

**ИТОГИ РАБОТЫ БОЛЬШОГО ЛЕДОВОГО БАССЕЙНА ААНИИ
(К 25-ЛЕТИЮ СО ДНЯ ВВОДА В СТРОЙ)**

*ст. науч. сотр. Н.А. КРУПИНА, канд. тех. наук В.А. ЛИХОМАНОВ,
мл. науч. сотр. П.В. МАКСИМОВА, мл. науч. сотр. П.М. НИКОЛАЕВ,
науч. сотр. А.В. САВИЦКАЯ, вед. инженер И.А. СВИСТУНОВ,
ст. науч. сотр. А.В. ЧЕРНОВ*

ГНЦ РФ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт. Санкт-Петербург, e-mail: olks@aari.ru

Большой ледовый бассейн ААНИИ введен в эксплуатацию в 1990 г. на смену первому в мире опытному ледовому бассейну, располагавшемуся в старом здании института. За 25 лет его работы существенно расширился диапазон выполняемых исследований, были разработаны новые методики подготовки и проведения экспериментов, усовершенствовано измерительное оборудование. В статье кратко описаны основные принципы физического моделирования, используемое в ледовом бассейне оборудование и наиболее интересные и перспективные экспериментальные работы.

Ключевые слова: ледовый бассейн, физическое моделирование, критерии подобия, ледовые качества, ледопроеходимость судна, ледовые нагрузки, шельфовые сооружения.

В послевоенные годы в СССР с большой интенсивностью возобновились исследования полярных областей нашей страны и, в первую очередь, ее национальной транспортной магистрали — Северного морского пути. Для этого требовался новый современный флот, включающий мощные ледоколы и транспортные суда, обладающие высокой ледопроеходимостью, мощностью и прочностью корпуса. Для облегчения проектирования таких судов в ААНИИ в 1955 г. был построен первый в мире ледовый опытный бассейн, основной задачей которого была отработка методом физического моделирования оптимальной формы корпуса судна и мощности энергетической установки, которая бы обеспечивала ему проектную ледопроеходимость. Тогда же в ААНИИ была разработана методика намораживания моделированного льда, основные прочностные свойства которого уменьшались по сравнению с аналогичными свойствами морского натурального льда пропорционально масштабу эксперимента. Методика давала возможность соблюдать геометрический, кинематический и динамический критерии подобия, что позволяло пересчитывать результаты эксперимента на натуре с большой точностью. Несмотря на небольшие размеры бассейна, в нем успешно прошли испытания первого в мире атомного ледокола «Ленин», атомных ледоколов типа «Арктика» и многих судов ледового плавания отечественных и зарубежных проектов.

В 1990 г., в соответствии со специальным постановлением Совета министров СССР, был введен в строй новый комплекс ледовых бассейнов, входящих в состав нового здания Арктического и антарктического научно-исследовательского института. Подробно технические характеристики ледового бассейна ААНИИ неоднократно опубликованы. Здесь стоит упомянуть лишь о том, что в его конструкции учтены все

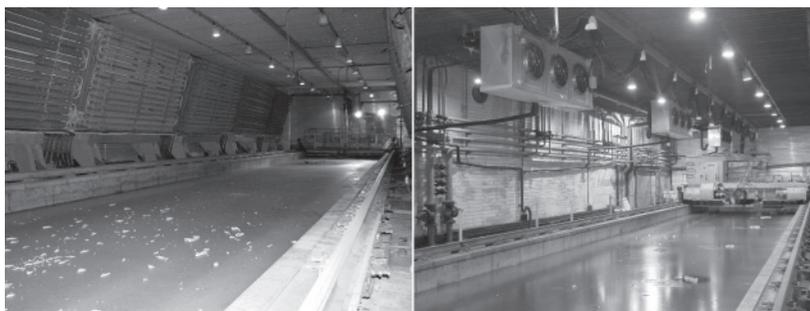


Рис. 1. Общий вид большого ледового бассейна ААНИИ: первоначальное состояние (слева) и после модернизации 2008 г. (справа).

положительные особенности первого бассейна. В частности, предусмотрена возможность быстро изменять соленость воды в чаше бассейна и управлять прочностными характеристиками льда. Модернизированная система охлаждения позволяет быстро и в широком диапазоне управлять режимом намораживания льда и температурным режимом в процессе проведения эксперимента. Работа холодильной системы автоматизирована. Управление ею осуществляется через Интернет. Система управления позволяет выбирать и устанавливать режимы намораживания льда и сохранять данные о температурном режиме в процессе наморозки. Эти данные используются для управления параметрами льда и его качеством.

На рис. 1 показан общий вид ледового бассейна ААНИИ.

Модельные эксперименты в ледовом бассейне выполняются в строгом соответствии с теорией подобия. Способ и устройство для моделирования ледяного покрова в ледовом опытовом бассейне ААНИИ позволяют, как было отмечено выше, соблюдать геометрический, кинематический и динамический критерии подобия (патент № 2535398). Используемые критерии приведены в табл. 1.

Таблица 1

**Критерии подобия при выполнении физического моделирования
(λ — масштаб моделирования)**

Параметр	Соотношение значений на натуре и в модельном эксперименте
Интервалы времени	$\lambda^{1/2}$
Линейные перемещения	λ
Угловые перемещения	1
Линейные скорости	$\lambda^{1/2}$
Угловые скорости	$1/\lambda^{1/2}$
Линейные ускорения	1
Угловые ускорения	$1/\lambda$
Силы	λ^3
Моменты сил	λ^4
Прочность льда	λ
Модуль упругости льда	λ

Основными задачами экспериментов по испытанию моделей судов в ледовом бассейне являются:

- оптимизация обводов корпуса судна;
- снижение ледового сопротивления;
- определение необходимой мощности энергетической установки судна для обеспечения спецификационной ледопроходимости судна;
- уменьшение воздействия льда на движительный комплекс;
- верификация результатов численного моделирования.

Бассейн оснащен рабочей тележкой, способной передвигаться по всей его длине с заданной скоростью и предназначенной как непосредственно для буксировки моделей судов, так и для вспомогательных операций, включая подготовку и уборку моделированного льда, исследование прочности льда и т.д. Бассейн оборудован также системой буксировки с помощью «падающего груза», что, в случае необходимости, позволяет обеспечивать движение модели судна во льду со строго заданной тягой.

За последние 25 лет, в связи с расширением диапазона выполняемых исследований, появлением современной компьютерной техники и т.д., измерительное оборудование было обновлено и/или усовершенствовано. Ввиду разнообразия решаемых задач и необходимости регистрации различных параметров в каждом эксперименте используется специально разработанная измерительная схема.

Для измерения усилий практически во всех модельных испытаниях используется тензометрическая система, которая включает в себя тензометрические датчики и тензостанцию, состоящую из модулей производства National Instruments Corporation (США), для регистрации показаний этих датчиков. Сборка тензостанции и разработка программного обеспечения была осуществлена фирмой «Витэк» (Санкт-Петербург, Россия), являющейся членом National Instruments Alliance. Многолетний опыт показал, что наиболее подходящими для условий ледового бассейна являются тензорезисторы фирмы Omega Engineering Inc. (США) сопротивлением 350 Ом, длиной измерительной решетки 10 мм и коэффициентом тензочувствительности (GF) 2. Оборудование позволяет вести непрерывную запись 20 каналов на протяжении 3 часов с частотой опроса 2 кГц.

В случаях, когда в эксперименте необходимо не только измерить усилие, но и получить распределение давлений по пятну контакта объекта со льдом, используется универсальная измерительная система фирмы Tekscan модели I-Scan IE1 (США). Система состоит из пленочного датчика контактных давлений и коннектора, соединяемого с датчиком, и специального программного обеспечения, которое считывает, регистрирует, анализирует данные о контактных давлениях и позволяет получать картину распределения давления по поверхности датчика в режиме реального времени и регистрировать ее с частотой опроса 100 Гц.

При проведении модельных испытаний часто требуется определить кинематические параметры в процессе движения модели и контакта со льдом. Для этих целей используется прибор БДК производства ОАО АНПП «Темп-Авиа» (Россия). Прибор состоит из трех акселерометров и трех измерителей угловых скоростей (гироскопов), размещенных ортогонально друг другу. Акселерометры измеряют общее ускорение (включая компоненту силы тяжести) вдоль осей X, Y и Z модели. Гироскопы измеряют три компоненты угловой скорости вращения модели вдоль мгновенных положений осей X, Y, Z. В качестве чувствительных элементов используются прецизионные

акселерометры и волоконные гироскопы. Для регистрации показаний прибора также может использоваться тензостанция, характеристики которой указаны выше. Технические характеристики прибора БДК: диапазон измерения угловых скоростей — до 300 град/с с погрешностью 0,1 %; диапазон измерения ускорения — до 4g; средняя наработка на отказ — 5000 ч; время готовности — 3 мин; время непрерывной работы — 12 ч; выходной сигнал — аналоговый.

Все описанное измерительное оборудование является универсальным и может использоваться при проведении любых модельных испытаний в ледовом бассейне в зависимости от целей исследований.

Как уже говорилось выше, первоначально основным назначением ледового бассейна было проведение модельных испытаний для оценки сопротивления судов ледового плавания при движении в сплошном ровном льду. Однако в последнее время в ледовом бассейне ААНИИ выполнялся целый ряд модельных экспериментов, которые не являются традиционными: исследовалось воздействие льда на различные шельфовые сооружения, моделировалась эволюция канала при многократном проходе по нему судна, оценивались нагрузки на всплывающие из-под льда объекты. Более того, выполнялась обширная программа работ по исследованию механики разрушения льда естественного намерзания толщиной около 50 см. Новые виды испытаний потребовали разработать методики физического моделирования различных ледяных образований, в частности торосов с заданными морфометрическими и прочностными параметрами, а также для обеспечения подобия свойств льда, не ограничиваться прочностью при изгибе и модулем упругости, но и уделять особое внимание прочности при сжатии.

Ниже приведены примеры наиболее интересных и нетипичных работ в ледовом бассейне.

В 2012 г. в рамках проектов по освоению и обустройству газоконденсатных месторождений в Обской губе перед ААНИИ была поставлена задача определения необходимого количества ледовых каналов в припае на подходе к порту Сабетта для обеспечения круглогодичной навигации. Эта задача решалась путем как математического, так и физического моделирования в ледовом бассейне ААНИИ. Для этого была разработана специальная уникальная методика моделирования и изготовлена самоходная модель газовоза, планирующегося к эксплуатации в Обской губе. В ходе эксперимента обеспечивалось геометрическое и динамическое подобие, а также подобие по тяге винтов. Эксперименты заключались в последовательных пробегах по каналу с периодичностью 3–4 ч. При замерзании канала после прохода модели в нем на участках чистой воды создавался моделированный лед. Целью испытаний являлось исследование ледопроеходимости судна в канале в условиях накопления льда. Было проведено несколько серий тестов. На рис. 2 показано состояние канала после прохода модели по сплошному льду (слева) и после нескольких пробегов (справа). Из рисунка видно, что в канале увеличилась сплоченность льда, уменьшились размеры блоков льда и практически выровнялись кромки канала. Анализ полученных результатов показал, что наибольшее влияние на ледопроежимость оказывают два параметра: объем битого льда в канале и намерзание льда на кромках канала, что является наиболее значимым для крупнотоннажных судов с протяженной цилиндрической вставкой.

Эксперименты в ледовом бассейне ААНИИ не ограничиваются моделированием движения судов во льдах. Все чаще выполняются модельные испытания воздействия

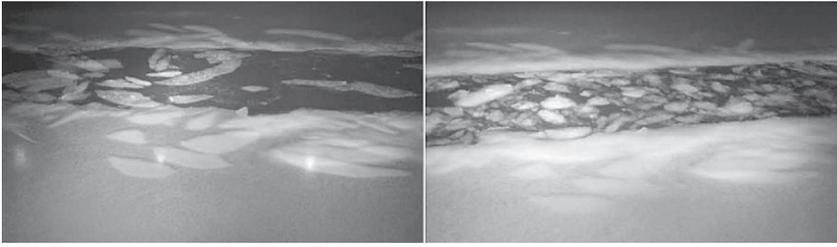


Рис. 2. Состояние канала после прохода модели по сплошному льду (слева) и после нескольких пробегов (справа).

льда на шельфовые сооружения. Первые подобные эксперименты были выполнены еще в 1994 г. Они состояли в оценке ледовых нагрузок на платформу «Приразломная» и на конический терминал. В последние годы в Большом ледовом бассейне было испытано много типов различных сооружений. Моделирование взаимодействия льда и сооружения в ледовом бассейне может выполняться двумя способами: с помощью прямого и обращенного движения. В первом случае модель сооружения закрепляется в заданной точке бассейна, а ледяной покров надвигается на нее с требуемой скоростью. Во втором случае ледяное поле остается неподвижным, а модель сооружения, закрепленная на буксировочной тележке, двигается сквозь лед. Способ проведения эксперимента выбирается для каждого конкретного эксперимента в зависимости от целей его проведения и решаемых задач.

Например, серия экспериментов по оценке ледовой нагрузки на многоопорное сооружение – пирс эстакадного типа с опорами из стальных труб – проводилась методом обращенного движения, т.е. модель с помощью тележки буксировалась через ледяное поле с заданной скоростью. Для испытаний была подготовлена модель оконечности пирса, наиболее подверженной воздействию льда. Модель состояла из 10 опор, каждая из которых была снабжена двухосевым динамометром, позволяющим измерять усилия в двух взаимно перпендикулярных направлениях в горизонтальной плоскости, по показаниям которых определялась величина суммарной нагрузки. Запись велась синхронно со всех датчиков, установленных на всех опорах модели. Внешний вид модели показан на рис. 3.

В соответствии с техническим заданием нужно было оценить суммарную нагрузку на каждую опору причала и распределение усилия между опорами при различных направлениях воздействия льда при заданных параметрах. Для имитации воздействия

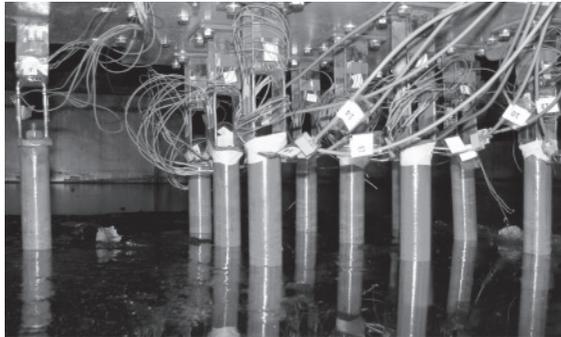


Рис. 3. Модель пирса, подготовленная к испытаниям.

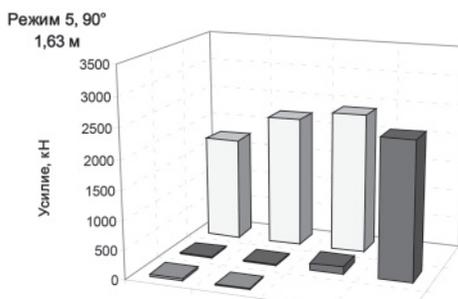


Рис. 4. Фрагмент испытаний и распределение усилий на опорах модели при воздействии льда толщиной в пересчете на натуру 1,63 м под углом дрейфа 90°.

льда с разных направлений относительно оси пирса, модель устанавливалась в разных положениях относительно направления движения – под углами 0°, 30°, 45°, 60°, 90° и 120°. На рис. 4, 5 показаны фрагменты испытаний и гистограммы распределения усилий по опорам при воздействии льда под углом 90° и 120° к продольной оси пирса.

Результаты испытаний позволили заказчику спроектировать оптимальную систему подкреплений опор пирса и обосновать проектные решения.

В качестве еще одного примера экспериментов по исследованию воздействия льда на шельфовые сооружения можно привести работу, в рамках которой выполнялось физическое моделирование средней и максимальной величины горизонтальной составляющей ледовой нагрузки при воздействии ровного льда на сооружения трех типов:

- плавучую нефтегазовую платформу судового типа;
- самоподъемную нефтегазовую платформу трехопорной конструкции с цилиндрическими колоннами — опорами;
- нефтегазовое сооружение гравитационного погружного типа с квадратным основанием с вертикальной или слабо наклонной стенкой.

Для решения поставленной задачи были изготовлены модели трех указанных сооружений. С целью максимального подобия экспериментов и для возможности дальнейшего сопоставления результатов все модели были выполнены в одинаковом масштабе 1:60. На рис. 6 и 7 показаны модели трехопорной платформы и платформы гравитационного типа в ходе модельных ледовых испытаний.

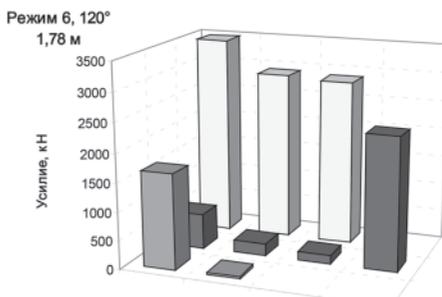


Рис. 5. Фрагмент испытаний и распределение усилий на опорах модели при воздействии льда толщиной в пересчете на натуру 1,78 м под углом дрейфа 120°.

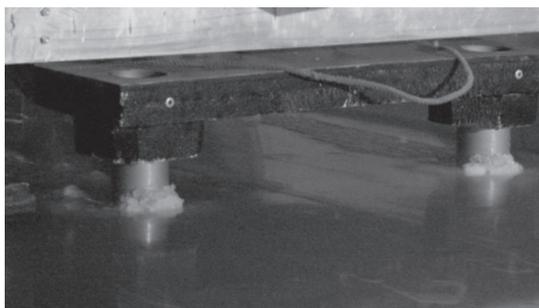


Рис. 6. Модель самоподъемной платформы с цилиндрическими опорами во время испытаний в ледовом бассейне при толщине моделированного льда 19 мм (что соответствует 1,14 м в натуральных условиях): воздействие льда со стороны двух опор.

В отличие от упомянутых выше экспериментов с моделью многоопорного пирса, эти испытания проводились методом прямого движения. Модели устанавливались на поперечном мостике в ледовом бассейне, где заранее было подготовлено ледяное поле требуемой толщины и прочности. Крепление моделей к мостику осуществлялось через измерительный динамометр, направление которого совпадало с направлением движения льда. Во время эксперимента ледяное поле равномерно надвигалось на модель с заданной скоростью. Длина участка ледяного поля, взаимодействовавшего с моделью на протяжении одного эксперимента, как правило, составляла не менее 3–4 длин корпуса модели. Анализ результатов выявил зависимости ледовой нагрузки от толщины льда. Аппроксимация экспериментальных точек степенной функцией почти для всех сценариев взаимодействия дает показатель степени, близкий к 2.

В конце 2014 г. в ледовом бассейне ААНИИ были завершены работы по физическому моделированию воздействия льда на проектируемые портовые сооружения в районе Салмановского месторождения. В рамках данной работы оценивалась глобальная ледовая нагрузка на ледозащитную дамбу в заданных ледовых условиях. Эксперименты проводились способом надвигания ледяного поля на неподвижную модель сооружения, что наиболее достоверно отображает процессы, происходящие в реальных условиях. Модель сооружения представляла собой стенку шириной, равной ширине бассейна, с переменным углом наклона передней грани. Измерительная панель шириной 1 метр, снабженная 4-мя двухосевыми динамометрами для независимого измерения горизонтальной и вертикальной компонент ледовой нагрузки, размещалась

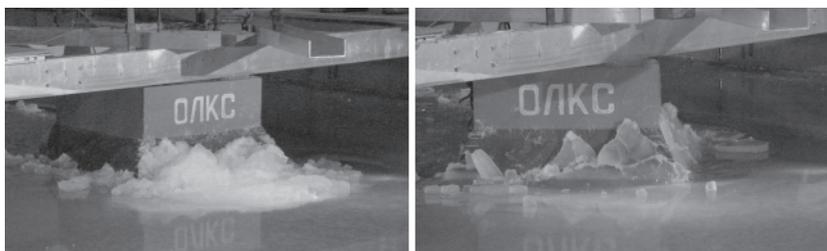


Рис. 7. Модель сооружения гравитационного погружного типа во время испытаний в ледовом бассейне при толщине моделированного льда 23 мм (что соответствует 1,4 м в натуральных условиях): воздействие льда на фронт сооружения (слева) и воздействие льда под углом 45° к фронту сооружения (справа).

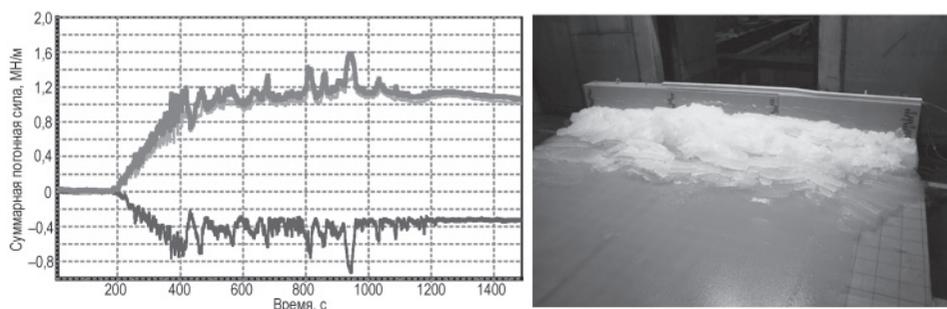


Рис. 8. Вертикальная, горизонтальная и суммарная нагрузка в пересчете на натуру (слева) и фото образовавшегося навала льда в конце проведения эксперимента (справа).

в середине модели, чем обеспечивалось отсутствие краевых эффектов при разрушении ледяного образования. Модель также включала имитатор дна акватории, причем его заглубление можно было варьировать.

На рис. 8 показаны полученные в результате эксперимента графики ледовой нагрузки и фото сооружения с образовавшимся навалом льда в конце проведения эксперимента (показаны результаты воздействия льда на сооружение с наклонной передней гранью). В связи с тем, что измерения нагрузки проводились на небольшом участке протяженного сооружения, результаты представлены в виде погонной силы. На графике усилий показано изменение горизонтальной, вертикальной и суммарной погонной силы в ходе одного из экспериментов. Из графика видно, что при данной форме сооружения на начальном этапе, когда надвигающийся лед взаимодействует непосредственно с сооружением, нагрузка резко возрастает, а далее, при образовавшемся навале, практически стабилизируется на некотором значении.

Как уже говорилось выше, методика подготовки моделированного льда в ледовом бассейне направлена в первую очередь на обеспечение заданных значений изгибной прочности и модуля упругости льда. Однако в данной работе было необходимо дополнительно обеспечить определенное соотношение между прочностью при изгибе и прочностью при сжатии. Чтобы добиться требуемых соотношений, была проведена методическая работа по усовершенствованию существующей методики приготовления моделированного льда.

Кроме характера ледового воздействия и величины ледовой нагрузки по результатам экспериментов были получены оценки геометрических характеристик навалов, образовавшихся перед сооружением: длина навала, высота надводной и глубина подводной частей навала, а также размеры блоков, его образующих. Следует отметить,

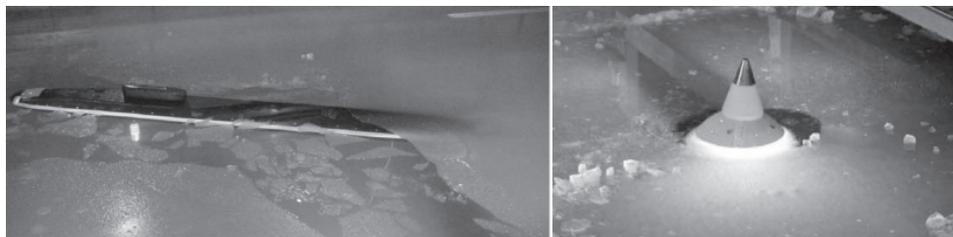


Рис. 9. Всплытие подводной лодки (слева) и спасательной камеры (справа) во время экспериментов в ледовом бассейне ААНИИ.

что полученные оценки справедливы только для глобальных нагрузок и неприменимы для расчета местной прочности сооружения.

Принципиально новым направлением экспериментальных работ в бассейне являются исследования всплытия подводных объектов из-под льда. Начиная с 2012 г. в БЛБ по заказу ЦКБ МТ «Рубин» проводятся испытания моделей подводной лодки (ПЛ) и всплывающей спасательной камеры (КСВ) с целью определения усилий на их корпусные конструкции при проламывании льда. На рис. 9 показаны фрагменты этих испытаний. Выполнение исследований потребовало разработки принципиально новой методики проведения экспериментов, позволяющей обеспечить всплытие моделей с различной глубины, при заданных требуемых параметрах: избыточной плавучести, начальном дифференте и крене, положении центра тяжести и др.

Измерительная схема для определения усилий состояла из комбинации тензометрических датчиков и датчика контактных усилий. Ледовые нагрузки на выступающие элементы корпуса, такие как рубка и перо руля на лодке или верхний элемент на камере, измерялись с помощью тензометрии. А нагрузки на основной корпус лодки — с помощью датчика контактных давлений. Учитывая, что ледовая нагрузка зависит от скорости взаимодействия и формы контактирующих поверхностей, в экспериментах было важно определить кинематику всплывающих объектов. Для этого использовался прибор БДК, с помощью которого удалось не только определить скорость моделей при контакте со льдом при разной плавучести и глубине всплытия, но и изменение этой скорости в процессе проламывания льда. Также БДК позволил определить крен и дифферент моделей при контакте со льдом, что дало информацию о положении зоны контакта. Дополнительно к определению ледовых нагрузок в ходе экспериментов был исследован обширный круг вопросов, связанных со взаимодействием всплывающего объекта с ледяным покровом, таких как влияние различных типов инденторов, устанавливаемых на ограждении выдвижных устройств ПЛ, на величину возникающей ледовой нагрузки; влияние формы палубы ПЛ на степень ее очистки ото льда в процессе всплытия; эффективность различных форм верхней части КСВ с точки зрения обеспечения спасения экипажей ПЛ при всплытии в ледовых условиях и т.д.

Помимо моделированного льда, чаша большого ледового бассейна обладает достаточной прочностью для получения льда естественного намерзания толщиной до 70 см, что позволяет проводить эксперименты в полунатурном и даже натурном масштабе. Например, в 2006–2007 гг. в БЛБ в рамках работ по гранту РФФИ № 06-08-01288 «Исследование характеристик разрушения и трещиностойкости льда при сложном нагружении в лабораторных условиях» были выполнены уникальные эксперименты на льду естественного намерзания толщиной около 45 см. Основной целью данной работы было выявить зависимость параметров разрушения льда от скорости нагружения, при относительной стабильности значений остальных внешних факторов. Ввиду того, что температурный режим в лабораторном помещении сохранялся постоянным на протяжении всего времени подготовки ледяного покрова, воздействия солнечной радиации и снега полностью отсутствовали, лед, намороженный в бассейне, являлся более однородным, чем морской лед природных водоемов, т.е. были созданы идеальные (эталонные) условия для проведения экспериментов. Программа экспериментов включала испытания при одноосном сжатии цилиндрических образцов высотой 250 мм и диаметром 142 мм, отобранных как перпендикулярно, так и параллельно поверхности ледяного покрова. Поперечные размеры образцов по крайней

мере на порядок превышали размеры кристаллов льда. Нагрузка прикладывалась к образцам в направлении их оси. Всего было испытано 398 образцов. В ходе каждого эксперимента фиксировались зависимости от времени силы, действующей на образец, и деформации образца. Первичная обработка экспериментальных данных состояла в получении для каждого образца диаграммы «напряжения-деформации», которые нормировались по максимальным для каждого образца значениям деформации и напряжения. При этом была выявлена высокая степень нелинейности получаемых диаграмм. Статистическая обработка показала, что диаграммы деформирования для морского льда с высокой точностью могут быть аппроксимированы степенной зависимостью, причем распределение значений показателей степени подчиняется лог-нормальному закону. Для проведения более глубокого анализа была разработана конечно-элементная модель нагружения образцов с учетом физико-механических свойств льда. В результате численного моделирования была получена расчетная картина напряженно-деформированного состояния образца. На основании сопоставления результатов расчетов с реальной картиной разрушения были построены критерии разрушения льда в зависимости от направления приложения нагрузки, скорости нагружения образца и температуры льда, необходимые в численных моделях для расчета ледовых нагрузок на инженерные объекты. В ходе работы было спроектировано, изготовлено и испытано в бассейне уникальное оборудование, позволяющее проводить испытания прочностных свойств в натуральных условиях. Оборудование неоднократно использовалось при проведении полевых работ.

В последние годы после частичной модернизации большой ледовый бассейн напряженно работал без перерывов даже в летние месяцы. Расширен диапазон исследований ледовых качеств судов, в частности, освоены самоходные испытания с новыми типами движителей. Наряду с традиционными работами, освоены принципиально новые направления: экспериментальные исследования параметров всплытия из-под льда подводных объектов и оценка величины и распределения ледовых нагрузок на многоопорные гидротехнические сооружения в зависимости от ледовых условий и направления дрейфа льда. Полученные результаты позволят внести коррективы в теоретические модели расчета динамики движения подводных объектов, а также более точно определять необходимое количество опор, их размеры и места расположений в конструкции многоопорных шельфовых сооружений, что может существенно повысить безопасность и экономическую эффективность их строительства и эксплуатации.

*N.A. KRUPINA, V.A. LIKHOMANOV, P.V. MAKSIMOVA, P.M. NIKOLAEV,
A.V. SAVITSKAYA, I.A. SVISTUNOV, A.V. CHERNOV*

RESULTS OF WORK OF LARGE ICE TANK OF AARI (TO THE 25TH ANNIVERSARY OF THE COMMISSIONING)

Large ice tank AARI was commissioned in 1990 to replace the world's first ice tank, located in the old building of the institute. For 25 years, his work has expanded the range of studies carried out, have developed new methods of preparation and experimentation, advanced measuring equipment. The article briefly describes the basic principles of physical modeling and experimental equipment used in the ice tank and also contains the most interesting and promising experimental work.

Keywords: ice tank, physical modelling, similarity criterion, ice properties, ice capability, ice loads, offshore structure.