

## ЛЕДОТЕХНИКА ICE TECHNOLOGY

Оригинальная статья / Original paper

<https://doi.org/10.30758/0555-2648-2025-71-1-46-62>

УДК 629.5.018




### Модернизированный комплекс ледовых бассейнов ФГБУ «ААНИИ» К 35-летию со дня ввода в строй

П.В. Пацева<sup>✉</sup>, А.В. Савицкая, Н.А. Крупина, А.В. Чернов,  
И.А. Свистунов, В.А. Лихоманов

ГНЦ РФ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт,  
Санкт-Петербург, Россия

<sup>✉</sup>[pvpatseva@aari.ru](mailto:pvpatseva@aari.ru)

 ПВП, 0000-0002-5218-3756; НАК, 0000-0002-3043-5713; АВЧ, 0000-0001-8462-7270;  
ИАС, 0009-0002-9436-4288

**Аннотация.** Модернизация комплекса ледовых бассейнов ААНИИ, открытых в 1990 г., была выполнена в 2022–2023 гг. в рамках гранта, выделенного Министерством науки и высшего образования РФ. В процессе модернизации была выполнена замена холодильных установок большого и малого ледовых бассейнов, организован теплоизолированный комплекс помещений с зернохранилищем, закуплено новое измерительное оборудование, обновлен станочный парк модельной мастерской. Проведенная модернизация позволяет расширить диапазон исследований, которые могут выполняться в комплексе ледовых бассейнов ААНИИ. В статье приведен краткий обзор современных ледовых бассейнов, существующих в России и за рубежом. Рассмотрены результаты модернизации и возможности комплекса ледовых бассейнов ААНИИ. Представлены наиболее интересные и значимые экспериментальные работы, выполненные за последние 10 лет. Описаны самоходные испытания моделей судов, оснащенных дистанционно управляемыми винторулевыми колонками, в том числе испытания нового научно-экспедиционного судна «Иван Фролов», строящегося для ААНИИ. Рассмотрены результаты испытаний ледостойкой самодвижущейся платформы (ЛСП) — НЭС «Северный полюс» в условиях интенсивного сжатия льда. Представлены работы по физическому моделированию взаимодействия льда с гидротехническими сооружениями.

**Ключевые слова:** ледовая ходкость судна, ледовый бассейн, моделированный лед, модельный эксперимент, толщина льда

**Для цитирования:** Пацева П.В., Савицкая А.В., Крупина Н.А., Чернов А.В., Свистунов И.А., Лихоманов В.А. Модернизированный комплекс ледовых бассейнов ФГБУ «ААНИИ». К 35-летию со дня ввода в строй. *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2025;71(1):46–62. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2025-71-1-46-62>

Поступила 19.11.2024

После переработки 03.02.2025

Принята 10.02.2025

© Авторы, 2024

© Authors, 2024

## Modernized complex of FSBI “AARI” ice tanks On the 35<sup>th</sup> anniversary of its commissioning

Polina V. Patseva✉, Anna V. Savitskaya, Nina A. Krupina, Alexey V. Chernov,  
Ivan A. Svistunov, Vladimir A. Likhomanov

*State Scientific Center of the Russian Federation Arctic and Antarctic Research Institute,  
St. Petersburg, Russia*

✉pvpatseva@aari.ru

✉ PVP, 0000-0002-5218-3756; NAK, 0000-0002-3043-5713; AVC, 0000-0001-8462-7270;  
IAS, 0009-0002-9436-4288

**Abstract.** The current AARI complex of ice tanks was commissioned in 1990. Its modernization was carried out in 2022–2023 within the framework of a grant allocated by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation. In the course of the modernization, the refrigeration units of the large and small ice basins were renewed, a thermally insulated complex of rooms with a core storage facility was built, new measuring equipment was purchased, and the machine park of the model workshop was updated. The article discusses the results of the modernization and the capabilities of the complex of ice basins. 30 m long, 5 m wide and 1.8 m deep, the large tank allows ship models and offshore structures to be tested in various ice conditions. The ice basin has a deep-water part with a depth of 6 m, which is used to model the surfacing of underwater objects from under the ice. The small ice tank, 5 m in length, 5 m in width, and 2.5 m in depth is used to perform a wide range of studies on naturally frozen ice in the field of mechanics of deformation and fracture of sea ice. The small tank can also be used as a low-temperature laboratory to study the properties of various coatings and materials. The paper presents the most interesting and significant experimental studies carried out at the AARI complex of ice basins over the past 10 years. The studies include: self-propelled testing of ship models equipped with new remotely controlled rudder propellers including the testing of the new scientific expedition vessel «Ivan Frolov», currently being built for the AARI; physical modeling of the behavior of the ice-resistant self-propelled platform (IRSPP) “North Pole” under conditions of intense ice compression; physical modeling of the interaction of ice with hydraulic structures: bridge piers and shore reinforcement structures. The modernization of equipment and measuring devices contributes to a significant increase in the range of studies that can be performed using the AARI complex of ice tanks and enhances the quality of studies.

**Keywords:** ice capability of ship, ice basin, modeled ice, model experiment, ice thickness

**For citation:** Patseva P.V., Savitskaya A.V., Krupina N.A., Chernov A.V., Svistunov I.A., Likhomanov V.A. Modernized complex of FSBI “AARI” ice tanks. On the 35<sup>th</sup> anniversary of its commissioning. *Arctic and Antarctic Research*. 2025;71(1):46–62. (In Russ.). <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2025-71-1-46-62>

Received 19.11.2024

Revised 03.02.2025

Accepted 10.02.2025

### Введение

Первый в мире опытовый ледовый бассейн был открыт 1955 г. в здании Арктического и антарктического научно-исследовательского института (АНИИ), располагавшегося тогда в Шереметевском дворце на набережной реки Фонтанки (рис. 1) в Ленинграде. Создание ледового бассейна было обусловлено необходимостью получения данных о ледовом сопротивлении для последующего успешного проектирования судов ледового плавания. Здесь прошли испытания первого в мире атомного ледокола «Ленин» и атомных ледоколов типа «Арктика» (в начале 1970-х гг.).

В 1986 г. АНИИ переехал в новое здание на улице Беринга на Васильевском острове, а в 1990 г. был запущен в эксплуатацию новый комплекс ледовых бассейнов АНИИ, который включал: большой и малый ледовые бассейны, низкотемператур-



Рис. 1. Первый в мире опытовый ледовый бассейн, открытый в ААНИИ в 1955 г.  
 Fig. 1. The world’s first ice tank, opened at the AARI in 1955

ные камеры и собственную мастерскую по изготовлению моделей. При постройке большой ледовый бассейн был снабжен крышками-батареями, предназначенными для охлаждения воздуха. В 2008 г. крышки-батареи были демонтированы и заменены на новую холодильную автоматизированную установку с тремя воздухоохладителями, расположенными по периметру бассейна.

Опыт создания и эксплуатации первого ледового бассейна вызвал большой научный и практический интерес к ледовой проблематике многих зарубежных исследователей. Подобные экспериментальные установки стали появляться и в других странах начиная с 1958 г. На данный момент всего в мире около 30 действующих ледовых опытовых бассейнов [1].

В табл. 1 приведены данные о современных ледовых бассейнах, введенных в эксплуатацию или модернизированных после 2000 г., включая бассейн ААНИИ, который прошел последнюю модернизацию в 2022–2023 гг. по гранту, выделенному Министерством науки и высшего образования РФ на техническое обновление ком-

Таблица 1

Современные опытовые ледовые бассейны

Table 1

Modern experimental ice basins

Организация (место нахождения)	Год постройки (модернизации)	Длина, м	Ширина, м	Глубина, м
ААНИИ (Россия, Санкт-Петербург)	1990 (2008, 2023)	30,0	5,0	1,8/5,8
КТНЦ (Россия, Санкт-Петербург)	2013	100/80	10	2,0/4,0
Aker Arctic (Финляндия, Хельсинки)	2006	75,0	8,0	2,1
Университет Аалто (Финляндия, Эспоо)	1988 (2019)	40,0	40,0	2,1
Исследовательский институт MOERI (Южная Корея)	2009	42,0	32,0	2,5
Тяньцзиньский университет (Китай, Тяньцзинь)	2016	40,0	6,0	2,0

плекса ледовых опытовых бассейнов. Помимо ледового бассейна ААНИИ в России функционирует большой ледовый бассейн в Крыловском государственном научном центре (КГНЦ) [2]. Также в нашей стране распространены лаборатории, лед в которых намораживается естественным способом при отрицательных температурах окружающего воздуха. Однако они имеют небольшие размеры, что накладывает некоторые ограничения при проведении испытаний. Такие лаборатории находятся в НГТУ им. Р.Е. Алексеева в Нижнем Новгороде [3] и в Приамурском государственном университете имени Шолом-Алейхема в г. Биробиджане [4].

Ледовый бассейн ААНИИ имеет средние размеры и позволяет проводить различные виды исследований в области ледотехники. Для того чтобы поддерживать возможность проведения исследований на современном уровне, в рамках гранта в 2022–2023 гг. была выполнена модернизация холодильных установок и помещений, возобновлена работа малого ледового бассейна, организован теплоизолированный комплекс помещений, включающий зернохранилище, закуплено новое измерительное оборудование, обновлен станочный парк модельной мастерской.

За 35 лет деятельности ледового бассейна было проведено большое количество испытаний судов и гидротехнических сооружений, а также работ, которые не являются традиционными для опытовых бассейнов. Описание измерительного оборудования и ряд исследований, выполненных до 2015 г., представлены в статье [5]. Далее приведено описание модернизированного комплекса ледовых бассейнов, охарактеризованы его назначение и наиболее значимые работы, выполненные за последние 10 лет, в том числе после модернизации.

### **Большой ледовый бассейн**

Большой ледовый бассейн ААНИИ предназначен для проведения модельных испытаний судов и инженерных сооружений в ледовых условиях. Основные виды работ, выполняемых в ледовом опытовом бассейне:

- исследование ледовой ходкости судов в различных ледовых условиях с возможностью проведения как буксировочных, так и самоходных испытаний [5, 6];
- исследование воздействий льда на инженерные гидротехнические сооружения (опоры мостов, причалов, буровые платформы, различные ледозащитные сооружения), в том числе определение глобальной ледовой нагрузки на морские инженерные сооружения при их взаимодействии с ледяными образованиями [5, 7];
- исследование процессов всплытия подводных объектов из-под льда и т. д. [8].

В бассейне возможно моделирование широкого спектра ледовых условий и ледяных образований, в том числе: сплошной ровный неподвижный и дрейфующий лед, битый лед с заданными размерами и сплоченностью, торосистый лед различных видов, ледовые каналы различного возраста [9, 10].

На рис. 2 показан общий вид большого ледового бассейна ААНИИ после проведения модернизации, а в табл. 2 приведены его основные характеристики.

Чаша бассейна представляет собой канал с поперечным сечением в виде трапеции. В канале имеется глубоководная часть, которая используется для моделирования процессов всплытия. В чашу вмонтированы боковые иллюминаторы с прожекторами для освещения подводной части, что позволяет вести наблюдение и видеосъемку экспериментов под водой. Бассейн оснащен самоходной буксировочной тележкой с обогреваемой кабиной, которая имеет массу около 9 т и может передвигаться со скоростью до 1,5 м/с. Тележка предназначена как для проведения модельных испы-



Рис. 2. Общий вид большого ледового бассейна ААНИИ в 2024 г. после модернизации  
 Fig. 2. General view of the AARI large ice basin in 2024 after modernization

Таблица 2

Основные характеристики большого ледового бассейна ААНИИ

Table 2

Main characteristics of the AARI large ice tank	
Параметр	Значение
Длина	30 м
Ширина	5 м
Длина доковой камеры	8 м
Общая площадь ледяного поля	150 м <sup>2</sup>
Глубина	1,8 м
Параметры глубоководной части (Д×Ш×Г)	7 × 1,2 × 6 м
Минимальная температура воздуха	–20 °С
Максимальная толщина моделированного льда	70 мм
Максимальная толщина льда естественного намерзания	70 см
Скорость движения модели	до 1,5 м/с
Предельные размеры испытуемой модели	длина — до 7 м ширина — 1 м

таний, размещения различного измерительного оборудования, так и для выполнения технологических функций — уборка остатков льда после эксперимента, очистка водного зеркала бассейна от естественно намерзшего льда, равномерное распыление водного раствора вдоль чаши бассейна для приготовления моделированного льда.

В рамках модернизации большого ледового бассейна была выполнена замена холодильной установки. Вместо трех воздухоохладителей теперь используется шесть, что позволяет добиться более равномерного распределения холодного воздуха по помещению бассейна. В качестве хладагента используется фреон. Работа холодильной системы автоматизирована. Управление системой может осуществляться через интернет. Система управления позволяет выбирать и устанавливать режимы намораживания льда и сохранять данные о температурном режиме в процессе на-

морозки. Для дополнительного контроля за температурой воздуха в помещении ледового бассейна установлена метеостанция. Для отслеживания температуры воды в чаше бассейна используется термокоса, установленная на горизонте 90 см от дна и измеряющая температуру каждые 0,5 м по длине бассейна. Такие технологические решения позволяют управлять параметрами льда и его качеством и обеспечивают равномерное намерзание толщины льда по длине бассейна.

Согласно общим положениям моделирования, лед для проведения испытаний должен удовлетворять соотношениям геометрического, кинематического и динамического подобия [11, 12]. В мировой практике используются два типа моделированного льда: столбчатый и гранулированный<sup>1</sup>. Методика приготовления моделированного столбчатого льда была предложена специалистами ААНИИ [11]. В настоящее время в ледовом бассейне института намораживается столбчатый поликристаллический ослабленный лед NaCl-ice, который образуется с помощью внесения мелких кристаллов льда при распылении над спокойным зеркалом воды бассейна небольшого количества воды. Образующаяся структура позволяет льду иметь заниженную изгибную прочность по сравнению с естественно образовавшимся льдом. Изменение концентрации соли NaCl, растворимой в чаше бассейна, позволяет варьировать величину предела прочности льда на уровне масштаба моделирования. Способ и устройство для моделирования ледяного покрова в ледовом опытовом бассейне ААНИИ защищены патентом РФ № 2535398 [13].

В ледовом бассейне ААНИИ могут проводиться как буксировочные, так и самоходные испытания судов. Буксировка модели может выполняться с помощью самоходной тележки. В рамках модернизации были проведены мероприятия по восстановлению прямолинейности рельсового пути, по которому движется тележка, и выполнен ремонт ее ходовой части. Это сделано для минимизации вибраций тележки в процессе движения. Также было модернизировано буксирно-измерительное устройство, в котором реализована схема односточной буксировки: изготовлена регулируемая по высоте рама с кронштейном, и приобретены новые датчики продольного усилия, которые крепятся к раме, выполненные на базе одноосевых динамометров сжатия-растяжения с различными диапазонами измерений.

Также буксировочные испытания могут выполняться с помощью системы «бесконечного троса», когда модель приводится в движение падающим грузом — то есть задается тяга модели и измеряется развиваемая скорость, либо устройство освобождается от троса падающего груза, модель подсоединяется к тросу через динамометр и буксируется с заданной скоростью, при этом измеряется сопротивление. Схема данного устройства представлена на рис. 3. Модель включается в нижнюю ветвь «бесконечного троса» буксировочной системы. Для сохранения возможности свободного изменения дифферента и всплытия модели на ходу, а также для исключения рыскания на курсе используется специальная запряжка. Динамометр прикрепляется к настилу в районе геометрического центра модели и соединяется с запряжкой через шарнир.

Модернизация системы «бесконечного троса» заключалась в установке нового электродвигателя с цифровым управлением по моменту и оборотам, что позволило повысить точность задаваемой скорости. При этом измерение скорости производится

<sup>1</sup> ITTC — Recommended Procedures and Guidelines, General Guidance and Introduction to Model Testing. 2017. URL: <https://www.ittc.info/media/8051/75-02-04-01.pdf> (accessed 02.12.2024).

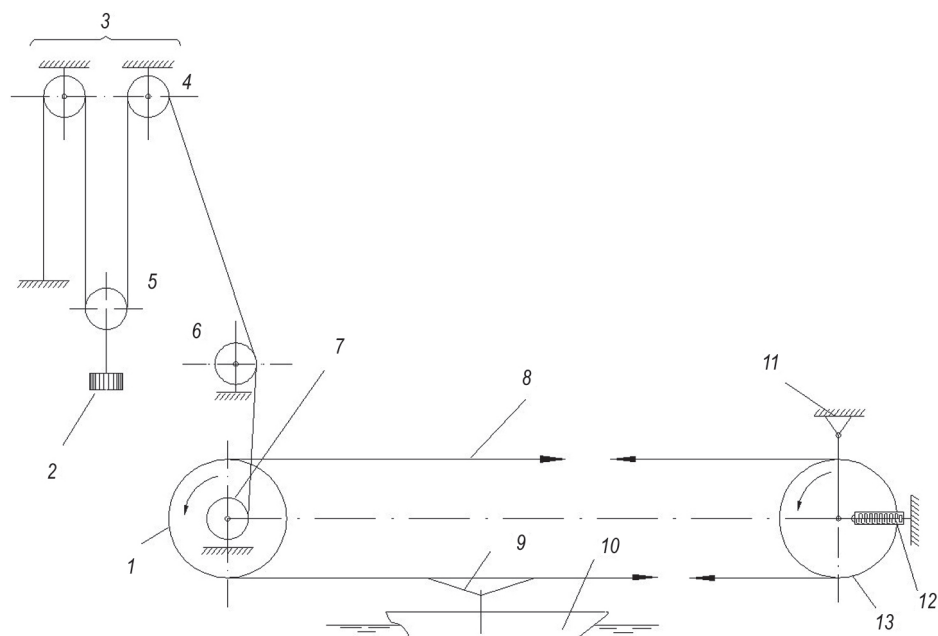


Рис. 3. Схема устройства для буксировки модели:

1, 13 — колеса; 2 — рабочий груз; 3 — полиспаст; 4, 6 — направляющие ролики; 5 — подвижный ролик полиспаста; 7 — барабан; 8 — буксировочный трос; 9 — запряжка модели; 10 — модель; 11 — шарнир подвески колеса; 12 — натяжное устройство

Fig. 3. Diagram of the device for towing the model:

1, 13 — wheels; 2 — plummet; 3 — polypast; 4, 6 — fixed pulley; 5 — movable pulley; 7 — drum; 8 — tow rope; 9 — device for fixing the model; 10 — model; 11 — wheel suspension hinge; 12 — tension device

с помощью инфракрасного щелевого оптического датчика на базе оптопары, установленного на щелевом кольце колеса, жестко соединенном с приводным колесом буксировочного устройства.

Для проведения самоходных испытаний судов с различными типами движителей был приобретен модельный движительный комплекс (рис. 4), который включает в себя: 3 полноповоротные винторулевые колонки (ВРК), 3 валопровода, 2 пера руля, блок управления, аккумуляторный блок и виртуальный пульт управления на базе ноутбука. Программное обеспечение комплекса позволяет задавать и отображать в реальном времени частоту и направления вращения для валопроводов и ВРК, а также углов поворота ВРК. При этом отображается крутящий момент и упор для каждого пропульсивного элемента. Запись параметров выполняется в процессе всего эксперимента.

Такое оснащение большого ледового бассейна позволяет разнообразить спектр выполняемых исследований и повысить качество проводимых экспериментов. Ниже представлены наиболее интересные работы, которые были выполнены до и после модернизации в ледовом бассейне за последнее десятилетие.

Одним из наиболее значимых событий в российской полярной науке является постройка ледостойкой самодвижущейся платформы (ЛСП) — НЭС «Северный полюс». Платформа прошла в АНИИ полный цикл создания [14]: от идеи за-



Рис. 4. Двигательный комплекс, установленный на модель НЭС «Иван Фролов»

Fig. 4. Propulsion system installed on the model of the research vessel “Ivan Frolov”



Рис. 5. Модель ЛСП (масштаб 1:40) во время проведения эксперимента по воздействию интенсивных ледовых сжатий на корпус

Fig. 5. Model of the IRSPP (scale 1:40) during the experiment on the effect of intense ice compression on the hull

мены дрейфующих ледовых станций «Северный полюс» на плавучее сооружение в 1970-х гг. и разработки технико-экономического обоснования в 2010 г. до первого дрейфа ЛСП в 2022–2024 гг. Перед постройкой судна в 2018 г. была выполнена обширная программа модельных испытаний ЛСП в масштабе 1:40 по заказу АО КБ «Вымпел» [6]. По результатам испытаний была определена ледопроечность в сплошном льду, в битом льду и канале, которая была подтверждена в ходе натурных ледовых испытаний.

Так как основной режим эксплуатации ЛСП — дрейф в ледовых условиях, в бассейне также был выполнен новый тип испытаний — эксперименты по воздействию интенсивных ледовых сжатий на корпус ЛСП и оценке параметров остойчивости платформы [10]. При этом выполнялась оценка воздействия льда на борт модели с помощью пленочного датчика контактных давлений и регистрация кинематических параметров модели (ускорений и углов наклона платформы) в процессе взаимодействия со льдом. На рис. 5 показана модель ЛСП во время проведения таких испытаний.

По результатам модельных испытаний была определена оптимальная форма корпуса ЛСП для успешной эксплуатации в ледовых условиях. В частности, было

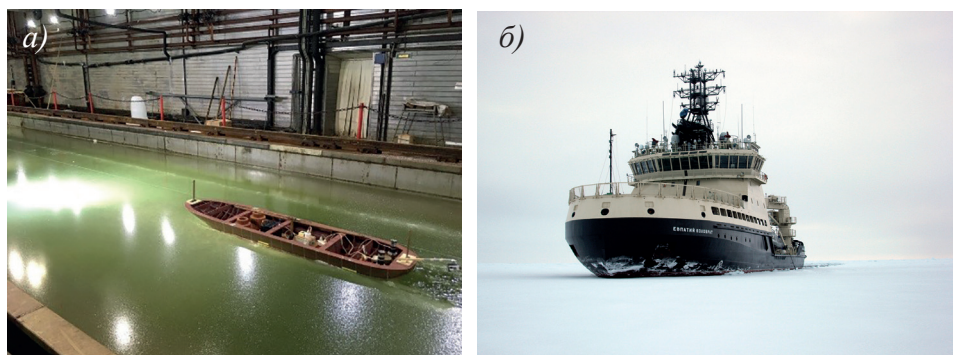


Рис. 6. Ледокол «Евпатий Коловрат» (проект 21180М): *а* — модельные испытания в ледовом бассейне ААНИИ, *б* — натурные ледовые испытания

Fig. 6. Icebreaker “Evpatiy Kolovrat” (project 21180M): *a* — model tests in the AARI ice tank, *b* — full-scale ice trials

высказано предложение по корректировке формы кормовой оконечности с целью предотвращения попадания льда к ВРК. Данное предложение было принято заказчиком, и обводы кормы были модифицированы. Благодаря наблюдениям в ходе экспериментов за качественной картиной ломки льда и образования навалов у борта платформы, были определены районы, которые требуется оборудовать датчиками системы мониторинга ледовых нагрузок [15]. Еще одним важным итогом выполненных исследований стали создание и отработка новой экспериментально-аналитической методики проведения модельного эксперимента по определению ледовой нагрузки от ледовых сжатий на суда и специализированные сооружения судового типа. Данная методика использует математическую модель описания физических процессов, сопровождающих взаимодействие плавучего объекта, имеющего наклонные борта в средней части корпуса, с толстым однолетним или многолетним ледяным полем при ледовых сжатиях, а также прямые измерения изменений угла крена и осадки судна в процессе модельного эксперимента [7].

ААНИИ имеет все возможности для проведения комплекса ледовых испытаний судов — от модели до натуре. Так, в 2017 г. были выполнены модельные испытания ледокола проекта 21180М «Евпатий Коловрат» (рис. 6а), а в 2023 г. состоялись его натурные испытания (рис. 6б). Стоит отметить, что такой же комплекс испытаний был выполнен и для ледокола «Илья Муромец» предыдущего проекта 21180 [16].

В 2024 г. уже в модернизированном бассейне были проведены испытания будущего флагмана полярного флота, который в настоящее время строится для ААНИИ на Адмиралтейских верфях, — НЭС «Иван Фролов». Были выполнены буксировочные и самоходные испытания в сплошном ровном льду и в битых льдах разной сплоченности. Наличие управляемых винторулевых колонок, установленных на модели, позволило провести эксперименты по исследованию ледопроходимости при движении кормой вперед, по оценке возможности выхода судна из канала при разных углах поворота ВРК, а также испытания по форсированию торосов (рис. 7а). Эксперименты по движению задним ходом осуществлялись методом самоходного движения при условии подбора тяги на швартовах. Отработка методики проведения самоходных испытаний при движении задним ходом будет продолжена.

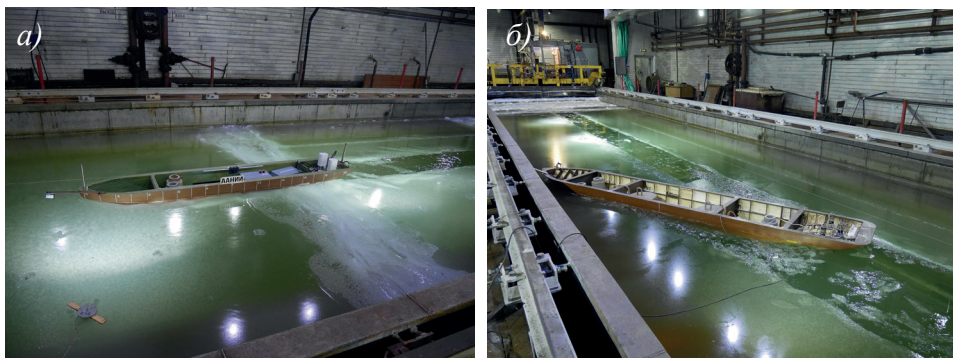


Рис. 7. Испытания моделей судов в ледовом бассейне: *a* — модель НЭС «Иван Фролов» (масштаб 1:50) во время проведения эксперимента по форсированию тороса передним ходом; *б* — эксперимент по выходу из канала модели контейнеровоза ледового класса Arc8 (масштаб 1:60) при движении носом вперед

Fig. 7. Testing of ship models in the ice basin: *a* — model of the research vessel “Ivan Frolov” (scale 1:50) during an experiment on crossing a hummock at ahead motion; *б* — experiment on exiting the channel of a model of an Arc8 ice-class container ship (scale 1:60) while moving forward

Одной из интересных работ также являются экспериментальные исследования ледовой ходкости и маневренности контейнеровоза ледового класса Arc8, проведенные в 2022 г. по заказу ООО «МИБ-дизайн-СПб». Для проведения испытаний была изготовлена модель судна в масштабе 1:60, оснащенная тремя винторулевыми колонками. В рамках данной работы выполнен стандартный комплекс испытаний в сплошных и битых льдах, а также испытания по форсированию торосов и по выходу из канала (рис. 7б). Результаты испытаний позволили сделать вывод, что при исходной форме кормовой оконечности изгибающее воздействие корпуса на лед невелико, что приводит к резкому росту сопротивления и снижению ледопроеходимости. В связи с этим было рекомендовано оптимизировать обводы кормовой оконечности для улучшения ходкости на заднем ходу при проектной осадке.

В качестве примера работ по исследованию взаимодействия льда с гидротехническими сооружениями можно привести испытания по воздействию дрейфующего льда на опоры мостового перехода через р. Обь в районе г. Салехарда, выполненные по заказу ООО «ИЦ “МиТ”» в 2017 г. В результате данной работы получены оценки параметров ледовой нагрузки на опоры моста при различных направлениях и скоростях дрейфа льда, разработаны рекомендации по определению расчетных ледовых воздействий на опоры и по конструированию ледорезной части опор моста с целью снижения ледового воздействия. Было испытано 6 различных вариантов опор проектируемого моста. В данном случае был реализован метод обращенного движения, когда лед неподвижен, а модель сооружения, закрепленная на буксировочной тележке, движется сквозь лед.

В 2023 г. по заказу АО «ЛЕНМОРНИИПРОЕКТ» была выполнена оценка воздействия льда на берегоукрепление нефтяного терминала в порту «Бухта Север». Основной задачей физического моделирования являлось определение конфигурации ледозащитной стенки берегоукрепления, которая бы предотвратила наполнение льда на территорию нефтяного терминала со стороны акватории порта. Для проведения

испытаний поверхность изготовленной модели была покрыта слоем щебня, который в свою очередь сверху был закреплен двойным слоем цементных кубиков размером  $40 \times 40$  мм, моделирующего материал, из которого изготавливаются элементы бе-



Рис. 8. Модель берегоукрепления с исходным углом откоса 1:4, подготовленная к испытаниям  
Fig. 8. The model of the bank protection with an initial slope angle of 1:4, prepared for testing

регоукрепления в натуральных условиях (рис. 8). Моделирование взаимодействия сооружения со льдом здесь осуществляется методом прямого движения, когда ледяной покров надвигается с требуемой скоростью на модель сооружения, закрепленную в заданной точке бассейна.

При проведении экспериментов с откосом с исходным уклоном 1:4 было зафиксировано воздействие льда на ледозащитную стенку и попадание льда за нее. Поэтому было рекомендовано увеличить уклон до 1:2,5, что создает предпосылки для более эффективной фрагментации льда и накопления его на горизонтальном участке (берме).

### Малый ледовый бассейн

Для проведения научных и практических исследований не всегда требуются поля моделированного льда длиной более 20 м. Иногда достаточно ограничиться небольшим объемом охлаждаемого помещения для решения локальных задач. Для проведения таких работ в ААНИИ существует малый ледовый бассейн — это относительно небольшое теплоизолированное помещение размером (Д $\times$ Ш $\times$ В) 11,2 $\times$ 8,2 $\times$ 6,2 м, в котором расположена чаша бассейна размером (Д $\times$ Ш $\times$ Г) 5 $\times$ 5 $\times$ 2,5 м (рис. 9). Эксперименты в малом бассейне проводятся на льду естественного намерзания. В рамках модернизации в бассейне установлена новая холодильная установка, которая позволяет поддерживать температуру в помещении до  $-30$  °С и намораживать естественный лед толщиной до одного метра.

Также был обновлен измерительный комплекс для исследования физико-механических свойств льда: гидростанция и пресс для исследования прочности льда при одноосном сжатии, термометры, весы, кондуктометр и др.

Такое оснащение малого бассейна позволяет проводить большой спектр исследований на льду естественного намерзания [17]:



Рис. 9. Общий вид малого ледового бассейна

Fig. 9. General view of the small ice tank

- механики деформации и разрушения морского льда;
- физических свойств льда: температуры, солёности и плотности льда;
- пределов прочности и модулей деформации льда при сжатии малых образцов перпендикулярно и параллельно поверхности покрова;
- прочностных характеристик ровного льда при изгибе по результатам испытания консолей, выпиленных на всю толщину льда, и по результатам испытания малых образцов.

Помещение малого бассейна может использоваться в качестве низкотемпературной лаборатории для исследования свойств различных покрытий и материалов:

- исследования свойств материалов с целью прогнозирования возможности их длительной работоспособности в экстремальных условиях низких температур, статических, циклических и динамических нагрузжений, в сочетании с воздействием агрессивных коррозионных сред и физических полей (коррозия);
- исследования износостойкости металлизационных покрытий при взаимодействии со льдом и физическое моделирование истирающего воздействия льда (рис. 10);
- оценки эффективности протекторных покрытий для наружной защиты металлоконструкций объектов гражданского и промышленного строительства от обледенения;
- исследования по определению адгезии льда к различным покрытиям и т. д.

При проведении подобных испытаний специалисты ААНИИ принимают участие в создании методик имитации воздействия льда на образцы покрытий и материалов, разрабатывают экспериментальные установки, проводят эксперименты, выполняя необходимые измерения, и передают образцы заказчику для оценки последствий ледового воздействия на испытанное покрытие или материал.

Отдельно стоит упомянуть возможность предоставления комплекса ледовых бассейнов для испытаний различных спасательных средств, которые неоднократно проводились в ААНИИ в интересах МЧС и Министерства обороны РФ.

Все приведенные выше виды испытаний ранее проводились в большом ледовом бассейне. После модернизации их стало возможно проводить в малом бассейне, что, во-первых, позволяет сохранять рабочий режим в большом бассейне под задачи



Рис. 10. Установка для проведения испытаний по определению истирающего воздействия льда на образцы материалов

Fig. 10. A test facility for determining the corrosion rate of steel samples using the gravimetric method, which can also be used to determine the abrasive effect of ice on samples

физического моделирования, а во-вторых, существенно снижает как трудоемкость, так и энергозатраты на проведение таких испытаний. Так, в 2024–2025 гг. в малом бассейне в рамках договора с ИПФ РАН проводятся исследования физических и механических свойств пресного льда во время цикла намораживания-таяния, включающие описание текстуры и структуры полученного льда, измерения толщины льда, температуры, плотности, прочности на изгиб и на сжатие.

### Модельный цех

В состав комплекса ледовых бассейнов ААНИИ входит также модельный цех, где изготавливаются все испытываемые в ледовом бассейне модели судов и сооружений. В рамках модернизации в цех было закуплено современное оборудование, которое позволяет использовать новые технологические возможности, такие как 3D-фрезерование, 3D-печать, 3D-сканирование, лазерный раскрой листовых материалов.

Традиционно в ААНИИ модели для испытаний изготавливали из фанеры. В соответствии с теоретическим чертежом выполнялся раскрой конструктивных элементов корпуса — шпангоутов, стрингеров, днища, планширя и т. д. Все детали вырезались из фанеры с помощью гидроабразивной или лазерной резки. Далее собирался каркас модели (рис. 11а), который обшивался тонкими полосками фанеры. Затем каркас обклеивался стеклотканью для придания прочности и герметичности корпусу, а потом выполнялась шпаклевка и покраска. Такой способ позволял получить проч-

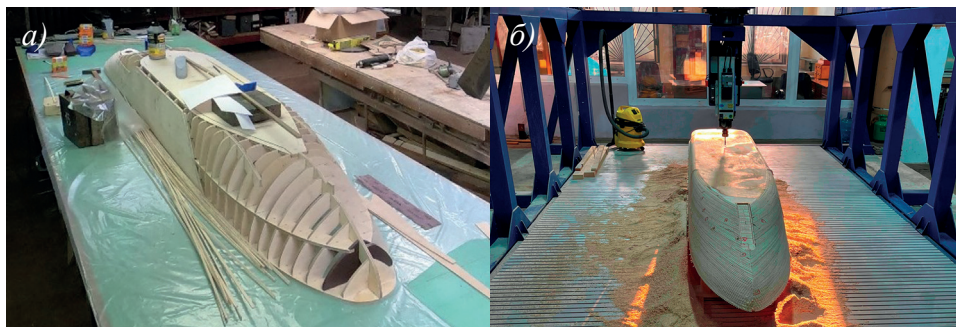


Рис. 11. Изготовление модели судна в ААНИИ: *а* — изготовление деревянной каркасной модели по традиционной технологии; *б* — изготовление модели на пятиосевом фрезерном станке  
Fig. 11. Making a ship model at AARI: *a* — manufacturing the wooden frame model according to traditional technology; *b* — cutting out the model on a five-axis milling machine

ную модель, которая выдерживала многократные испытания в моделированном льду, не получая повреждений. Однако этот способ имел высокую трудоемкость, а также при укладке слоев эпоксидной смолы, стеклоткани и других покрытий иногда появлялись отклонения от требуемых характеристик формы корпуса.

В рамках модернизации в модельный цех был приобретен пятиосевой фрезерный станок производства фирмы «Моделист» с числовым программным управлением, который позволил сократить трудозатраты и время на изготовление моделей, размеры которых не превышают  $4 \times 1 \times 1$  м. Модели могут изготавливаться из пенопласта или фанеры, при этом точность их изготовления составляет 0,5 мм. На рис. 11б показан пример изготовления модели НЭС «Иван Фролов» в масштабе 1:50 с помощью данного станка.

Для контроля качества изготавливаемых моделей был приобретен набор ручных 3D-сканеров Calibri и Calibri Mini российской компании Thor3D. Кроме этого, в арсенале модельного цеха также появились станки лазерной резки  $1500 \times 1500$  мм и  $900 \times 600$  мм и 3D-принтер PICASO 3D Designer XL PRO S2 с областью печати  $360 \times 360 \times 610$  мм. Это оборудование позволяет изготавливать все необходимые для моделей детали непосредственно в модельном цехе, в частности, с помощью 3D-принтера возможно изготовление моделей гребных винтов.

### **Комплекс низкотемпературных камер**

Благодаря проведенной модернизации, в комплексе ледовых бассейнов появился теплоизолированный комплекс помещений размерами (Д  $\times$  Ш  $\times$  В)  $11 \times 11 \times 3$  м. В состав комплекса входит коридор площадью  $49,4 \text{ м}^2$ , охлаждаемый до  $-10^\circ\text{C}$ , две камеры площадью  $16 \text{ м}^2$  и  $13,6 \text{ м}^2$ , охлаждаемые до температуры  $-20^\circ\text{C}$ , а также кернохранилище площадью  $42 \text{ м}^2$ , охлаждаемое до температуры  $-10^\circ\text{C}$ , которое используется в том числе для хранения кернов многолетнемерзлых грунтов в рамках программы создания системы мониторинга многолетней мерзлоты. Кернохранилище оснащено системой дистанционного контроля за температурой в холодильных камерах. Комплекс может быть использован для хранения образцов льда и их подготовки для дальнейших исследований.

## Заключение

Проведенная модернизация оборудования и приборной базы способствовала существенному расширению диапазона исследований, которые могут выполняться в комплексе ледовых бассейнов ААНИИ. Новое холодильное оборудование позволяет выполнять работы со льдом круглогодично. Оборудование низкотемпературных камер и зернохранилища расширило спектр исследований по изучению как мерзлых грунтов, так и образцов замороженного льда (зернов). Значительно повышена точность изготовления моделей судов со сложными обводами корпуса, при этом уменьшена трудоемкость таких работ. Внедрение дистанционно управляемых винторулевых колонок позволило корректно выполнять физическое моделирование самоходного движения судна кормой вперед и моделировать процесс маневрирования судна во льдах. Наряду с традиционными работами, освоены принципиально новые направления, такие как моделирование поведения стоечного судна в условиях ледовых сжатий и другие. Усовершенствование холодильных мощностей малого ледового бассейна позволит больше внимания уделить исследованию фундаментальных проблем физики и механики льда. В частности, в настоящее время подано несколько заявок на гранты РНФ, в которых предполагается использовать возможности малого бассейна.

**Конфликт интересов.** Конфликт интересов отсутствует.

**Финансирование.** Обновление приборной базы проведено по грантам 2022 и 2023 гг. в рамках федерального проекта «Развитие инфраструктуры для научных исследований и подготовки кадров» национального проекта «Наука и университеты».

**Благодарности.** Авторы выражают благодарность инженерам отдела ледовых качеств судов ААНИИ, которые осуществляли контроль на всех этапах модернизации, а также техническое обеспечение проведения всех экспериментальных работ в комплексе ледовых бассейнов.

**Competing interests.** The authors have no competing interests.

**Funding.** The instrumentation base was updated under the 2022 and 2023 grants within the framework of the Federal project “Development of Infrastructure for Scientific Research and Personnel Training” of the national project “Science and Universities”.

**Acknowledgments.** The authors are grateful to the engineers of the AARI Department of ship performance in ice who maintained control at all stages of modernization and provided technical support for all the experimental work in the complex of ice basins.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Боруевич В.О., Русецкий А.А., Сазонов К.Е., Соловьев И.А. *Современные гидродинамические лаборатории*. СПб.: ФГУП «Крыловский государственный научный центр»; 2019. 316 с.
2. Денисов В.И., Сазонов К.Е., Тимофеев О.Я. Новые экспериментальные возможности Крыловского государственного научного центра по изучению ледовых воздействий на объекты морской техники. *Арктика: экология и экономика*. 2015;3(19):76–81.  
Denisov V.I., Sazonov K.E., Timofeev O.Ya. New experimental capabilities of the Krylov State Research Center for study of ice impact on marine equipment. *Arctic: Ecology and Economy*. 2015;3(19):76–81. (In Russ.)
3. Золотов Н.В., Калинина Н.В. Модернизация измерительного комплекса ледового опытового бассейна НГТУ. *Транспортные системы*. 2019;2(12):16–24.  
Zolotov N.V., Kalinina N.V. Modernization of the measuring complex of the NNSTU ice tank. *Transport systems*. 2019;2(12):16–24. (In Russ.)

4. Земляк В.Л., Баурин Н.О., Курбацкий Д.А. Лаборатория «Ледотехники». *Вестник Приамурского государственного университета им. Шолом-Алейхема*. 2013;1(12):68–77.  
Zemlyak V.L., Baurin N.O., Kurbachiy D.A. Laboratory "Ice technology". *Vestnik Priamurskogo gosudarstvennogo universiteta imeni Sholom-Aleichema*. 2013;1(12):68–77. (In Russ.)
5. Крупина Н.А., Лихоманов В.А., Максимова П.В., Николаев П.М., Савицкая А.В., Свистунов И.А., Чернов А.В. Итоги работы Большого ледового бассейна ААНИИ (к 25-летию со дня ввода в строй). *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2015;1(103):101–110.  
Krupina N.A., Likhomanov V.A., Maksimova P.V., Nikolaev P.M., Savitskaya A.V., Svistunov I.A., Chernov A.V. Results of work of large ice tank of AARI (to the 25th anniversary of the commissioning). *Problemy Arktiki i Antarktiki = Arctic and Antarctic Research*. 2015;1(103):101–110. (In Russ.)
6. Лихоманов В.А., Крупина Н.А., Свистунов И.А., Чернов А.В. Модельные испытания ледостойкой самодвижущейся платформы «Северный полюс» в ледовом бассейне ААНИИ. *Российские полярные исследования*. 2018;3(33):39–40.  
Likhomanov V.A., Krupina N.A., Svistunov I.A., Chernov A.V. Model tests of the ice-resistant self-propelled platform "North Pole" in the AARI's ice tank. *Russian polar researches*. 2018;3(33):36–37. (In Russ.)
7. Свистунов И.А. Экспериментально-аналитическая методика определения глобальной ледовой нагрузки от ледовых сжатий на суда и плавучие платформы, используемые в качестве полярных дрейфующих обсерваторий. *Арктика: экология и экономика*. 2023;13(1):85–96.  
<https://doi.org/10.25283/2223-4594-2023-1-85-96>  
Svistunov I.A. Experimental-analytical method for determining the global ice load from ice compression on ships and floating platforms used as polar drifting observatories. *Arctic: Ecology and Economy*. 2023;13(1):85–96. (In Russ.). <https://doi.org/10.25283/2223-4594-2023-1-85-96>
8. Свистунов И.А., Чернов А.В., Крупина Н.А., Лихоманов В.А., Максимова П.В. Физическое моделирование статического всплытия подводной лодки из-под льда в ледовом бассейне ААНИИ. *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2016;3(109):85–93.  
Svistunov I.A., Maksimova P.V., Chernov A.V., Krupina N.A., Likhomanov V.A. Physical modeling of surfacing underwater object from under the ice in the AARI's ice tank. *Problemy Arktiki i Antarktiki = Arctic and Antarctic Research*. 2016;3(109):85–93. (In Russ.)
9. Krupina N.A., Chernov A.V., Likhomanov V.A., Maksimova P.V., Savitskaya A.V. The ice tank study of ice performance of a large LNGS in the old channel. In: *Proceedings of the 22nd International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions (POAC)*, 9–13 June, Espoo, Finland. 2013. Curran Associates Inc, Red Hook, NY: 2014; 1:211–220.
10. Свистунов И.А. Определение кренящего момента, действующего при ледовом сжатии на ледостойкую самоходную платформу «Северный полюс», методом модельных испытаний. *Арктика: экология и экономика*. 2019;3(35):97–106. <https://doi.org/10.25283/2223-4594-2019-3-97-106>  
Svistunov I.A. Determination of the heeling moment acting in ice compression on the ice-resistant selfpropelled platform "North Pole" by the model testing method. *Arctic: Ecology and Economy*. 2019;3(35):97–106. (In Russ.). <https://doi.org/10.25283/2223-4594-2019-3-97-106>
11. Каштелян В.И., Позняк И.И., Рывлин А.Я. *Сопротивление льда движению судна*. Л.: Судостроение; 1968. 238 с.
12. Сазонов К.Е. *Модельный и натурный эксперименты в морской ледотехнике*. СПб.: Крыловский государственный научный центр; 2021. 308 с.
13. Патент РФ № 2013101426/13, 10.01.2013. Крупина Н.А., Чернов А.В., Николаев П.М. *Способ и устройство для моделирования ледяного покрова в ледовом опытовом бассейне*. Патент России № 2535398. 2014. Бюлл. № 34.

14. Макаров А.С., Лихоманов В.А., Соколов В.Т., Чернов А.В., Половинкин В.Н., Тимофеев О.Я., Могутин Ю.Б., Симонов Ю.А. Концептуальные принципы создания полярной дрейфующей исследовательской платформы. *Арктика: экология и экономика*. 2018;31:65–75. <https://doi.org/10.25283/2223-4594-2018-3-65-75>  
Makarov A.S., Likhomanov V.A., Sokolov V.T., Chernov A.V., Polovinkin V.N., Timofeev O.Ya., Mogutin Yu. I., Simonov Yu. A. Conceptual principles for creation of the drifting polar research platform. *Arctic: ecology and economy*. 2018;31:65–75. (In Russ.). <https://doi.org/10.25283/2223-4594-2018-3-65-75>
15. Чернов А.В., Максимова П.В., Лихоманов В.А., Свистунов И.А., Крупина Н.А., Савицкая А.В. Методика формирования архитектуры системы мониторинга ледовых нагрузок для ледостойкой самодвижущейся платформы. *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2020;66(4):515–533. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2020-66-4-515-533>  
Chernov A.V., Maksimova P.V., Likhomanov V.A., Svistunov I.A., Krupina N.A., Savitskaya A.V. Methodology for developing the configuration of an ice load monitoring system for an ice resistant self-propelled drifting platform. *Arctic and Antarctic Research*. 2020;66(4):515–533. (In Russ.). <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2020-66-4-515-533>
16. Чернов А.В. Испытания ледокола «Илья Муромец». *Российские полярные исследования*. 2018;2(32):27–29.  
Chernov A.V. Trials of the icebreaker “Ilya Muromets”. *Russian Polar Researches*. 2018;2(32):27–29. (In Russ.)
17. Крупина Н.А., Иванов Б.В., Кубышкин Н.В., Лихоманов В.А., Николаев П.М., Чернов А.В., Шахов Е.Г. Комплексные исследования процессов нарастания и механики разрушения льда естественного намерзания в большом ледовом бассейне ААНИИ. *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2008;2(79):7–20.  
Krupina N.A., Ivanov B.V., Kubyshkin N.V., Likhomanov V.A., Nikolaev P.M., Chernov A.V., Shakhov E.G. Combined experimental studies of growing up processes and failure mechanics of ice of natural freezing ice in AARI'S large ice tank. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. 2008;2(79):7–20. (In Russ.)