

ФЕДЕРАЛЬНАЯ ЦЕЛЕВАЯ ПРОГРАММА
«ГОСУДАРСТВЕННАЯ ПОДДЕРЖКА ИНТЕГРАЦИИ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
И ФУНДАМЕНТАЛЬНОЙ НАУКИ НА 1997 — 2000 ГОДЫ»

И.А.Степанюк

ТЕХНОЛОГИИ ИСПЫТАНИЙ И МОДЕЛИРОВАНИЯ МОРСКОГО ЛЬДА



Санкт-Петербург
Гидрометеоиздат
2001

УДК 551.332

Рассматривается совокупность технологий испытаний моделированного и натурального льда преимущественно для задач использования в условиях ледовых опытовых бассейнов.

Книга предназначена в качестве пособия для студентов старших курсов гидрометеорологических специальностей.

Издание осуществлено при финансовой поддержке Федеральной целевой программы «Государственная поддержка интеграции высшего образования и фундаментальной науки на 1997 — 2000 годы».

T 1805040600-22
069(02)-2001

© Центр «Интеграция», 2001 г.
© Степанюк И.А., 2001 г.

ISBN 5-286-01420-8

ВВЕДЕНИЕ

Развитие современных арктических морских технологий требует создания новых ледокольных и транспортных судов, стационарных буровых установок и других специальных технических средств для эксплуатации в ледовых условиях. Для этого необходимо использовать экспериментальные методы изучения взаимодействия этих технических средств со льдом. Методы должны быть дешевыми и надежными. Наиболее целесообразными принято считать методы физического моделирования. Моделирование процессов взаимодействия обеспечивается в ледовых опытовых бассейнах при соблюдении достаточно жестких критериев подобия как по отношению к модели технического средства, так и по отношению к модельному льду.

При решении задач моделирования ледяного поля в опытовых бассейнах становятся необходимыми предварительные исследования широкого круга вопросов, связанных с физико-механическими свойствами моделированного льда и соответствия этих свойств натурным льдам, технологиями определения этих свойств и методиками обработки результатов определений, а также с методами нормирования и воспроизведения основных из этих свойств в требуемом масштабе в искусственных условиях бассейна.

В данном пособии рассматриваются технологии испытаний. Для моделированного льда технологии основаны на аналогичных технологиях испытаний натуральных льдов, но имеют весьма специфические особенности. Во-первых, физико-механические свойства моделированного льда задаются существенно иными (например, прочностные свойства более низкими), чем у натуральных льдов. Во-вторых, размеры испытываемых образцов моделированного льда, как правило, весьма ограничены, особенно образцов, вырезаемых по вертикали, что приводит к существенному влиянию масштабных эффектов. Подобная специфика требует разумного и критического отношения к переносимым на условия опытового бассейна технологиям натуральных испытаний. В пособии для формирования такого отношения показан критический анализ используемых технологий и рассмотрены некоторые современные тенденции их развития.

Технологии испытаний основаны на длительном опыте отечественных и зарубежных исследователей. Некоторые из них, в частности, технологии испытаний прочностных свойств льда обобщены в рекомендациях Международной ассоциации гидрологических исследований (МАГИ) в 1975 г. Однако, во-первых, эти рекомендации не являются чем-то "застывшим", поэтому продолжают работы по совершенствованию технологий. Во-вто-

рых, рекомендации МАГИ являются далеко не полными, что требует существенного расширения существующих технологий. В-третьих, основные технологии испытаний являются преимущественно "ручными", разработка же автоматизированных методов ведется медленными темпами.

Кроме этого, следует отметить, что большинство используемых технологий испытаний в настоящее время метрологически слабо обеспечены. В значительной мере это связано с тем, что изначально основные принципы испытаний льда были взяты из технологий испытаний материалов в промышленности. Дальнейшее их развитие шло практически самостоятельно, при этом не всегда учитывались тоже развивающиеся общеметрологические требования и методики. В частности, не всегда соответствуют современным метрологическим требованиям существующие методы определений прочностных свойств льда, не подвергались критическому анализу точностные характеристики существующих методов определения плотности льда. Кроме того, все эти методы не позволяют полностью автоматизировать процессы измерений, что, несомненно, является весьма существенным их недостатком при современных требованиях к постановке физического эксперимента.

Методы нормирования и воспроизведения основных физико-химических свойств льда в требуемом масштабе в условиях бассейна, несмотря на значительный опыт, накопленный к настоящему времени в ледовых опытовых бассейнах мира, по-прежнему остаются развивающимися. Остаются во многом нерешенными вопросы надежной воспроизводимости физико-механических свойств, вопросы снижения прочности ниже масштаба 1:20, вопросы моделирования плотности льда в задаваемых пределах методики засева поверхности кристаллозародышами, методики формирования структур разрушения льда при испытаниях моделей и многие другие.

Наряду с технологиями, ставшими к настоящему времени во многом общепринятыми, в пособии рассматриваются также новые технологии и методики, еще не установившиеся и, возможно, в чем-то спорные. Однако поскольку данное пособие подготовлено для современных специалистов, то подобное расширение представляется вполне правомерным. Ведь из подобных нестандартных и поначалу спорных методик в будущем формируются стандартные. Знание же возможных путей развития представляется весьма полезным.

Пособие предназначено для студентов гидрометеорологических специальностей. Автор, кроме информации из литературных источников, в значительной мере использовал свой собственный опыт практической деятельности в специальной ледоисследовательской лаборатории.

Работа выполнена в рамках ФЦП «Интеграция», проект М141-05.

ГЛАВА 1. МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МОРСКОГО ЛЬДА И ТЕХНОЛОГИИ ИСПЫТАНИЙ

1.1. ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ КЛАССИФИКАЦИИ МОРСКИХ ЛЬДОВ И ИХ УЧЕТ ПРИ ИСПЫТАНИЯХ

В ледовых исследованиях применяют несколько основных видов классификации морских льдов. Наибольшее распространение получила структурно-генетическая классификация, предложенная Н.В.Черепановым [46], где за основу берется кристаллическая структура и условия образования / происхождения льда. Классификация Н.В.Черепанова включает все виды природных льдов (морские, речные, озерные, материковые и т.д.) Среди морских льдов выделены типы В1–В9 и Г1–Г4. Кроме структурно-генетической, получила широкое распространение классификация по возрастным категориям, принятая в системе Росгидромета в соответствии с международной номенклатурой морских льдов (1972 г.). Упрощенная классификация по возрастным категориям, где за основу взяты достигаемые толщины льдов, предложена В.В.Лавровым [26].

Структурно-генетическая классификация. В соответствии с этой классификацией морской лед разделяется на девять основных (В1–В9) типов и четыре дополнительных (Г1–Г4). Основные типы характерны для однолетних льдов, а дополнительные – для многолетних, структуры которых связана с происшедшими в периоды повторного выхолаживания процессами декристаллизации:

– тип В1; образуется в устойчивом гомотермическом приледном слое и хорошо развитой вертикальной конвекцией; имеет хорошо выраженную структуру с вертикальным расположением кристаллов;

– тип В2; имеет наиболее широкое распространение в Арктике; преимущественно, это обширные поля дрейфующих льдов, структура, как и у В1, преимущественно вертикальная, но содержит значительное количество поперечных межкристаллических прослоек, средняя длина кристаллов составляет порядка 100 мм;

– тип В3; образуется при интенсивном поступлении к фронту кристаллизации элементов внутриводного льда; основная структура – продольные кристаллы с большой извилистостью, включения захватываются между основной структурой; этот тип распространен среди дрейфующих и припайных льдов Арктики в зонах интенсивных подвижек и наличия стационарных полыней;

– тип В4; формируется обычно там же, где и В3; характеризуется преимущественно вертикальной ориентацией кристаллов, но при их длине не более 20 мм;

– тип В5; образуется при очень низких температурах воздуха в зимний период и при наличии на поверхности воды большого количества центров кристаллизации;

– тип В6; характерен для районов с резко изменяющимся гидрологическим режимом, например, морских устьев рек, проливов и т.д.; структура выглядит в виде укрупненных кристаллитных блоков, в каждом из которых наблюдается упорядоченная ориентация кристаллов; механические свойства обычно изотропны;

– тип В7; формируется при интенсивном ветровом перемешивании мелководных участков моря, когда происходит значительное образование шуги из внутриводного и донного льда; структура из более мелких, чем В6, кристаллитных блоков; внутри блоков кристаллы упорядочены; механические свойства изотропны;

– тип В8; образуется при смерзании зерен снега с мелкими зернами внутриводного льда; структура хаотическая, мелкозернистая; изотропен;

– тип В9; характерен для условий постепенной инфильтрации морской воды, выступающей на поверхность льда: структура хаотическая: мелкозернистая; соленость может достигать 14 ‰.

Для многолетних льдов характерны более сложные типы с преобразованной структурой. Преобразования происходят в результате таких причин, как радиационное таяние с повторным замерзанием, режеляционная перекристаллизация в глубинных слоях и т.д. Здесь в настоящее время выделяется четыре основных типа: Г1, Г2, Г3, Г4.

Наибольшее распространение в Арктике, по оценкам ААНИИ, имеют льды типов В2, В3 и В4.

Классификация по возрастным категориям. В соответствии с номенклатурой морских льдов (1972 г.) по возрастным категориям льды делятся на следующие виды:

1) начальные виды льдов (ледяные иглы, ледяное сало, снежура, шуга).

2) темный нилас; толщина до 5 см;

3) светлый нилас, в том числе блинчатый лед; толщина 5–10 см.

4) склянка; толщина порядка 5 см.

5) серый лед, в том числе блинчатый серый; толщина 10–15 см;

6) серо-белый лед; толщина 15–30 см;

7) тонкий однолетний белый лед; толщина 30–70 см;

8) однолетний лед средней толщины; толщина 70–120 см.

9) толстый однолетний лед; толщина > 120 см;

10) двухлетний лед; толщина > 200 см;

11) многолетний (паковый) лед; толщина 300 см и более.

Льды различных возрастных категорий имеют различную соленость S и, соответственно, плотность ρ . Это обусловлено постепенным стеканием рассола из межкристаллических ячеек. Наиболее велика изменчивость S и ρ у молодых льдов (табл. 1.)

Таблица 1

Характеристики льдов различных возрастных категорий

Вид льда	Толщина, см	Соленость, ‰	Плотность, кг/м ³
Нилас	3–10	13–18	830–916
Серый лед	10–15	7–10	810–890
Серо-белый лед	15–30	2–7	780–890
Белый лед	30–70	2–7	700–900

Несомненно, к данным табл. 1, следует относиться как к средним. Возможны случаи, когда, например, тонкий однолетний лед или лед средней толщины вследствие сильной пористости при сильно изменчивых температурных условиях может иметь соленость 10–12 ‰ из-за фильтрации морской воды по порам и фактически – насыщения льда водой.

Упрощенная классификация по возрастным стадиям. В работе [25] была предложена более сжатая классификация морских арктических льдов по возрастным категориям. Основой классификации является не комплекс характеристик, как в номенклатуре морских льдов, а их реальный возраст. Льды разбиваются на пять основных групп со следующими градациями возраста:

- 1) 1–1,5 месяца; толщина 50–60 см;
- 2) 2–3 месяца; толщина 70–120 см;
- 3) 5–6 месяцев; толщина 150–180 см;
- 4) двухлетний лед; толщина 200–250 см;
- 5) многолетний лед; толщина > 250 см;

Утверждается, что прочность льда определенного возраста является довольно устойчивой характеристикой как в пространстве, так и во времени. При этом приводятся обобщенные результаты испытаний на прочность при изгибе по различным районам Арктики.

Структуру натуральных льдов и особенности свойств различных видов льда необходимо учитывать как при моделировании льда в условиях опытовых бассейнов, так и при реализации технологий испытаний свойств моделированного и натурального льдов.

1.2. ОСНОВНЫЕ ПРОЧНОСТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МОРСКОГО ЛЬДА

Краткий обзор применяемых в настоящее время критериев прочности дан в монографии [3] и приводится ниже в несколько сокращенном виде:

1. *Предел пропорциональности* $\sigma_{пр}$ – напряжение, при котором отступление (отклонение) от закона Гука достигает некоторого определенного значения, устанавливаемого ведомственными техническими условиями. Считается, что при практических расчетах на прочность предел пропорциональности можно принимать равным пределу текучести (см. ниже).

2. Предел упругости σ_y – напряжение, при котором остаточные деформации впервые достигают некоторого значения, характеризующего

определенным допуском – 0,001; 0,003; 0,03 %. Допуск устанавливается соответствующими техническими условиями (ТУ). При практических расчетах σ_y также можно принимать равным пределу текучести.

3. Предел текучести σ_T – напряжение, соответствующее нижнему положению площадки текучести в диаграмме растяжения. Значение σ_T является границей между упругой и упруго-пластической зонами деформирования.

4. Предел прочности (временное сопротивление) σ_b – напряжение, соответствующее наибольшей нагрузке, предшествующей разрушению образца.

5. Предел ползучести $\sigma_{пл}$ – наибольшее напряжение, при котором скорость или деформация ползучести за определенный промежуток времени не превышает значения, установленного ТУ.

6. Предел длительной прочности $\sigma_{дл}$ – условное напряжение, равное отношению нагрузки, при которой происходит разрушение растянутого образца через определенный промежуток времени, к первоначальной площади поперечного сечения.

7. Предел выносливости σ_r – наибольшее напряжение цикла, которое материал может выдержать повторно без разрушения N раз, где N – заданное ТУ большое число ($10^6, 10^7, 10^8$).

Эти семь характеристик используются в материаловедении и могут применяться ко льду. Однако в механике разрушения морского льда нашла преимущественное применение лишь одна из них – предел прочности (временное сопротивление).

Предел прочности морского льда определяется при различных условиях испытаний и в силу этого установлены следующие его разновидности:

- предел прочности на изгиб ($\sigma_{из}$);
- предел прочности на сжатие ($\sigma_{сж}$);
- предел прочности на срез/сдвиг ($\sigma_{ср}$);
- предел прочности на растяжение (σ_r);
- предел прочности на сжатие/стесненное сжатие ($\sigma_{см}$); в зарубежной литературе иногда употребляется термин “твердость”, считающийся аналогом $\sigma_{см}$.

В последнее время в литературе замечается весьма критическое отношение к подобному разнообразию принятых характеристик прочностных свойств, в частности, в силу того, что каждая из этих характеристик является в значительной мере условной, не отражающей истинных механических свойств. Любое испытание образцов на прочность является, по сути, всего лишь моделью и может характеризовать механику разрушения больших масс льда лишь с привлечением сопутствующих гипотез. В частности, на это указывает М. Миллер [30], рассматривая испытания на изгиб балки, при этом утверждая, что подобные эксперименты являются *непрямыми* и при их анализе необходимо прибегать к *непрямым* гипотезам относительно механических свойств. В связи с этим, применяемые схемы испытаний на изгиб, по мнению М. Миллера, *не подходят*. Естественно, это весьма резкое мнение и оно остается спорным.

В связи с неудовлетворительным общим положением дел, связанных с изучением прочностных свойств морского льда, в литературе выдвигаются разнообразные предложения по новым методикам испытаний и характеристикам прочности. В частности, Г. Франкенштейн [44], чтобы внести ясность в вопрос о прочности, предлагает "...подвергать *плавающий ледяной покров* воздействию однородной нагрузки, распределенной по круговой области, и измерять получающиеся деформации в момент приложения данной нагрузки, а затем через фиксированные промежутки времени", т.е. предложены дорогостоящие эксперименты без всякой надежды на однозначные (и главное, повторяющиеся в пределах разумной погрешности) результаты. М. Меллор в работе [28] предлагает перейти к исследованию и использованию критериев разрушения, построенных не в терминах напряжений, а в терминах деформаций, считая, что это может существенно улучшить положение. Однако эта идея не нашла последователей.

В ряде работ [11, 17, 30] рассматриваются характеристики трещиностойкости льда, в частности, критический коэффициент интенсивности напряжений K_{1c} .

Критический коэффициент интенсивности напряжений K_{1c} является такой характеристикой материала, которая определяет напряжение, необходимое для распространения трещины известного размера [17]:

$$K_{1c} = K_1(l, \sigma).$$

Коэффициент K_{1c} для случая плоской деформации связан со скоростью высвобождения энергии деформации G следующим соотношением:

$$K_{1c}^2 = GE(1 - \mu^2),$$

где E – модуль Юнга; μ – коэффициент Пуассона.

При этом индекс "1" соответствует распространению трещины нормального отрыва.

Кроме K_{1c} , могут также использоваться коэффициенты K_{2c} и K_{3c} , соответствующие поперечному (вдоль поверхностей трещины) и продольному (вдоль фронта трещины) сдвигу. Однако, эти коэффициенты применительно к испытаниям морского льда практически не исследовались.

Повышенный интерес к K_{1c} вызван тем обстоятельством, что описание механизма разрушения льда через эту величину обладает определенной автономностью [11]. В связи с этим появляется некоторая надежда, что K_{1c} может являться тем универсальным параметром, с помощью которого можно описать прочностные свойства морского льда для различных условий нагружения.

В смысле особенностей методики испытаний эксперименты по определению K_{1c} представляются наиболее качественными по сравнению с другими методами. На наш взгляд, самой важной особенностью является то, что при этих экспериментах заранее устанавливается (задается) структура разрушения. Это предопределяет меньший разброс результатов экспериментов [17].

1.3. ТЕХНОЛОГИИ ИСПЫТАНИЙ ЛЬДА НА ПРОЧНОСТЬ

Определение прочности льда на изгиб σ_n . Прочность льда на изгиб определяется тремя основными методами:

- по разрушению балок, свободно лежащих на опорах;
- по разрушению консолей (клавишей);
- по разрушению круглой, свободно лежащей на кольцевой опоре, ледяной пластины, нагружаемой в центре.

Для первого способа вырезается из ледяного покрова прямоугольная балка, устанавливается на двух поперечных опорах (призматических либо цилиндрических) и нагружается посередине между опорами. Величина σ_n вычисляется по формуле:

$$\sigma_n = \frac{3 Pl}{2 bh^2}, \quad (1)$$

где P – разрушающая нагрузка; l – расстояние между опорами; b – ширина балки; h – толщина (высота) балки.

При этом, в связи с зависимостью σ_n от температуры и скорости нагружения, целесообразны дополнительные измерения этих величин при проведении испытаний.

В работе [26] рекомендуется устанавливать следующие характерные размеры балок для испытаний:

- малый размер; $l = 36$ см; $b = 4$ см; $h = 4$ см;
- большой размер; $l = 86-90$ см; $b = 11-12$ см; $h = 11-12$ см.

Важным является соотношение между l и сечением. Обычно рекомендуется устанавливать квадратное сечение ($b = h$), а значение l для промежуточных вариантов балок выбирать следующим: а) $b=h=5$ см; $l=44$ см; б) $b=h=6$ см; $l=52$ см; в) $b=h=7$ см; $l=60$ см; г) $b=h=8$ см; $l=52$ см.

При испытаниях балок на двух опорах наблюдается влияние деформации среза, что отмечается в работе [26]. Влияние деформации среза особенно заметно при испытаниях моделированного льда. В частности, если нагружение производить по некоторой площадке в центре, то разрушение балки обычно происходит в двух местах – по краям нагружающей площадки, что является типичным срезом. При уменьшении размеров площадки места разрушения, естественно, сближаются, сливаясь в одно при нагружении боковой поверхностью цилиндра. Однако, это слияние, конечно, не означает устранения деформации среза – всего лишь менее показательным становится ее проявление.

Второй способ используется в двух вариантах. В первом варианте из льда вырезается прямоугольная балка и один конец закрепляется в испытательном устройстве, второй – нагружается. Величина σ_n определяется по формуле:

$$\sigma_n = \frac{6Pl}{bh^2}, \quad (2)$$

где P – разрушающая нагрузка; l – расстояние от линии действия нагрузки до линии закрепления консоли; b – ширина; h – толщина.

Во втором варианте консоль вырезается непосредственно в ледяном покрове и остается скрепленной с ним одним из своих концов. Такую консоль зачастую называют клавишей. Нагрузка на свободный конец консоли осуществляется как снизу вверх (из воды в воздух), так и сверху вниз. При анализе результатов испытаний обычно отмечается, что направление действия нагрузки принципиального значения не имеет.

Значение σ_n также определяется по выражению (2).

Между результатами испытаний по первому и второму вариантам обычно наблюдаются существенные различия. Значения σ_n , полученные во втором варианте, значительно меньше. В работе [4] основной причиной этого считается концентрация напряжений в области скрепления консоли с ледяным массивом и предлагается вычисленные по формуле (2) величины σ_n умножить на эмпирически найденный коэффициент, равный 2,8. Испытания выпиленных во льду клавишей описаны также в работе [39]. Полученные результаты оказались значительно ниже (в среднем 0,25 МПа для морского льда), чем обычно наблюдающиеся (0,6–0,9 МПа при температурах $-1,5 + -7$ °С). С учетом же указанного коэффициента 2,8 они попадают в обычно наблюдающийся диапазон.

Данные работы [39] являются интересными еще и тем, что в ней большой массив натуральных данных (с 1950 по 1971 гг.) подвергался статистической обработке, и приведенное значение $\sigma_n = 0,25$ МПа является оценкой математического ожидания при среднем квадратическом отклонении 0,06.

Выпиливание консолей непосредственно в ледяном покрове, несомненно, весьма трудоемкий процесс, поэтому результатов натуральных испытаний, выполненных по такому варианту, довольно мало.

Третий способ (разрушение круглых пластин на кольцевой опоре) получил распространение в связи с простотой технологии выпиливания образцов из кернов, вырезанных кольцевым буром. Величина σ_n в этом способе определяется по формуле:

$$\sigma_n = \frac{3P}{2\pi mh^2} \left[m + (m+1) \ln \frac{r}{r_0} - (m-1) \frac{r_0}{4r^2} \right], \quad (3)$$

где m – величина, обратная коэффициенту Пуассона ($m \gg 3$); h – толщина пластины; r – рабочий радиус пластины (внутренний радиус кольцевой опоры); r_0 – радиус распределения нагрузки (“пятна” нагружения).

В работе [33] отмечается, что значения $(\sigma_n)_3$, полученные третьим способом, обычно больше значений $(\sigma_n)_1$, полученных первым способом. Статистически достоверно установлена следующая связь [26]:

$$(\sigma_n)_1 = 0,65(\sigma_n)_3.$$

При испытаниях пластин значительное влияние на результаты оказывает деформация среза. Усиленное влияние этой деформации как раз и

может обуславливать отмеченные различия. Дело в том, что в “пятне” нагружения в третьем способе создаются довольно значительные удельные давления (из-за малой площади “пятна”), которые приводят к межзеренной деформации (связи между кристаллитами не могут противостоять действующему давлению), при этом наблюдаются заниженные значения модуля деформации и возрастают определяемые значения $\sigma_{\text{н}}$. При этом, несмотря на усиленное влияние среза, разрушение диска происходит от напряжений изгиба, т.е. он ломается на несколько секторов.

Из всех трех способов наиболее привлекательным по своим качествам представляется способ испытания консолей. При работах в опытовых бассейнах он обладает еще одним преимуществом: если испытываются консоли, скрепленные с остальной частью ледового покрова (“клавиши” на плаву), то отсутствует влияние изменений температуры на получаемые результаты. Дело в том, что в других способах образец для испытаний из естественных переносится в искусственные условия испытательного устройства, при этом изменяется его температурный режим, могут возникать термические перенапряжения вплоть до формирования трещин и т.д.

Однако при сделанном выборе в пользу способа “консоль на плаву” остается неясным уже отмечавшийся эффект занижения результатов по сравнению с другими методами и правомерность использования корректирующего коэффициента, предложенного в работе [4]. В частности, в работе [26] отрицается влияние эффекта концентрации в местах прикрепления консоли. Для доказательства этого проводились эксперименты с консолями, имеющими закругления в местах прикрепления. Результаты испытаний “закругленных” консолей совпадали с результатами испытаний консолей прямоугольного типа. Однако, те и другие были ниже, чем результаты испытаний балок. Причинами расхождений в работе [26] считается деформация среза, и для согласования данных предлагается умножить данные испытаний консолей на коэффициент 1,5 при соотношении размеров $l \cong (7-8)h$. При этом отмечается, что при испытаниях консолей влияние деформации среза минимально.

В таком случае является закономерным вопрос: какие именно данные нужны для практических целей – “чистое” $\sigma_{\text{н}}$ или $\sigma_{\text{н}}$, искаженное влиянием среза, но получаемое по наиболее распространенной методике испытаний (балки на двух опорах)? При необходимости иметь “чистое” $\sigma_{\text{н}}$ целесообразно данные испытаний консолей не корректировать коэффициентами, а оставлять неизменными, как это, собственно, и делается в упоминавшейся выше работе [39].

Секция ледовых проблем МАГИ (Международная ассоциация гидравлических исследований) в 1980 г. предложила ряд рекомендаций по проведению испытаний, учитывающих особенности льда как материала, а также многие из отмеченных выше особенностей используемых методов. По испытаниям на $\sigma_{\text{н}}$ рекомендации состоят в следующем. При натурных исследованиях морского льда наиболее целесообразны испытания “консолей на плаву”, при

этом отмечается, что можно пренебрегать эффектом концентрации напряжений в месте крепления консоли. Однако рекомендуется с целью дальнейшей минимизации этого эффекта делать закругления (выемки) у основания консоли с радиусом, не превышающим 1/15 ширины консоли.

Что же касается испытаний пресноводного льда, то здесь ситуация иная. В рекомендациях МАГИ отмечается, что для этого случая влияние концентраций напряжений у основания консоли является значимым и приводит к практически не контролируемому (из-за трудностей учета радиуса) занижению результатов. В связи с этим для пресноводного льда целесообразнее использовать методику так называемого четырехточечного изгиба балки, схема которой соответствует схеме испытаний на K_{1c} , но без формирования исходной прорези (трещины заданной длины) в центральной части балки. Значения $\sigma_{\text{н}}$ в этом случае вычисляются по формуле:

$$\sigma_{\text{н}} = \frac{3Pc}{bh^2}, \quad (4)$$

где P – разрушающая нагрузка; c – расстояние между опорой и местом приложения нагрузки (эти расстояния должны быть одинаковыми слева и справа, а нагрузка должна быть распределена поровну между левой и правой линиями нагружения); b – ширина балки; h – толщина балки.

При испытаниях также целесообразно задавать некоторые оптимальные соотношения между размерами испытываемого образца (консоли, балки). В частности, во многих работах установлено, что наилучшие результаты получаются, когда $b = h$, а длина l примерно равна 8–8,5 h [26] (в работе [52] $l \cong 10h$). В рекомендациях МАГИ указываются близкие величины: $b = 1-2h$; $l = 7-10h$.

На результаты определений $\sigma_{\text{н}}$ всеми рассмотренными методами оказывает существенное влияние скорость нагружения $\sigma'(\tau)$. Характер этого влияния по данным работы [3] следующий. В диапазоне $\sigma'(\tau)$ от 6 до 15 кПа/с наблюдается уменьшение получаемых значений $\sigma_{\text{н}}$ с увеличением $\sigma'(\tau)$, при $\sigma'(\tau) \cong 15$ кПа/с – минимум, а при дальнейшем увеличении $\sigma'(\tau)$ – возрастание $\sigma_{\text{н}}$. Полный диапазон изменчивости $\sigma_{\text{н}}$ в диапазоне скоростей от 6 до 120 кПа/с не превышает $\pm 12\%$ среднего значения. Рекомендации МАГИ по данному вопросу состоят в указании времени, которое проходит от момента начала нагружения до момента разрушения образца.

Методы определения прочности льда на сжатие $\sigma_{\text{ск}}$. Прочность льда на сжатие $\sigma_{\text{ск}}$ в наиболее распространенном смысле – это предел прочности при одноосном нагружении. Определение $\sigma_{\text{ск}}$ производится путем нагружения кубических или цилиндрических образцов с помощью пресса. Вычисление производят по формуле:

$$\sigma_{\text{ск}} = P/S_0, \quad (5)$$

где P – величина нагружающей нагрузки; S_0 – площадь поперечного сечения образца.

Получаемые значения $\sigma_{ск}$ зависят от следующих методических факторов:

а) ориентации образца относительно направления действия нагрузки;

б) кристаллической структуры образца;

в) скорости изменения нагрузки;

г) размеров образца (масштабный фактор).

Влияние ориентации обусловлено тем, что реальный лед в большинстве случаев анизотропен по своим свойствам, и разрушающая нагрузка, прикладываемая к образцу вдоль кристаллов (вертикальный образец), значительно (до 5 раз) превышает нагрузку, прикладываемую поперек кристаллов. Наиболее характерен этот эффект для льда типов В1 и В2 с хорошо выраженной столбчатой кристаллической структурой и малозаметен у льдов типов В6–В9 с мелкозернистой структурой.

Различия в пять раз приводятся в работе [53] для льдов восточного района Канадской Арктики. В опытах использовались колонки размером 76×250 мм при температуре поверхности льда -10°C и солёности 4 ‰.

В работе [3] отмечается, что для средних условий различия составляют 40–50 %.

Влияние кристаллической структуры проявляется, кроме вышерассмотренного эффекта, еще и напрямую. Дело в том, что кристаллы реального льда необязательно имеют прямолинейную форму, а зачастую извилисты (в некоторых работах для характеристики этого факта вводится специальный термин – коэффициент извилистости). При повышенной извилистости прочность льда оказывается более высокой из-за усиленной связи между кристаллами.

Влияние скорости изменения нагрузки $P'(\tau)$ наглядно демонстрируют данные У.Голда и А.Краусца, приводимые в работе [33]:

$$\text{при } P'(\tau) = 2 \text{ Па/мин} - \sigma_{ск} = 1,6 \text{ МПа};$$

$$P'(\tau) = 100 \text{ Па/мин} - \sigma_{ск} = 5,1 \text{ МПа};$$

$$P'(\tau) = 1000 \text{ Па/мин} - \sigma_{ск} = 8,8 \text{ МПа};$$

Возможный диапазон $P'(\tau)$ в этих данных, к сожалению, весьма ограничен, т.е. по У.Голду и А.Краусцу зависимость прямая: с возрастанием скорости увеличивается $\sigma_{ск}$. Однако такая связь не сохраняется во всем диапазоне $P'(\tau)$. При дальнейшем увеличении $P'(\tau)$ наблюдается максимум $\sigma_{ск}$, затем $\sigma_{ск}$ начинает уменьшаться. Положение максимума оценивается в работе [33]. Значения $P'(\tau)$ для максимума составляет 0,3–0,4 МПа/мин. При этом высказывается мнение, что дальнейшее понижение $\sigma_{ск}$ с увеличением $P'(\tau)$, по-видимому, обусловлено тем, что нагрузка при $P'(\tau) > 0,3-0,4$ МПа/мин приобретает характер динамической и вид деформации меняется – деформация сжатия переходит в деформацию удара, которой присуще более низкое временное сопротивление.

Такой характер влияния $P'(\tau)$ – с промежуточным максимумом – в настоящее время отмечается большинством исследователей. Влияние размеров

образца при испытаниях еще недостаточно изучено. Более подробно этот эффект рассматривается ниже (см. "масштабный эффект при испытаниях").

Кроме размеров, влияет также форма образца. На практике всегда наиболее широко применялись образцы кубической формы, но в последнее время такая форма признается нецелесообразной. Дело в том, что при испытаниях характер нагружения кубического образца значительно отличается от требуемого одноосного из-за влияния краевых эффектов. Лучшие результаты дают испытания цилиндрических образцов, тем более, что становится более простой их подготовка на основе кернов, полученных кольцевым буром. Для устранения влияния концевых возмущений секцией ледовых проблем МАГИ рекомендуется устанавливать длину цилиндра в 2–3 раза превышающий его диаметр. Нагружаемые торцы цилиндра при этом должны тщательно зашлифовываться, например, путем оплавления прогретой плоскостью. Поскольку идеальной обработки в полевых условиях добиться довольно трудно, то в таких случаях целесообразно использовать прокладки, например, из бумаги, располагаемые между нагружающими пластинами испытательного пресса и торцами цилиндра.

Кроме цилиндрических, могут быть использованы также призматические образцы, имеющие в поперечном сечении квадратную форму, а длину, как и у цилиндров, в 2–3 раза превышающую ширину.

Нагружающее устройство, используемое при испытаниях, должно обладать высокой жесткостью с целью устранения вращательного и горизонтального смещений нагружающих пластин.

Ввиду зависимости результатов от структуры рекомендуется выполнять предварительное кристаллографическое описание образца с оценками размера кристаллов, выбирать диаметр (или ширину) образца в 15–20 раз превышающую размер кристаллов, а положение образца (его структуры) по отношению к направлению нагружения обязательно указывать в отчетных материалах (МАГИ).

Определение прочности льда на срез (сдвиг) $\sigma_{ср}$. Прочность льда на срез $\sigma_{ср}$ обычно определяется двумя методами: продавливанием плоской пластины льда с помощью центрального пуансона; испытаниями призматических образцов путем сдвига их половинок относительно друг друга.

В обоих методах величина $\sigma_{ср}$ определяется по формуле:

$$\sigma_{ср} = \frac{P}{S_{ср}}, \quad (6)$$

где P – разрушающая нагрузка; $S_{ср}$ – площадь поверхности среза.

Для устранения возможного влияния деформаций изгиба поверхности испытываемых образцов тщательно обрабатываются, например, плавлением. В первом методе играет большую роль совпадение размеров пуансона и отверстия в нижней (опорной) пластине, на которую накладывається образец, а также соосность пуансона и отверстия.

По оценкам, сделанным в работе [26], на результаты испытаний влияют:

- а) величина нормального давления;
- б) способ проведения опыта;
- в) скорость изменения нагрузки;
- г) размеры образца (масштабный фактор).

Прочность на срез при вертикальной ориентации (действие нагрузки вдоль кристаллов) образцов столбчатой кристаллической структуры в 3–3,5 раза меньше, чем при горизонтальной ориентации.

Влияние давления, способ проведения опыта, а также скорость нагрузки проявляются через размеры зоны раздробления льда в окрестностях среза. Чем больше зона раздробления, тем выше получаемые значения $\sigma_{ср}$. При прочих равных условиях в испытаниях по второму методу зона раздробления получается меньшей.

В целом же методика испытаний на срез еще недостаточно отработана, а данные натурных испытаний немногочисленны.

Определение прочности льда на растяжение σ_p . Прочность льда на растяжение определяется при испытаниях образцов двух основных видов:

- а) образцов гантелевидной формы, растягиваемых в продольном направлении;
- б) образцов в форме полых ледяных цилиндров, сжимаемых по диаметру к центру.

В первом случае в образце действует растягивающее напряжение, и величина σ_p может быть определена по формуле:

$$\sigma_p = \frac{P}{S_p},$$

где P – разрушающая нагрузка; S_p – площадь сечения разрыва.

Во втором случае (полый цилиндр) в образце возникает сложное напряженное состояние, и при вычислении результатов испытаний становится необходимым учитывать зависимость деформации от напряжения.

В связи с этим, испытаниям образцов в форме гантелей следует отдавать предпочтение, что и рекомендовано секцией ледовых проблем МАГИ. Для обеспечения правильного растягивающего нагружения в торце образцов должны вмораживаться металлические пробки при довольно жестких допусках на их положение (соосность между собой и образцом). А уже к этим пробкам прикрепляются гибкие тросы испытательного устройства.

Определение прочности льда на смятие $\sigma_{см}$. Прочность льда на смятие $\sigma_{см}$ (твердость) определяется путем вдавливания индентора сферической или пирамидальной формы в пластину льда. Измеряется площадь вмятины, а $\sigma_{см}$ определяется по формуле:

$$\sigma_{см} = \frac{P}{S_{см}}, \quad (7)$$

где P – величина действующей нагрузки; $S_{см}$ – измеренная площадь вмятины.

Методическая обоснованность таких испытаний в настоящее время все еще остается дискуссионной. Остается неясным влияние направления вдавливания. В экспериментальных результатах отмечается, что при вдавливании параллельно оптической оси (С-оси) $\sigma_{см}$ оказывается больше, чем при перпендикулярном воздействии (этот факт понятен – перпендикулярное воздействие идет вдоль базисной плоскости). Однако, при повышенных температурах льда имеет место обратная зависимость, что пока не имеет разумных объяснений.

Результаты измерений зависят от времени приложения нагрузки. С увеличением времени измеряемое значение $\sigma_{см}$ возрастает. В работе [3] указывается, что эта связь обусловлена характером пластического течения льда в зоне смятия.

Определение упругих характеристик льда. Упругие характеристики морского льда (модуль Юнга, модуль сдвига и коэффициент Пуассона) определяются двумя основными методами: статическим и динамическим.

Сущность статических методов заключается в измерении величины деформации после приложения нагрузки. *Модуль Юнга* в статических методах определяют при сжатии и растяжении образцов по относительному удлинению в момент разрушения:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon}, \quad (8)$$

где σ – например, $\sigma_{раст}$; ε – относительное удлинение образца.

При изгибе балок на двух опорах модуль Юнга определяют путем измерений стрелки

$$E = \frac{Pl^3}{4bh^3f}, \quad (9)$$

где P – нагрузка; l – рабочая длина образца (между опорами); b – ширина балки; h – высота балки; f – величина прогиба.

При изгибе консоли формула несколько видоизменяется:

$$E = \frac{4Pl^3}{bh^3f}, \quad (10)$$

где f – величина изгиба незакрепленного конца консоли.

Результаты определений E статическими методами зависят от условий проведения экспериментов, (например, по данным Т. Табаты меняются от 28 до 8200 МПа). Вообще, значение E должно определяться только в области упругих деформаций. А при статических испытаниях рассмотренными методами обязательно проявляют себя пластические деформации, т.е. измеренная величина деформации (ε либо f) обычно превышает истинную и измеренные значения E оказываются заниженными.

Величина превышения измеренной деформации, очевидно, является систематической погрешностью. Значение этой погрешности в каждой серии испытаний остается неизвестным, поскольку связано с длительностью приложения нагрузки, характером нагрузки и т. д. Однако известен ее знак (+). В связи с этим за истинные значения E целесообразно принимать максимальные значения, полученные в сериях опытов.

Статические методы определения модуля сдвига G заключаются в испытаниях цилиндрических или призматических образцов льда на кручение. При этом создаются условия чистого сдвига. Измеряя (или задавая) величину касательного напряжения, величину G в таких испытаниях определяют по формуле:

$$G = \frac{\tau}{\gamma}, \quad (11)$$

где τ – касательное напряжение, приложенное к образцу; γ – относительный сдвиг (деформация сдвига).

Естественно, при определениях деформации сдвига также появляется систематическая составляющая погрешности, связанная с пластичностью льда, хотя ее величина существенно меньше, чем при измерениях модуля E . Это обуславливает меньший разброс данных по G , приводимых в литературе.

Коэффициент Пуассона μ , характеризующий отношения относительной поперечной ϵ_1 к относительной продольной деформации ϵ_2 , статическими методами обычно не определяется. Лишь ввиду того, что для изотропных материалов, подчиняющихся закону Гука:

$$\mu = \frac{E}{2G} - 1, \quad (12)$$

значение μ может быть вычислено по результатам статических измерений E и G .

Динамические методы определения E заключаются в определении резонансной частоты колебаний изгиба у образцов круглого или прямоугольного сечения (1-й вариант), резонансной частоты продольных колебаний у аналогичных образцов (2-й вариант), либо в определении скорости распределения продольных сейсмических колебаний в натуральных условиях (3-й вариант).

Коэффициент Пуассона в динамических методах определяется путем измерений резонансной частоты продольных ($f_{пр}$) и поперечных ($f_{п}$) колебаний образцов круглого или прямоугольного сечения. Величина μ определяется по формулам:

для образцов круглого сечения

$$\mu = 0,5 \cdot \left(\frac{f_{пр}}{f_{п}} \right)^2 - 1;$$

для образцов прямоугольного сечения

$$\mu = \frac{0,5 \left(\frac{f_{np}}{f_n} \right)^2}{k} - 1,$$

где

$$k = \frac{\frac{a}{b} + \frac{b}{a}}{4 \frac{a}{b} + 0,21 \left(\frac{a}{b} \right)^6 + 2,52 \left(\frac{a}{b} \right)^2};$$

a – ширина образца; b – толщина в направлении изгиба.

В натуральных условиях при использовании сейсмических колебаний коэффициент Пуассона определяется по соотношению между скоростями распространения поперечных (ϑ_s) и продольных (ϑ_p) волн:

$$\mu = 1 - 2 \left(\frac{\vartheta_s}{\vartheta_p} \right), \quad (13)$$

Модуль сдвига G в динамических методах определяется путем возбуждения крутильных колебаний в образцах круглого или прямоугольного сечения и измерения резонансной частоты этих колебаний (1-й вариант), а в натуральных условиях при использовании сейсмических колебаний, путем вычислений по известной зависимости между G и измеренными значениями E и μ .

Нестандартные методы определения прочностных свойств. В некоторых работах [3, 9] предлагается метод определения $\sigma_{\text{н}}$ по скорости распространения во льду продольных акустических колебаний (C_l). Физическая сущность связи $\sigma_{\text{н}}$ (C_l) при этом остается лишь предположительной. Однако разброс точек в приводимых характеристиках довольно мал, что позволяет надеяться на перспективность метода.

В работе [3] приведено эмпирическое уравнение связи $\sigma_{\text{н}}$ и скорости плоской акустической волны:

$$\sigma_{\text{н}} = 0,28 \left(-29,2 + 2,21 \cdot 10^{-2} C_l - 1,34 \cdot 10^{-6} C_l^2 \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (14)$$

где C_l выражено в м/с, $\sigma_{\text{н}}$ – МПа.

В литературе оценивается влияние температуры на выявленные связи $\sigma_{\text{н}}$ (C_l). Однако, эти оценки противоречивы. Представляется наиболее вероятным, что это влияние отсутствует, или оно очень слабое. Действительно, как следует из результатов независимых измерений скорости [3], с понижением температуры скорости возрастает. Аналогично ведет себя $\sigma_{\text{н}}$ с изменением температуры, соответственно, следует ожидать взаимной компенсации влияния этих зависимостей на связь $\sigma_{\text{н}}$ (C_l).

Можно отметить также аналогичные зависимости у σ_n и C_l от солёности льда S_n , хотя это вообще не затрагивается в указанных работах. Тем самым, влияние солёности, по-видимому, возможно компенсируется.

Таким образом, связь между σ_n и C_l в статистическом смысле может оказаться весьма устойчивой, а коэффициенты в регрессионном уравнении типа вышеприведенного – мало варьирующими. Это обуславливает перспективность дальнейших исследований метода, в частности, для использования при автоматизированных определениях σ_n моделированного льда в ледовых бассейнах.

В работе [38] предлагается расчетный эмпирический метод, основанных на результатах анализа данных 436 опытов, проведенных на различных замерзающих водоемах. При заданной температуре T расчет σ_n выполняется по формуле:

$$\sigma_n = \sigma_n^{np} \left(1 - \frac{S_n}{S_n^o} \right), \quad (15)$$

где σ_n^{np} – предел прочности на изгиб пресноводного ледяного покрова при температуре T ; S_n – среднее значение солёности данного ледяного покрова; S_n^o – экстремальное значение солёности льда ($\gg 15\%$).

При отсутствии фактических данных по S_n , что обычно и бывает, ее величину можно определить по эмпирической формуле:

$$S_n = S_n (1-b) \cdot \exp[-a\sqrt{h}] + b \cdot S_n, \quad (16)$$

где a и b – эмпирические коэффициенты; h – толщина льда; S_n – солёность поверхностного слоя воды, из которой формируется лед.

Значение $b \approx 0,13$, а значение a зависит от скорости нарастания льда и изменяется в пределах от 0,35 до 0,60. При большой скорости роста (≈ 4 см/сутки) $a=0,35$, а при малой (0,5 см/сутки) – $a = 0,60$. Когда скорость неизвестна, то можно принимать среднее значение $a = 0,50$.

Масштабный эффект. Сущность масштабного эффекта при испытания прочностных свойств льда состоит во влиянии на получаемые результаты геометрических размеров образцов.

Наиболее подробный анализ масштабного эффекта применительно к определениям σ_n выполнен В.В.Лавровым [26].

При геометрически подобных образцах связь между значениями σ_n для них устанавливается в виде формулы:

$$\sigma_{n2} = \sigma_{n1} \frac{l_1 \cdot h_2}{l_2 \cdot h_1} \sqrt{\frac{l_1}{l_2}}, \quad (17)$$

при условии $b = h$. Индексы 1 и 2 обозначают параметры соответствующего образца.

Если образцы 1 и 2 геометрически не подобны, то в формуле связи должны учитываться их модули деформации $E_{\text{диф}}$:

$$\sigma_{н1} = \sigma_{н2} \frac{l_1 h_2 E_{\text{диф}2}}{l_2 h_1 E_{\text{диф}1}} \cdot \sqrt{\frac{l_1}{l_2}}, \quad (18)$$

В формулах (17) и (18) наблюдается, на первый взгляд, противоречие с имеющимися (пока немногочисленными) экспериментальными данными. Действительно, например, из формулы (17) следует, что $\sigma_{н}$ и размеры сечения образца, которые определяются величиной h , связаны прямопропорциональной зависимостью. В то время, как экспериментальные данные [5, 26] свидетельствуют об обратной зависимости. На самом деле, если учитывать, что l и h должны быть взаимосвязаны (например, по рекомендациям МАГИ $l \cong 7+10h$), формула (17) преобразуется в следующую:

$$\sigma_{н2} = \sigma_{н1} \sqrt{\frac{h_1}{h_2}}. \quad (19)$$

Тем самым, кажущееся противоречие исчезает, и соответствие экспериментальным данным оказывается вполне удовлетворительным.

Сами же экспериментальные данные довольно противоречивы. В частности, в работе [26], такие данные приводятся в виде таблиц и по мнению автора, подтверждают теоретическое рассмотрение. Однако, если эти данные нанести на график (рис. 1), то получается весьма хаотичная картина. Кривые 1, 2 и 3 здесь проведены весьма условно. Кривая 1 отображает изменчивость $\sigma_{н}$, рассчитанную по формуле (19) относительно точки 1'', кривая 2 показывает изменчивость погрешности (без учета точки 1', кривая 3 – получающуюся изменчивость $\sigma_{н}$ без учета точки 1''. При такой (конечно, весьма произвольной интерпретации) характер кривых 1 и 3 противоположен и каким-либо доказательством теоретического рассмотрения данные быть не могут. В работе же [26] изменчивость $\sigma_{н}$ оценивается по отношению к точке 1'', что несомненно, является слишком большим произволом.

Тем не менее, характер влияния (уменьшение $\sigma_{н}$ с увеличением размеров), по-видимому, все же справедлив. Такое мнение основывается как на анализе физического механизма эффекта, подробно выполняемом, в работах [5, 26, 27], так и на ряде опытных данных, приводимых в тех же работах.

Кроме формул (17) и (19), выведенных для свободно опирающихся балок, В.В.Лавров [26] предлагает формулу для *пластин*, нагружаемых в центре:

$$\sigma_{н} = 16,0 - \ln^{1,35} h, \quad (20)$$

где h – толщина пластины, см; $\sigma_{н}$ – прочность, кг/см².

Масштабный эффект на изгиб исследовался в работе [5] также при испытаниях консолей.

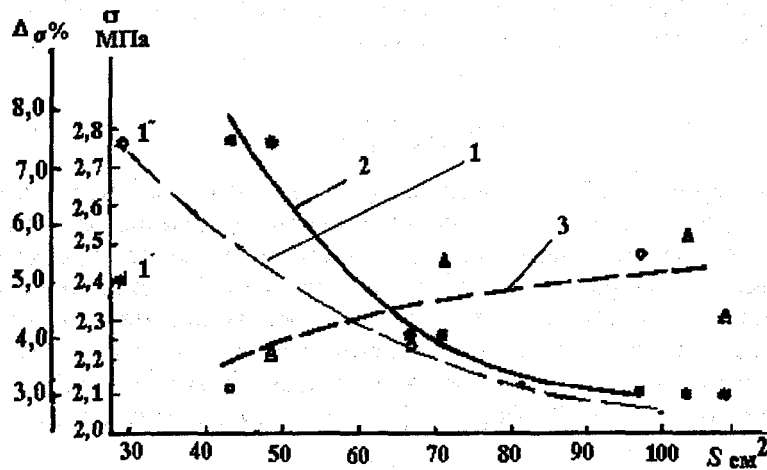


Рис. 1. Результаты испытаний масштабного эффекта при испытаниях на изгиб: $1', 1''$ – экспериментальные значения; 1 – изменчивость σ_n в соответствии с формулой (19) относительно $1''$; 2 – изменчивость погрешности $\Delta\sigma$ без учета $1'$; 3 – изменчивость σ_n без учета $1''$.

На рис. 2 показана совокупность ряда некоторых известных зависимостей. По оси $(\sigma_n)_{\text{отн}}$ отложены значения изменений σ_n по отношению к σ_n образца при площади поперечного сечения $S_0 = 70 \text{ cm}^2$, взятой за основу И.П.Бутягиным. По оси S отложены значения площади поперечного сечения образцов. Кривая 1 построена по формуле (20) при условных $S = h^2$, кривая 2 – по данным И.П.Бутягина [5], кривая 3 – по формуле (19) для

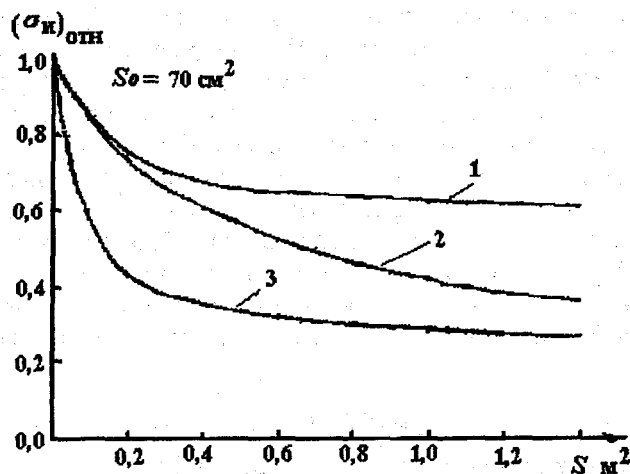


Рис. 2. Масштабный эффект при испытаниях на изгиб по расчетным данным: 1 – по формуле (20); 2 – по данным [5]; 3 – по формуле (19).

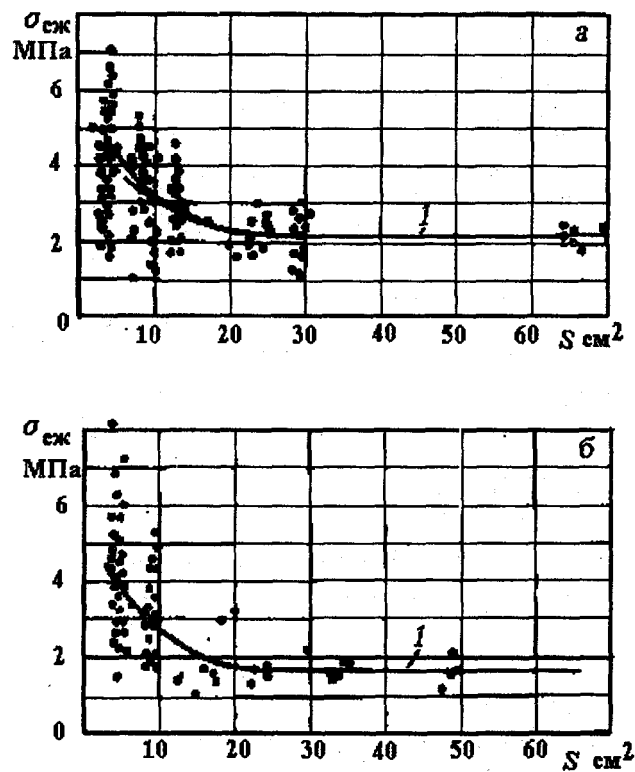


Рис. 3. Зависимость предела прочности на сжатие от площади образцов при приложении нагрузки вдоль кристаллов и температуре:
 а — -10°C ; б — -2°C .

балок. Характер изменчивости у кривых совпадает, но сама величина варьирует довольно сильно. По-видимому, вопрос о масштабном эффекте при изгибе все еще требует дополнительных исследований, преимущественно экспериментальных. Но если они невозможны, то для учета эффекта при испытаниях льда в бассейне наиболее целесообразно пользоваться данными И.П.Бутыгина.

При испытаниях на сжатие масштабный эффект оценивался в работе [26]. Для сравнения с результатами этой работы далее оцениваются результаты специально выполненных экспериментов.

В этих экспериментах предел прочности при одноосном сжатии определялся для озерного льда на геометрически подобных кубических образцах объемом $11,2 - 525 \text{ см}^3$. Площадь контакта образца с подвижной частью пресса составляла $5 - 65 \text{ см}^2$. Температура льда изменялась в задаваемых пределах от -2 до -20°C путем длительной выдержки образцов в холодильной камере.

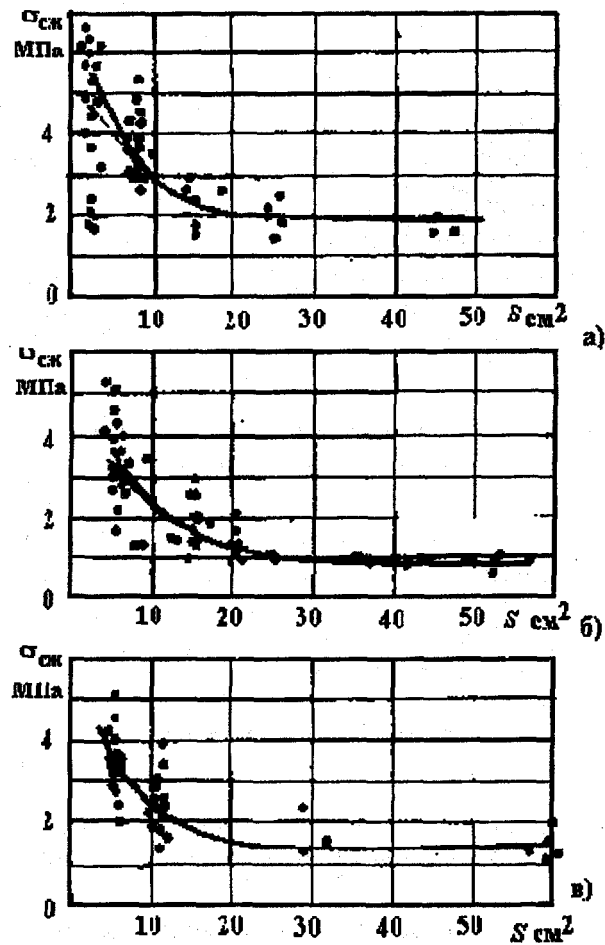


Рис. 4. Зависимость предела прочности льда на сжатие от площади образцов при приложении нагрузки поперек кристаллов и температуре:
a – -20°C ; *б* – -10°C ; *в* – -2°C .

Испытания проводились нагружением образцов как вдоль, так и поперек расположения кристаллов при различных значениях площади сечения S .

Результаты испытаний приведены на рис. 3, 4 и 5.

При каждом дискретном значении S выполнялась серия испытаний. Данные в каждой такой серии рассматривались как случайная величина и подвергались статистической обработке, в частности, рассчитывались частоты $\Delta\sigma$, строились гистограммы распределения и оценивался вид функции плотности распределения (рис. 6).

Функции плотности распределения (рис. 6 з) имеют характерные черты гамма-распределения.

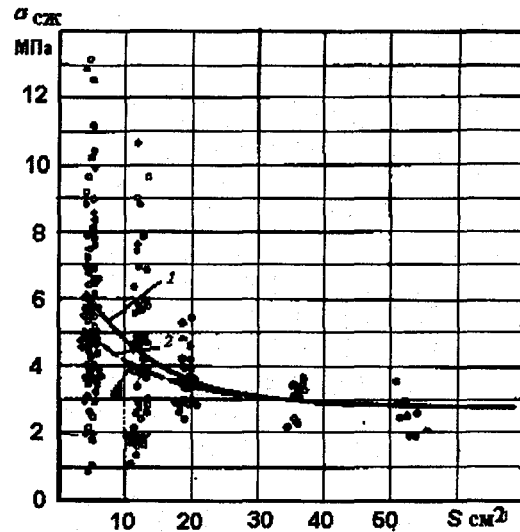


Рис. 5. Зависимость предела прочности льда на сжатие от площади образцов при температуре -20°C и приложении нагрузки вдоль кристаллов по оценкам математического ожидания (1) и медианным (2).

По выполненным оценкам математического ожидания построены осредненные кривые (рис. 3–5, кривые 1), которые отображают масштабный эффект. Для расчетных оценок может быть использована формула

$$\sigma_{сж} = \frac{\sigma_1 \frac{\lg V - \lg V_1}{\lg V_1 - \lg V_2}}{\sigma_2 \frac{\lg V_1 - \lg V_2}{\lg V_1 - \lg V_2}}, \quad (21)$$

где $\sigma_{сж}$, σ_1 и σ_2 – пределы прочности при одноосном сжатии образцов с объемом V , V_1 и V_2 , соответственно.

Следует, однако, отметить, что несмотря на довольно большой объем полученных данных, к результирующим оценкам здесь все же следует относиться с осторожностью, в частности, к вопросу применения формулы (21). Дело в том, что несоответствие полученных функций плотности распределения (см. рис. 6) нормальному закону свидетельствует о том, что на результаты воздействовал некоторый неслучайный фактор, приводящий к появлению систематической погрешности.

Вероятнее всего этим фактором является нелинейность взаимосвязи между прочностью и дефектностью (раздел 2.2). А в таком случае наиболее корректной оценкой результата испытаний при каждом дискретном значении S становится медианное значение $\sigma_{сж}$.

Эти значения вычислены для представленных серий данных и показаны на рис. 5 в виде кривой 2. В области малых S “медианные” кривые

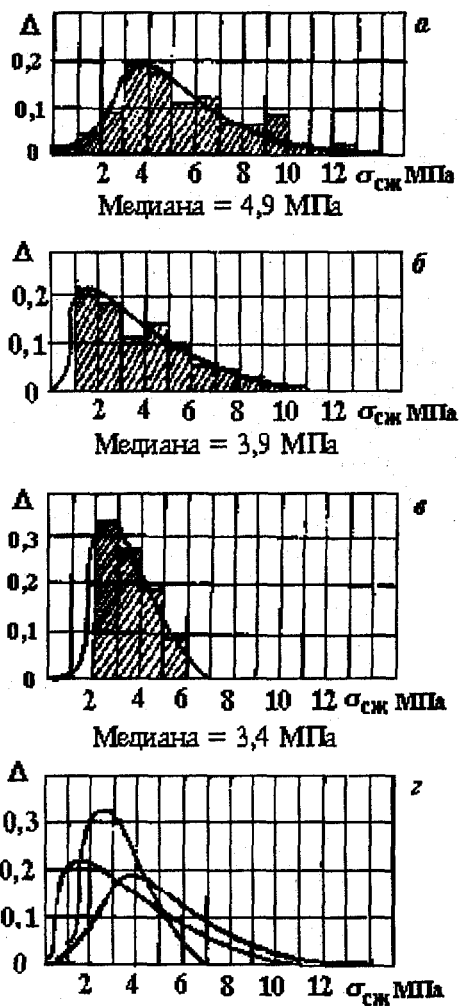


Рис. 6. Гистограммы распределения данных испытаний прочности образцов льда на одноосное сжатие при различной площади поперечного сечения образцов: а - 5 см²; б - 12 см²; в - 19 см²; г - сводный график кривых распределения. Условия опытов: нагрузка вдоль кристаллов при температуре -20°С, лед натурный.

обычно располагаются существенно ниже кривых, построенных по оценкам математических ожиданий, а в области больших S совпадают с ними.

Это означает, во-первых, формула (21) в области малых масштабов неприменима, во-вторых - влияние отмеченного неслучайного фактора резко падает с увеличением размеров. Вторая особенность косвенно подтверждает справедливость выдвинутого предположения о сущности неслучайного влияющего фактора.

При испытаниях на срез масштабный эффект кратко оценивается в работе [26], где отмечается, что влияние размеров площади среза на средние значения $\sigma_{ср}$ является малым и может практически не учитываться при малых скоростях деформирования. Однако, при этом также отмечается, что в опытах с малыми образцами всегда наблюдается повышенный разброс результатов.

Масштабные эффекты при испытаниях на растяжение и на смятие практически не исследованы.

В заключение следует отметить два наиболее важных факта:

1) во всех результатах, связанных с исследованиями масштабного эффекта, наблюдается существенное возрастание разброса результатов с уменьшением размеров испытываемых образцов;

2) характер зависимости между получаемыми значениями прочности и размерами является обратным: конкретный вид этой зависимости требует уточнений.

В целом, следует отметить, что существующие методики испытаний на прочность метрологически недостаточно обеспечены, несмотря на наличие рекомендаций, разработанных секцией ледовых проблем МАГИ. При внедрении методик, особенно для задач испытаний моделированного льда, где обычно невозможно использовать большие образцы из-за малых толщин намораживаемого ледяного покрова, а сам лед существенно менее прочен, чем натуральный, целесообразно проведение специальных метрологических исследований путем получения серий данных для каждого ледового поля и последующей обработки этих серий по утвержденным стандартам [12 – 16].

При подготовке образцов к испытаниям и при самих испытаниях наиболее целесообразно использовать рекомендации МАГИ по $\sigma_{н}$, $\sigma_{сж}$ и $\sigma_{ср}$, а по $\sigma_{ср}$ – рекомендации работы [26].

1.4. ТЕХНОЛОГИИ ИСПЫТАНИЙ ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ КРИТИЧЕСКОГО КОЭФФИЦИЕНТА ИНТЕНСИВНОСТИ НАПРЯЖЕНИЙ K_{1C}

Японскими специалистами для определения K_{1C} использовалась методика трехточечного изгиба образцов с надрезом [22]. Расстояние между опорными роликами составляло 160 см. Нагрузка осуществлялась в центре. Надрезы делались по одному из трех возможных направлений в среднем сечении образцов: по нормали к верхней поверхности, по нормали к нижней поверхности и на боковых поверхностях. Направление нагрузки при испытании выбиралось как параллельно, так и перпендикулярно по отношению к расположению кристаллов льда (направление роста). Результаты приведены на рис. 7.

До проведения испытаний в образцах производились измерения электропроводности в пяти независимых точках вдоль направления расположения кристаллов, с целью определения солености льда и воды. Хотя по

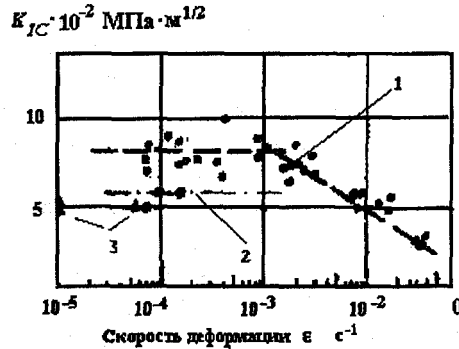


Рис. 7. Результаты испытаний образцов с надрезом: на верхней (1); боковой (2) и на нижней (3) поверхностях.

данной работы [22] остается не известным, каким образом осуществлялся пересчет электропроводности в соленость.

Отмечается также, что при использовавшейся методике не наблюдалось существенных деформаций в образце у опорных роликов и в местах приложения нагрузки.

Значение коэффициента K_{IC} рассчитывалось по формуле:

$$K_{IC} = \frac{6M\sqrt{l_i}}{bh^2} F\left(\frac{l_i}{h}\right), \quad (22)$$

где $F\left(\frac{l_i}{h}\right) = 1,93 - 3,07\frac{l_i}{h} + 14,53\left(\frac{l_i}{h}\right)^2 - 25,11\left(\frac{l_i}{h}\right)^3 + 25,80\left(\frac{l_i}{h}\right)^4$; M – приложенный момент; l_i – длина надреза; h – толщина образца; b – ширина образца.

Характерной особенностью полученных результатов явился весьма малый их разброс (см. рис. 7), хотя корректная оценка разброса (например, по коэффициенту вариации) не производилась.

В работе [17] испытания проводились по схеме четырехточечного изгиба (рис.8). Надрез a делался в нижней части образца. Значение K_{IC} определялось в соответствии с выражением:

$$K_{IC} = \frac{3P(l_1 - l_2)\sqrt{l_i}}{2bh^2} F\left(\frac{l_i}{h}\right), \quad (23)$$

где P – величина нагрузки; l_1 – расстояние между нижними (опорными) роликами; l_2 – расстояние между верхними (нагружающими) роликами; l_i – длина надреза; h – толщина образца; b – ширина образца;

$$F\left(\frac{l_i}{h}\right) = 1,99 - 2,47\left(\frac{l_i}{h}\right) + 12,97\left(\frac{l_i}{h}\right)^2 - 23,17\left(\frac{l_i}{h}\right)^3 + 24,80\left(\frac{l_i}{h}\right)^4.$$

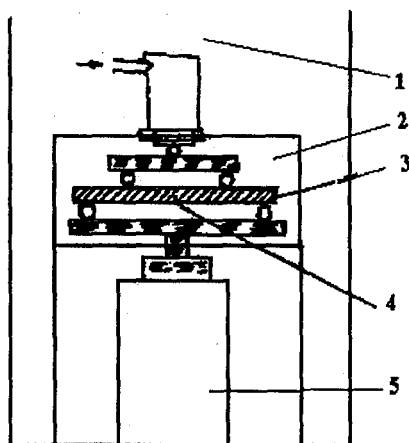


Рис. 8. Конструкция установки и схема испытаний на четырехточечный изгиб: 1 – холодильная камера; 2 – испытательный бокс; 3 – образец льда; 4 – надрез; 5 – ячейка нагружения.

Исследования проводились с образцами, полученными из дистиллированной воды. При этом следует отметить, что у полученных данных типичный закон распределения существенно отличается от нормального. Разброс результатов по-прежнему значителен (не менее, чем в два раза по грубым оценкам). Тем самым, методика испытаний еще не может считаться отработанной. Конечно, определенное влияние на характер гистограмм оказала изменчивость скорости изменения нагрузки.

При дальнейшем исследовании методик необходимо выдерживать постоянными скорость деформации и температуру, и лишь при этих условиях производить оценку статистических характеристик получаемых результатов.

1.5. ОБОБЩЕНИЕ ОСНОВНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ ПО ПРОЧНОСТНЫМ СВОЙСТВАМ ДЛЯ ЗАДАЧ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Общезвестен тот факт, что имеющиеся в литературе данные по прочностным свойствам натурального льда характеризуются очень большим разбросом, при этом, как правило, предполагается, что разброс вызван преимущественно широкой изменчивостью этих свойств. Однако причина не только в изменчивости, а в значительной степени – в несовершенстве методик испытаний и в отсутствии их корректного нормирования. Упомянувшиеся выше рекомендации МАГИ действительно являются только рекомендациями и не являются каким-либо нормативным документом, хотя весьма полезны и ими целесообразно пользоваться при отсутствии лучших методик.

В связи с отсутствием единых методик оказываются трудно сопоставимыми данные, приводимые различными авторами. Тем более, что в боль-

Таблица 2

Систематизированные данные по $\sigma_{сж}$, МПа и V_p , %

$\sigma_{сж}$	1,0	4,2	4,2	4,3	4,6	5,2	5,2	5,3	5,4	5,6
V_p	0,2	7,6	14,3	0,3	2,3	0,6	19,3	8,9	2,6	3,5
$\sigma_{сж}$	5,6	5,7	5,8	5,8	5,9	6,0	6,1	6,9	7,1	7,2
V_p	11,5	2,3	0,3	12,4	13,4	2,4	3,3	14,7	7,6	6,9
$\sigma_{сж}$	7,5	7,6	7,7	7,8	8,0	8,0	8,1	8,1	8,3	8,5
V_p	7,3	10,4	0,2	12,6	7,5	8,6	7,1	10,8	9,9	3,3
$\sigma_{сж}$	8,6	8,7	8,7	8,8	9,1	9,2	10,0	10,1	10,1	10,2
V_p	7,2	7,5	12,2	9,0	6,0	6,4	7,0	3,9	9,1	8,9
$\sigma_{сж}$	10,3	10,3	10,4	10,4	10,5	10,9	11,5	12,0	12,0	12,0
V_p	6,2	8,1	1,0	2,3	4,9	6,4	7,8	2,1	4,8	12,4
$\sigma_{сж}$	12,3	12,3	12,5	13,1	13,2	13,3	15,0	16,8	19,2	22,0
V_p	5,3	12,3	7,0	14,1	7,1	7,8	5,0	5,0	5,5	5,1
$\sigma_{сж}$	$M_{\sigma} = 90$	$S_n = 3,7$	$S_{n-1} = 3,8$	$K_{\sigma} = 0,42$	$Me = 8,5$	$\Delta_c = 1,0$	$(P = 0,95)$	$n = 60$		
V_p	$M_{\sigma} = 7,0$	$S_n = 4,2$	$S_{n-1} = 4,2$	$K_{\sigma} = 0,6$	$Me = 7,0$	$\Delta_c = 1,1$	$(P = 0,95)$	$n = 60$		

Примечание: n – число данных исходного ряда; K_{σ} – коэффициент асимметрии.

шинстве публикаций практически отсутствуют сообщения о технических особенностях применяемых технологий. Аналогичными недостатками обладают также архивные данные Росгидромета.

Однако в задачах моделирования льда в опытовых бассейнах для испытаний моделей технических средств (судов, буровых установок и т.д.) необходимо опираться на некоторый конкретный диапазон значений прочностных характеристик льда как материала, поскольку именно в соответствии с таким диапазоном устанавливаются критерии подобия при моделировании и производятся расчеты конструкций. Тем самым, в имеющемся разбросе данных необходимо выделять некоторые закономерности и пытаться устанавливать отмеченный "опорный" диапазон. При этом оказывается, что очень важную роль, кроме особенностей технологий испытаний, начинает играть методика выполняющихся оценок. Эти вопросы являются очень непростыми и окончательной ясности в них нет до настоящего времени. Поэтому далее рассматриваются оценки прочностных характеристик по весьма различным данным.

В табл.2 в качестве примера типичного разброса приводятся экспериментальные результаты, полученные зарубежными исследователями (Sinha, Frederking, 1979 г.). Эти результаты здесь существенно преобразованы. Исходный ряд данных ранжировался по значениям $\sigma_{сж}$ и выполнялась статистическая обработка по стандартной методике (ГОСТ 8.207-76). Функция плотности распределения $\sigma_{сж}$ является асимметричной (коэффициент асимметрии $K_s = +0,905$), причем мода смещена влево от математи-

ческого ожидания, что является довольно характерным результатом для большинства данных по прочности. Конечный результат обработки, представленный, например, по медианному значению составляет $M_e = 8,5 \pm 1,0$ (доверительная вероятность $P = 0,95$) существенно больше, чем оцениваемый большинством исследователей.

В табл.3 приведены систематизированные данные по $\sigma_{ск}$, взятые из различных литературных источников. Следует отметить, что в графе 6 указаны диапазоны значений, в определенной мере уже систематизированные авторами сообщений, тем не менее общий разброс оказывается чрезвычайно большим (от 0,4 до 12,0 МПа). Можно воспользоваться чисто формальным приемом статистических оценок этих данных в предположении, что разброс является случайным, а также является случайным воздействием T и S_d . В этом случае для данных с 1 по 14 после предварительного осреднения внутри интервалов получается следующее: $M_{\sigma} = 5,2 \pm 1,2$ МПа ($P=0,95$); $K_{\sigma} = 0,47$.

Таблица 3

Систематизированные данные $\sigma_{ск}$ по разным источникам

Номер л/л	Автор, организация	Район испытаний, структура льда	T_b или T_n , °C	S_d , %	$\sigma_{ск}$, МПа	Условия и результаты испытаний
1	2	3	4	5	6	7
1	Frederking R.M., Timco G.W., 1983	Мелкозернистый (1-3 мм) поверхностный слой	-11 + +1	-	2,5 + 4,0	$h_n > 50$ см. Состояние текучести при относительной деформации 0,3%
2	Frederking R.M., Timco G.W., 1983	Столбчато-гранулированный лед (>50 см, 5-10 мм)	-11 + +1	-	1 + 2,5	$h_n > 50$ см. Текучесть при деформации 0,3%
3	Зубов Н.Н., 1994	Арктика, обобщенные данные	до -30	-	1,8 + 4,8	-
4	Буткович, 1956	-	-4 + -18	5,5	2,6+10,7	Цилиндрические образцы высотой 10 см, диаметр 7,5 см
5	Пейтон Х.Р., 1966	200 миль севернее Аляски	-1 + -6	-	2,0 + 4,5	Толщина льда 172 см, скорость нагружения 17-51 КПа/с
6	Кан С.И., 1974	Охотское море	около 0	-	0,4 + 5,7	Кубические образцы 7x7x7 см
7	Буткович, 1956, 1959 [22]	-	-	-	7,6+12,0	Вертикально вырезанные образцы
8	Пейтон Х.Р. 1966 [22]	-	-	-	8,4	То же
9	Шварц, 1970	Балтийское море	0 + -10	-	2,2 + 6,0	Линейное возрастание с уменьшением температуры
10	Петров И.Г., 1976	Финский залив	-10	<0,5	2,0 + 5,0	Образцы кубической формы 5x5x5 см
11	"Louis S. St. Laurent", 1977	Пролив Ланкастера	-	-	5,5	Испытания стенок несквозной лунки во льду. Давление домкратом

Номер п/п	Автор, организация	Район испытаний, структура льда	T_1 или T_2 , °C	S_1 , %	$\sigma_{сж}$, МПа	Условия и результаты испытаний
1	2	3	4	5	6	7
12	"Canmar Kigoriak", 1979-1980	Море Бофорта	-	-	3,1+4,8 ср. 3,9	Для горизонтально вырезанных образцов. Скорость нагружения 0,09-0,13 МПа/с; $V_p = 9,9\%$
13	Sinha N.K., Frederking R.M., 1979	-	-20+ -27 -20+ -27	0+20 0+20	5,6 7,5	Многолетний лед, скорость нагружения 0,15-0,20 МПа/с. Однолетний лед, скорость нагружения 0,17 МПа/с
14	ЦНИИ им. акад. Крылова (обработка данных Sinha N.K., Frederking R.M.)	-	-20+ -27	$7,0 \pm 1,1$ ($P=0,95$)	$8,5 \pm 1,0$ ($P=0,95$)	Обработка по ГОСТ 8.207-76. Закон распределения по $S\%$ - нормальный, для $\sigma_{сж} - M_\sigma = 9,0$ МПа, $M_\sigma = 8,5$ МПа, $K_\sigma = 0,42$; $K_G = +0,905$
15	Петров И.Г., 1976 (обобщенные данные)	Моря Арктики	0 -1 -2 -3 -4 -5 -10 -15 -20 -25 -30 -35	- - - - - - - - - - - -	1,0 1,3 1,5 1,7 1,9 2,1 2,5 2,55 2,6 2,65 2,7 2,75	Приведенные данные рассматриваются как наиболее вероятные значения при средней солености льда, т.е. $\approx 5 - 8\%$

В обобщениях [33], которые также приведены в табл. 3, получены значения $\sigma_{сж}$, отличающиеся от полученного выше M_σ (для средних условий) примерно в 2 раза. Основная причина таких различий в том, что в работе [33] рассматривается однолетний лед, а в табл.3 приведена совокупность, включающая и многолетние льды, прочность которых существенно выше, чем однолетних.

Примененный формальный прием фактически является методом экспертных оценок с весовыми коэффициентами экспертов, равными 1.

В табл. 4 приведены данные различных авторов по σ_x . Воспользовавшись приемом экспертных оценок, получим (без учета графы 5) следующие значения: $M_\sigma = 0,62 \pm 0,12$ ($P = 0,95$) при $K_\sigma = 0,36$. Этот результат является несколько заниженным по сравнению с оценками И.Г.Петрова, приведенными в графе 5 таблицы. Учитывая, что оценки И.Г.Петрова построены, в основном, по испытаниям балок, где наблюдается влияние среза, можно считать более вероятной приведенную выше оценку.

Поскольку значения прочности зависят от температуры, то для различных видов структур по классификации Н.В.Черепанова при соответствующих различиях солености взятые из литературы обобщенные данные на-

несены на графики (рис.9). В общем случае зависимость от $T^{\circ}\text{C}$ нелинейна, но в узких диапазонах эта нелинейность может не учитываться.

Зависимость от солености у $\sigma_{\text{н}}$ в общем случае тоже нелинейна, но в узком диапазоне реальных значений $\rho_{\text{н}}$, по данным А.Я.Рывлина [39] эта нелинейность тоже может не учитываться.

Данные по прочности на срез $\sigma_{\text{ср}}$, смятие $\sigma_{\text{см}}$, расширения $\sigma_{\text{р}}$, а также по упругим характеристикам морского льда в имеющейся литературе весьма немногочисленны, и основные обобщения по ним с привлечением архивных данных ААНИИ сделаны в работе [33], а обобщение зарубежных данных в работе [22].

Таблица 4

Систематизированные данные $\sigma_{\text{н}}$

Номер п/п	Авторы, организация	Район испытаний, структура льда	$T_{\text{н}}$, $^{\circ}\text{C}$	$S_{\text{н}}$, %	$\sigma_{\text{н}}$, МПа	Условия испытаний
1	2	3	4	5	6	7
1	Frederking R.M., Timco G.W., 1983	Море Бофорта	-	-	0,6 + 1,0	Январь и май 1982 г.
2	Tabata Tadashi, Suzuki Yosio, Aota Masaaki, 1975	Ботнический залив	-0,3 + -0,8	0,7	0,1 + 0,5	Март 1975 г., консоли: $h_{\text{н}} = 35$ см и $h_{\text{н}} = 51$ см; $l = 1,8-3$ м, $b = 30$ см
3	Рывлин А.Я., 1975	Арктический бассейн	-	-	0,5 + 0,6 0,15 + 0,3 (min)	Консоли на плаву в естественных условиях
4	Рывлин А.Я., 1950-1971	То же	-	-	0,25 0,7 (с учетом $k = 2,8$)	Консоли на плаву в естественных условиях. Статистический анализ
5	Петров И.Г., 1976	- " -	0 -1 -2 -3 -4 -5 -10 -15 -20 -25	- - - - - - - - - - -	0,20 0,40 0,65 0,75 0,85 0,90 1,10 1,20 1,35 1,40	Наиболее вероятные (экспертные) значения при совокупности различных условий испытаний
6	Эдвардс Р., 1983	Побережье Лабрадора	-	-	0,55	Консоль
7	Дукинс У., 1967	Лабораторные условия	-	-	0,34 + -0,91	Балки, выращенные в изотермических условиях лаборатории
8	Браун Дж. Х., 1966	Побережье Аляски, Гренландия	-	-	0,6 + 1,1	Консоли на плаву. Данные умножены на $k = 2,8$
9	Эдвардс Р., 1972	-	-	-	0,34	-
10	Эквист, 1972	-	-	-	0,19 + 0,48	-
11	Дайкинс (Дукинс), 1971	-	-	-	0,2 + 0,9	Натурные и лабораторные эксперименты

Окончание табл. 4

Номер п/п	Авторы, организация	Район испытаний, структура льда	T_n , °C	S_n , %	σ_n , МПа	Условия испытаний
1	2	3	4	5	6	7
12	Буткович, 1956, 1959	-	-	-	0,2 + 0,7	Натурные эксперименты
13	Панов В.В., Воеводин В.А., Николаев С.Е., 1976	-	-	1 2 3	1,5 0,8 0,4	Натурный молодой лед
14	Петров И.Г., 1971	Восточная часть Карского моря	-4 + -8	4+6	0,67 + -1,05	Испытания малых образцов
15	ЦНИИ им. акад. Крылова, 1985 (по исходным данным ААНИИ)	Восточная часть Карского моря	-1,9±0,1 -6,2±2 -5,0±2	4,3±0,6 3,8±0,4 3,9±0,4	0,75±0,07 0,98±0,09 0,94±0,12	Статистическая обработка, стандартные оценки ($P = 0,95$)
		Шестоватая структура с добавками	-	-	0,72±0,06	Обработка рядов, распределенных по типам кристаллической структуры.
		Зернистая с добавками	-	-	1,04±0,08	Стандартные оценки (M_n) ($P = 0,95$)
		Чисто зернистая структура	-	-	1,06±0,16	
		Столбчатая структура	-	-	1,19±0,16	
		Чисто шестоватая структура	-	-	0,67±0,08	
		Среднее для всех структур	4,1±2	4,0 ± 0,5	0,97±0,03	
16	ЦНИИ им. акад. Крылова, 1985 (по исходным данным ААНИИ)	Восточная часть Карского моря	-1,9±0,1 -6,2±2 -5,0±2	4,3±0,6 3,8±0,4 3,9±0,4	0,72±0,07 0,94±0,09 0,95±0,12	Статистическая обработка. Оценки по медианным значениям
		Шестоватая структура с добавками	-	-	0,78±0,06	
		Зернистая структура	-	-	0,95±0,1	
		Чисто шестоватая структура	-	-	0,75±0,08	
		Столбчатая структура	-	-	1,12±0,16	
		Чисто зернистая структура	-	-	0,99±0,16	
		Среднее для всех структур	4,1±2	4,0±0,5	0,93±0,06	

Прочность льда на срез σ_{cp} связана с температурой и ее значения по данным работы [33] приводятся в табл. 5, 6 совместно с данными по $\sigma_{сж}$ и σ_n . Данные из работы [22] несколько завышены по сравнению с данными табл.5, в частности, данные Бутковича, однако, приводимые там же дан-

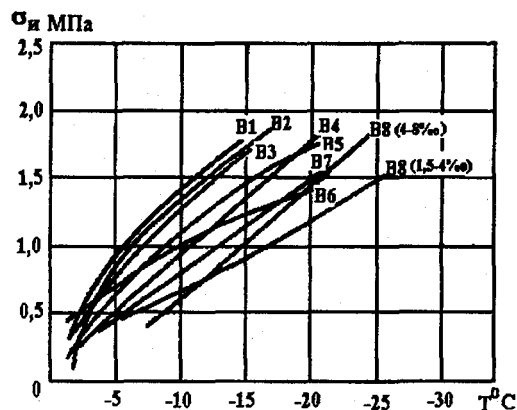


Рис.9. Зависимость обобщенных значений предела прочности льда на изгиб от вида структуры льда в диапазоне температур.

ные Пейджа и Ли попадают в указанный интервал зависимости $\sigma_{ср}$ от температуры и солёности и в реально распространенных диапазонах изменчивости могут рассматриваться как практически линейные.

Прочность на растяжение σ_p по данным работы [33] в диапазоне температур $0+10^\circ\text{C}$ меняются в среднем от 0,6 до 1,1 МПа, а при $T \approx -20^\circ\text{C}$ значения σ_p составляют 1,4+1,8 МПа. По данным Дайкинса, приведенным в работе [22], σ_p зависят от приложения нагрузки и для вертикально вырезанных образцов в диапазоне $S_d=0+9\text{‰}$ меняется в пределах от 0,7 МПа до 1,6 МПа, а для горизонтально вырезанных при $S_d=0+9\text{‰}$ – от 0,3 МПа до 0,7 МПа, причем, зависимость σ_p от солёности может рассматриваться как линейная.

Таблица 5

Наиболее вероятное значение прочности при различных видах деформации, МПа

Вид деформации	0	-1	-2	-3	-4	-5	-10	-15	-20	-25
Сжатие	1,00	1,30	1,00	1,70	1,90	2,10	2,50	2,55	2,60	2,65
Изгиб	0,20	0,40	0,65	0,75	0,85	0,90	1,10	1,20	1,35	1,40
Срез	0,02	0,13	0,23	0,31	0,37	0,42	0,62	0,73	0,76	0,77

Таблица 6

Соотношение между значениями прочности при различных видах деформации, отн. ед.

Вид деформации	0	-1	-2	-3	-4	-5	-10	-15	-20	-25	Среднее
Сжатие	50	10	6,5	5,5	5,1	5,0	4,0	3,4	3,4	3,4	4
Изгиб	10	3,1	2,8	2,4	2,3	2,1	1,8	1,7	1,8	1,8	2
Срез	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

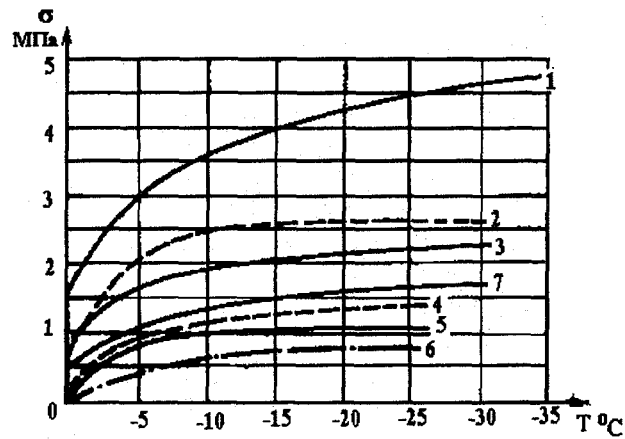


Рис.10. Зависимость от температуры обобщенных значений прочности различных видов льда по данным [33].

Указаны $\sigma_{ср}$ пресноводного (1) и морского (2) льда; $\sigma_{с}$ пресноводного (3) и морского (4) льда; $\sigma_{ср}$ пресноводного (5) и морского (6) льда; $\sigma_{с}$ пресноводного льда (7).

Прочность на смятие у морского льда исследовалась очень мало. В зарубежных данных величина $\sigma_{сн}$ считается в среднем равной $\approx 3,0$ МПа.

Для удобства использования средние оценки прочности при различных видах деформации нанесены на сводный график (рис.10).

Приведенные в данной главе обобщенные данные по различным прочностным свойствам могут быть использованы при разработке технических заданий на испытания моделей в условиях ледовых опытовых бассейнов, а также при формировании требований к физико-механическим свойствам моделированного льда в этих бассейнах в соответствии с используемыми критериями подобия.

ГЛАВА 2. СТАТИСТИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ДАННЫХ ИСПЫТАНИЙ

2.1. МЕТОДИКА ОБРАБОТКИ

Получаемые в лабораторных и натуральных условиях данные по физико-механическим свойствам морского льда являются данными *прямых* измерений (ГОСТ 16263-70. Метрология. Термины и определения) с многократными наблюдениями. Обработка данных в этом случае должна производиться в соответствии с [14].

Полная методика обработки изложена в рекомендациях [29], а также в работе [41].

Для натуральных условий ряды наблюдений, распределенные по представляющему интерес географическому району, рассматриваются как случайные ряды, условно приведенные к одному моменту времени. Иной вариант рассмотрения просто невозможен. В результате такого рассмотрения могут быть получены достоверные средние характеристики физико-механических свойств льда по данному району с оценками доверительных границ погрешности результата при заданной доверительной вероятности.

Прежде всего из исходного набора данных выбираются однородные ряды, т.е. результаты наблюдений таких участков анализируемого района, в которых физические условия формирования ледяного покрова являются однотипными. Из рассмотрения исключаются участки с сильным влиянием речного стока, а также участки закрытых акваторий. Кроме выбора по географическому положению точек наблюдений, для дополнительного контроля используются данные о солености льда.

В выбранных рядах данных отдельные значения могут резко отличаться от всей совокупности. Решение о том, считать ли их *грубыми* отклонениями (погрешностями) принимается на основании следующего статистического критерия.

Вычисляется величина

$$t_{\max} = \frac{|X_{\max} - M_x|}{S_{n-1}}, \quad (24)$$

где X_{\max} – анализируемое резко выделяющееся значение; M_x – оценка математического ожидания ряда; S_{n-1} – несмещенная оценка среднего квадратического отклонения ряда.

По таблицам распределения наибольшего по абсолютному значению нормированного отклонения [29, 41] определяется теоретическое значение величины t_{γ} :

$$t_T = \frac{\max |x_i - M_x|}{S_{n-1}}. \quad (25)$$

Для этого необходимо предварительно задаться уровнем значимости q (при $n \leq 50$).

В предположении, что исходный анализируемый ряд может считаться распределенным по нормальному закону, решение об исключении из рассмотрения значения X_{\max} принимается, если $t_{\max} > t_T$.

Если количество данных n превышает 50, то значение t_T вычисляется по формуле:

$$t_T = Z_{\alpha/2} \cdot \sqrt{1 - \frac{1}{n}}, \quad (26)$$

где $Z_{\alpha/2}$ – аргумент кривой нормального распределения, определяемый по таблицам из работ [29, 41].

Для окончательно установленного ряда данных вычисляются следующие характеристики:

– оценка математического ожидания (среднее арифметическое)

$$M_x = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}; \quad (27)$$

– смещенная оценка среднего квадратического отклонения

$$S_n = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - M_x)^2}{n}}; \quad (28)$$

– несмещенная оценка среднего квадратического отклонения

$$S_{n-1} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - M_x)^2}{n-1}}; \quad (29)$$

– коэффициент вариации:

$$K_\sigma = \frac{S_{n-1}}{M_x}; \quad (30)$$

– значения моды распределения:

$$M_0 = a_{M_0} + h \frac{\omega_{M_0} - \omega_{M_0-1}}{2\omega_{M_0} - \omega_{M_0-1} + \omega_{M_0+1}}, \quad (31)$$

где a_{Mo} – начало модального интервала, т.е. такого, которому соответствует наибольшая часть в рассчитанной гистограмме; ω_{Mo} – частота модального интервала; ω_{Mo-1} – частота интервала, предшествующего модальному; ω_{Mo+1} – частота интервала, следующего за модальным; h – ширина интервала, использованная при расчете гистограммы;
– значение медианы распределения:

$$Me = a_{Me} + h \frac{0,5 - \omega_{Me}^{нак}}{\omega_{Me}}, \quad (32)$$

где a_{Me} – начало медианного интервала в гистограмме, т.е. такого интервала, которому соответствует первая из накопленных частот, превышающая 0,5; $\omega_{Me}^{нак}$ – частота, накопленная к началу медианного интервала; ω_{Me} – частота медианного интервала.

Второй путь вычисления Me связан с предварительным ранжированием исходного ряда, т.е. последовательным расположением значений ряда в порядке возрастания. Если в ряду нечетное число наблюдений $n = 2q - 1$, то $Me = X_q$, т.е. значению, занимающему q -е место после ранжирования. При $n = 2q$ получим

$$Me = \frac{X_q + X_{q+1}}{2}; \quad (33)$$

– коэффициент асимметрии

$$K_s = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - M_x)^3}{S_{n-1}^3}. \quad (34)$$

Кроме этого, анализируемое распределение данных наблюдений проверяется на соответствие нормальному закону. Для этого применяются следующие критерии.

При $10 < n < 50$ проверка соответствия осуществляется по d -статистике или по так называемому *составному критерию* (ГОСТ 8.207-76), а при $n \geq 50$ по критерию χ^2 – Пирсона.

Эмпирическое значение d -статистики вычисляется по формуле:

$$\bar{d} = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - M_x)}{\sqrt{n \sum_{i=1}^n (X_i - M_x)^2}} = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - M_x)^2}{n \cdot S_n}. \quad (35)$$

Принимается, что гипотеза о нормальности согласуется с данными наблюдений, если

$$d_{1-q/2} < \bar{d} < d_{q/2},$$

где $d_{1-q/2}$ и $d_{q/2}$ – процентные точки распределения статистики d , которые находят по таблицам из [29, 41]; q – выбранный уровень значимости критерия.

Конечно, критерий проверки по d -статистике весьма слабый и чаще всего в расчетах получается требуемое соответствие. С одной стороны, это хорошо, поскольку позволяет с достаточной корректностью определить среднее по району значение результата измерений и установить доверительные границы его погрешности при заданной доверительной вероятности (в частности, в расчетах целесообразно задавать $P = 0,95$). Однако, с другой стороны, желательно более тщательное выявление вида закона распределения. С этой целью выполняется расчет коэффициента асимметрии K_s , по значению которого можно судить (приблизительно) о характере смещения моды распределения по отношению к математическому ожиданию (если $K_s > 0$, то мода смещена влево, а при $K_s < 0$ – вправо относительно M_x). Причем, величина смещения пропорциональна значению $|K_s|$. Дополнительно к этому производится расчет гистограммы распределения по исходному ряду.

Доверительные границы среднего по району результата измерения устанавливаются в пределах:

$$\pm 2\Delta = \pm 2\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - M_x)^2}{n(n-1)}} = \pm \frac{2S_{n-1}}{\sqrt{n}}. \quad (36)$$

При этом доверительная вероятность P , как известно, равна 0,95 для нормального закона.

Расчет гистограммы распределения по исходному ряду производится путем разбивки полного диапазона изменчивости X_i на узкие интервалы, для которых подсчитывается число попадающих в них значений X_i (частота n_i). Затем вычисляется соотношение n_i/n , где n – полное число наблюдений исходного ряда.

Следует отметить, что в некоторых работах, где приводятся результаты расчета гистограмм, наблюдается довольно характерная ошибка, связанная с неоправданным завышением устанавливаемого количества интервалов. Из-за этого гистограммы оказываются сильно “изрезанными” и не дают наглядного представления о характере распределения. В работе [41] даются обоснованные рекомендации по выбору числа интервалов и наиболее целесообразно пользоваться именно ими. В частности, при $n < 40$ рекомендуемое число интервалов должно соответствовать 5–6. При $40 < n < 100$ – 7–9. При этом получают достаточно “гладкие” гистограммы и по их срединным точкам удается построить плавную кривую плотности распределения.

Для усиления критерия d -статистики применяют дополнительный критерий. Сущность его состоит в том, что гипотеза о нормальности считается подтверждаемой, если не более m разностей $(X_i - M_x)$ превосходят значение $Z_{\alpha/2} \cdot S_{n-1}$, где $Z_{\alpha/2}$ – верхняя $100 \cdot \alpha/2$ -процентная точка нормированной функции Лапласа, а величина $\alpha(n, q)$ определяется по числу наблюдений n и уровню значимости критерия q как корень уравнения:

$$1 - \sum_{k=0}^m C_n^k (1-\alpha)^k \cdot \alpha^{n-k} = q, \quad (37)$$

где α – доверительная вероятность.

Таблицы для определения $\alpha(n, q)$ и $Z_{\alpha/2}$ приводятся в работе [41].

Сочетание обоих критериев называется *составным* критерием. При его использовании гипотеза о нормальности принимается только в том случае, если она подтверждается обоими критериями. При этом уровень значимости составного критерия

$$q \leq q_1 + q_2.$$

Если в исходном ряду данных количество наблюдений $n \geq 50$, то проверка гипотезы о нормальности распределения должна проводиться по критерию более сильному, чем d -статистика или составной критерий, и для этой цели рекомендуется использовать критерий χ^2 – Пирсона [14].

Расчет критерия χ^2 производится по следующей схеме:

- данные наблюдений, как и при расчете гистограммы, группируют по интервалам, определяя число наблюдений n_i , попадающее в каждый из интервалов;
- вычисляют оценку математического ожидания M_x и несмещенную оценку среднего квадратического отклонения S_{n-1} ;
- для каждого интервала определяют

$$Z_i = \frac{X_{i0} - M_x}{S_{n-1}}, \quad (38)$$

где X_{i0} – абсцисса, соответствующая середине i -го интервала;

- для вычисленных значений Z_i находят значения плотности вероятности:

$$\varphi(Z_i) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{1}{2} Z_i^2\right), \quad (39)$$

причем, как известно, функция $\varphi(Z)$ во многих пособиях представлена в виде таблиц;

- по кривой распределения $\varphi(Z)$ вычисляют теоретическое число наблюдений \tilde{n}_i в каждом интервале:

$$\tilde{n}_i = n \frac{h}{S_{n-1}} \cdot \varphi(Z_i), \quad (40)$$

где n – общее число данных; h – длина интервала;

– объединяют соседние интервалы, эмпирическое число наблюдений n_i в которых меньше 5;

– для каждого интервала после объединения вычисляют χ_i^2 :

$$\chi_i^2 = \frac{(n_i - \bar{n}_i)^2}{\bar{n}_i}; \quad (41)$$

– вычисляют χ^2 , просуммировав χ_i по всем L интервалам:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^L \left[\frac{(n_i - \bar{n}_i)^2}{\bar{n}_i} \right]; \quad (42)$$

– определяют число степеней свободы:

$$K = L - r - 1;$$

где r – число оцениваемых по выборке параметров теоретического распределения.

Для нормального распределения по выборке обычно определяют оценку математического ожидания M_x и оценку дисперсии S_{n-1}^2 , поэтому, $r = 2$ и $K = L - 3$;

– выбрав уровень значимости критерия q , при полученном K , приняв $P(\chi^2 > \chi_n^2) = 1 - q / 2$, находят значения q -процентных точек для χ^2 -распределения [41];

– принимается, что гипотеза о нормальности распределения подтверждается, если $\chi_n^2 < \chi^2 < \chi_n^2$.

Если распределение данных подчиняется нормальному закону, то дальнейшие оценки производятся по достаточно отработанным правилам. Обобщенный результат испытаний формулируется в соответствии с ГОСТ 8.011-72 [13] в виде оценки математического ожидания с указанием доверительных границ погрешности результата и доверительной вероятности. Как правило, доверительные границы устанавливаются по выражению (36) при доверительной вероятности 0,95.

Однако ситуация сразу же изменяется, если проверка по критериям согласия не подтверждает соответствия экспериментального распределения нормальному закону. В таких случаях необходимо установить, к какому из наиболее распространенных законов максимально близко анализируемое распределение, а затем формулировать обобщенный результат в соответствии [12]. Также установлены правила определения оценок и доверительных границ для параметров гамма-распределения, экспоненциального распределения, распределения Пуассона и некоторых других.

Несомненно, что вид экспериментального распределения может не соответствовать этим распространенным законам. В таком случае необходим тщательный анализ причин, который привел к таким результатам.

Одной из характерных причин является резкое изменение условий в процессе испытаний. В таких случаях ряды необходимо разбивать на отдельные однородные группы. Еще одна из возможных причин – физическая, которая проявляется в применяемых технологиях испытаний. Она заключается во *вторичности* получаемых данных по пределам прочности при испытаниях. Причины этого рассматриваются ниже.

2.2. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕДИАНЫ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ В КАЧЕСТВЕ ОБОБЩЕННОГО РЕЗУЛЬТАТА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРОЧНОСТИ ЛЬДА

При статистическом анализе экспериментальных данных по пределам прочности, представленных в виде однородных рядов, зачастую выявляется, что графический вид функции плотности распределения, как правило, существенно отличается от нормального закона, при этом оценка математического ожидания M_{σ} , которую принято использовать в качестве обобщенного результата испытаний, смещена вправо (в сторону увеличения предела прочности) относительно моды распределения. Естественно полагать, что появление подобной закономерной асимметрии связано с действием некоторого неслучайного фактора, в противном случае распределение с увеличением объема выборки должно стремиться к нормальному закону.

Из сказанного следует, что оценка M_{σ} для таких серий испытаний не является репрезентативной оценкой результата, а доверительные границы его погрешности, зачастую устанавливаемые как симметричный интервал $\pm 2S_{\sigma}$ (S_{σ} – среднее квадратическое отклонение), не являются репрезентативными оценками погрешности и не соответствуют требованиям [13, 14].

Применительно к задаче определения механических свойств льда отмеченная особенность позволяет считать, что получаемые опытным путем значения пределов прочности являются *вторичными*, связанными функционально с некоторой исходной величиной, не отягощенной влиянием неслучайного фактора [43]. Рассмотрим в качестве такой исходной величины характеристику дефектов структуры во льду, которые при тщательной обработке поверхностей образцов будут преимущественно определять условия разрушения при испытаниях.

В этом случае систематическим (неслучайным) фактором, обуславливающим асимметрию закона распределения, будет являться нелинейность взаимосвязи между экспериментально получаемыми значениями прочности σ_n и распределением дефектов структуры (дефектностью D). Физический смысл вводимого понятия дефектности для рассматриваемой задачи принципиального значения не имеет. Однако следует отметить, что определяющим фактором, формирующим величину D , является линейный размер l , максимального дефекта в испытываемом образце. Понятие дефектности в данном частном случае более удобно, чем, например, размер li , поскольку изменчивость величины D_i может быть задана в нормированном виде, т.е. $0 \leq D_i \leq 1$.

Для рассмотренных условий в любой из серий испытаний случайная величина σ_{ni} связана со случайной величиной D_i некоторой неслучайной функцией связи $F(D_i)$. Вид этой функции зависит от конкретных условий эксперимента (геометрии образца, схемы нагружения, вида и геометрии внутренних дефектов в образце: рассоловых ячеек, пор, микротрещин и т.д.). В простейшем случае растяжения-сжатия, т.е. при испытаниях на изгиб (σ_{ni}), интерпретируя D_i как некоторую функцию

$$D_i = \frac{R \cdot l_i}{l_{\max}},$$

где l_{\max} – максимально возможный размер дефекта; R – коэффициент связи. Вид функции $F(D_i)$ можно установить следующим:

$$\sigma_{ni} = F(D_i) = \sqrt{\frac{2GRE}{D_i l_{\max} (1 - \mu^2) \pi}} = K_{IC} \sqrt{\frac{R}{D_i l_{\max} \pi}}, \quad (43)$$

где G – поверхностная энергия; E – модуль Юнга; μ – коэффициент Пуассона.

Такая взаимосвязь соответствует модели Гриффитса [43] и при физической конкретизации величин R и l_{\max} в принципе может позволять по имеющимся данным испытаний на изгиб σ_{ni} восстанавливать значения критического коэффициента интенсивности напряжений K_{IC} . При этом коэффициент R в общем случае является переменным и зависящим, в свою очередь, от l_i .

Например, при испытаниях по схеме четырехточечного изгиба

$$\sigma_{ni} = \frac{K_{IC}}{\sqrt{l_i} F\left(\frac{l_i}{h}\right)}, \quad (44)$$

где h – толщина образца.

Отсюда получается

$$R = \frac{\pi}{\left[F\left(\frac{l_i}{h}\right)\right]^2}. \quad (45)$$

Функция $F(l_i/h)$, по данным работы [17], выглядит следующим образом:

$$F\left(\frac{l_i}{h}\right) = 1,99 - 2,47 \left(\frac{l_i}{h}\right) + 12,97 \left(\frac{l_i}{h}\right)^2 - 23,17 \left(\frac{l_i}{h}\right)^3 + 24,80 \left(\frac{l_i}{h}\right)^4. \quad (46)$$

Здесь l_i – длина трещины заданного размера.

Известно, что при неслучайной функции связи между двумя случайными величинами (в нашем случае D_i и σ_{ni} при $\sigma_{ni} = F(D_i)$) их плотности вероятности связаны выражением

$$\varphi_D(D_i) = \varphi_\sigma[F(D_i)] \cdot [F'(D_i)], \quad (47)$$

где $\varphi_D(D_i)$ – плотность распределения вероятности дефектности; $\varphi_\sigma[F(D_i)]$ – плотность распределения вероятности предела прочности на изгиб; $F(D_i)$ – первая производная функция связи.

При этом однозначно соответствуют друг другу квантили распределения D_p и σ_{np} :

$$\sigma_{np} = F(D_p) \text{ при } 0 < p < 1.$$

Отсюда следует, что медианы (квантили $p = 1/2$) также однозначно связаны

$$Me = F(D_{1/2}). \quad (48)$$

Поскольку медиана распределения дефектности $D_{1/2}$ при принятом нормальном законе совпадает с модой и математическим ожиданием и является наряду с ними средней статистической характеристикой этой величины, то медиану Me распределения σ_{np} , однозначно соответствующую $D_{1/2}$, следует считать обобщенной характеристикой прочности, более корректно отображающий результат измерений при испытаниях в серии, чем используемая обычно оценка математического ожидания M_σ .

Из рассмотренных закономерностей следует принципиальная возможность восстановления функции связи $F(D)$ по статистическим параметрам исходного ряда σ_{ni} . Функция $F(D)$ должна быть определена не менее чем в трех точках (чем больше точек, тем лучше получаемое приближение). В качестве простейшего метода восстановления можно предложить графоаналитический (рис. 11).

На оси σ_{ni} , как на оси абсцисс, строится гистограмма и наносится функция плотности распределения. Осью ординат при этом является ось частостей n_i/n . На оси xi по параметрам ряда σ_{ni} определяется положение квантилей (квантилей $1/2, 1/4$ и $3/4$). Начальное значение гистограммы при этом обычно не совпадает с началом координат оси xi . После этого на оси Di формируется отрезок изменчивости Di (в принятом условии $0 \leq D_i \leq 1$). Очевидно, что минимальное значение σ_{ni} гистограммы должно соответствовать $D_i = 1$. Это соответствие дает возможность получить точку 1 искомой функции связи. Из уже рассмотренных условий легко получается точка 3 – это точка взаимного соответствия медианы Me исходного распределения и $D_i = 0,5$. Для получения точек 2 и 4 необходимо воспользоваться дополнительными условиями. В частности, известно, что для нормального закона квантили $1/4$ и $3/4$ относят от центра на расстоянии $0,674S$, где S – среднее квадратическое отклонение. Известно, что с вероятностью 0,997 распределенная нормально случайная величина укладывается в интервал $\pm 3S$. В таком случае $S \approx 0,167$ при $0 \leq D_i \leq 1$, а положения квантилей $1/4$ и $3/4$ соответствуют значениям $D_{1/4} = 0,388$ и $D_{3/4} = 0,612$.

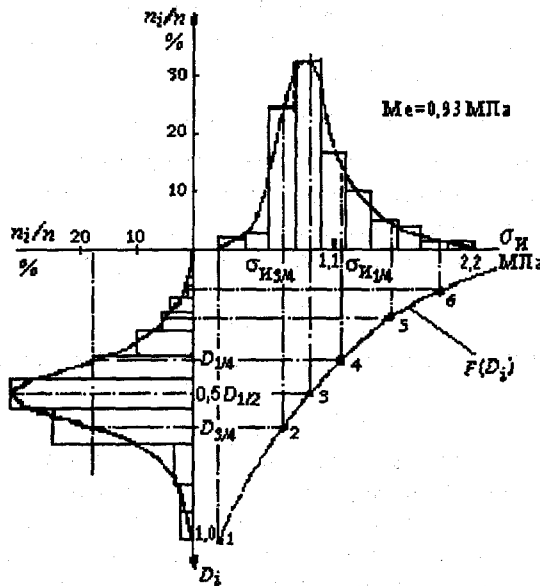


Рис.11. Трансформация функции плотности распределения при нелинейной функции связи.

Поскольку квантили обоих распределений однозначно связаны через функцию $F(D_i)$, то, зная положение точек $D_{1/4}$ и $D_{3/4}$ на оси D_i и точек $\sigma_{и1/4}$ и $\sigma_{и3/4}$ на оси σ_y , легко получаем точки 2 и 4 функции $F(D_i)$ (см. рис. 11).

Несомненно, что из условия соответствия квантилей следует возможность получения, при необходимости, еще ряда точек, например 5 и 6 функции $F(D_i)$ – по соответствию децилей, процентилей и т.д. Следует отметить, что при аналитическом представлении функции $F(D_i)$ в виде степенного ряда соответствие квантилей позволяет рассчитать значения коэффициентов ряда.

При найденной функции связи $F(D_i)$ становится возможным на основании выражения (47) восстановить функцию плотности распределения $\varphi_D(D_i)$, вычисляя производные $F(D_i)$ и определяя затем $\varphi_D(D_i)$ при значениях D_i , поставленных в соответствие исходным $\sigma_{иi}$ при известном $\varphi_\sigma(\sigma_{иi})$. Так же достаточно просто восстанавливается гистограмма распределения. Поскольку границы интервалов $\Delta\sigma_{иi}$ является квантилями с $0 < p < 1$, то они могут быть спроектированы через графическую функцию $F(D_i)$ на ось D_i (см. рис. 11), при этом, естественно, ширина интервалов оказывается переменной. Значения частот n_i/n в каждом из интервалов для обеих гистограмм должны совпасть. Это следует как из общефизических соображений (количество наблюдаемых значений в интервале не может измениться при рассматриваемой трансформации), так и из математических условий трансформации. Действительно, из выражения (47) следует:

$$\varphi_D(D_i) \cdot |dD_i| = \varphi_\sigma(\sigma_n) \cdot |d\sigma_n|, \quad (49)$$

Поскольку

$$\varphi_D(D_i) = \frac{d\Phi(D_i)}{dD_i} \text{ и } \varphi_\sigma(\sigma_n) = \frac{d\Phi(\sigma_n)}{d\sigma_n},$$

где $\Phi(D)$ и $\Phi(\sigma_n)$ – соответствующие функции распределения, внутри каждого интервала это приводит к равенству

$$d\Phi(D_i) = d\Phi(\sigma_n)$$

и соответственно

$$\Phi(D_i) = \Phi(\sigma_n)$$

при вполне естественном равенстве нулю постоянной интегрирования.

Частость n_i/n для каждого интервала есть не что иное, как

$$(n/n_i)_D = \int_{D_i}^{D_i+\Delta D} d\Phi(D_i) = \Phi(D_i + \Delta D) - \Phi(D_i);$$

$$(n/n_i)_{\sigma_n} = \int_{\sigma_n}^{\sigma_n+\Delta\sigma_n} d\Phi(\sigma_n) = \Phi(\sigma_n + \Delta\sigma_n) - \Phi(\sigma_n).$$

Отсюда следует равенство частот для взаимосвязанных интервалов в распределениях D_i и σ_n :

$$(n_i/n)_D = (n_i/n)_{\sigma_n}.$$

Такое полное восстановление функции связи $F(D_i)$ и параметров распределения D_i позволяет корректно установить доверительные границы погрешности обобщенного результата измерений предела прочности (как показано выше, значения медианы Me) при заданной доверительной вероятности P_Δ . Как установлено, только в таком случае можно использовать получаемые результаты. Если задавать $P_\Delta = 0,95$, как это обычно принято, то случайная погрешность Δ_c результата измерений в серии при нормальном законе распределения равна

$$\Delta_n = \pm \frac{2S}{\sqrt{n}};$$

где S – среднее квадратическое отклонение в серии наблюдений; n – количество наблюдений.

Таким образом, по восстановленному распределению D_i могут быть корректно определены доверительные границы погрешности для результата \bar{D} . Затем, поскольку границы являются квантилями с $0 < p < 1$, они могут быть спроектированы через $F(D_i)$ на ось σ_n (см. рис. 11) и, тем самым, получены в значениях отклонений σ_n .

Более удобно выполнение такой операции расчетным путем с использованием квартилей $D_{1/4}$ и $D_{3/4}$ и их соответствия с квартилями $\sigma_{n1/4}$ и $\sigma_{n3/4}$. При этом значения доверительных границ погрешности оказываются следующими:

$$\Delta_{c1} = \frac{2(\sigma_{n3/4} - Me)}{0,674\sqrt{n}} = \frac{2,97(\sigma_{n3/4} - Me)}{\sqrt{n}};$$

$$\Delta_{c2} = \frac{2(\sigma_{n1/4} - Me)}{0,674\sqrt{n}} = \frac{2,97(\sigma_{n1/4} - Me)}{\sqrt{n}}.$$

В окончательном виде результат измерений прочности может быть записан в виде

$$\bar{\sigma}_n = Me \begin{matrix} +\Delta_{c1} \\ +\Delta_{c2} \end{matrix}.$$

В приводимом на рис. 11 примере использованы данные натуральных определений предела прочности на изгиб морского льда в восточной части Карского моря ($n=99$). Для этих данных обобщенная оценка $\bar{\sigma}_n$ составит:

$$\bar{\sigma}_n = 0,93 \begin{matrix} -0,05 \\ +0,06 \end{matrix} \text{ МПа } (P_{\Delta} = 0,95).$$

Как следует из статистического анализа данных по регионам (раздел 1.5), выбор медианы распределения в качестве обобщенного результата существенно уменьшает разброс между группами данных при близких физических свойствах образцов, что является немаловажным положительным эффектом рассмотренной методики. По-видимому, методика может считаться также достаточно корректной и в том случае, когда на исходный ряд значений σ_{ni} оказывали влияния иные факторы, например, температура T_i и соленость S_i образцов льда или совокупность этих случайных факторов. При совокупности функция связи становится многозначной. Однако основные закономерности трансформации законов распределения оказываются сходными с рассмотренными выше одномерным случаем. В частности, если

$$\sigma_{ni} = F(D_i, T_i, S_i),$$

то

$$\Phi(\sigma_n) = \iiint dF(D_i, T_i, S_i),$$

$$\sigma_{ni}(D_i, T_i, S_i) \leq \sigma_n,$$

откуда могут быть получены требуемые закономерности, в том числе и для одномерного случая.

Если законы распределения случайных величин T_i и S_i , в свою очередь, отличаются от нормального, то их асимметрия, естественно, оказывает влияние на характер и асимметрию результирующего закона. Наличие известных функций связи $\sigma_n(T_i)$ и $\sigma_n(S_i)$ позволяет учесть это влияние и восстановить, например, рассмотренным выше графоаналитическим путем закон распределения σ_{nr} , неотягощенный асимметрией законов распределения T_i и S_i .

Следует также отметить, что в случае малых объемов выборки, когда асимметрия закона распределения формируется случайным образом (а не закономерным, как в рассмотренных случаях), медиана может являться также более достоверной оценкой результата, чем среднее арифметическое [43].

ГЛАВА 3. ТЕХНОЛОГИИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПЛОТНОСТИ МОРСКОГО ЛЬДА

3.1. ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЛОТНОСТИ МОРСКОГО ЛЬДА И ЗАДАЧИ ЕЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ

При моделировании процессов взаимодействия морских технических средств с ледовым покровом возникает насущная необходимость учета плотности как непосредственно льда, так и льда в совокупности с имеющимся на нем снежным покровом. Это важно при проектировании и испытаниях ледоколов и судов ледового плавания, поскольку при движении во льдах значительная часть мощности судов затрачивается на притапливание обломков льда, продвигающихся вдоль бортов. Это важно также и для натуральных условий. Здесь планирование транспортных операций с предварительными оценками ледовой ходкости, а также выбор оптимальных маршрутов следования требуют при соответствующем учете притапливания обломков льда знания средней плотности ледяного покрова по предполагаемым маршрутам следования, причем, как плотности чистого льда, так и плотности снега на его поверхности.

В связи с этим возрастает интерес к технологиям определений плотности морского льда, особенно, к возможным путям совершенствования этих технологий и методам, позволяющим автоматизировать процесс измерений, что дает возможность получения больших объемов оперативной информации.

Плотность морского льда изменяется в довольно широких пределах и зависит от его типа. Классификация по Н.В.Черепанову [46] содержит следующие типы с диапазонами возможных изменений плотности: тип В1, 910–930 кг/м³; тип В2, 910–930 кг/м³; тип В3, 930–950 кг/м³; тип В4, 900–920 кг/м³; тип В5, 900–935 кг/м³; тип В6, 890–900 кг/м³; тип В7, 880–900 кг/м³; тип В8, 850–900 кг/м³; тип В9, 830–900 кг/м³.

Для многолетних льдов характерны более сложные типы с преобразованной структурой. Преобразование происходит в результате таких причин, как радиационное таяние с повторным замерзанием, режеляционная перекристаллизация, собирательная кристаллизация в глубинных слоях и т.д. Здесь выделяется четыре основных типа с плотностями, соответственно, 910–915, 890–905, 870–900 и 760–820 кг/м³.

Таким образом, общий диапазон изменений плотности у натурального морского льда составляет от 760 до 950 кг/м³.

Кроме типа льда (соответственно, его солёности и кристаллической структуры), на значения плотности существенное влияние оказывает по-

Таблица 7

Обобщенные данные плотности морского льда

Возрастная категория льда	Соленость, ‰	Плотность, кг/м ³
Нилас	13–18	830–916
Серый лед	7–10	810–890
Серо-белый лед	2–7	780–890
Белый лед	2–7	700–900

ристость, обусловленная газонасыщением в процессе ледообразования или последующим замещением воздухом солевых ячеек. Пористость арктических льдов меняется от 0,6 до 38 % [3], а в среднем составляет 3–10 %.

В табл. 6 приводятся обобщенные результаты определений плотности морского однолетнего льда основных возрастных категорий по данным работы [3]. Эти данные характеризуют льды прикромочной зоны Берингова моря. По диапазону изменчивости значений плотности они практически совпадают с данными по плотности типов льда структурно-генетической классификации. Смещен лишь минимальный предел до 700 кг/м³, который, видимо, связан с высокой пористостью верхних слоев белого льда.

Для плотности льда характерна существенная зависимость от солености и температуры. Зависимость от солености проявляется особенно заметно в льдах зернистой структуры: чем больше рассола во льду и выше его концентрация, тем больше плотность. Для обобщенных средних значений вид этой зависимости при различных температурах представлен на рис. 12. Для разных температур T связь между плотностью γ_p и соленостью S ‰ оказывается практически линейной. Здесь, конечно, следует подчеркнуть, что эту связь нельзя рассматривать как некоторую универсальную – это так же видно и из табл. 7. Уменьшение плотности, связанное с миграцией рассола из межкристаллических прослоек, закономерно лишь в том случае, если отсутствуют процессы рекристаллизации в порах.

Зависимость плотности от температуры (рис. 13) имеет более сложный характер и в значительной мере обуславливается как характером изменчивости температурного коэффициента объемного расширения, так и структурными изменениями внутри льда, в частности, образованием кристаллогидратов солей, а также выпадением солей в осадок в межкристаллических прослойках. Для демонстрации того, что влияние указанных факторов чрезвычайно существенно, на рис. 13 приведена зависимость плотности γ_p рассола межкристаллических ячеек от температуры. С понижением температуры величина γ_p возрастает, также возрастает плотность пресноводного льда (0 ‰), в результате при их сочетании, казалось бы, можно ожидать для различных соленостей S ‰ морского льда аналогичного характера зависимости $\gamma_p(T)$, чего на самом деле не получается.

Для моделирования ледяного покрова в опытовых бассейнах при изучении вопросов взаимодействия судна со льдом на начальных этапах

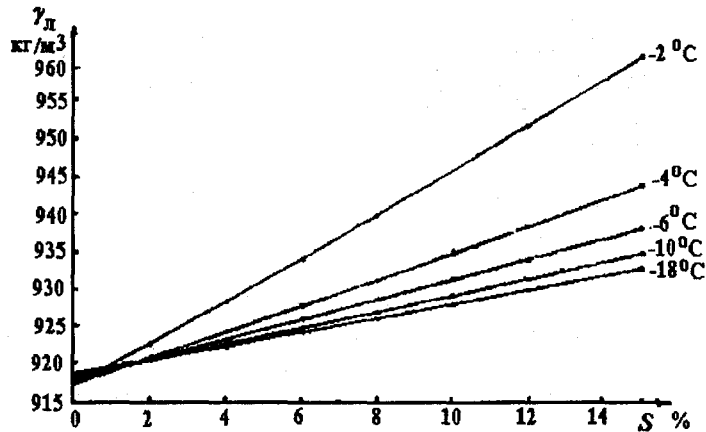


Рис. 12. Зависимость плотности льда от солености при различных температурах.

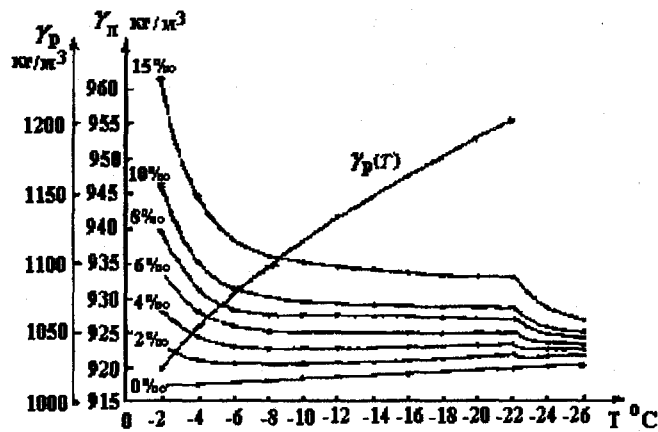


Рис. 13. Зависимости плотности льда и рассола межкристаллических ячеек от температуры.

проектирования наибольший интерес представляет изменчивость $\gamma_{\text{л}}$ в области повышенных температур. Дело в том, что в этой области максимально разупрочнение льда, требуемое по условиям подобия, но это, в свою очередь, предопределяет максимальную изменчивость плотности. Тем самым, возникает проблема *оперативного* и, желательно, непрерывного контроля плотности моделированного морского льда.

В задачах моделирования в настоящее время существуют два основных мнения по вопросу моделирования требуемых значений плотности. Первое из них состоит в том, что плотности моделированного льда долж-

ны примерно соответствовать плотности натурального льда и составлять величину порядка 920 кг/м^3 . Обычно это довольно не сложно обеспечивается в условиях опытового бассейна, поскольку здесь в большинстве случаев формируется ледяной покров с кристаллической структурой, близкой к типам В1 и В2 (типа ниласа) и большим количеством рассоловых ячеек, или формируется покров с зернистой структурой.

Однако следует учитывать следующее обстоятельство. При изучении процессов взаимодействия судна со льдом наиболее важное значение имеет не сама плотность льда, а разность плотностей $\Delta\rho$ льда и воды, поскольку именно разность определяет затрачиваемые усилия на притапливание обломков льдин. При одинаковой плотности моделируемого и натурального льдов величину $\Delta\rho$ определяют различия в плотности естественной и бассейновой воды. Даже при их одинаковом солевом составе (что весьма редко используется) различны значения соленостей. В частности, естественная океанская вода имеет соленость 32–34 ‰, что при температуре 0°C дает значения плотности около 1027 кг/м^3 . Вода в бассейне применяется при соленостях 10–12 ‰ и при той же температуре 0°C имеет плотность 1008–1010 кг/м^3 . В результате различия в $\Delta\rho$ между моделью и натурой могут достигать 20–25 ‰, что вносит весьма существенные погрешности в результаты испытаний моделей судов.

Таким образом, при моделировании более целесообразно формировать лед с пониженной плотностью, добиваясь равенства $\Delta\rho$ для модели и натуре.

В реальных ситуациях взаимодействия судна с ледяным покровом, как отмечалось выше, значительное влияние оказывает также снежный покров на льду. Плотность снежного покрова в Арктике изменяется от 60–100 кг/м^3 у свежевыпавшего рыхлого снега до 260–400 кг/м^3 у снега типа “снежной доски” или “ветрового фирна”. Влияние снежного покрова на движение судна сказывается как на затратах мощности на трение, так и, особенно, в затратах на притапливание обломков. В случаях наличия снежного покрова на льду для обломков может быть установлена некоторая эквивалентная плотность, являющаяся средневзвешенной плотностью льда и снега. Толщина снежного покрова может достигать 40–50 % толщины льда.

Учет этих условий требует моделирования льда с еще меньшей плотностью, чем в предыдущем варианте. И если плотность порядка 900–920 кг/м^3 сравнительно легко обеспечивается в условиях бассейна контролем требуемого режима и физико-химических условий кристаллизации, то меньшие плотности должны формироваться искусственными приемами, например, внедрением в структуру моделируемого ледяного покрова газовых пузырьков путем барботажа. Очевидные трудности надежного контроля подобных искусственных приемов могут приводить к сильным вариациям достигаемой плотности, что, в свою очередь, требует ее постоянного контроля как в процессе намораживания, так и окончательного контроля перед началом испытаний.

Значительные успехи в создании ледовых покровов малой плотности в опытовых бассейнах, по-видимому, могут быть достигнуты с использованием специальных приемов моделирования, например, путем нанесения на поверхность переохлажденной воды бассейна искусственного льда рыхлой структуры (например [42]).

3.2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПЛОТНОСТИ ЛЬДА ПУТЕМ ГИДРОСТАТИЧЕСКОГО ВЗВЕШИВАНИЯ

Наиболее распространенным методом определения плотности льда является метод гидростатического взвешивания. Он может быть реализован двумя методами.

Метод 1. Последовательно выполняются следующие операции. Из ледяного покрова вырезают образец льда произвольного объема, производят взвешивание образца в воздухе с помощью аналитических весов, затем погружают образец полностью в жидкость и проводят взвешивание в жидкости. При этом применяют жидкость, плотность которой меньше, чем ожидаемая плотность образца. По полученным двум значениям массы образца вычисляют плотность льда γ_n по формуле:

$$\gamma_n = \frac{M_n \gamma_{ж}}{M_n - M_{ж}}, \quad (50)$$

где M_n – результат взвешивания образца в воздухе; $M_{ж}$ – результат взвешивания образца в жидкости; $\gamma_{ж}$ – плотность жидкости.

Метод 2. Этот метод менее распространен. Сущность его состоит в том, что производят только одно взвешивание в жидкости с известной плотностью. Но при этом задают объем образца V_n . Плотность льда определяют по формуле:

$$\gamma_n = \frac{M_{ж}}{V_n} + \gamma_{ж}, \quad (51)$$

где $M_{ж}$ – результат взвешивания в жидкости.

Меньшая распространенность этого метода обусловлена трудностями фиксирования объема образца. Хотя, если проанализировать погрешности, то оказывается, что оба варианта по качеству близки между собой, причем у второго метода можно даже отметить ряд преимуществ (раздел 3.3).

Требования к жидкости, в которой производится взвешивание образца, следующие:

- жидкость не должна растворять лед;
- плотность жидкости должна быть меньше плотности льда и составлять величину порядка 700–800 кг/м³;
- температура кристаллизации жидкости должна быть ниже –20 °С;
- жидкость должна быть марки ЧДА (чистой для анализов).

В простейших случаях используется керосин ($\gamma_{ж} \approx 800$ кг/м³) или легкие фракции бензина с плотностью порядка 700 кг/м³. Однако эти вещества зна-

Таблица 8

Характеристики используемых жидкостей

Тип жидкости	$\gamma_{ж}$, кг/м ³	Температура		Формула
		кристал- лизации, °С	кипения, °С	
Гептан	710	-90,61	98,43	C ₇ H ₁₆
Октилен (октен)	714	-101,71	121,28	C ₈ H ₁₆
Гептилен (гептен)	697	-119,04	93,64	C ₇ H ₁₄
Пептин	694	-106,10	40,23	CH = C - CH ₂₂ - CH ₃
Гексин	715	-132,10	71,35	CH = C - CH ₂₃ - CH ₃
Децин	792	-44,00	174,00	CH = C - CH ₂₇ - CH ₃
Толуол (метилбензол)	867	-95,00	110,63	C ₆ H ₅ - CH ₃
Этилбензол	867	-93,90	136,15	C ₆ H ₅ - C ₂ H ₅
Бутилбензол	860	-87,97	183,27	C ₆ H ₅ - C ₄ H ₉
О-ксилол	880	-25,17	144,40	Кольца
μ-ксилол	864	-47,80	139,10	Кольца

чительно загрязнены (химически не чисты) или содержат добавки, предназначенные для повышения октанового числа. В связи с этим целесообразно использование ряда жидкостей из группы углеводородов (табл. 8), выпускаемых химической промышленностью с маркой ЧДА.

В практике *натурных* морских исследований используется метод 3, в частности, при профильных ледовых наблюдениях, когда требуемое оборудование для гидростатического взвешивания отсутствует, а набирать образцы для лабораторных анализов затруднительно, используется более простой метод. Он заключается в том, что измеряют глубину погружения льда в воду. Измерения производят непосредственно по уровню воды в лунке, если отсутствует гидростатический подпор, или на выпиленных цилиндрических кернах, если подпор воды существует. Оценка подпора производится сопоставлением поверхности керна, свободно плавающего в лунке, с поверхностью ледяного покрова. Если поверхности совпадают, то подпор отсутствует.

Плотность льда в этом методе определяется по формуле:

$$\gamma_n = \frac{h_w}{h_n} \gamma_w, \quad (52)$$

где h_w – глубина погружения льдов воду, т.е. расстояние от нижней поверхности льда до поверхности воды в лунке; γ_w – плотность воды.

При использовании кернов формула (52) может быть несколько видоизменена, если требуется повышенная точность измерений:

$$\gamma_n = \frac{h_w D_w^2}{h_n D_n^2} \gamma_w, \quad (53)$$

где D_w – средний диаметр погруженной части керна; D_n – средний диаметр всего керна.

Различия между D_w и D_n , как правило, малосущественны при использовании кольцевых буров типа ПИ-8 и играют роль лишь при малых диаметрах керна.

Изменчивость плотности воды, характерная для реальных условий, на результаты определений практически не влияет.

3.3. ОЦЕНКИ ПОГРЕШНОСТЕЙ МЕТОДОВ

Метод 1. Случайная погрешность. Зададимся условием, что случайная погрешность взвешивания не зависит от того, где производится взвешивание – в жидкости или в воздухе, и равна σ_m ; случайную погрешность контроля плотности жидкости обозначим σ_x . Используя формулу (50), получим выражение для оценки случайной погрешности σ_n результата определения γ_n :

$$\begin{aligned} \sigma_n &= \sqrt{\left(\frac{\partial \gamma_n}{\partial \gamma_x} \sigma_x\right)^2 + \left(\frac{\partial \gamma_n}{\partial M_b} \sigma_m\right)^2 + \left(\frac{\partial \gamma_n}{\partial M_x} \sigma_m\right)^2} = \\ &= \sqrt{\frac{M_b^2}{(M_b - M_x)^2} \sigma_x^2 + \frac{\gamma_c^2 (M_b^2 + M_x^2)}{(M_b - M_x)^4} \sigma_m^2} \end{aligned} \quad (54)$$

В относительной форме:

$$\sigma_n^{\text{отн}} = \frac{\sigma_n}{\gamma_n} = \sqrt{(\sigma_x^{\text{отн}})^2 + \frac{M_b^2 + M_x^2}{(M_b - M_x)^2} (\sigma_m^{\text{отн}})^2}, \quad (55)$$

где $\sigma_x^{\text{отн}}$ и $\sigma_m^{\text{отн}}$ – относительные значения погрешностей σ_x и σ_m .

Поскольку $(M_b^2 + M_x^2)$ всегда больше $(M_b - M_x)^2$, то даже при несущественном $\sigma_x^{\text{отн}}$ величина $\sigma_n^{\text{отн}}$ значительно превышает $\sigma_m^{\text{отн}}$, причем, это превышение возрастает с увеличением M_x .

Из этой закономерности следует, что при измерениях целесообразно стремиться к использованию жидкости с плотностью, максимально близкой к плотности льда. Во-вторых, целесообразно иметь низкое $\sigma_m^{\text{отн}}$.

Систематическая погрешность. Оценка систематической погрешности на основании формулы (3.1) приводит к выражению:

$$\Delta_n = \frac{M_b}{M_b - M_x} \cdot \Delta_x + \frac{\gamma_x M_b}{(M_b - M_x)^2} \cdot \Delta_{mb} - \frac{\gamma_x M_x}{(M_b - M_x)^2} \cdot \Delta_{mx}, \quad (56)$$

где Δ_n – систематическая погрешность результата измерения; Δ_x – систематическая погрешность задания плотности жидкости; Δ_{mx} – систематическая погрешность взвешивания в жидкости; Δ_{mb} – систематическая погрешность взвешивания в воздухе.

Следует отметить, что здесь рассматривается систематическая погрешность как *знаковая* характеристика, т.е. как изменчивость в результате воздействия некоторого неслучайного фактора. Если она неизвестна, то это *погрешность*, если известна, то вводится в результаты измерений как *поправка*. На эту тонкость обращается внимание потому, что в литературе часто встречается *интервальная* оценка систематической погрешности, т.е. как $\pm \Delta$. Дело в том, что *интервальной* оценке подлежат так называемые *неисключенные остатки систематической погрешности*, т.е. то, что остается после введения поправок. Здесь же в рассмотрении предполагается, что значения составляющих Δ неизвестны.

Составляющие Δ_x , $\Delta_{мж}$ и $\Delta_{мв}$ формируются преимущественно за счет влияния температуры во время измерений, а также за счет методики проведения измерений. В величины $\Delta_{мж}$ и $\Delta_{мв}$ дополнительно также входит систематическая погрешность используемых весов (например, смещение нуля). Однако, поскольку она остается одинаковой для обоих вариантов измерений, то ее влияние на Δ_n в значительной мере взаимно компенсируется. Это наглядно видно при представлении выражения (56) в относительной форме:

$$\begin{aligned} \Delta_n^{\text{отн}} &= \Delta_c^{\text{отн}} + \frac{M_x}{M_n - M_x} \Delta_{мж}^{\text{отн}} - \frac{M_x}{M_x - M_n} \Delta_{мв}^{\text{отн}} = \\ &= \Delta_x^{\text{отн}} + \frac{M_x}{M_n - M_x} (\Delta_{мж}^{\text{отн}} - \Delta_{мв}^{\text{отн}}) \end{aligned} \quad (57)$$

Как следует из приведенных выражений, наибольшее влияние на Δ_n оказывает систематическая погрешность задания плотности жидкости. А это, в свою очередь, требует учета ее температуры в момент измерений.

Рассмотрим температурную зависимость плотности одной из наиболее применяемых жидкостей – гептана C_7H_{16} (рис. 14).

Для диапазона $0...-10^\circ C$ температурный коэффициент плотности гептана составляет примерно $-0,06 \text{ \%}/K$. При необходимости обеспечивать измерения γ_n с систематической погрешностью, не превышающей $0,1 \text{ \%}$, тем самым, оказывается вполне достаточным контроль температуры в пределах $\pm 0,5 K$ (с запасом на учет погрешностей $\Delta_{мж}$ и $\Delta_{мв}$).

В свою очередь, это требует термостатирования образца льда перед началом определений – длительным выдерживанием его при температуре, равной задаваемой температуре гептана во время определений.

Наиболее целесообразно установить температуру близкой к $-7,5...-10^\circ C$, поскольку в этой области при соленостях льда порядка $2-3 \text{ \%}$ близок к нулю его температурный коэффициент объемного расширения, а также становится практически несущественным температурный коэффициент плотности ($<0,03 \text{ \%}/K$).

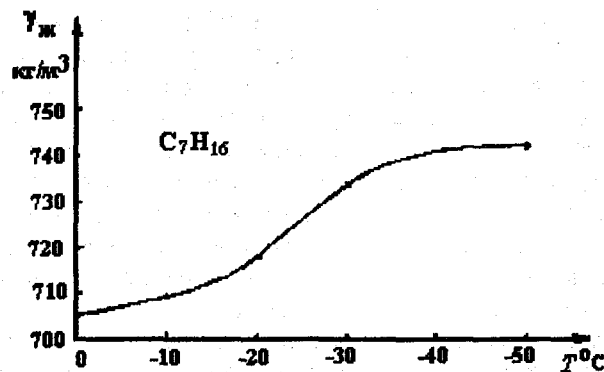


Рис. 14. Зависимость плотности гептана от температуры.

В составляющие $\Delta_{мж}$ и $\Delta_{мв}$ входит влияние креплений. Фактически это прибавка массы крепления к массе образца, т.е. в $\Delta_{мж}$ и в $\Delta_{мв}$ она присутствует со знаком "+". Однако, величина прибавки для обоих случаев различна. При измерениях в жидкости крепления попадают в нее, и прибавка в $\Delta_{мж}$ оказывается существенно меньшей по сравнению с $\Delta_{мв}$.

Различия между ними можно оценить через объем V_x и плотность γ_x той части креплений, которая при измерениях попадает в жидкость. Очевидно, тогда

$$\begin{aligned} \Delta_{мв} &= V_x \gamma_x + \Delta_x^0; \\ \Delta_{мж} &= V_x (\gamma_x - \gamma_c) + \Delta_c^0, \end{aligned} \quad (58)$$

где Δ_b^0 и Δ_x^0 – систематические составляющие других видов.

Величины Δ_b^0 и Δ_x^0 содержат, в основном, составляющую погрешности аналитических весов. В том случае, конечно, если выдерживается температурный режим измерений. Тем самым, для оценок влияния креплений будем считать Δ_b^0 и Δ_x^0 равным и их влиянием пренебрегаем.

В таком случае, подставив (58) в выражение (56), получим:

$$\Delta_n = \frac{M_b}{M_b - M_x} \Delta_x + \frac{\gamma_x V_x [M_b \gamma_x - (M_b \gamma_x + M_x \gamma_x)]}{(M_b - M_x)^2}, \quad (59)$$

Наличие знака "-" в числителе второго члена позволяет поставить условие минимизации влияния креплений:

$$\gamma_x = \frac{M_b}{M_b - M_x} \gamma_c, \quad (60)$$

Таким образом, крепления должны выполняться из материала, плотность которого γ_x превышает плотность жидкости в $M_b / (M_b - M_x)$ раз, т.е. примерно соответствует $(1,2-1,3)\gamma_c$ или, что равноценно: $\gamma_x = \gamma_n$.

Подбор специального материала с плотностью порядка 800 кг/м^3 и достаточной прочностью довольно затруднителен. Поэтому целесообразно изготовление креплений из тонких металлических трубок. Соотношением диаметра трубки и ее массы можно задавать любую требуемую эквивалентную плотность.

Метод 2. Случайная погрешность. В соответствии с формулой (51) выражение для случайной погрешности имеет вид

$$\sigma_n = \sqrt{\frac{\sigma_m^2}{V_n^2} + \frac{M_x^2}{V_n^4} \sigma_v^2 + \sigma_x^2}; \quad (61)$$

А в относительной форме:

$$\sigma_n^{\text{отн}} = \sqrt{\frac{(\sigma_m^{\text{отн}})^2}{\left(1 + \frac{\gamma_x V_n}{M_x}\right)^2} + \frac{(\sigma_v^{\text{отн}})^2}{\left(1 + \frac{\gamma_x V_n}{M_x}\right)^2} + \frac{(\sigma_x^{\text{отн}})^2}{\left(1 + \frac{M_x}{\gamma_x V_n}\right)^2}}, \quad (62)$$

где σ_m и $\sigma_v^{\text{отн}}$ – абсолютная и относительная случайные погрешности контроля объема образца соответственно.

Основной путь уменьшения σ_n , очевидно, состоит в уменьшении M_x , т.е. как и в предыдущем случае – за счет максимального приближения плотности жидкости к ожидаемой плотности льда.

Сравнивая выражения (62) и (55), можно отметить, что второй метод в рамках влияния случайных погрешностей обладает определенным преимуществом по сравнению с первым. В выражении (62) коэффициент при $(\sigma_x^{\text{отн}})^2$ близок к единице, т.е. влияние $\sigma_x^{\text{отн}}$ на $\sigma_n^{\text{отн}}$ в обоих случаях практически одинаково. Влияние же остальных членов существенно различно. Коэффициент при $(\sigma_m^{\text{отн}})^2$ в выражении (55), как уже отмечалось, больше единицы и составляет 1,2–1,5. Коэффициенты при $(\sigma_m^{\text{отн}})^2$ и $(\sigma_v^{\text{отн}})^2$ в выражении (62) составляет величину порядка 0,01–0,02 при $\gamma_x/\gamma_n \approx 0,8–0,9$, т.е. для получения одинаковых погрешностей $\sigma_n^{\text{отн}}$ в методе 2 составляющие $\sigma_m^{\text{отн}}$ и $\sigma_v^{\text{отн}}$ могут почти на порядок превышать $\sigma_m^{\text{отн}}$ в методе 1.

Систематическая погрешность. Из формулы (51) найдем выражение для систематической погрешности:

$$\Delta_n = \frac{\Delta_m}{V_n} - \frac{M_x}{V_n^2} \Delta_v + \Delta_x, \quad (63)$$

В относительной форме:

$$\Delta_n^{\text{отн}} = \frac{\Delta_m^{\text{отн}}}{1 + \frac{\gamma_x V_n}{M_x}} - \frac{\Delta_v^{\text{отн}}}{1 + \frac{\gamma_x V_n}{M_x}} + \frac{\Delta_x^{\text{отн}}}{1 + \frac{M_x}{\gamma_x V_n}}, \quad (64)$$

где Δ_v и $\Delta_v^{\text{отн}}$ – абсолютная и относительная погрешности задания объема образца; Δ_m и $\Delta_m^{\text{отн}}$ – абсолютная и относительная систематические погрешности взвешивания в жидкости.

Сравнивая выражения (64) и (57), можно отметить, что они практически равноценны. Коэффициент при $\Delta_x^{\text{отн}}$ близок к единице, а коэффициенты при $\Delta_m^{\text{отн}}$ и $\Delta_v^{\text{отн}}$ составляют примерно 0,1 аналогично коэффициенту при $\Delta_{\text{мж}}$ и $\Delta_{\text{мв}}$ в выражении (57).

Влияние креплений образца проявляется, как и в первом методе, в систематических составляющих, которые входят здесь в величины Δ_m и Δ_x . При самостоятельном анализе их влияния, т.е. при пренебрежении остальными составляющими в Δ_m и Δ_v , выражение (63) может быть записано в виде:

$$\Delta_n = \Delta_x + \frac{V_x(\gamma_x - \gamma_{\text{ж}})}{V_n} - \frac{M_{\text{ж}}V_x}{V_n^2}, \quad (65)$$

где V_x – объем части крепления, погруженной в жидкость; γ_x – плотность материала креплений.

Из выражения (65) легко находится условие минимизации влияния креплений:

$$\gamma_x = \gamma_{\text{ж}} + \frac{M_{\text{ж}}}{V_x}, \quad (66)$$

Поскольку $M_{\text{ж}} = V_n(\gamma_n - \gamma_{\text{ж}})$, то это сводится к равенству $\gamma_x = \gamma_n$.

Таким образом, в рамках влияния систематических погрешностей методы 1 и 2 оказываются равноценными.

Метод 3. Случайная погрешность. Исходя из формулы (52), выражения для абсолютной и относительной погрешностей имеют вид:

$$\sigma_n = \sqrt{\frac{\gamma_w^2}{h_n^2} \sigma_w^2 + \frac{h_w^2 \gamma_w^2}{h_n^4} \sigma_h^2 + \frac{h_w^2}{h_n^2} \sigma_\gamma^2}, \quad (67)$$

$$\sigma_n^{\text{отн}} = \sqrt{(\sigma_w^{\text{отн}})^2 + (\sigma_h^{\text{отн}})^2 + (\sigma_\gamma^{\text{отн}})^2}, \quad (68)$$

где σ_w и $\sigma_w^{\text{отн}}$ – абсолютная и относительная погрешности измерения глубины погружения льда в воду, соответственно; σ_h и $\sigma_h^{\text{отн}}$ – погрешности измерения толщины льда; σ_γ и $\sigma_\gamma^{\text{отн}}$ – погрешности от изменчивости плотности воды.

Величина $\sigma_\gamma^{\text{отн}}$ в типичных условиях измерений составляет не более 1×10^{-3} и по сравнению с другими составляющими ею обычно можно пренебречь. Основную трудность представляют достаточно точные измерения толщины h_n и глубины h_w . Для обеспечения $\sigma_n^{\text{отн}}$ порядка 0,2–0,3 % погрешности σ_w и σ_h при толщине льда 50–70 см не должны превышать ± 1 мм. С уменьшением толщины эти требования ужесточаются.

Таким образом, если для натуральных условий, где измерения начинаются обычно при толщинах льда более 40 см, этот метод при своей несом-

ненной простоте оказывается достаточно качественным, то для условий опытового бассейна с моделированным льдом ($h_n = 6-10$ см) его применение в "ручном" варианте нецелесообразно.

Однако, следует отметить, что это пока единственный метод, позволяющий автоматизировать процесс измерений.

Систематическая погрешность. Выражения для систематической погрешности могут быть представлены в виде:

$$\Delta_n = \frac{\gamma_w}{h_n} \Delta_w + \frac{h_w}{h_n} \Delta_\gamma - \frac{h_w \gamma_w}{h_n^2} \Delta_h; \quad (69)$$

$$\Delta_n^{\text{отн}} = \Delta_\gamma^{\text{отн}} - \Delta_h^{\text{отн}},$$

где Δ_w и $\Delta_w^{\text{отн}}$ – абсолютная и относительная систематические погрешности определения глубины погружения льда в воду; Δ_n и $\Delta_n^{\text{отн}}$ – аналогичные погрешности определения толщины льда; Δ_γ и $\Delta_\gamma^{\text{отн}}$ – аналогичные погрешности учета плотности.

Как следует из выражений (69), систематические погрешности играют в этом методе меньшую роль, чем случайные, поскольку основные из них (Δ_w и Δ_n) в значительной мере взаимно компенсируют друг друга.

3.4. ПУТИ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ МЕТОДОВ ИЗМЕРЕНИЯ ПЛОТНОСТИ ЛЬДА

Компенсационный метод повышенной точности. Как следует из выражений для погрешностей у первого и второго методов, они существенно уменьшаются при близости значений плотности образца и плотности жидкости. Это приобретает особенно важное значение во втором методе, где снижение $M_{ж}$ до нуля превращает знаменатель коэффициентов при $\sigma_w^{\text{отн}}$ и $\sigma_\gamma^{\text{отн}}$ в бесконечность (62), т.е. практически устраняет их влияние на результирующую случайную погрешность.

Выравнивание плотностей может быть реализовано в процессе измерений путем смешивания жидкостей с различными плотностями, например, легкой и тяжелой фракцией бензина, или гептана C_7H_{16} и ундекана $C_{11}H_{24}$.

Устройство для реализации метода выравнивания, кроме аналитических весов и термостатированного сосуда, в котором производится взвешивание образца льда, содержит две калиброванные химические бюретки, заполненные выбранными жидкостями разных плотностей. При взвешивании добавлением более плотной жидкости из бюретки в стакан с образцом добиваются нулевого положения аналитических весов. По количеству использованных жидкостей определяют среднюю плотность смеси. Плотность образца льда считают равной плотности смеси.

Метод снижения погрешностей путем контроля плотности жидкости. Влияние систематических изменений плотности используемой жидкости (за счет изменчивости температуры, загрязнений и т.д.) сказывается

на систематических погрешностях обоих методов. Для снижения этого влияния целесообразен контроль $\gamma_{ж}$, в частности, путем предварительного взвешивания образца с эталонной плотностью.

Такой образец выполняется в виде герметичного металлического контейнера заданной массы и объема. Наилучшим материалом для изготовления образца является элинвар или инвар. Температурный коэффициент линейного расширения элинвара составляет $0,5 \times 10^{-6} \text{K}^{-1}$, инвара $-1,5 \times 10^{-6} \text{K}^{-1}$. Столь низкие значения коэффициентов гарантируют высокую стабильность объема.

Достаточно качественным является также эталон, изготовленный из стали. Ее температурный коэффициент $K_L = 16,0 \times 10^{-6} \text{K}^{-1}$. Если образец выполнен в виде куба, например, с длиной ребра 50 мм, то его объем равен 125 см^3 при 0°C . При изменениях температуры от 0 до -30°C изменение длины ребра составит $\Delta L = K_L \Delta T = -0,024 \text{ мм}$. При этом объем изменится на $0,18 \text{ см}^3$, а величина $\Delta V^{\text{отн}} = \Delta V / V$ составит 0,14 %. Поскольку реальная изменчивость температуры обычно намного меньше 30 К, то и реальное $\Delta V^{\text{отн}}$ существенно меньше 0,1 %, что вполне достаточно для практических целей.

Метод измерений с заглублением образца в воду градуированной нагрузкой. В качестве основы здесь использован метод 3. Его основные недостатки связаны, в основном, с трудностями достаточно качественного определения толщины льда и глубины его погружения в воду. В данном методе эти трудности устраняются за счет использования внешней градуированной нагрузки, полностью заглубляющей образец льда (рис. 15).

После достижения полного погружения величина нагрузки стабилизируется, что соответствует отсчетному значению P (рис. 15 в).

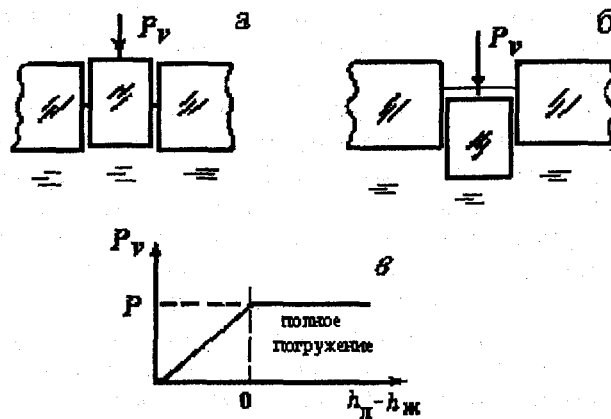


Рис. 15. Схема определений плотности с полным погружением образца льда в воду:

а - исходное положение; б - полное погружение; в - результат измерений.

Плотность льда определяется по формуле:

$$\gamma_n = \gamma_w - \frac{4P}{\pi D^2 h_n}, \quad (70)$$

где h_n – толщина льда; D – диаметр образца.

Наиболее целесообразно формирование образца за счет использования цилиндрической вставки, вмораживаемой в лед, и ее последующего подогрева, например, с помощью вплавленной сетки. Прогрев здесь может быть достаточно слабым, чтобы всего лишь обеспечить свободное скольжение наружной поверхности вставки относительно окружающего льда.

Случайная погрешность метода может быть оценена по выражению

$$\sigma_n = \sqrt{\sigma_\gamma^2 + \frac{16}{\pi^2 D^4 h_n^2} \sigma_p^2 + \frac{64 P^2}{\pi^2 D^6 h_n^2} \sigma_D^2 + \frac{16 P^2}{\pi^2 D^4 h_n^4} \sigma_h^2}, \quad (71)$$

а в относительной форме:

$$\begin{aligned} \sigma_n^{\text{отн}} &= \sqrt{\frac{(\sigma_\gamma^{\text{отн}})^2}{\left(1 - \frac{4D}{\pi D^2 h_n \gamma_w}\right)^2} + \frac{(\sigma_p^{\text{отн}})^2}{\left(\frac{\pi D^2 h_n \gamma_w}{4P} - 1\right)^2} + \frac{4(\sigma_D^{\text{отн}})^2}{\left(\frac{\pi D^2 h_n \gamma_w}{4P} - 1\right)^2} + \frac{(\sigma_h^{\text{отн}})^2}{\left(\frac{\pi D^2 h_n \gamma_w}{4P} - 1\right)^2}} = \\ &= \sqrt{k_1 (\sigma_\gamma^{\text{отн}})^2 + k_2 (\sigma_p^{\text{отн}})^2 + k_3 (\sigma_D^{\text{отн}})^2 + k_4 (\sigma_h^{\text{отн}})^2}. \quad (72) \end{aligned}$$

Значения коэффициентов оказываются следующими: $k_1 \cong 1,1$; $k_2 \cong 0,02$; $k_3 \cong 0,08$; $k_4 \cong 0,02$ (при $\gamma_n \cong 900 \text{ кг/м}^3$).

Таким образом, составляющая с минимальной изменчивостью ($\sigma_\gamma^{\text{отн}}$) здесь возрастает незначительно, а влияние остальных составляющих резко уменьшено малыми значениями коэффициентов (сравните с формулами (67) и (68)).

Максимальное влияние оказывает погрешность задания диаметра образца. Однако с увеличением диаметра это влияние существенно уменьшается (поскольку уменьшается $\sigma_D^{\text{отн}}$ при сохранении σ_D). Результирующая погрешность $\sigma_n^{\text{отн}} = 0,1-0,2 \%$ сравнительно легко обеспечивается при $D=20-30 \text{ см}$ (при этом должно быть $\sigma_D = \pm 1-2 \text{ мм}$).

ГЛАВА 4. АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОСНОВНЫХ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МОДЕЛИРОВАННОГО ЛЬДА

4.1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЛЬДА

Принципы автоматизации

Как отмечалось ранее, для обеспечения высокого качества испытаний в ледовом опытовом бассейне необходим надежный контроль основных физико-механических свойств моделированного льда.

К основным свойствам, требующим оперативного контроля, в первую очередь относятся:

- предел прочности льда на изгиб при температуре проведения испытаний;
- плотность льда при той же температуре.

Дополнительно для определения плотности льда и контроля структуры намораживаемого льда целесообразно оперативное определение плотности поверхностного слоя воды в бассейне.

Наиболее целесообразно автоматизированное совместное определение этих свойств непосредственно перед проведением испытаний. Возможность таких определений создает сочетание следующих ранее рассмотренных методов.

Прочность льда на изгиб определяется нагружением консоли (клавиши) выпиленной или выплавленной в ледяном покрове. Для качественного определения здесь необходимо надежное задание размеров консоли

Плотность льда определяется методом полного погружения образца заданных размеров в исходную воду бассейна (раздел 3.4).

Плотность воды определяется путем полного погружения в эту же воду эталонного образца из инвара или стали с известной эквивалентной плотностью (раздел 3.4).

Все три операции осуществляются последовательно. Для их качественного выполнения целесообразна дополнительная операция. Она состоит в том, что в ледовый покров бассейна вмораживается прямоугольная форма из политетрафторэтилена, задающая размеры будущей консоли (клавиши) для испытаний – задатчик формы (рис. 16). Положение верхней кромки задатчика формы должно совпадать с поверхностью воды в бассейне.

В стенке задатчика формы впрессован нагревательный элемент – изолированная сетка, покрытая слоем фольги и подключаемая к источнику тока. Вертикальный размер задатчика формы превышает ожидаемую толщину льда.

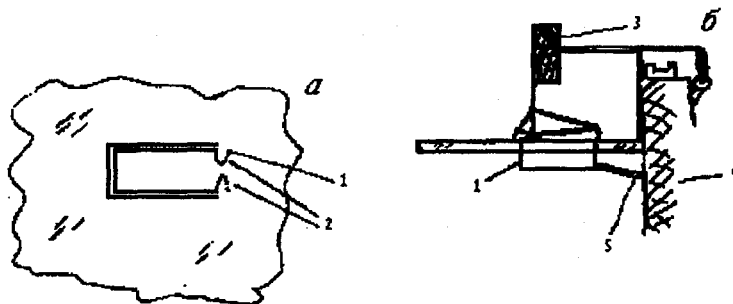


Рис. 16. Схема установки:

1 – задатчик формы; 2 – пропилы в формируемом образце льда; 3 – устройство нагружения; 4 – стенка бассейна; 5 – опора.

Конструкция стенок задатчика такова, что при подключении тока нагрева к сетке происходит прогрев и плавление льда на внешней поверхности стенок (сетки с фольгой расположены между тонкими внешними стенками из политетрафторэтилена и толстыми внутренними; соотношение толщин, например, 1:5). Поскольку плавление во внутреннем объеме отсутствует, то объем образца определяется объемом задатчика и случайная погрешность задания объема оказывается незначительной.

При намораживании образца льда внутри искусственной формы следует учитывать следующие важные особенности.

Прежде всего, все три стенки задатчика формы (см. рис. 16) должны располагаться строго вертикально. Это обусловлено необходимостью устранения искажений толщины образующегося образца льда. Дело в том, что тепловые потоки по поверхности бассейна должны формироваться только по вертикали – это одно из основных условий намораживания однородного по толщине ледяного покрова. Если стенки задатчика будут смещены относительно вертикали, то тем самым они создадут тепловой экран для нижней части образца, и его толщина в вертикальном сечении окажется неоднородной.

Однако следует отметить, что условие вертикальности противоречиво для торцевой и боковых стенок. При слабом выплавлении (зазор порядка 0,2–0,3 мм) это условие затрудняет свободный поворот консоли на предельный угол деформации при испытании на изгиб. В связи с этим целесообразно выполнение стенок с переменной площадью сечения (возрастание снизу вверх), причем, внутренняя поверхность при этом должна оставаться вертикальной.

Следующая особенность состоит в том, что теплопроводность материала задатчика формы должна быть не большей, чем теплопроводность льда. Это связано с необходимостью устранения дополнительных потоков холода через торцы пластин, что может повлиять на неоднородность толщины об-

Таблица 8

Характеристики используемых материалов

Материал	F , эрг/см ²
Нержавеющая сталь	2000
Медь	1650
Алюминий	900
Олово	700
Эпоксидный стеклопластик	100
Краска	70
Политилгидросилоксан	30
Полиэтилен	28
Политетрафторэтилен	19
Перфторпарафин	9

разца в вертикальном сечении, обратную по характеру, чем в предыдущем случае, т.е. у краев образца толщина будет больше, чем в середине.

Противоположный характер влияния теплопроводности и наклонов позволяет при реальном материале пластин, даже избыточно теплопроводном, выбрать оптимальные условия намораживания образца.

Как отмечается в работах [3, 31], влияние материала распространяется до расстояний в несколько сантиметров, а его характер и интенсивность зависят от величины свободной поверхностной энергии.

Максимальное влияние оказывают материалы с $F \approx 100$ эрг/см², к которым, в частности, относятся эпоксидный стеклопластик (табл. 9).

Получаемая структура льда также зависит от расстояния до подложки и от материалов подложки. Для морского льда можно пренебречь влиянием подложки лишь с $F_2 = 19$ эрг/см² на расстояниях, превышающих 15 мм.

Из рассмотренного следует, что в качестве материала для пластин задатчика наиболее целесообразно выбирать материалы с $F \approx 5-30$ эрг/см² и даже в этом случае учитывать искажения, вносимые во внешние слои намораживаемого образца в пределах до 10–15 мм.

Эти искажения влияют преимущественно на прочность льда. Их влияние на плотность незначительно: изменчивость плотности в “искаженном” слое не превышает 0,2–0,3%, а при соотношении размеров “искаженного” слоя и размеров образца порядка 1/5 результирующие искажения плотности не превышают 0,05%, что может не учитываться.

Наиболее целесообразный путь учета влияния искажений на прочность состоит в том, что у основания консоли перед началом испытаний выполняются пропилы треугольной формы, обращенные вершинами друг к другу (см. рис. 16). Пропилы выполняются на всю толщину льда. Глубина пропилов устанавливается превышающей размеры “искаженного” слоя, т.е. при задатчике формы из политетрафторэтилена – 1,2 + 1,5 см. Дополнительным достоинством наличия пропилов является то, что они способствуют стабилизации поверхности разрушения при обламывании консо-

ли благодаря концентрации напряжений у вершин, тем самым обуславливают снижение случайной погрешности определений.

Стабилизация поверхности разрушения способствует также снижению случайной погрешности определений плотности, поскольку при этом снижаются вариации получаемого объема образца (о влиянии объема на результаты определений плотности погружением в исходную воду бассейна см. также раздел 3.4).

Влияние задатчика формы на результаты определений плотности состоит в появлении систематической погрешности, обусловленной различиями плотности задатчика и исходной воды. Ввиду весьма малой изменчивости плотности вода от опыта к опыту, и тем более, при ее контроле, эта погрешность легко определяется (погружением задатчика в воду при отсутствии образца) и устраняется из результатов.

Таким образом, рассмотренная технология автоматизированного совместного определения основных физико-механических свойств льда и воды в опытовом бассейне позволяет получать в процессе одного испытания значения $\sigma_{\text{л}}$ и $\gamma_{\text{л}}$ у льда и производить контроль плотности $\gamma_{\text{в}}$ воды. При учете выделенных выше особенностей случайные погрешности определений $\sigma_{\text{л}}$ и $\gamma_{\text{л}}$ не превышают погрешностей известных методов.

Кроме возможности совместных определений $\sigma_{\text{л}}$ и $\gamma_{\text{л}}$, рассмотренная технология обладает весьма важным достоинством, связанным с проведением измерений при температурах льда и воды, соответствующих условиям испытаний моделей. Это практически полностью устраняет методические погрешности (случайные и систематические), обусловленные в известных "ручных" методах тем, что образец льда вынимается из своих естественных условий. Ведь при вынимании нарушается температурный режим, что способствует термическому микрорастрескиванию поверхностных слоев, убирается влияние абсорбции окружающей воды на прочность, что нецелесообразно, и т. д.

Основные конструктивные характеристики

Устройство, реализующее рассмотренную технологию определений, содержит:

- узел нагружения с датчиком развиваемых усилий;
- задатчик формы образца льда;
- источник тока нагрева задатчика формы;
- эталонный образец с эквивалентной плотностью порядка $0,9 \text{ кг/дм}^3$,

Узел нагружения содержит опорную раму, крепящуюся к стенке бассейна, на которой установлен электродвигатель с редуктором, обеспечивающим перемещение по вертикали нагружающей штанги. При испытаниях наконечник штанги опирается на свободный конец, сформированный ледяной консолью. Целесообразно усложнение формы наконечника, по сравнению с общепринятой. Поскольку необходимо не только разрушение консоли, но и полное погружение ее в воду, то наконечник имеет

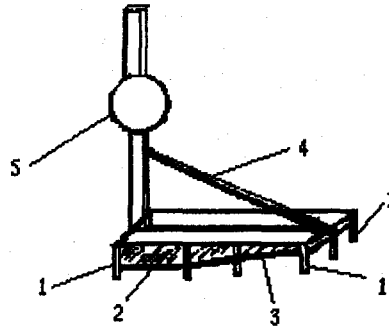


Рис. 17. Схема узла нагружения:

1 – стойка; 2 – горизонтальный участок; 3 – наклонный участок; 4 – ребро; 5 – измерительный преобразователь.

общие размеры не меньше размеров задатчика формы (рис. 17) и снабжен по периметру ограничивающими стенками или стойками 1, не позволяющими образцу льда “выскользнуть” при нагружении. Нижняя (упорная) поверхность наконечника имеет горизонтальный 2 и наклонный 3 участки. Нагружение для разрушения консоли обеспечивается только горизонтальным участком. Угол наклона участка 3 выбирается превышающим предельно возможный угол деформации консоли. После обламывания консоли прижимается к наклонному участку (за счет архимедовой силы) и погружается в воду уже в наклонном положении. Обеспечение жесткости конструкции наконечника для этих условий обеспечивается дополнительным ребром 4. Следует отметить, что при слабом выплавлении (зазор 0,2–0,3 мм) наличие стоек 1 является отрицательным фактором, поскольку не позволит обеспечить свободное перемещение наконечника. Для таких условий целесообразно ограничить форму наклонной 3 и горизонтальной 2 площадками, а размеры выбрать не превышающими размеров консоли.

В разрыве нагружающей штанги установлен измерительный преобразователь развиваемого усилия 5, например, в виде упругого кольца с наклеенными тензорезисторами.

Здесь следует отметить, что обычно применяемые в подобных конструкциях тензорезисторные преобразователи усилий обладают довольно высокой погрешностью (0,5–1,0%). Более целесообразно использование резонансных преобразователей: механоэлектрических – в виде резонансной пластины или струны, закрепляемой внутри упругого кольца (погрешность 0,2 %); или пьезоэлектрических – в виде аналогичной пластины пьезокварцевого резонатора (погрешность 0,01–0,05 %).

Задатчик формы образца льда, как уже отмечалось, имеет П-образную форму (см. рис. 16) и состоит из трех состыкованных между собой пластин из гидрофобного материала, например, из политетрафторэтилена. Конструкция каждой гидрофобной пластины двухслойная, причем, толщина внутреннего слоя превышает толщину внешнего. Соотношение тол-

щин устанавливается в пределах 5/1–3/1. Между обоими слоями располагается плоский нагревательный элемент, например, в виде сетки из изолированного провода, помещенной между двумя слоями фольги. Наличие фольги обеспечивает равномерное распределение плотности теплового потока по поверхности каждой пластины.

Размеры задатчика формы устанавливаются из следующих соображений.

Усилие P_γ , необходимое для полного погружения образца льда вместе с задатчиком формы в воду, определяется по формуле:

$$P_\gamma = \Delta(2l + b_1 + 2\Delta)h(\gamma_w - \gamma_a) + lb_1h(\gamma_w - \gamma_n), \quad (73)$$

где Δ – толщина стенок задатчика формы; l – длина получаемого образца льда; b_1 – ширина образца льда; h – толщина льда; γ_w – плотность воды; γ_a – эквивалентная плотность задатчика формы (определяется отдельным погружением в воду); γ_n – моделируемая плотность льда.

Усилие P_k , требуемое для обламывания консоли, следующее:

$$P_k = \frac{\sigma_{nm} b_2 h^2}{6l} = \frac{\sigma_{nn} b_2 h^2}{6Kl}, \quad (74)$$

где σ_{nm} – прочность на изгиб моделированного льда; b_2 – ширина основания консоли (после выполнения пропилов); σ_{nn} – принятая средняя прочность на изгиб натурального льда; K – коэффициент моделирования.

Выбор размеров обуславливается, в первую очередь, требованиями к испытываемой консоли, в частности, известными из литературы соотношениями: $l \geq 6b_2$; $b_2 \approx h$, во-вторых, целесообразностью условия $P_k \approx P_\gamma$. При этом условии обеспечиваются малые и близкие между собой значения абсолютной погрешности измерения P при заданном классе точности датчика силы. Третье требование, выявленное в главе 1, состоит в необходимости обеспечивать глубину пропилов порядка 12–15 мм, в результате получается условие $(b_1 - b_2) \geq 25$ мм.

Из выражения (73) следует также целесообразность условия $\gamma_a \approx \gamma_w$, которое позволяет практически устранить систематическую погрешность влияния задатчика формы.

При необходимости полной автоматизации процесса измерений целесообразно снабдить узел нагружения двумя подогреваемыми пуансонами треугольной формы, расположенными над требуемыми вырезами у основания консоли и перемещаемыми по вертикали. Наконечники пуансонов должны иметь переменную площадь сечения, возрастающую снизу вверх до требуемых размеров пропилов, а нагревательный элемент трубчатого типа должен располагаться по центральной оси пуансонов. Такая конструкция обеспечивает максимальные значения температуры в области наконечников и ее понижение в основной области, что способствует повышению качества выполняемых пропилов.

Рассмотренная конструкция при всей своей простоте позволяет устранить трудоемкие ручные операции по контролю основных физико-механических свойств моделируемого льда, что повышает достоверность получаемых результатов и снижает затраты времени на подготовку к испытаниям моделей.

4.2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТОЛЩИНЫ И ПЛОТНОСТИ МОДЕЛИРОВАННОГО ЛЕДЯНОГО ПОКРОВА

Одной из важнейших характеристик моделируемого ледяного покрова является его толщина. Оперативный контроль толщины необходим в процессе намораживания. Традиционный метод определения толщины состоит в просверливании (пробивании) лунки во льду и в выполнении прямых измерений с помощью рейки у края этой лунки. Метод обладает низкой оперативностью и нарушает сплошность формируемого ледяного покрова.

Иногда применяется вмораживание измерительной рейки в лед. Конструкция вмораживаемой рейки существенно отличается от обычной. Ведь рейка должна перемещаться, чтобы в процессе измерений ее нижний упор можно было прижать к нижней поверхности ледяного покрова. Для этого рейка вставляется внутрь дополнительной неподвижной формы, которая, собственно, и вмораживается в лед. В качестве материалов рейки и формы наиболее целесообразно использовать гидрофобные материалы, например, тефлон.

Известен также автоматический метод непрерывного контроля толщины льда, в котором используется измерительный преобразователь (ИП) в виде катушки индуктивности с однослойной спиральной обмоткой. Катушка вмораживается в лед, а ее выводы подключаются к измерителю индуктивности. Физическая сущность метода состоит в том, что часть катушки, находящаяся в воде, шунтируется вследствие высокой электрической проводимости воды, и значения измеряемой индуктивности оказывается связанным с размерами той части катушки, которая находится в толще льда. При этом лед рассматривается как диэлектрик без активных потерь.

Неучет активных потерь играет основную роль в формировании погрешности метода. Действительно, объемная электрическая проводимость льда может изменяться от $1,5 \times 10^{-3}$ до 5×10^{-3} $\text{ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$ [3]. Это данные для натурального льда. У моделированного льда объемная проводимость может быть существенно выше. Эквивалентная схема индуктивного преобразователя, помещенного в среду с конечной проводимостью, упрощенно может быть представлена в виде параллельно соединенных индуктивности L и активного сопротивления R_n . Тогда модуль комплексного сопротивления ИП будет равен

$$|Z_{\text{ин}}| = \frac{\omega L R_n}{\sqrt{R_n^2 + \omega^2 L^2}},$$

где ω – круговая частота питающего напряжения ИП.

Относительная изменчивость

$$\frac{\Delta |Z_{\text{ип}}|}{|Z_{\text{ип}}|} = \frac{R_n^2 \Delta L}{L(R_n^2 + \omega^2 L^2)} + \frac{\omega^2 L^2}{R_n^2 + \omega^2 L^2} \cdot \frac{\Delta R_n}{R_n}$$

Считая, что $R_n \approx 3\omega L$, а $\Delta R_n / R_n \approx \Delta \sigma_n / \sigma_n$, где σ_n – удельная электрическая проводимость, получим, что погрешность за счет неучета изменчивости σ_n может достигать $\pm 5\%$.

Это значение получено при объемной проводимости, характерной для натурного льда. Моделированный лед, как правило, имеет намного большую электрическую проводимость и соответственно, большие потери.

Представляется более перспективным емкостный метод [1], где активные потери во льду не влияют на результат измерений. В этом методе ИП выполнен как конденсатор, одной из обкладок которого является проводящая вода. ИП вмораживается в лед и изменение толщины льда приводит к изменению площади этой обкладки и, соответственно, – к изменению емкости конденсатора. В емкостном методе сравнительно несложными конструктивными приемами (преимущественно – за счет увеличения площади контактирования с водой) может быть получена на порядок более высокая чувствительность, чем в предыдущем случае. При этом благодаря устранению влияния проводимостей льда и воды случайная погрешность измерений уменьшается до значений $\pm 0,1-0,5\%$.

Наряду с определениями толщины моделированного льда очень важное значение имеет автоматическое определение его плотности. Емкостный метод позволяет производить одновременные определения толщины и плотности [1] путем дополнительных измерений глубины погружения льда в воду. Плотность определяется по формуле

$$\rho_n = \frac{h_w \rho_w}{h_n},$$

где h_w – глубина погружения льда в воду; h_n – толщина льда; ρ_w – плотность воды.

Конструкция устройства, реализующего метод, разработана в двух основных вариантах [1]. Наиболее интересен для условий бассейна вариант, позволяющий производить измерения при наличии подпора воды. В этом варианте в лед бассейна вмораживают два кольцевых чувствительных элемента 1 и 2 (рис. 18). Каждый из элементов выполнен в виде сетки из изолированного провода, расположенной по образующей кольца и наложенной на прочную основу. Оба элемента соосны и имеют разные диаметры. Длина образующей каждого кольца превышает максимально возможную толщину льда. По оси обоих чувствительных элементов устанавливается опорный элемент 3 в виде металлического штыря с контактной площадкой 4 на нижнем конце. Площадка в процессе измерений должна полностью находиться в воде подо льдом.

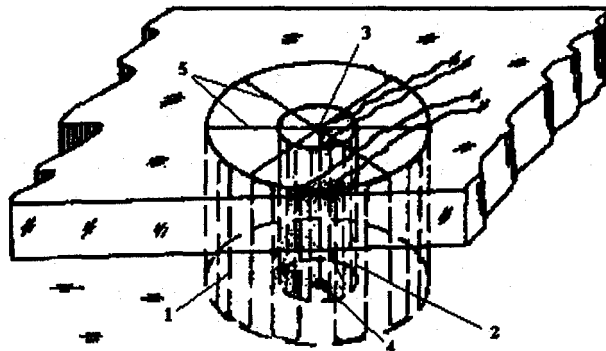


Рис. 18. Конструкция вмораживаемых измерительных преобразователей устройства.

Условные обозначения указаны в тексте.

Все элементы скреплены между собой легкой рамой 5, опирающейся после замораживания на поверхность ледяного покрова или кинематически связанной со стенкой бассейна.

Скрепляющая чувствительные элементы рама должна быть выполнена из полых трубок, создающих плавучесть, тем самым, устройство может быть установлено в требуемой точке перед началом замерзания.

Каждая из сеток чувствительных элементов имеет два вывода. Оба вывода используются только в наружном элементе, во внутреннем используется только один из выводов.

Один из выводов каждого чувствительного элемента 1 и 2 совместно с выводом от опорного элемента 3 подключены к самостоятельным измерительным преобразователям 4 и 5 в виде резистивно-емкостных мостов типа моста Соти (рис. 19).

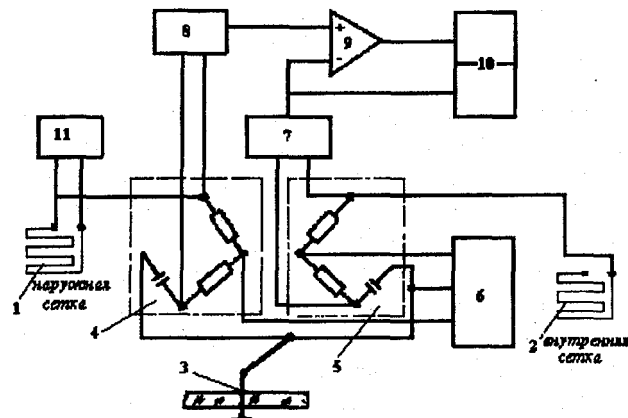


Рис. 19. Функциональная схема измерительной части установки.

Условные обозначения указаны в тексте.

Диагонали питания обоих мостов подключены к выходам генератора 6, а выходные диагонали – к отдельным узлам выпрямления напряжения 7 и 8. Выход узла 7 подсоединен к инвертирующему входу дифференциального узла 9 и одновременно к входу двухканального регистратора напряжения 10. Выход узла 8 подсоединен к неинвертирующему входу узла 9, а выход узла 9 – ко второму входу регистратора 10.

Оба вывода сетки наружного чувствительного элемента дополнительно подсоединены к источнику напряжения нагрева 11.

Принцип действия устройства состоит в следующем.

Перед началом измерений подается напряжение нагрева на сетку наружного элемента, что приводит к протаиванию кольцевой лунки. Момент протаивания фиксируется по резкому изменению характеристик элемента. При наличии гидростатического подпора воды выплавленный образец льда совместно с чувствительными и опорным элементами подвсплывает. По внутреннему кольцевому элементу, который остается замороженным, определяется толщина льда, а по наружному – положение поверхности воды относительно верхней кромки льда.

Действие чувствительных элементов основано на следующем. Поскольку в сетках используется изолированный провод, то между ним и электропроводной водой создается распределенная емкость. Величина этой емкости, естественно, зависит от уровня покрытия сетки водой. Для внутреннего элемента этот уровень совпадает с нижней поверхностью льда, а для наружного – является уровнем погружения выплавленного образца льда в воду. По двум этим величинам и известной плотности воды в соответствии с формулой (52) определяется плотность льда.

Возможности автоматических (в данном случае с помощью распределенной емкости) изменений уровня электропроводной жидкости существенно превышают “ручные” возможности (с помощью мерной рейки). При “гладкой” поверхности воды может быть обеспечена абсолютная погрешность $\pm 0,2$ мм (шероховатая нижняя поверхность льда “сглаживается” за счет естественного осреднения распределенной емкости по окружности чувствительного элемента). Как следует из выводов по анализу погрешностей, такое значение оказывается вполне приемлемым для практических целей.

СПИСОК РЕКОМЕНДОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. А.с. № 1295234 А1, СССР. МКИ 4 G 01 F 23/26. Устройство для измерения параметров ледяного покрова (его варианты)/И.А. Степанюк. –№ 3830937/24-10. –Заявл. 25.12.84. –Опубл. 07.03.87. –Бюлл. изобр. СССР, 1987, № 9.
2. *Ассур А.* Некоторые перспективные направления исследования в механике льда // *Физика и механика льда*. –М.: Мир, 1983. –С.13–23.
3. *Богородский В.В., Гаврило В.П.* Лед. –Л.: Гидрометеониздат, 1980. –384 с.
4. *Браун Дж.Х.* Упругость и прочность морского льда // *Лед и снег*. –М.: Мир, 1966. –С. 51–80.
5. *Бутягин И.П.* Прочность льда и ледяного покрова. –Новосибирск: Наука, 1966. –153 с.
6. *Войтковский К.Ф.* Задачи инженерной гляциологии // *Механика и физика льда*. –М.: Наука, 1983. –С.58–65.
7. *Гаврило В.П., Гриценко В.Д., Лоцилов В.С.* К вопросу о натуральных исследованиях морфологии торосов на арктических льдах и возможности моделирования процессов торошения // *Труды ААНИИ*. –1974. –Т.316. –С.70–76.
8. *Гаврило В.П., Гусев А.В., Никитин В.А.* Исследование механических характеристик льдов Берингова моря // *Труды ААНИИ*. –1974. –Т.324. –С.63–68.
9. *Гаврило В.П., Никитин В.А.* Оценка прочности морского льда при изгибе по данным измерения в нем скорости звука // *Труды координационных совещаний по гидротехнике*. –1976. –Вып. 111. –С.193–195.
10. *Голландцева А.Н., Глухова Н.В.* Исследование структуры морского льда // *Труды ААНИИ*. –1971. –Т. 300. –С.205–209.
11. *Гольдштейн Р.В., Осипенко Н.М.* Механика разрушения и некоторые вопросы разрушения льда // *Механика и физика льда*. –М.: Наука, 1983. –С.65–94.
12. ГОСТ 11.011-83. Правила определения оценок и доверительных границ для параметров гамма-распределения. –М.: Изд-во стандартов, 1985. –50 с.
13. ГОСТ 8.011-72. Показатели точности измерений и формы представления результатов измерений. –М.: Изд-во стандартов, 1972. –5 с.
14. ГОСТ 8.207-76. Прямые измерения с многократными наблюдениями. Методы обработки результатов наблюдений. –М.: Изд-во стандартов, 1979. –12 с.
15. ГОСТ 8.401-80. Классы точности средств измерений. Общие требования. –М.: Изд-во стандартов, 1984. –12 с.
16. ГОСТ 8.563-96. Нормативно-технические документы на методики выполнения измерений. –М.: Изд-во стандартов, 1983. –12 с.
17. *Гудмен Д.* Измерение критического коэффициента интенсивности напряжений K_{Ic} поликристаллического льда при больших скоростях нагружения // *Физика и механика льда*. –М.: Мир, 1983. –С.127–189.
18. *Зарецкий Ю.К., Фиш А.М.* Закономерность деформирования льда во времени при одноосном сжатии // *Труды ААНИИ*. –1974. –Т.324. –С.163–171.
19. *Зарецкий Ю.К., Чумичев Б.Д.* Кратковременная ползучесть льда. –Новосибирск: Наука, 1982. –121 с.

20. Картер Д.С. Хрупкое разрушение поликристаллического льда при сжатии // Труды симпозиума МАГИ "Лед и его воздействие на гидротехнические сооружения". –Л., 1972. –С.69–79.
21. Капителян В.И. и др. Ледоколы. –Л.: Судостроение, 1972. –286 с.
22. Капителян В.И., Фаддеев О.В. Исследование прочностных характеристик льда для обеспечения рационального проектирования судов ледового плавания // Судостроение за рубежом, 1982. –№ 2(182). –С. 27–39. – № 3(183). –С.44–57.
23. Капителян В.И., Фаддеев О.В. Проблемы и тенденции в исследованиях ходкости судов во льдах // Механика и физика льда. –М.: Наука, 1983. –С.122–135.
24. Коржавин К.Н., Ивченко А.Б. Исследование механических свойств пресноводного льда при медленных изменениях нагрузки // Труды ААНИИ. –1975. –Т. 326. –С.193–196.
25. Лавров В.В. Классификация морского льда по прочности // Труды ААНИИ. –1976. –Т. 331. –С. 100–103.
26. Лавров В.В. Деформация и прочность льда. –Л.: Гидрометеониздат, 1969. –206 с.
27. Лавров В.В. Масштабный эффект как отражение механизма разрушения льда // Труды ААНИИ. –1971. –Т.300. –С.32–38.
28. Меллор М. Механические свойства поликристаллического льда // Физика и механика льда. –М.: Мир, 1983. –С.202–239.
29. Методы обработки результатов при измерениях // Труды метрологических институтов СССР. –1972. –Вып. 134 (194). –117 с.
30. Миллер К. Применение механики разрушения к ледовым проблемам // Физика и механика льда. –М.: Мир, 1983. –С.258–271.
31. Панов В.В. и др. Экспериментальное изучение адгезии льда в лабораторных и натуральных условиях // Труды ААНИИ. –1975. –Т. 326. –С.147–154.
32. Песчанский И.С. Ледоведение и ледотехника. –Л.: Гидрометеониздат, 1967. –461 с.
33. Петров И.Г. Выбор наиболее вероятных значений механических характеристик льда // Труды ААНИИ. –1976. –Т.331. –С.4–41.
34. Петров И.Г. Опыт районирования арктических морей по структуре // Труды ААНИИ. –1971. –Т.300. –С. 39–55.
35. Петров И.Г. Физико-механические свойства и толщина ледяного покрова // Мат-лы наблюдений научн.-исслед. дрейфующих станций 1950/51 г. Т.2.– Л., 1955. –С.103–166.
36. Петров И.Г., Федотов В.И., Черепанов Н.В. О методике приготовления лабораторного льда с заданными физическими свойствами // Труды ААНИИ. –1988. –Т. 401. –С. 77–93.
37. Регель В.Р., Слуцкер А.И., Томашевский Э.Е. Кинетическая природа прочности твердых тел. –М.: Наука, 1974. –211 с.
38. Рывлин А.Я. Метод прогнозирования предела прочности ледяного покрова на изгиб // Проблемы Арктики и Антарктики. –1974. –Вып. 45. –С.79–86.
39. Рывлин А.Я. Натурные исследования физико-механических свойств ледяного покрова // Труды ААНИИ. –1975. –Т. 326. –С.205–209.
40. Саистунов Б.Н. Ледовая ходкость ледокола в заснеженных льдах и на мелководье // Труды ААНИИ. –1981. –Т.376. –С.41–47.
41. Селиванов М.Н., Фридман А.Э., Кудряшова Ж.Ф. Качество измерений. –Л.: Лениздат, 1987. –295 с.
42. Сморгун Г.И. Теоретические основы получения льда рыхлой структуры. –Новосибирск: Наука, 1984. –157 с.
43. Степанюк И.А., Сазонов К.Е. Определение механических свойств льда по параметрам распределения случайной выборки // Моделирование и эксперименталь-

ные исследования гидрологии шельфовых морей. Сб. научн. трудов. – Вып. 100. – Л.: Изд-во ЛГМИ, 1988. – С. 122–129.

44. Франкентейн Г. Опыт, накопленный при лабораторных исследованиях в решении ледовых проблем. // Физика и механика льда. – М.: Мир, 1983. – С. 95–103.

45. Фредеркинг Р. Предварительные данные по плоским деформациям при испытании столбчатозернистого льда на сжатие // Тр. симпозиума МАГИ “Лед и его воздействие на гидротехнические сооружения”. – Л., 1972. – С. 26–30.

46. Черепанов Н. В. Классификация льдов природных водоемов // Труды ААНИИ. – 1976. – Т. 331. – С. 77–99.

47. Черепанов Н. В., Камышиникова А. В. Размеры и форма кристаллов конжеляционного льда // Труды ААНИИ. – 1971. – Т. 300. – С. 196–204.

48. Швайштейн З. И. Экспериментальные работы в ледоисследовательской лаборатории // Труды ААНИИ. – 1971. – Т. 300. – С. 21–31.

49. Эдвардс Р. Моделирование процесса взаимодействия ледяного покрова с судами. // Физика и механика льда. – М.: Мир, 1983. – С. 64–81.

50. Эйзенберг Д., Кауцман В. Структура и свойства воды. – Л.: Гидрометеиздат, 1975. – 280 с.

51. Яковлев Г. Н. Метод предсказания прочностных характеристик ледяного покрова // Труды ААНИИ. – 1971. – Т. 300. – С. 9–20.

52. Maattanen Mauri. On the flexural strength of brackish water ice by in situ tests // *Mar/ Sci/ Comuns*, 1976. – 2, № 2. – P. 125–138.

53. Sinha N. K. Field test on rate sensitivity of vertical strength and deformation of first-year columnar-grained sea ice // *Nat. Res. Counc. Can. Div. Build. Res. Pap.* – 1983. – № 1151. – P. 231–242.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	3
Глава 1. Механические свойства морского льда и технологии испытаний	5
1.1. Используемые классификации морских льдов и их учет при испытаниях	5
1.2. Основные прочностные характеристики морского льда	7
1.3. Технологии испытаний льда на прочность	10
1.4. Технологии испытаний при определении критического коэффициента интенсивности напряжений K_{IC}	27
1.5. Обобщение основных экспериментальных данных по прочностным свойствам для задач моделирования	29
Глава 2. Статистическая обработка данных испытаний	37
2.1. Методика обработки	37
2.2. Использование медианы распределения в качестве обобщенного результата определения прочности льда	43
Глава 3. Технологии определения плотности морского льда	50
3.1. Характеристики плотности морского льда и задачи ее моделирования	50
3.2. Определение плотности льда путем гидростатического взвешивания	54
3.3. Оценки погрешностей методов	56
3.4. Пути совершенствования методов измерения плотности льда ..	61
Глава 4. Автоматизированные технологии определения основных физико-механических характеристик моделированного льда	64
4.1. Определение физико-механических свойств льда	64
4.2. Определение толщины и плотности моделированного ледяного покрова	70
Список рекомендованной литературы	74

СТЕПАНЮК Иван Антонович

ТЕХНОЛОГИИ ИСПЫТАНИЙ
И МОДЕЛИРОВАНИЯ МОРСКОГО ЛЬДА

Редактор Н.П.Муравьева

Оригинал-макет и обложка А.А.Меркулов

ЛР № 020228 от 10.11.96 г.

Подписано в печать 01.06.2001. Формат 60 × 90 1/16. Печать офсетная. Бумага офсетная.
Печ. л. 5,0. Кр.-отг. 5,25. Уч.-изд. л. 4,73. Тираж 1000 экз.

Гидрометеиздат, 199397, Санкт-Петербург, В. О., ул. Беринга, д. 38.