

УДК 629.124

DOI: 10.46960/2782-5477_2022_3_32

Ю.А. Двойченко, М.А. Панченко, М.А. Панакушин
ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ
КОМПОЗИТНОЙ МОДЕЛИ ЛЬДА В МАЛОМ ЛЕДОВОМ БАССЕЙНЕ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Описан порядок и технология проведения опытов в малом ледовом бассейне с использованием композитной модели льда. Описано устройство малого ледового бассейна, а также оборудование для проведения экспериментов. Полученные результаты могут быть использованы для прогнозирования ледовой ходкости судов.

Ключевые слова: модель льда, композитная структура, малый ледовый бассейн, диаграмма разрушения модели льда.

Введение

Круглогодичная эксплуатация судов по Северному Морскому пути является актуальным вопросом. Соответственно, актуальны и задачи экспериментального исследования по взаимодействию судов и других объектов морской техники со льдом. Одним из доступных способов их решения является модельный эксперимент, требующий соблюдения большого количества условий при проведении эксперимента, а также достоверная обработка полученных данных и пересчет результатов на натуру.

Модельные эксперименты необходимы для изучения процесса разрушения ледяного покрова, при меньших материальных затратах на проведение опытов. При выборе способа моделирования ледяного покрова встречаются недостатки, которые не позволяют выбрать оптимальный вариант в рамках модельных экспериментов. В данном случае выбрана модель льда GP-ice, в состав которого входят гранулы по 3 мм по всей поверхности бассейна [1]. Цель экспериментов состоит в получении результатов, по которым можно сделать вывод о характере разрушения ледяного покрова в натуральных условиях.

Для проведения экспериментальных исследований необходимы либо постоянные большие затраты, либо небольшие начальные затраты на покупку оборудования, при минимальных затратах на проведение экспериментов. В Нижегородском государственном университете им. Р.Е. Алексеева на базе кафедры «Кораблестроение и авиационная техника» проводятся эксперименты по моделированию разрушений ледяного покрова в малом ледовом бассейне. Преимущества малого ледового бассейна в возможности проведения опытов в течение дня. Затраты на оборудование, обслуживание и проведение опытов при этом минимальны.

Экспериментальное оборудование

Для проведения опытов по изучению композитной модели льда использовался малый ледовый бассейн НГТУ [2]. Бассейн представляет собой ванну размерами 2,4×1,1×0,4 м, размещенную в термокамере «POLAIR KXH-11.02». Конструкция и наличие изоляции в термокамере позволяет проводить эксперименты при температуре не ниже минус 25 °С. Чаша бассейна изготовлена из листового пенопласта, смонтированного на металлическом каркасе. В чаше размещают двумя слоями полиэтиленовую пленку, обеспечивающую герметичность. Для защиты пленки от повреждений ее укладывают поликарбонатные листы, и также по бортам до планшира устанавливаются поликарбонатные листы. Планширь бассейна выполнен

металлическим, на уровне замерзания ледяного поля к вертикальной части планширя присоединялась также металлическая окантовка, поддерживающая боковые листы поликарбоната.

Состав оборудования лаборатории определялся целями и задачами проводимых исследований. В данной установке было совмещено силонагружающее устройство, а также датчики силы и перемещения. Внешний вид устройства показан на рис 1.

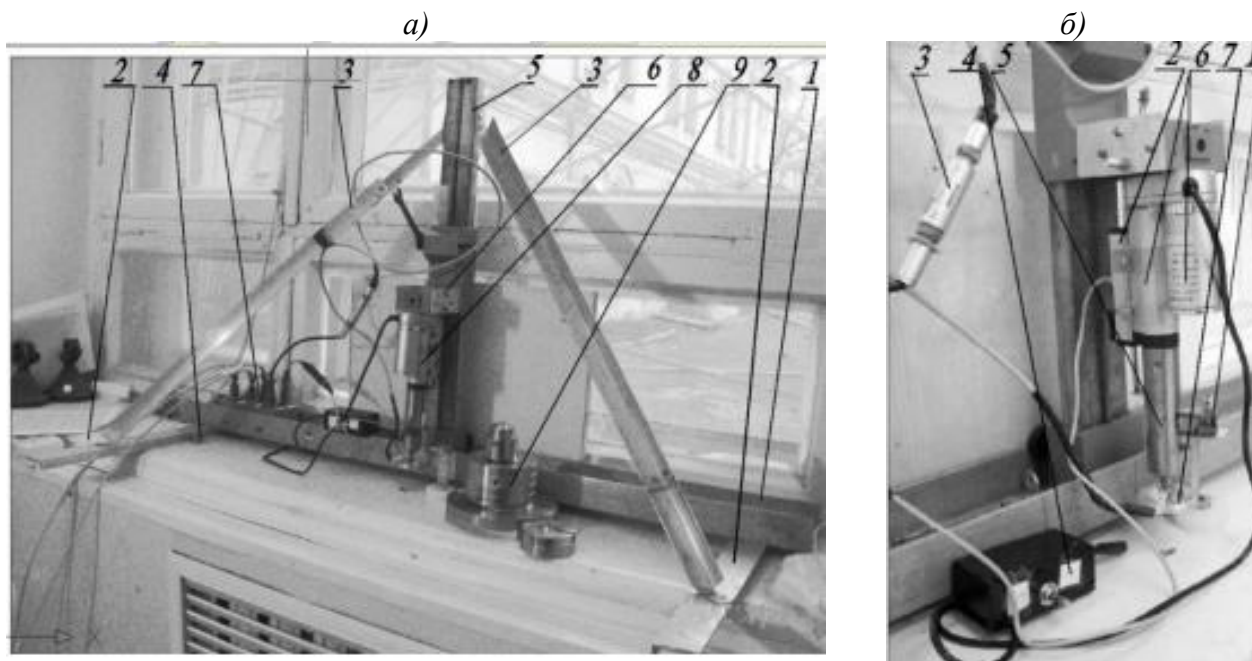


Рис. 1. Установка для проведения экспериментов по разрушению льда:

а) общий вид: 1 – несущая балка, 2 – опоры для крепления на планшире, 3 – раскосы, 4 – винтовые распоры крепления к планширю, 5 – стойка, 6 – передвижная каретка, 7 – блок коммутации, 8 – нагружающий и измерительный блок, 9 – калибровочные грузы датчика силы;

б) силонагружающее устройство: 1 – тензометрический датчик силы (скоба), 2 – потенциометрический датчик перемещения, 3 – усилитель тензодатчика, 4 – рубильник механизма перемещения, 5 – оправка датчика силы, 6 – механизм перемещения упора для создания упора на лед, 7 – упорный элемент

Для контроля оборудования обязательно перед опытом производилась калибровка датчиков, показанных на рис. 1: силы – набором грузов, перемещения – штангенциркулем. Каретка после установки устройства на планшире бассейна перемещалась на стойке так, чтобы упор находился на расстоянии 2-3 мм ото льда. Для опытов по пролому льда тензоскоба помещалась в специальную оправку, обеспечивающую ее вертикальное положение. Для создания нагрузки на лед использован бытовой линейный привод. Линейный ход составляет 50 мм, время полного выдвигания около 10 с, максимальное развиваемое усилие – 500 Н. Для этого привода используется отдельный блок питания 24 В. Потенциометрический датчик линейных перемещений (рис. 2) марки FWAXXT/R имеет ход штока 80 мм, точность измерения 0,01 мм. Универсальный предусилитель LP-04-M напряжения сигнала полного тензомаста (рис. 2) имеет дифференциальный вход усилителя, выход источника опорного напряжения. Коэффициент усиления составляет около 100. Сигналы датчиков передавались на ПК через модуль АЦП/ЦАП «L-Card» 14-140М (рис. 2), предназначенный для построения многоканальных измерительных систем ввода, вывода и обработки аналоговой и цифровой информации, имеет USB интерфейс для подключения к ПК. Низковольтное питание датчиков (2,5 В, 5 В) и усилителя обеспечивалось блоками батарей типа АА.

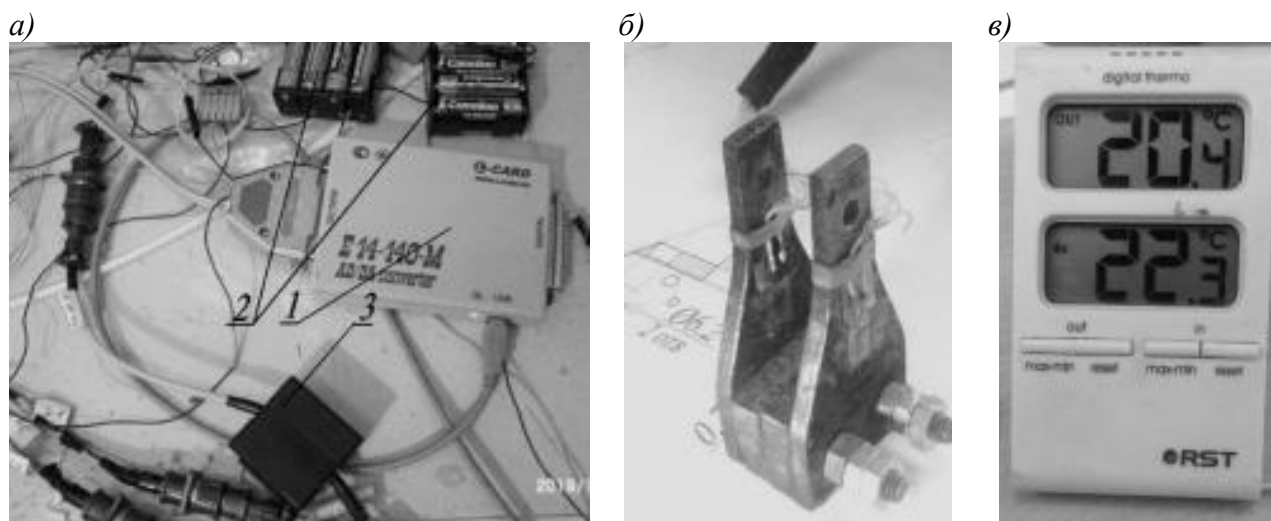


Рис. 2. Оборудование для проведения опытов:

- а) блоки регистрации и питания 1 – устройство регистрации сигналов датчиков, 2 – батареи питания тензодатчика и его усилителя, питание датчика перемещения, 3 – выключатель питания; б) общий вид тензодатчика (скобы); в) лабораторный термометр*

Замеры температуры в термокамере и лаборатории производились дистанционным термометром изображенным на рис.2. Датчик температуры в термокамере был помещен на уровне воды в бассейне, что давало правильные данные о температуре. Датчик на дисплее холодильного агрегата показывал температуру внутри контура испарителя в термокамере, что не соответствовало реальной температуре в камере. Следует отметить, что при отсутствии воды в термокамере в ней можно было добиться температуры $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$, при намораживании льда ниже $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ температура не опускалась. Температура на дне бассейна измерялась обычным бытовым оконным термометром, погрешность составляла $\pm 0,25\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Методика проведения опытов и обработка результатов

Для исследования свойств композитной модели льда использована следующая методика.

1. Распределение гранул в 1, 2 или 3 слоя на поверхности воды в бассейне и их разравнивание.
2. Включение холодильной термокамеры. В процессе ее работы контролировался процесс создания льда композитной конструкции. Для этого производились замеры толщины льда при достижении необходимого для модельного эксперимента ее значения.
3. Размещение и подключение установки для проведения опытов. Установка размещается на планшете бассейна и утяжеляется грузами для надежной фиксации. Размещение установки показано на рис. 3. Далее, к установке подключается питание и провода передачи сигналов от датчиков силы и перемещения к АЦП. Подключение установки показано на рис. 4. После проверки работы установки можно приступать к проведению опыта. Центральный пролом показан на рис. 5. Запись проведенного опыта представлена на рис. 6.
4. Обработка полученных результатов. Данные из специального расширения LGraph переводились в текстовый документ, который далее был обработан посредством пакета программ, написанных на языке Python.



Рис. 3. Размещение установки



Рис. 4. Подключение установки

В процессе обработки получены графики разрушений (рис. 8), а также выполнен расчет необходимых параметров. Модуль упругости ледяного покрова определяется:

$$w = \frac{P}{4\sqrt{kD}} Re H_0^{(1)}(\sqrt{ix}) \quad (1)$$

где $Re H_0^{(1)}(\sqrt{ix})$ – вещественная часть цилиндрической функции Ганкеля нулевого порядка; $D = \frac{Eh_n^3}{12(1-\mu^2)}$ – цилиндрическая жесткость; P – сосредоточенная сила; $k = \rho_B g$ – модуль упругого основания (коэффициент жесткости упругого основания). E – модуль упругости; μ – коэффициент Пуассона.

Решение данного уравнения принадлежит Герцу для стрелки прогиба под нагрузкой:

$$W = \frac{P}{8\sqrt{kD}} \quad (2)$$

$A_p = \int_0^{w_R} P_p(w)dw$ – работа разрушения ледяного покрова. Она соответствует площади диаграммы.



Рис. 5. Проведение опыта

а) до пролома ледяного покрова; б) после пролома ледяного покрова

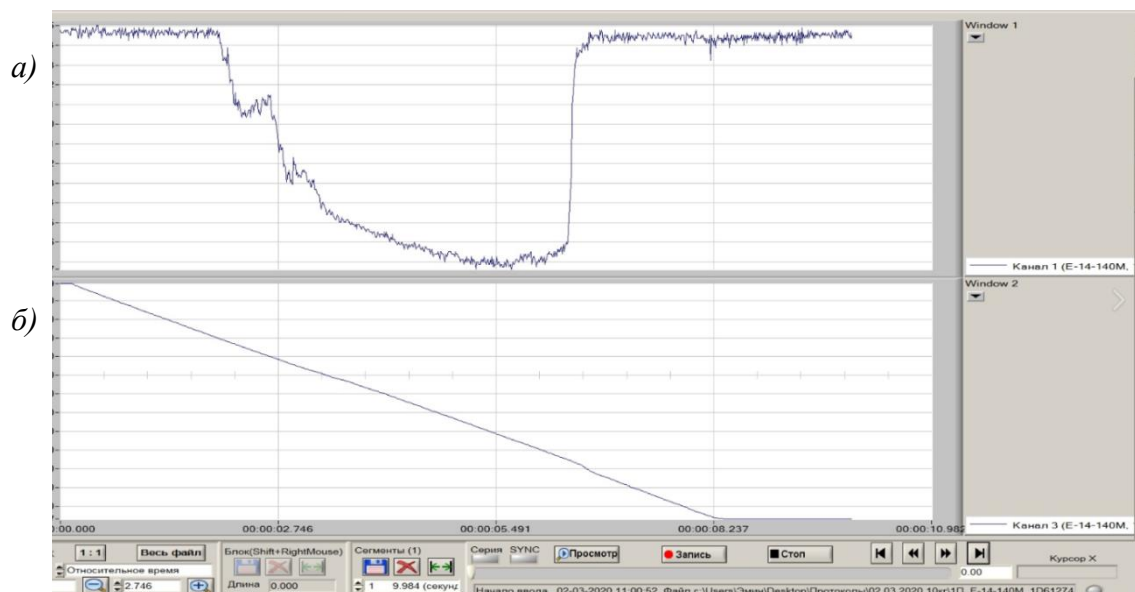


Рис. 6. Результаты опыта центрального пролома композитного льда в ПО LGGraph:

а) окно № 1 – показания датчика силы в вольтах от времени;

б) окно № 2 – показания датчика перемещения в вольтах от времени

На рис. 7 приведена характерная диаграмма разрушения ледяного покрова, где $A_{кр}$ – работа критической части, равная площади под диаграммой от 0 до $w_{кр}$, вычисляется по диаграмме; $A_{закр}$ – работа закритической части, равная площади под диаграммой от $w_{кр}$ до w_{max} , вычисляется по диаграмме; $A = A_{кр} + A_{закр}$ – полная работа.

По параметрам, полученным с диаграммы разрушения, были вычислены коэффициенты:

$$K_{A_{кр}} = \frac{A_{кр}}{F_{max} \cdot w_{кр}} \text{ – коэффициент критической части;}$$

$$K_{A_{закр}} = \frac{A_{закр}}{F_{max} \cdot w_{max}} \text{ – коэффициент критической части;}$$

$$K_A = \frac{A}{F_{max} \cdot w_{max}} \text{ – коэффициент всей части диаграммы;}$$

$A_{закр}/A$ – отношение работы закритической части к полной работе.

В результате проведенных исследований получены диаграммы разрушения композитной модели льда для различных толщин. В качестве примера на рис. 8, 9 представлены диаграммы для модели льда толщиной 2,5 и 5 мм.

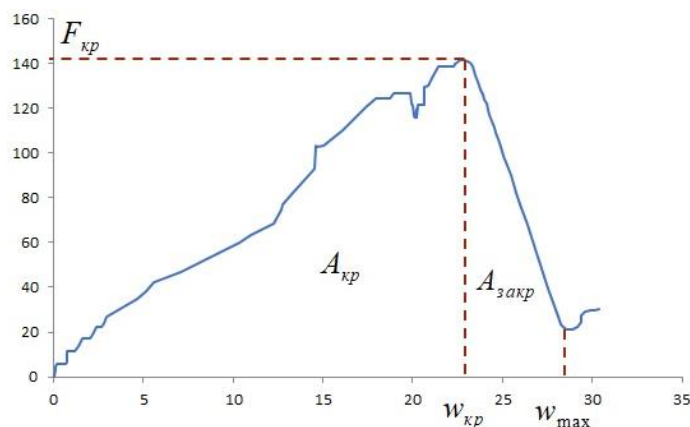


Рис. 7. Характерный вид диаграммы разрушения

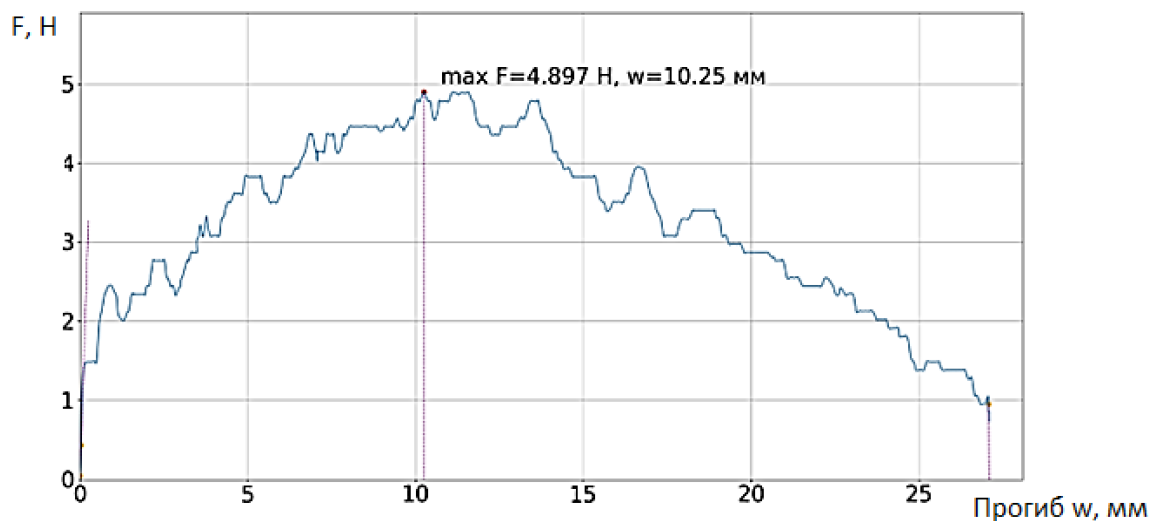


Рис. 8. Диаграммы разрушений композитного льда толщиной 2,5 мм

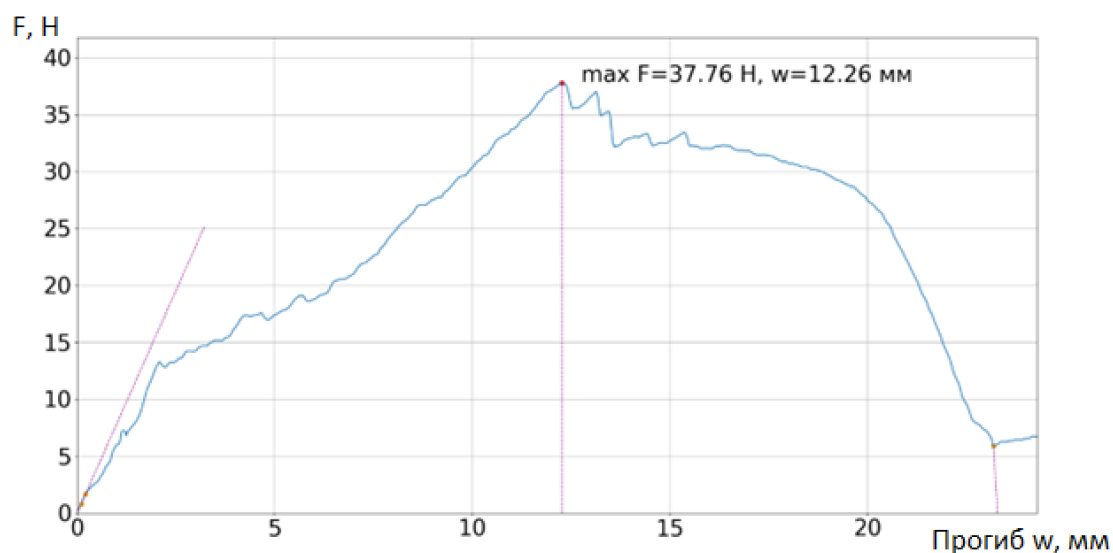


Рис. 9. Диаграммы разрушений композитного льда толщиной 5 мм

В табл. 1 представлены физико-механические свойства и коэффициенты полученные по диаграммам разрушения композитной модели льда (рис. 8, 9). Полученные диаграммы имеют вид схожий с диаграммами разрушения натурального льда [3], а также равное значение коэффициентов, что говорит о работоспособности данной модели льда.

Таблица 1.
Физико-механические свойства и коэффициенты

$h_{л}, \text{ мм}$	$F_{max}, \text{ Н}$	$D, \text{ Н/м}$	$W, \text{ МПа}$	$A_{кр}, \text{ Дж}$	$A_{закр}, \text{ Дж}$	$A, \text{ Дж}$	$K1$	$K2$	ΣK	$A2/A_{\Sigma}$
5	37,76	96,99	0,415	0,2504	0,3037	0,5542	0,5411	0,7291	0,6301	0,548
2,5	4,90	267,60	1,145	0,0340	0,0526	0,0867	0,6785	0,638	0,6533	0,607

Для дальнейшего моделирования льда рассмотренной композитной структуры необходимо провести серию повторных опытов, что позволит получить более точную картину разрушения модельного льда, а также уточнить данные при пересчете на натуру.

Заключение

Произведены модельные эксперименты по разрушения композитной модели льда и получены его физико-механические свойства: модуль упругости, цилиндрическая жесткость, работа разрушения, работа критической части, работа закритической части, полная работа, отношение работы закритической части к полной работе. Также определены коэффициенты разрушения композитной модели льда: коэффициент критической части, коэффициент закритической части, коэффициент всей части диаграммы.

Представленные исследования выполнены по проекту № 22-19-00376 «Экспериментально-теоретическое исследование полуэмпирических моделей взаимодействия судов со льдом» в рамках гранта РФФ.

Библиографический список

1. Двойченко, Ю.А. К вопросу о моделировании ледяного покрова с использованием композитной модели льда [Текст] / Двойченко, Ю.А., Зуев, В.А., Себин А.С. // Труды Крыловского государственного научного центра. 2019. Специальный выпуск 2. С. 59-62.
2. Зуев, В.А. Техника и технология исследований модельного льда в малом ледовом бассейне НГТУ им. Р.Е. Алексеева [Текст] / В.А. Зуев, Ю.А. Двойченко, А.С. Себин // Транспортные системы. 2019. № 3 (13). С. 39-47.
3. Ионов, Б.П. Ледовая ходкость судов [Текст] / Б.П. Ионов, Е.М. Грамузов. – СПб: Судостроение, 2001. – 522 с.