c). К примеру, при испытаниях на сжатие образцов морского льда на шельфе о. Сахалин [14], выпиленных перпендикулярно и параллельно поверхности льда, коэффициент анизотропии, а именно отношение прочности первого рода образцов ко вторым, изменялся в диапазоне 1,7–3,0. Такого рода анизотропия свойственна призматическому (столбчатому) льду с вертикальными вытянутыми кристаллами столбчатой формы, как на рис. 2, *а*.

Но бывает лед, в группе соседствующих кристаллов которого главные оси ориентированы случайным образом. Такой лед называют зернистым (снежным). Он образуется, когда снег, наледь или снежура смерзаются. Такой лед, как правило, образует верхний слой ледового поля (до 20–25 % толщины) и ледники. Поскольку ось C в этом поликристалле ориентирована случайным образом, прочность зернистого льда не зависит от направления приложения нагрузки.

Согласно отечественным нормам СП 38.13330.2012 [15], структура ледового поля (речного и морского) определяется по данным кристаллографического исследования, но при их отсутствии допускается принимать, что:

- ледяной покров открытых озер, водохранилищ и крупных рек состоит из зернистого и призматического льдов;
- ледяной покров морей и устьевых участков рек, впадающих в моря, состоит из зернистого и волокнистого льдов.

При этом толщина слоя зернистого льда, располагающегося в верхней части ледяного покрова, относится к толщине слоя призматического или волокнистого льда как 1:3.

СП 38.13330.2012 [15] выделяет третью категорию льда (по структуре) — волокнистый лед, характерный для морского льда. Он отличается от призматического тем, что в нем присутствуют полости с воздухом и солевым раствором (рис. 3). Данные полости образуются из-за того, что кристаллы льда в процессе роста вытесняют из своей структуры соль, которая в виде соляной суспензии концентрируется в небольших вертикальных каналах и со временем уходит из тела льда из-за большего, чем у льда, удельного веса. Наличие данных полостей и, соответственно, большей пористости, делает морской лед менее прочным, чем пресный.

1.2.2. Процессы образования льда

На рис. 3 схематично показан поперечный разрез типичного однолетнего морского льда [12]. Под слоем свежего снега лежит зернистый лед, образовавшийся в процессе таяния снега. Кристаллы льда небольшие и имеют случайную ориентацию. Под зернистым льдом находится волокнистый лед. Между кристаллами волокнистого льда располагаются продолговатые вертикальные полости и солевые каналы, которые образуются в процессе роста кристаллов при постепенном вытеснении соли.

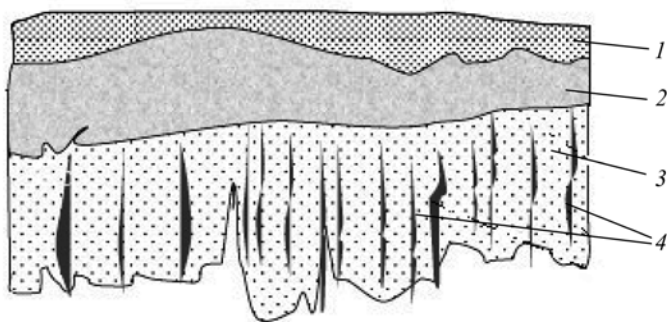


Рис. 3. Поперечный разрез типичного однолетнего льда [12]:
 1 — снег; 2 — зернистый лед; 3 — волокнистый лед;
 4 — полости с воздухом и солевым раствором

Образование льда на поверхности морской воды происходит, когда температура падает ниже нуля. Начинают появляться первые кристаллы льда, которые образуют тонкий эластичный слой. Толщина льда в течение зимнего периода непрерывно нарастает, вплоть до начала разрушения ледяного покрова в весенний период. Нарастание льда вызвано в основном двумя факторами: *термическим* и *динамическим*. Толщина термического (ровного) льда постепенно увеличивается в течение зимы и к началу таяния может достигать 1,6 м [14] и более. Толщина льда, образовавшегося под воздействием динамических факторов — *наслоения* и *торошения*, может быть значительно больше.

Термическое нарастание льда. Когда нет открытой воды, толщина льда постепенно увеличивается за счет разницы тепловых потоков между льдом, водой и атмосферой. Поток тепла, проходящий в атмосферу через лед от морской (или пресной) воды, пропорционален теплопроводности льда и температурному градиенту, а теплота, выделяющаяся в процессе кристаллизации, пропорциональна образовавшейся массе льда. Замедлять теплопередачу может слой снега, который довольно часто образуется на поверхности льда. Снег — слабый проводник тепла с теплопроводностью в случае свежего нес слежавшегося снега — $0,086 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ и плотного снега — $0,34 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$, что на порядок меньше теплопроводности льда, которая составляет $2,2 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$. Эта характеристика равна количеству теплоты, проходящей через однородный образец льда единичной длины и единичной площади за единицу времени при единичной разнице температур (1 К). В системе СИ единицей измерения коэффициента теплопроводности является $\text{Вт/(м}\cdot\text{К)}$. Таким образом, снег изолирует лед от температурных перепадов. Этот эффект частично нивелируется, когда снег тает и потом замерзает, превращаясь в зернистый лед [12]. Приведенное ниже уравнение, представленное в международном стандарте ISO 19906, является примером эмпирической формулы для нахождения толщины льда с учетом влияния температуры воздуха и толщины снега на поверхности льда:

$$h = -m + [(m + h_0)^2 - 405 \sum T_a]^{1/2},$$

где T_a — средняя дневная температура воздуха, $^{\circ}\text{C}$;

m — эмпирический коэффициент, зависящий от толщины снега;

h_0 — толщина льда в начале ледового сезона (в случае однолетнего льда $h_0 = 0$), м;

h — толщина льда в конце ледового периода, м.

Динамическое нарастание льда. Лед редко бывает стационарным. Ветер и течения, которые воздействуют на лед, во-первых, вызывают в нем напряжения, которые, в свою очередь, могут стать причиной образования трещин и разрушения льда; во-вторых, заставляют льдины сталкиваться друг с другом. При столкновении льдин друг с другом могут происходить такие динамические процессы, как *наслоение* льда и *торошение* (рис. 4).

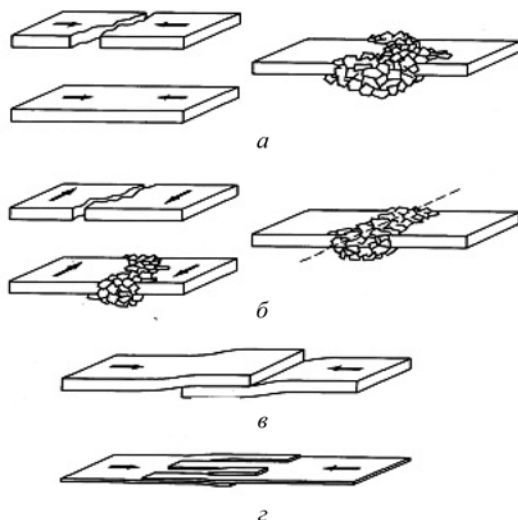


Рис. 4. Формы динамического нарастания льда:
 а, б — торошение; в — плоское наслоение ровного льда;
 з — пальчиковое наслоение ровного льда [13]

Наслоение льда. Когда льдины имеют еще относительно небольшую толщину (до 0,5 м), они часто наслаиваются друг на друга. Обычно имеют место два различных типа наслоения: плоское и пальчиковое [16]. В первом случае, когда две льдины встречаются, одна из льдин целиком наваливается сверху на другую льдину. Наслоение льдов значительно увеличивает их толщину. Во втором случае ледовое наслоение получило термин пальчиковое, так как процесс наслоения очень напоминает скрещивание пальцев. При этом процессе могут образовываться ледовые пальцы иногда длиной до 100 м. Интересным феноменом является тот факт, что иногда достаточно толстый лед также может наслаиваться друг на друга. Этот процесс пока слабо изучен.

Торошение. При взаимодействии двух льдин может происходить не только их наложение друг на друга, но и деформация. В арктических районах торосы встречаются очень часто. Они могут вызывать основную

Оглавление

Предисловие	3
1. Лед. Его основные параметры и характеристики	5
1.1. Общие положения	5
1.2. Структура льда. Процессы образования льда	6
1.2.1. Структура льда	6
1.2.2. Процессы образования льда	8
1.3. Типы льда. Морфометрия льда	11
1.3.1. Типы льда	11
1.3.2. Морфометрия льда	13
1.4. Динамика ледяного покрова	15
1.5. Физико-механические свойства льда	17
1.5.1. Общая характеристика льда как твердого тела	17
1.5.2. Прочность льда на сжатие	19
1.5.3. Прочность льда на изгиб и растяжение	22
1.5.4. Трещиностойкость	23
2. Механика разрушения льда и особенности воздействия льда на гидротехнические сооружения	24
3. Расчет ледовых нагрузок на гидротехнические сооружения	31
3.1. Основные положения	31
3.2. Факторы, влияющие на ледовую нагрузку	33
3.3. Сценарии ледовых воздействий и расчетные случаи	35
3.4. Ледовые нагрузки от ровных полей на гидротехнические сооружения	37
3.5. Ледовые нагрузки от торосов	42
3.6. Ледовые нагрузки на наклонные и конические опоры сооружений	47
3.7. Ледовые нагрузки на многоопорные конструкции	51
3.8. Локальные ледовые нагрузки	53
4. Методы защиты портовых и шельфовых сооружений от ледовых воздействий	54
4.1. Защита портовых акваторий и судоходных каналов	54
4.1.1. Защита портовых акваторий	54
4.1.2. Защита судоходных каналов	57
4.2. Защита шельфовых сооружений от ледовых воздействий	59
4.3. Защита гидротехнических сооружений от истирания подвижками льда	61

5. Примеры расчетов ледовой нагрузки	63
Библиографический список	68
Приложения.....	71
1. Таблицы для определения значений прочности льда на одноосное сжатие c_i для i -го слоя в отсутствие опытных данных	71
2. Таблицы для определения ледовых нагрузок на сооружения от полей ровного льда.....	73
3. Таблицы для определения нагрузок от движущегося ледяного поля на отдельно стоящую коническую опору и на секцию сооружения откосного профиля	74
4. Нагрузка от воздействия остановившегося поля ровного льда, наваливающегося на сооружение при действии течения воды и ветра.....	76
5. Нагрузки на сооружения от сплошного ледяного покрова при его температурном расширении	77
6. Нагрузки от примерзшего к сооружению ледяного покрова при изменении уровня воды	79
7. Нагрузки на сооружения от заторных и зажорных масс льда	83

Учебное издание

Политько Валентин Александрович, **Кантаржи** Игорь Григорьевич,
Мордвицев Константин Петрович

ЛЕДОВЫЕ НАГРУЗКИ НА МОРСКИЕ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИЕ СООРУЖЕНИЯ

Редактор, корректор *А.К. Смирнова*
Компьютерная правка *О.В. Суховой*
Верстка, дизайн обложки *Д.Л. Разумного*

Подписано в печать 01.12.2016 г. И-54. Формат 60×84/16.

Усл. печ. л. 5,11. Тираж 100 экз. Заказ 321

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

«Национальный исследовательский
Московский государственный строительный университет»
129337, Москва, Ярославское ш., 26.

Издательство МИСИ — МГСУ.
Тел. (495) 287-49-14, вн. 13-71, (499) 188-29-75, (499) 183-97-95.
E-mail: ric@mgsu.ru, rio@mgsu.ru.

Отпечатано в типографии Издательства МИСИ — МГСУ.
Тел. (499) 183-91-90, (499) 183-67-92, (499) 183-91-44