

КОМПЛЕКСНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ НАРАСТАНИЯ И МЕХАНИКИ РАЗРУШЕНИЯ ЛЬДА ЕСТЕСТВЕННОГО НАМЕРЗАНИЯ В БОЛЬШОМ ЛЕДОВОМ БАСЕЙНЕ ААНИИ

*Н.А.КРУПИНА, Б.В.ИВАНОВ, Н.В.КУБЫШКИН, В.А.ЛИХОМАНОВ,
П.М.НИКОЛАЕВ, А.В.ЧЕРНОВ, Е.Г.ШАХОВ*

ГНЦ РФ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт

В 2007 г., в рамках проекта 1.7.5 ЦНТП, при поддержке гранта РФФИ, сотрудниками отдела ледовых качеств судов при участии сотрудников отдела взаимодействия океана и атмосферы и лаборатории «Арктик-шельф» был выполнен комплекс экспериментальных работ в большом ледовом бассейне ААНИИ. Эксперименты проводились на лабораторном льду естественного намерзания, аналогичном натурному, толщиной около 45 см. Исследования включали:

- испытания образцов льда при сжатии параллельно и перпендикулярно поверхности ледяного покрова;*
- испытания прочности льда при крупномасштабном сжатии;*
- испытания прочности льда при внедрении цилиндрического индентора;*
- исследование характеристик трещиностойкости;*
- исследование эволюции вертикальных профилей температуры, солёности и плотности нарастающего лабораторного льда естественного намерзания;*
- моделирование искусственной снежицы.*

Настоящая статья посвящена результатам исследований прочности образцов льда при сжатии и термодинамики искусственной снежицы

1. ОБЩЕЕ ОПИСАНИЕ РАБОТ

В феврале 2007 г. в рамках проекта 1.7.5 ЦНТП «Обеспечить проведение экспериментальных исследований прочностных характеристик морского льда на базе комплекса ледовых бассейнов ААНИИ» и гранта РФФИ № 06-08-01288 «Исследование характеристик разрушения и трещиностойкости льда при сложном нагружении в лабораторных условиях» сотрудниками ААНИИ был выполнен комплекс экспериментальных работ в большом ледовом бассейне института. Исследования включали:

- испытания образцов льда при сжатии силой, прикладываемой параллельно и перпендикулярно поверхности ледяного покрова (в дальнейшем – параллельное и перпендикулярное сжатие);*
- испытания прочности льда при крупномасштабном сжатии;*
- испытания прочности льда при внедрении цилиндрического индентора;*
- исследование характеристик трещиностойкости;*
- исследование эволюции вертикальных профилей температуры, солёности и плотности нарастающего лабораторного льда естественного намерзания;*
- моделирование искусственной снежицы.*

Оборудование большого ледового бассейна ААНИИ позволяет получить лабораторный лед естественного намерзания. Солёность воды в бассейне составляла около 15%. Температура воздуха в помещении бассейна в период подготовки льда поддерживалась в диапазоне $-14...-17$ °С (см. рис. 1). Поскольку температур-

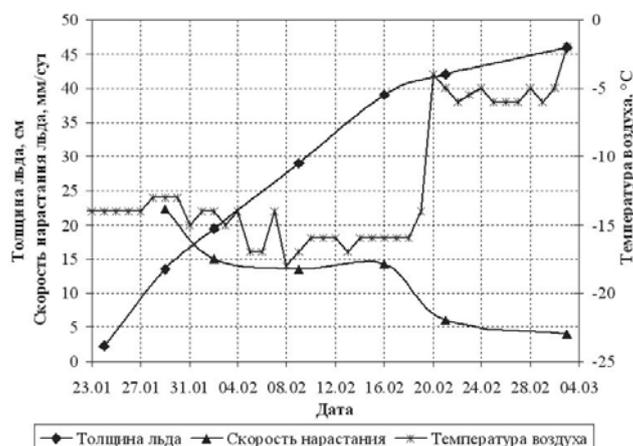


Рис. 1. Температурный режим в большом ледовом бассейне и скорость нарастания льда в ходе проведения экспериментов

ный режим в бассейне поддерживался в достаточно узких пределах, воздействия солнечной радиации и других внешних факторов (ветер, осадки и др.) отсутствовали, можно полагать, что создавались идеальные (эталонные) условия для намораживания льда и решения основных задач планируемого эксперимента. Можно утверждать также, что лед, приготовленный в бассейне, по структуре и механическим свойствам был более однородным, чем природный морской лед. В результате был получен лабораторный лед естественного намерзания, аналогичный натурному, толщиной около 45 см.

Еще до начала ледообразования была установлена термокоса, термисторы которой были расположены так, чтобы в каждую серию измерений входили: температура воздуха над ледяной поверхностью, температура поверхности льда, температура в толще льда, температура в подледном слое воды (для оценки потока тепла от воды). Показания термокосы снимались каждые 3 дня. В дополнение к измерениям температуры, определялись вертикальные профили солёности и плотности льда, что позволило зафиксировать изменения свойств нарастающего льда.

После достижения ледяным покровом толщины 40 см на поверхности льда была сделана снежица с целью исследования поведения жидкой линзы на поверхности льда. Скорость нарастания льда заметно снизилась, и температура воздуха в бассейне была повышена до -5°C .

Данная статья содержит описание и результаты экспериментов по исследованию характеристик разрушения льда при сложном нагружении малых образцов и моделированию искусственной снежицы.

2. ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК РАЗРУШЕНИЯ ЛЬДА ПРИ СЛОЖНОМ НАГРУЖЕНИИ В ЛАБОРАТОРНЫХ УСЛОВИЯХ

Изучение поведения льда при разрушении является очень сложной задачей. Известно, что лед является анизотропным материалом, который в естественных условиях находится при температурах, близких к температуре плавления. На характер его разрушения оказывает существенное влияние множество факторов, такие как температура, солёность, кристаллическое строение, направление приложения нагрузки и т.д. Основной целью данной работы было выявить зависимость параметров разрушения от скорости нагружения, при относительной стабильности значений остальных внешних факторов.

Испытания цилиндрических или призматических образцов являются одним из самых распространенных способов определения прочности льда при сжатии. Множество таких экспериментов проведено отечественными и зарубежными исследователями. Они, как правило, были направлены на определение прочности льда в конкретном географическом районе и при определенных условиях. Их общим недостатком было то, что в натуральных условиях удавалось подготовить и испытать ограниченное количество образцов. Эксперименты, условия и методика которых позволяла бы исследовать десятки или сотни образцов, однородных по структуре и в одинаковых условиях, ранее не проводились.

В рамках представляемой работы испытывались цилиндрические образцы высотой 250 мм и диаметром 100 мм или 142 мм. Поперечные размеры образцов, по крайней мере, на порядок превышали размеры кристаллов льда. С целью выявления анизотропии свойств льда при сжатии, ось образцов была ориентирована как перпендикулярно, так и параллельно плоскости ледяного покрова. Нагрузка прикладывалась к образцам в направлении их оси. При этом образцы, перпендикулярные направлению роста ледяного покрова (т.е. параллельно поверхности льда), отбирались с нескольких фиксированных горизонтов – 10, 22 и 35 см от верхней поверхности льда.

Поскольку результаты испытания существенно зависят от точности изготовления образца в части его геометрических параметров (длина и диаметр образца, параллельность торцов образца, перпендикулярность торцов оси образца), был изготовлен специальный стенд, позволяющий изготавливать образцы строго заданной длины, а также обеспечивающий перпендикулярность торцов образца его оси. Стенд оборудован фиксатором керны и электрической цепной пилой, закрепленной на качающемся держателе. Изготовленные образцы подвергались взвешиванию и обмеру для определения плотности льда.

Температура в образцах льда измерялась прецизионными электронными термометрами GTH175/MO фирмы GREISINGER ELECTRONIC (Германия) (диапазон измеряемых температур – от $-199,9$ °C до $+199,9$ °C, погрешность измерений – не более $0,1$ °C). Для определения температуры в керне непосредственно после его извлечения из ледяного покрова просверливались отверстия до оси керны, в которые помещался шуп термометра. Соленость определялась по электропроводности растаявшего льда с помощью лабораторного кондуктометра InoLab Cond 720 с погрешностью измерений не более $0,1$ ‰. Плотность льда находилась по результатам определения геометрических размеров образца льда и взвешивания его на электронных весах ТВН-4К производства ООО «ПетВес» (Россия). Наименьший предел взвешивания для весов ТВН-4К составляет 40 г, наибольший предел взвешивания – 4 кг. Погрешность измерений – не более 2 г.

Для испытаний при сжатии использовался модернизированный гидравлический пресс ГП-10 производства Экспериментальных производственных мастерских ААНИИ, развивавший усилие до 98 кН (10т). Пресс был снабжен измерителем давления WIKA ECO-TRONIC производства фирмы WIKA (диапазон измеряемых давлений – от 0 до 400 бар, сила выходного тока – от 4 до 20 μ A, напряжение питания – от 10 до 30 В постоянного тока). Для измерения абсолютных деформаций образца и, таким образом, определения скорости деформации льда при испытаниях на прессе монтировался датчик линейных перемещений ДЛП-2 производства ООО «Микросенсорные технологии» (Россия), с помощью которого фиксировалось перемещение штока гидроцилиндра. Сигналы с обоих датчиков поступали на вход многофункциональной платы DAQCard-6062E производства National Instruments Corporation (США), установленной в переносном компьютере. Плата обеспечивала аналогово-цифровое преобразование сигнала и имела следующие технические характеристики: количество входных каналов – до 16, частота опроса каналов – до 500 тыс. считываний в секунду, разрешение – 12 бит. Программное

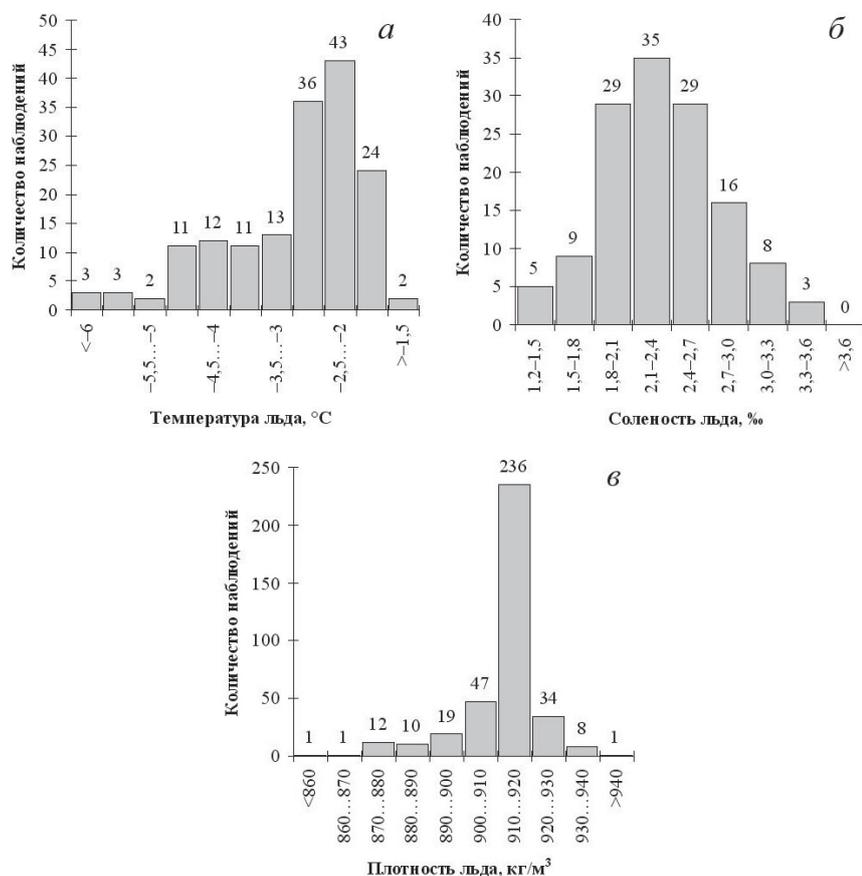


Рис. 2. Гистограммы распределения температуры (а), солености (б) и плотности (в) льда, измеренных в ходе выполнения прочностных испытаний

обеспечение измерительной системы, обеспечивающее сбор и запись данных, а также их отображение в ходе испытания, состояло из программы *VI Logger* версии 1.0.1, выполнявшейся в среде *Measurement & Automation Explorer* версии 2.2.0.3010 (поставщик – *National Instruments Corporation*, США). Тарировка прессы выполнялась по поверенному образцовому динамометру ДОСМ-3-10.

Температура, соленость и плотность льда являются важными факторами, влияющими на его прочность и деформационные характеристики. Эти параметры были получены для большинства испытанных образцов. Обобщенные результаты измерений приведены в виде гистограмм на рис. 2. Несмотря на идеальные условия образования льда (постоянная температура воздуха, постоянная соленость воды, отсутствие перемешивания, отсутствие осадков и др.), наблюдается значительный разброс как значений солености, так и значений плотности льда. Однако в большей степени это связано с изменчивостью параметров по толщине льда. Для иллюстрации этого факта на рис. 3 показаны вертикальные профили солености и плотности льда.

Как уже говорилось, основной целью эксперимента было исследование характеристик разрушения льда при различных условиях нагружения. Для этого были проведены серии испытаний малых образцов льда при сжатии параллельно и пер-

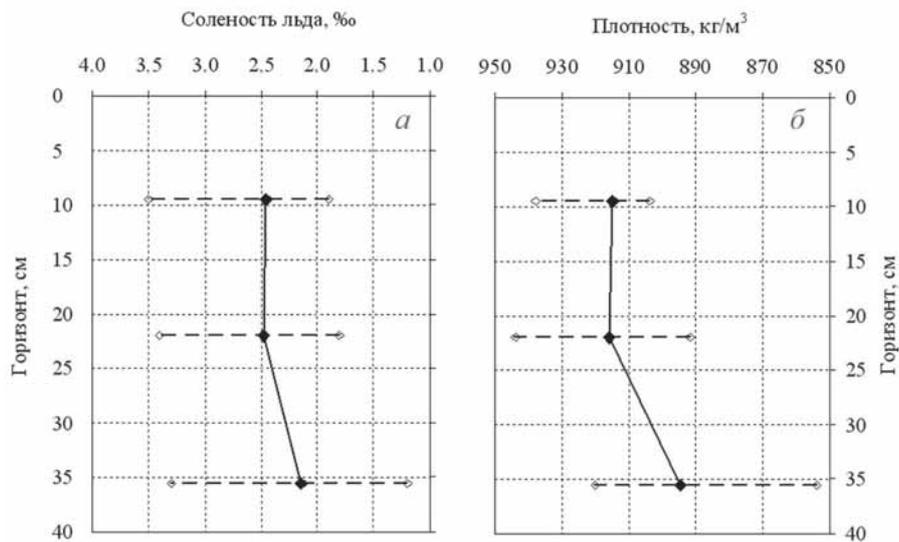


Рис. 3. Вертикальная изменчивость солености и плотности льда (среднее значение и диапазон вариации)

пендикулярно поверхности ледяного покрова. Обобщенные результаты представлены в табл. 1 и на рис. 4. Наблюдается изменчивость свойств по толщине льда – при испытаниях параллельно поверхности ледяного покрова предел прочности существенно уменьшается в направлении от верхней поверхности льда к нижней. Определение прочности льда при сжатии не являлось главной задачей экспериментов. При определении этой величины оказалось, что, несмотря на стабильные внешние условия в период ледообразования и относительно однородные физические свойства льда, разброс значений очень велик (отношение максимальных и минимальных значений составляет от 3 до 10). Это означает, что для оценки параметров разрушения льда невозможно ограничиться детерминированным подходом, а необходимо использовать вероятностные методы. В частности, распределение пределов прочности хорошо описывается Гамма-распределением (см. рис. 4). Аналогичная закономерность обычно наблюдается и при анализе натуральных данных.

Основным параметром, который варьировался в ходе экспериментов, являлась скорость нагружения. На рис. 5 представлены гистограммы относительных

Таблица 1

Обобщенные результаты измерений

Характеристика льда	Кол-во измерений	Минимум	Максимум	Среднее значение	Стандартное отклонение
Предел прочности при сжатии перпендикулярно плоскости горизонта, МПа	205	0,72	6,97	3,26	1,37
Предел прочности при сжатии параллельно плоскости горизонта, МПа	192	0,45	3,01	1,62	0,51
верхний горизонт	64	1,10	3,01	1,90	0,48
средний горизонт	54	0,60	2,81	1,54	0,42
нижний горизонт	64	0,45	2,39	1,37	0,45

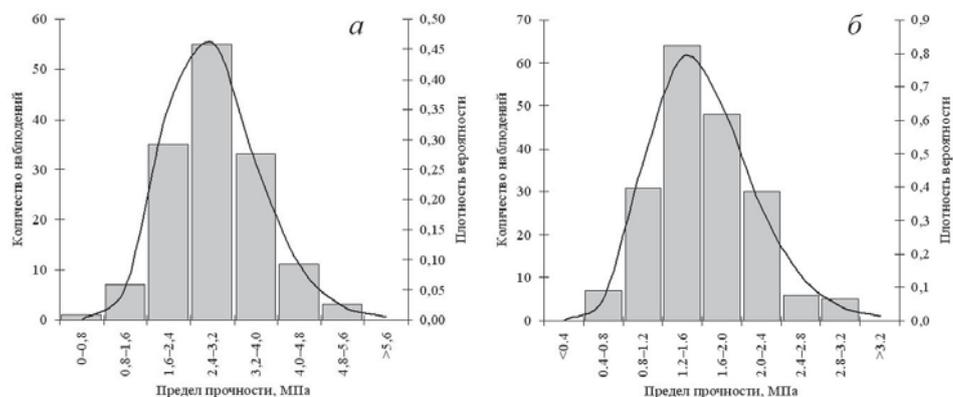


Рис. 4. Гистограммы распределения предела прочности при испытаниях образцов льда при сжатии параллельно (а) и перпендикулярно (б) поверхности ледяного покрова и их аппроксимации Гамма-распределением

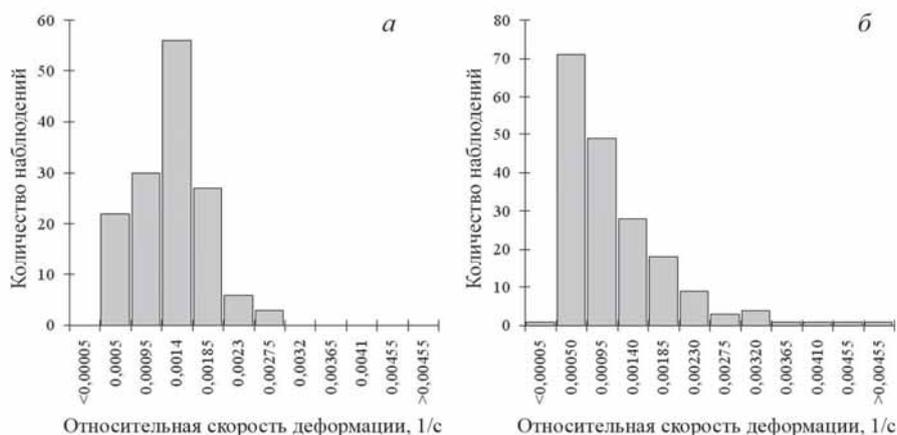


Рис. 5. Гистограммы распределения относительной скорости деформации при испытаниях образцов льда при сжатии параллельно (а) и перпендикулярно (б) поверхности ледяного покрова

скоростей деформации¹ образцов льда при сжатии перпендикулярно и параллельно поверхности ледяного покрова. Наибольшее количество опытов было выполнено при относительной скорости деформации, близкой к требуемой в нормативных документах для производства ледоисследовательских работ, т.е. близкой к значению 10^{-4} 1/с. Однако диапазон вариации скоростей составил от $5 \cdot 10^{-5}$ до $5 \cdot 10^{-3}$.

Традиционно принято считать, что при увеличении скорости нагружения прочность льда уменьшается. Однако в проведенных экспериментах такой закономерности обнаружено не было. На рис. 6 представлены зависимости предела прочности

¹ В данном случае перемещения штока пресса соответствуют абсолютной деформации образца, поэтому под относительной скоростью деформации понимается отношение скорости перемещения штока пресса к длине образца.

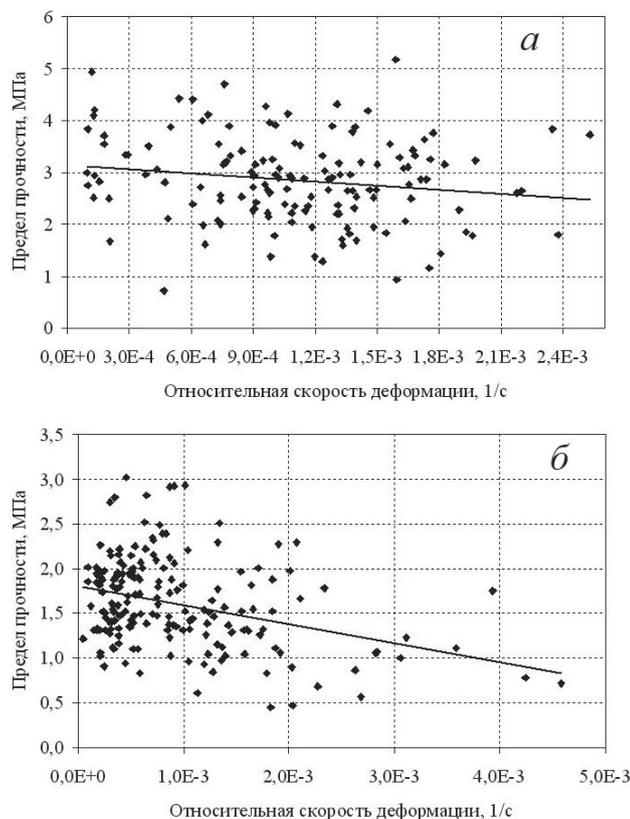


Рис. 6. Зависимость при сжатии перпендикулярно (а) и параллельно (б) поверхности льда

от скорости деформации. Видно, что корреляция между этими величинами полностью отсутствует. В связи с этим дальнейший анализ выполнялся для всей выборки целиком, без разделения на различные диапазоны скоростей деформации.

Для расчета ледовых нагрузок на инженерные объекты с помощью конечно-элементного моделирования необходимо детальное знание свойств льда как материала, в частности характеристик поведения льда в процессе нагружения. В первом приближении такие характеристики могут быть получены путем анализа экспериментальных данных по испытаниям образцов при сжатии.

С помощью измерительного оборудования для каждого испытанного образца были получены зависимости силы, действующей на образец, и перемещения штока пресса от времени. В качестве примеров для данной статьи были выбраны два испытания образцов при сжатии перпендикулярно поверхности ледяного покрова: № 201 и № 111. Оба образца имели диаметр 100 мм, а высоту – 250 мм. Температура образцов при испытании была $-2,8\text{ }^{\circ}\text{C}$, соленость 2,6 ‰, плотность 915 кг/м^3 . Основное отличие между образцами – относительная скорость деформации при испытании. Для образца № 111 она составила $1,54 \cdot 10^{-4}\text{ 1/с}$, а для № 201 – $1,33 \cdot 10^{-3}\text{ 1/с}$, т.е. отличалась примерно в 10 раз. Записи процесса нагружения представлены на рис. 7.

По результатам экспериментов для каждого образца получены зависимости от времени: силы, действующей на него, и перемещения штока. Перемещения

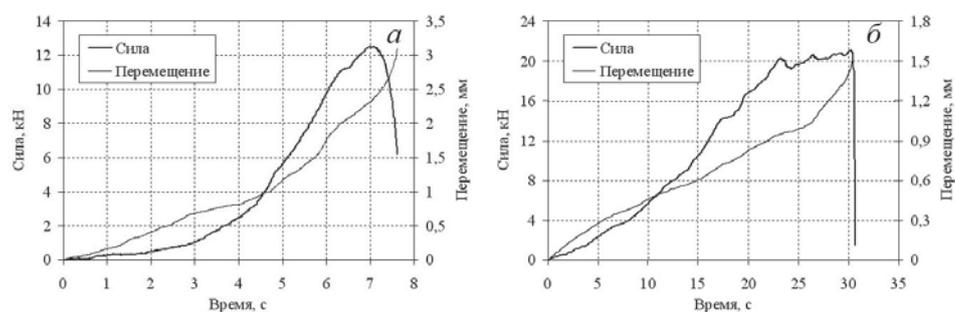


Рис. 7. Записи процесса нагружения образцов № 201(а) и 111 (б)

штока численно равны абсолютной деформации сжатия образца. Первичная обработка экспериментальных данных заключалась в перестроении диаграмм зависимости силы и перемещения от времени в диаграммы «деформация–напряжения». При этом деформации и напряжения рассчитывались по формулам:

$$\sigma(t) = \frac{F(t)}{S}, \quad \varepsilon(t) = \frac{\Delta l(t)}{l}, \quad (1)$$

где $F(t)$ – зависимость силы, действующей на образец льда, от времени; $\sigma(t)$ – зависимость напряжений, возникающих в образце, от времени; $\varepsilon(t)$ – зависимость относительных деформаций образца от времени; $\Delta l(t)$ – зависимость перемещения штока прессы от времени; S – площадь поперечного сечения образца; l – длина образца.

В связи с большой вариацией значений максимальных относительных деформаций и максимальных напряжений все диаграммы «деформация–напряжения» были нормированы по максимальным значениям, в результате чего был получен набор кривых в безразмерных координатах. Пример нормированных диаграмм для образцов № 111 и 201 представлен на рис. 8.

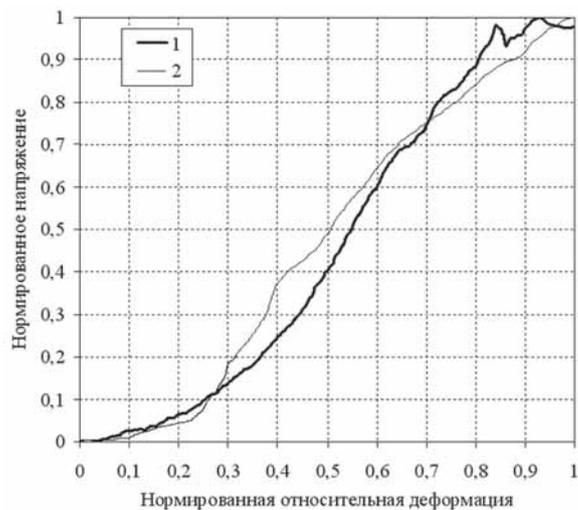


Рис. 8. Нормированные диаграммы «деформация–напряжения» для образцов № 111 (кривая 1) и № 201 (кривая 2)

Уже на этапе первичной обработки результатов экспериментов была обнаружена высокая степень нелинейности диаграммы «деформация–напряжения» и было определено, что наилучшая аппроксимация безразмерных диаграмм описывается степенной функцией $\bar{\sigma} = \bar{\varepsilon}^a$. Для каждого образца (кривой), с помощью пакетного приложения *DataFit*, было рассчитано значение коэффициента a . Анализ результатов показал, что значения коэффициента a являются случайной величиной, распределенной по логнормальному закону. В качестве средней оценки при сжатии перпендикулярно поверхности ледяного покрова безразмерная зависимость напряжений от деформаций может быть описана квадратичной функцией (среднее рассчитанное значение коэффициента $a = 2,001$). Для сжатия параллельно поверхности ледяного покрова среднее значение показателя степени меньше 2 и зависит от горизонта по толщине льда, а именно: для верхнего горизонта – 1,586; среднего – 1,784; нижнего – 1,866.

В заключение можно сказать, что в качестве первого приближения при описании свойств льда как материала применительно к конечно-элементному моделированию можно рекомендовать использовать зависимость напряжений $\sigma(\varepsilon)$ от деформаций в образце ε в следующем виде:

$$\sigma(\varepsilon) = \sigma_{\max} \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{\max}} \right)^a, \quad (2)$$

где σ_{\max} – предел прочности льда при сжатии; ε_{\max} – предельная деформация образца; a – показатель степени, значение которого выбирается в зависимости от направления действия силы относительно поверхности ледяного покрова.

По результатам работы можно сделать следующие выводы:

- разработана усовершенствованная методика проведения экспериментов по изучению прочностных характеристик льда на базе ледового бассейна ААНИИ; определен перечень внешних факторов, которые необходимо варьировать при выполнении таких работ: температура льда, скорость нарастания льда (а соответственно, изменение кристаллической структуры льда), скорость нагружения при исследовании прочности льда и т.д.;

- впервые в мировой практике в лабораторных условиях получена статистика по результатам около 400 опытов по изучению механики разрушения льда;

- получены уникальные данные, позволяющие начать разработку критериев разрушения льда, необходимых для конечно-элементного моделирования процессов воздействия льда на суда и сооружения;

- разработана механико-математическая модель разрушения льда, пригодная для описания льда как материала при моделировании взаимодействия льда с различными объектами; эта модель будет усовершенствована при проведении серий дополнительных экспериментов.

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЖИДКИХ ЛИНЗ (ЗАМЕРЗШИХ СНЕЖНИЦ) НА ПРИМЕРЕ ИСКУССТВЕННОГО ЛЬДА В ЛЕДОВОМ БАССЕЙНЕ ААНИИ

Основная цель выполненных исследований заключалась в проведении лабораторных экспериментов по исследованию термодинамики жидких линз (замерзших снежиц), теплофизических свойств модельного льда и особенностей его нарастания при наличии жидких линз.

Как известно, снежицы оказывают значительное влияние на скорость разрушения морского льда в силу более низкого альбедо [1, 3]. Являясь очагами поглощения солнечной радиации, они способствуют более интенсивному таянию льда, превращаясь на конечном этапе своего существования в сквозные промои-

ны. Это обстоятельство в конечном счете приводит к механическому разрушению льда, нарушению его сплошности и к более интенсивному таянию его боковых поверхностей. Роль снежниц в осенне-зимний период исследована недостаточно. Хотя имеется ряд работ, в которых, на основании немногочисленных экспериментальных данных, формулируется вывод, что замерзшие снежницы (жидкие линзы) обуславливают заметную пространственную неравномерность зимнего нарастания льда [2]. Причем под снежницами лед нарастает медленнее. Естественно, сведения о том, что снежницы в осенний период покрываются тонким слоем льда, имелись в отчетах многих дрейфующих станций. В ряде случаев было определено альbedo подобных снежниц и выполнены измерения толщин образовавшегося льда. Однако каких-либо далеко идущих выводов о термодинамических последствиях подобных явлений сделано не было.

Безусловно, организация наблюдений над снежницами в зимних условиях принципиально возможна. Однако здесь присутствует ряд технических моментов, которые довольно затруднительно реализовать в натуральных условиях. В первую очередь это касается размещения соответствующей аппаратуры (датчиков) внутри снежницы, покрытой растущим льдом, без нарушения его сплошности и возможности контроля внешних условий эксперимента. Для создания необходимых условий, приближающихся к натурным и в то же время контролируемых наблюдателем, мы использовали возможности ледового бассейна ААНИИ. При достижении модельным льдом в бассейне толщины 50 см на его поверхности была создана искусственная снежница с горизонтальными размерами 50×50 см и глубиной 20 см. На дне снежницы были установлены следующие приборы:

- комплекс «Прилив» для изменений температуры и гидростатического давления в слое жидкости при образовании льда на ее поверхности;
- портативный кондуктометр ЕС300 для измерения температуры, электропроводности и солёности жидкости;
- прецизионный датчик температуры YSI-46043 для регистрации температуры жидкости с высоким разрешением и точностью.

Приемная мембрана датчика давления и датчик температуры «Прилива» располагались на расстоянии 2–3 см от дна снежницы, датчики ЕС300 и YSI-46043 на расстоянии 5–6 см от дна (закреплены на корпусе «Прилива»). Снежница была заполнена пресной (водопроводной) водой с начальной температурой около 18 °С до уровня поверхности льда. Регистрация давления проводилась непрерывно с дискретностью 2 минуты с помощью аналого-цифрового преобразователя, входящего в комплект прибора «Прилив», температура и электропроводность фиксировалась один раз в сутки с помощью цифрового блока ЕС300, который присоединялся к датчикам в момент измерений, и портативного мультиметра. Общая продолжительность измерений составила 8 суток.

Наиболее интересные результаты были получены при анализе данных измерений с комплекса «Прилив» и датчиков, размещенных на дне снежницы до момента ее замерзания. Схема размещения приборов, размеры снежницы и особенности ледовых образований на момент окончания эксперимента представлены на рис. 9.

Как уже указывалось выше, глубина искусственной снежницы составляла 20 см. Солёность льда изменялась от 2,4 ‰ в верхнем 4 см слое льда до 1,9 ‰ в слое на глубине 20–24 см, линейно убывая с глубиной (по данным о ледовом керне, полученным за 5 суток до начала нашего эксперимента). В течение этих суток толщина льда изменилась очень незначительно. Начиная с 20 февраля и до окончания эксперимента непрерывно фиксировалось гидростатическое давление внутри жидкой линзы и температура ее придонного слоя (2–3 см от дна). Дискретность измерений составляла 2 мин. Параллельно, один раз в сутки, выполнялись замеры температуры жидкости на расстоянии 5 см от дна (прецизионный термометр YSI-43-46), а также

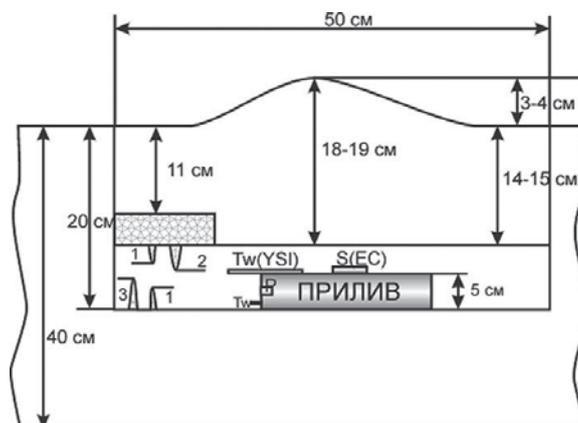


Рис. 9. Схема эксперимента: 1, 2, 3 – размеры ледяных образований на дне и нижней поверхности льда в снежнице (см); 14–15 см – ровный лед на поверхности снежницы; 18–19 см – толщина льда в центре; 3–4 см – высота «вздутия»; 40 см – общая толщина искусственного льда в бассейне; 20×50 см – размеры снежницы

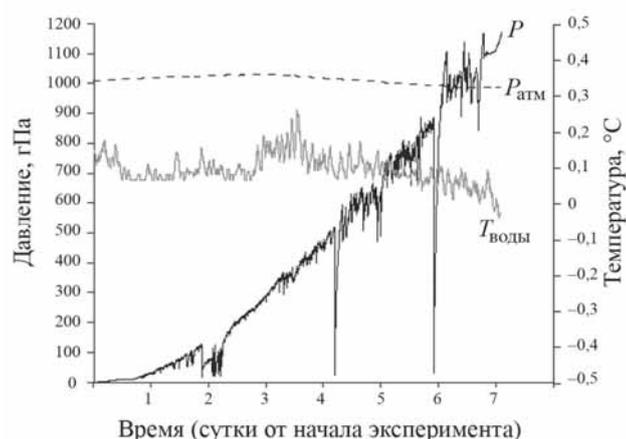


Рис. 10. Изменения температуры воды ($T_{\text{воды}}$) и гидростатического давления (P) в жидкой линзе и атмосферного давления ($P_{\text{атм}}$)

электропроводности и солёности (кондуктометр ЕС300, расстояние то же). Временной ход давления и температуры («Прилив») представлен на рис. 10.

На графике видны характерные моменты «сброса» давления в замерзшей снежнице, причем в ряде случаев (давление падает практически до нуля) снежница имела свободное сообщение с окружающим воздухом. Визуально это проявилось в образовании трещин на верхней границе льда, сформировавшегося на снежнице. В целом наблюдалась устойчивая тенденция роста гидростатического давления по мере увеличения толщины льда на поверхности снежницы. К сожалению, мы не имели технической возможности контролировать этот процесс количественно. В то же время, как указывалось выше, этот процесс может сопровождаться либо разрушением льда на поверхности снежницы (появление трещин), либо его деформацией в виде характерных ледяных бугров – «вздутий», высотой до 3 см.



Рис. 11. Типы деформации льда на поверхности искусственной снежицы: *а* – трещины; *б* – «вздутия»

Все эти морфометрические особенности (трещины, «вздутия») и их размеры представлены на рис. 11.

По данным наших измерений, соленость воды в течение практически всего эксперимента оставалась нулевой. По крайней мере, в пределах точности кондуктометра ЕС300. Электропроводность же имела тенденцию к росту. В начальный момент она составляла $0,357 \mu\text{S}$, а в конце эксперимента равнялась $2,336 \mu\text{S}$. При этом соленость воды оказалась равной $0,3 \text{‰}$. Поскольку погрешность измерений солёности кондуктометром ЕС300 составляет $\pm 0,3 \text{‰}$, то к полученным оценкам солёности нужно относиться с большой осторожностью. В то же время отмеченный рост электропроводности свидетельствует об определенном росте минерализации жидкости. По-видимому, это связано с тем, что при заполнении снежицы использовалась обыкновенная водопроводная вода, имеющая относительно высокую температуру. Первые замеры в снежице показали, что температура воды равнялась $+6 \text{ °C}$. Таким образом, мы не можем исключить тот факт, что часть льда (солёность верхнего 20 см слоя составляла $1,9\text{--}2,4 \text{‰}$) могла расплавиться при контакте с теплой водой. Как результат – образование на дне слоя воды не нулевой солёности.

Возможно, именно это обстоятельство и обусловило положительные значения температуры у дна снежицы (2–3 см) практически в период всего эксперимента. Действительно, в этом случае на границе фронта кристаллизации температура жидкости будет равна 0 °C , а в придонном слое она может быть отличной от нуля, поскольку конвективное перемешивание в снежице отсутствует (стратификация устойчивая), а процессы молекулярного перемешивания за несколько суток не могут привести к гомогенизации всего слоя (коэффициент температуропроводности имеет порядок $10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$).

К сожалению, на 7 сутки эксперимента датчик давления остановился на отметке в 111 гПа. По-видимому, это было связано с обмерзанием приемной мембраны. Однако датчик температуры продолжал работать до момента извлечения прибора из снежицы.

Поскольку на момент извлечения прибора из снежицы на ее дне находилась вода, можно предположить, что датчик фиксировал понижение температуры воды не нулевой солёности. Если вспомнить, что «измеренная» солёность составила $0,3 \text{‰}$, то это соответствует температуре замерзания, равной примерно $-0,02 \text{ °C}$. Зафиксированные значения оказались существенно ниже. Однако такие низкие значения температуры замерзания ($-0,5\text{...}-0,7 \text{ °C}$) соответствуют солёности $10\text{--}13 \text{‰}$ [4]. В то же время датчик давления остановился на отметке в 1118 гПа и никаких характерных сбросов

давления зафиксировано не было. Соленость, равную примерно 10 ‰, имел верхний слой воды в бассейне. При вскрытии снежницы откачать находящуюся в ней воду не представилось возможным, т.к. в нее поступала вода снизу. Следовательно, имела место инфильтрация воды сквозь дно снежницы, поскольку явных следов разрушения дна («поршневое» отторжение) зафиксировано не было. В случае нарушения «герметичности» дна произошло бы выравнивание давления внутри снежницы с атмосферным. Если вернуться к схеме, представленной на рис. 9, нельзя не отметить, что так называемые «бугорки и неровности», обнаруженные на дне снежницы и на нижней поверхности льда, образовавшегося на ее поверхности, вполне могли соприкоснуться с датчиком температуры, вызывая его обмерзание. В этом случае датчик будет фиксировать уже не температуру окружающей жидкости, а температуру льда сверху или снизу. Действительно, после вскрытия снежницы мы обнаружили, что все приборы были покрыты сантиметровым слоем льда.

Таким образом, вопрос о фактических значениях температуры воды внутри жидкой линзы остается открытым. Ответить на него позволят новые эксперименты, которые планируется провести в ледовом бассейне ААНИИ в 2008 г. Однако уже сейчас можно сформулировать предложения по содержанию планируемых экспериментов, приборам и оборудованию. Это позволит получить принципиально новые результаты, которые, несомненно, будут иметь как теоретическое, так и прикладное значения. Основные требования к проведению экспериментов можно свести к следующим:

- использование прецизионного датчика, определяющего малые величины солености с большой точностью;
- регистрация солености и температуры в снежнице (например, датчик YSI-43046) должна носить непрерывный характер, желательно на нескольких уровнях;
- возможность контролировать нарастание льда в снежнице;
- непрерывная регистрация температуры и влажности воздуха в помещении бассейна, а также теплового излучения льда и свода бассейна, солености и температуры подледного слоя (граничные условия для модельных расчетов);
- организация регулярных наблюдений за интенсивностью нарастания участков ровного льда и под снежницей (применение подводной телеметрии);
- использование красителей для исследования процессов диффузии;
- исследование структуры и текстуры ровного льда и льда, образующегося на поверхности снежницы.

В заключение сформулируем основные научные результаты, полученные в результате проведенных экспериментов и в соответствии с календарным планом работ:

- впервые проведены экспериментальные исследования искусственных жидких линз (замерзших снежниц) на базе ледового бассейна ААНИИ;
- испытаны приборы и оборудование, разработанные в отделе разработки автоматических станций и приборов (самописец «Прилив-2», прецизионный датчик температуры YSI) и имеющиеся в лаборатории взаимодействия океана и атмосферы (портативный кондуктометр ЕС300);
- опробована методика проведения подобных экспериментов;
- получены оригинальные экспериментальные данные о параметрах замерзающей искусственной снежницы (температура воды; соленость (минерализация); электропроводность; гидростатическое давление); также в период эксперимента получены сопутствующие данные о температуре воздуха, температуре льда на нескольких уровнях (термокоса), температуре и солености подледного слоя воды, толщине льда и его солености; сформирован электронный архив полученных натуральных данных;
- зафиксирован устойчивый (квазилинейный) рост гидростатического давления в жидкости (до 1200 гПа) при увеличении толщины льда на ее поверхности до 15 см при начальной глубине снежницы в 20 см; отмечены кратковременные

(импульсные) сбросы давления (до значений атмосферного), сопровождающиеся появлением трещин на поверхности нарастающего «молодого» льда; избыточное давление в жидкой фазе имело своим последствием появление характерных «вздутий» (бугров) на поверхности замерзшей снежицы;

– проанализирована взаимосвязь скорости нарастания искусственного льда и температуры воздуха в помещении бассейна в терминах эмпирических формул «градусо-дней мороза».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Богородский П.В., Махитас А.П. К вопросу о формировании снежиц в Арктическом бассейне // Метеорология и гидрология. 1996. № 8. С. 72–80.
2. Бузуев А.Я., Горбунов Ю.А., Гудкович З.М., Лосев С.М. Оценка площади воды на льду по материалам аэрофотосъемки // «ПОЛЭКС–Север-76»: Сб. трудов. Т. 2. Л.: Гидрометеиздат, 1978. С. 92–106.
3. Иванов Б.В., Андреев О.М. Особенности термической структуры арктических снежиц // Тр. ААНИИ. 2003. Т. 446. С. 176–184.
4. Океанографические таблицы. Изд. 4-е. Л.: Гидрометеиздат, 1975. 477 с.

*N.A.KRUPINA, B.V.IVANOV, N.V.KUBYSHKIN, V.A.LIKHOMANOV, P.M.NIKOLAEV,
A.V.CHERNOV, E.G.SHAKHOV*

COMBINED EXPERIMENTAL STUDIES OF GROWING UP PROCESSES AND FAILURE MECHANICS OF ICE OF NATURAL FREEZING ICE IN AARI'S LARGE ICE TANK

Combined experimental studies were fulfilled in AARI's large ice tank by researchers of the Department of Ship Performance in Ice with the assistance of Department of Interaction of Ocean and Atmosphere and «Arctic-Shelf» laboratory in 2007 under the project 1.7.5 SRTP (Special Research Technical Program) and with support of RFBR (Russian Foundation for Basic Research). Tests were carried out on laboratory ice of natural freezing with thickness of 45 cm analogous to the in-situ sea ice. Experiments included:

- tests of ice samples at compression parallel and perpendicular to the ice cover surface;
- tests of ice strength at large-scale compression;
- tests of ice strength at indentation of cylindrical indenter;
- research on characteristics of cracking resistance;
- research on evolution of vertical profiles of temperature, salinity and density of building-up laboratory ice of natural freezing;
- modeling of an artificial meltwater pool.

The paper is devoted to results of studies of ice samples compressive strength and an artificial meltwater pool thermodynamics.