



DOI: 10.24937/2542-2324-2023-3-405-71-80

УДК 629.5.018.75:629.561.5

EDN: PGMBCD

Е.А. Бокатова¹, А.А. Добродеев¹ , К.Е. Сазонов¹ , Е.М. Бабич², Н.А. Крупина³

¹ ФГУП «Крыловский государственный научный центр», Санкт-Петербург, Россия

² АО ЦКБ «Айсберг», Санкт-Петербург, Россия

³ ФГБУ «Арктический и антарктический научно-исследовательский институт», Санкт-Петербург, Россия

ЛЕДОВЫЕ НАТУРНЫЕ ИСПЫТАНИЯ АТОМНЫХ ЛЕДОКОЛОВ «АРКТИКА» И «СИБИРЬ»

Объект и цель научной работы. Объектами исследования являются головной и первый серийный универсальные атомные ледоколы проекта 22220. Основная цель – подтверждение в натуральных условиях их спецификационных характеристик в области ледовой ходкости и управляемости.

Материалы и методы. Сбор и анализ данных натуральных испытаний ледоколов проекта 22220.

Основные результаты. Обработанные данные натуральных испытаний ледоколов «Арктика» и «Сибирь» подтверждают выполнение ими спецификационных требований к ледовой ходкости и управляемости.

Заключение. Обобщенный анализ натуральных испытаний новых атомных ледоколов проекта 22220 «Арктика» и «Сибирь» показал, что они обладают отличными ледовыми качествами и способны обеспечивать судоходство на трассе Северного морского пути. Предельная ледопробитость данных судов при скорости движения 2 уз составляет 2,81 м, при скорости 1,5 уз – 2,92 м, а при скорости 1 уз – 3,03 м, что позволяет прокладывать каналы во льдах толщиной 1,5–2 м с повышенной скоростью. Кроме того, эти ледоколы способны уверенно маневрировать во льдах и преодолевать значительные торосистые образования.



Ключевые слова: ледокол, натурные ледовые испытания, ледопробитость, радиус циркуляции, прочность и толщина льда.

Авторы заявляют об отсутствии возможных конфликтов интересов.

DOI: 10.24937/2542-2324-2023-3-405-71-80

UDC 629.5.018.75:629.561.5

EDN: PGMBCD

Е.А. Bokatova¹, А.А. Dobrodeev¹ , К.Е. Sazonov¹ , Е.М. Babich², N.A. Krupina³

¹ Krylov State Research Centre, St. Petersburg, Russia

² АО ЦКБ «Айсберг», Санкт-Петербург, Россия

³ Arctic and Antarctic Research Institute, St. Petersburg, Russia

FULL-SCALE ICE TRIALS OF ARKTIKA AND SIBIR NUCLEAR ICEBREAKERS

Object and purpose of research. This paper discusses lead and first-production universal nuclear icebreakers of Project 22220. The main purpose of this work was to confirm specification parameters (ice propulsion performance and ice maneuverability) of these ships in real service conditions.

Materials and methods. Collection and analysis of the full-scale trial data for icebreakers of Project 22220

Main results. Processing of the full-scale trial data for *Arktika* and *Sibir* icebreakers confirmed their compliance with specification requirements to ice propulsion performance and ice maneuverability.

Conclusion. Generalized analysis of full-scale trial data for new Project 22220 nuclear icebreakers, *Arktika* and *Sibir*, has proven their outstanding ice performance parameters, as well as their ability to support ship traffic along the Northern Sea Route. Limit ice-breaking capability of these icebreakers turned out to be 2.81 m at the speed 2 knots, 2.92 m at the speed 1.5 knots and 3.03 m at the speed 1 knot, so they can make channels in 1.5-2 m thick ice at moving at high speed. Besides, these icebreakers can steadily perform ice maneuvers and overcome strong ridges.

Keywords: icebreaker, full-scale ice trials, ice-breaking capability, turning circle radius, ice strength and thickness.

The authors declare no conflicts of interest.

Для цитирования: Бокатова Е.А., Добродеев А.А., Сазонов К.Е., Бабич Е.М., Крупина Н.А. Ледовые натурные испытания атомных ледоколов «Арктика» и «Сибирь». Труды Крыловского государственного научного центра. 2023; 3(405): 71–80.

For citations: Bokatova E.A., Dobrodeev A.A., Sazonov K.E., Babich E.M., Krupina N.A. Full-scale ice trials of *Arktika* and *Sibir* nuclear icebreakers. Transactions of the Krylov State Research Centre. 2023; 3(405): 71–80 (in Russian).

Введение

Introduction

В 2020–2021 гг. АО «Балтийский завод» построил и сдал в эксплуатацию головной универсальный атомный ледокол (ГУАЛ) «Арктика» и серийный универсальный атомный ледокол (СУАЛ) «Сибирь» проекта 22220. СУАЛ «Сибирь» (рис. 1) является вторым судном проекта и первым в серии. Заказчиком ледоколов выступил ФГУП «Атомфлот».

Ледоколы этого проекта предназначены для неограниченной эксплуатации в арктических морях России и имеют ледовый класс Российского морского регистра судоходства (РС) Icebreaker 9. Они способны круглогодично осуществлять самостоятельную проводку крупнотоннажных судов, лиди-



Рис. 1. Первый серийный универсальный атомный ледокол «Сибирь» проекта 22220

Fig. 1. First-production Project 22220 nuclear icebreaker, *Sibir*

рование караванов в Западном и Восточном секторах Арктики, включая мелководные участки Енисея и Обской губы.

Универсальные атомные турбозлектрические ледоколы проекта 22220 оборудованы традиционной пропульсивной установкой, состоящей из трех гребных винтов с приводом от сдвоенных гребных электродвигателей (ГЭД) суммарной мощностью 20 МВт каждый. Управление ледоколами осуществляется одним рулем, расположенным в диаметральной плоскости. Главные размерения ледоколов приведены в табл. 1.

Перед натурными испытаниями были разработаны и утверждены программы их проведения для каждого из ледоколов. Изучение характеристик ледовой ходкости и управляемости во время натуральных испытаний осуществляли специалисты ФГУП «Крыловский государственный научный центр», которые имеют большой опыт подобных работ ([1–4] и др.). Кроме этого, сотрудники Крыловского центра на ледоколе «Арктика» выполнили измерение крутящего момента и крутильных колебаний (тормозографирование) на валопроводах ледокола.

Одновременно с этим проводились работы по тонкой настройке системы электродвижения силами представителей филиала «ЦНИИ СЭТ». Специалисты ФБГУ «АНИИ» выполняли гидрометеорологическое обеспечение экспериментального рейса, осуществляли выбор полигонов для проведения испытаний, а также измерение толщины и прочностных характеристик льда. Во время ледовых испытаний силами АО «Балтийский завод» на ледоколах проводились контрольные замеры по ряду методик заводских ходовых испытаний (в частности, по вибрациям и микроклимату), т.е. те испытания, которые в полном объеме невозможно было провести в условиях Финского залива.

Таблица 1. Главные размерения ледоколов проекта 22220

Table 1. Project 22220 icebreaker: main particulars

№	Размерение	Величина
1	Длина габаритная, м	172,70
2	Длина по конструктивной ватерлинии (КВЛ), м	160,00
3	Ширина наибольшая, м	34,00
4	Ширина по КВЛ, м	33,00
5	Осадка по КВЛ, м	10,50
6	Высота борта до верхней палубы, м	15,20
7	Коэффициент общей полноты при осадке по КВЛ	0,58

Для проведения натуральных испытаний ФГУП «Атомфлот» в период с конца мая по середину июня 2023 г. было организовано последовательное освобождение ледоколов от их основной деятельности. По согласованию со специалистами ФБГУ «ААНИИ» для каждого из судов в соответствии с текущей метеорологической и ледовой обстановкой определялись полигоны.

Программа испытаний и средства измерений

Test program and measuring instruments

Разработанные заранее программы натуральных испытаний ледоколов «Арктика» и «Сибирь» были практически идентичными. Ниже в табл. 2 приводятся фрагменты из программ испытаний, относящиеся к вопросам исследования ледовой ходкости и управляемости.

В табл. 2 указаны установочные значения мощности двигателей. При проведении каждого испытания регистрировались следующие параметры:

- скорость движения ледокола, определяемая с помощью спутниковой системы GPS по штатным приборам, а также с помощью переносной системы GPS;
- мощность ГЭД, измеренная по штатным приборам судна;
- частота вращения гребных валов по штатным приборам судна.

Специалисты ФБГУ «ААНИИ» в процессе проведения натуральных испытаний проводили измерения толщин ледяного покрова, слоя снега и прочности льда на изгиб. Прочность льда на изгиб определялась косвенным методом путем измерения температуры и солености льда из отобранных кернов. Натурные испытания выполнены на осадке по КВЛ ледокола, равной 10,5 м.

Таблица 2. Программа ледовых испытаний

Table 2. Program of ice trials

Номер режима по программе	Вид испытаний	Дата проведения испытаний	
		СУАЛ «Сибирь»	ГУАЛ «Арктика»
5.1	Сплошной лед. Прямолинейное движение передним ходом. Мощность 100–90–80–70–60–50–40 %	02.06.2023 ¹	12.06.2023 ²
5.2	Сплошной лед. Прямолинейное движение передним ходом. Мощность 100–90–80–70–60–50–40 %. Работает пневмоомывающее устройство (ПОУ)	Не проводилось ³	12.06.2023 ²
5.3	Сплошной лед. Прямолинейное движение задним ходом. Мощность 100–90–80–70–60–50–40 %	02.06.2023 ¹	12.06.2023 ²
6	Исследование движения ледокола в торосах передним ходом. Мощность 100 %	02.06.2023 ⁴	14.06.2023 ⁶
7	Сплошной лед. Циркуляция передним ходом. Угол перекладки ВРК 10–15–25–35°. Мощность 100 %	03.06.2023 ⁵	13.06.2023 ⁶
	Сплошной лед. Циркуляция задним ходом. Мощность 100 %	03.06.2023	13.06.2023 ⁶
8	Маневр «звезда»	02.06.2023	13.06.2023
9	Исследование возможности выхода ледокола из собственного канала носом и кормой вперед	02.06.2023	13.06.2023

Примечания

¹ Выполнены режимы 100–80–60 % мощности.

² Выполнены режимы 80–60–40 % мощности.

³ На СУАЛ «Сибирь» режимы движения с ПОУ не выполнялись.

⁴ Преодоление тороса выполнено во время теста по прямолинейному движению.

⁵ Угол перекладки руля 25° не исследовался.

⁶ Мощность составляла 80 %.

Испытания атомного ледокола «Сибирь»

Testing of nuclear icebreaker *Sibir*

Испытания этого ледокола происходили 2–3 июня 2023 г. В припайном льду на входе в пролив Матисена в юго-восточной части Карского моря. Припайный лед был практически лишен снежного покрова, поэтому учет влияния снега на результаты испытаний не проводился. Прочность льда на изгиб на полигоне по косвенным измерениям специалистов ФГБУ «ААНИИ» составила 202–283 кПа.

При выполнении режима 5.1 – движение передним ходом (табл. 2) – зафиксированы средние показатели ледовой ходкости ледокола, указанные в табл. 3. Здесь и далее знак «минус» в таблицах с результатами измерений показателей ходкости означает движение на заднем ходу.

Результаты выполнения режима 5.3 – движение задним ходом – представлены в табл. 4.

При выполнении режима 5.1 ледокол преодолел торос, профиль которого измерили специалисты ФГБУ «ААНИИ» (рис. 2). Изменение показателей ледовой ходкости ледокола во время

Таблица 3. Средние показатели ледовой ходкости ледокола «Сибирь» на режиме движения передним ходом

Table 3. Average ice propulsion performance parameters for *Sibir* icebreaker: ahead running

Частота вращения, об/мин			Установочная мощность, %	Мощность, МВт			Скорость, уз	Толщина льда, м
П.Б.	Ср.	Л.Б.		П.Б.	Ср.	Л.Б.		
100,0	102,5	97,3	60	12,2	12,2	11,3	4,6	1,80
108,2	117,0	108,2	80	16,0	16,3	16,0	5,8	1,80
114,6	125,0	117,9	100	18,8	19,4	18,9	8,4	1,55

Таблица 4. Средние показатели ледовой ходкости ледокола «Сибирь» на режиме движения задним ходом

Table 4. Average ice propulsion performance parameters for *Sibir* icebreaker: astern running

Частота вращения, об/мин			Установочная мощность, %	Мощность, МВт			Скорость, уз	Толщина льда, м
П.Б.	Ср.	Л.Б.		П.Б.	Ср.	Л.Б.		
-87,0	-112,7	-107,7	80	-8,9	-15,9	-16,2	-2,8	1,83
-85,0	-122,1	-114,6	100	-8,9	-20,0	-19,5	-3,2	1,83

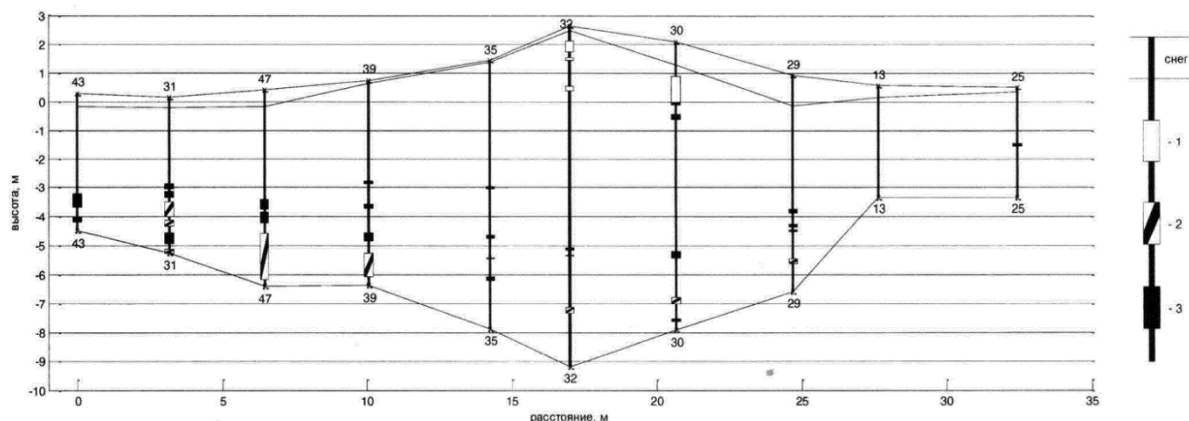


Рис. 2. Профиль торосистого образования: 1 – провалы, заполненные воздухом и/или снегом; 2 – провалы, заполненные шугой; 3 – провалы, заполненные водой

Fig. 2. Ridge profile

Таблица 5. Результаты циркуляционных испытаний

Table 5. Turning-circle test results

Положения ледокола во время режимов	Угол перекладки руля, °	Угол изменения курса, °	Относительный радиус циркуляции при длине по ватерлинии 160,0 м
I–II	10	204,4–183,8	5,78
II–III	15	183,8–162,7	5,47
III–IV	30	155,9–67,7	4,69

преодоления торося представлены на рис. 3 (см. вклейку).

После выполнения режима 5.1 в ходе занятия ледоколом положения для движения кормой вперед был выполнен маневр «звезда» (пункт программы 8), в ходе выполнения которого ледокол также произвел выход из собственного канала носом и кормой вперед (пункт программы 9). Последовательность выполнения маневра показана на рис. 4 (см. вклейку).

Движения ледокола на циркуляции изучались в последний день испытаний, 3 июня 2023 г. Сначала были выполнены циркуляции при движении носом вперед при использовании 100 % мощности. После выполнения маневров при угле перекладки руля 10° и 15° дальнейшему движению ледокола препятствовало поле восторошенного льда. Поэтому дальнейшие испытания были выполнены после смены позиции ледоколом.

После этого была осуществлена циркуляция при угле перекладки руля 30°. При каждом угле перекладки руля ледокол описывал траекторию, соответствующую изменению угла курса на 20–30°. Таких отрезков траектории вполне достаточно для определения по известным формулам радиуса циркуляции [5]. Результаты циркуляционных испытаний на переднем ходу представлены в табл. 5 и на рис. 5 (см. вклейку). Средняя толщина ледяного поля при этих испытаниях составила 1,9 м.

После выполнения циркуляций передним ходом была предпринята попытка выполнить циркуляцию на заднем ходу. Для выполнения этого маневра руль был поставлен в диаметрально плоскость, поворот ледокола должен был осуществляться за счет работы гребных винтов «враздрай». Данный режим движения является единственным возможным способом маневрирования на заднем ходу для судов, оснащенных традиционным движительно-рулевым комплексом.

Суть его заключается в создании вращающего момента ледокола за счет изменения направления тягового усилия на одном из бортовых гребных винтов в противоположном направлении по отношению к двум другим винтам. Таким образом, создаваемое ледоколом тяговое усилие для движения вперед задним ходом на режиме циркуляции значительно меньше, чем на режиме прямолинейного движения. После начала выполнения маневра было установлено, что скорость движения ледокола менее 0,5 уз. Поэтому испытания были прекращены.

Испытания ледокола «Арктика»

Testing of icebreaker *Arktika*

Испытания головного ледокола пр. 22220 выполнялись с 12 по 14 июня 2023 г. В припайном льду на входе в пролив Вилькицкого в юго-восточной части Карского моря. Припайный лед был практически лишен снежного покрова, поэтому учет влияния снега на результаты испытаний не проводился. Прочность льда на изгиб на полигоне, по косвенным измерениям специалистов ФГБУ «ААНИИ», составила 190 кПа.

Натурные испытания начались с выполнения режима 5.1 (табл. 1) по прямолинейному движению в сплошном льду передним ходом. Сразу по окончании данного эксперимента был выполнен аналогичный режим, но с работающим ПОУ (режим 5.2). Средние показатели движения, зафиксированные при выполнении обоих режимов на переднем ходу, представлены в табл. 6.

Результаты выполнения режима 5.3 – прямолинейное движение кормой вперед – представлены в табл. 7.

Натурные испытания по преодолению головным ледоколом пр. 22220 торосистого образования были проведены 14 июня 2023 г. Перед проведением эксперимента группа сотрудников ФГБУ

«ААНИИ» выполнила тщательные измерения профиля тороса (3 сечения), схематичное изображение которых приведено на рис. 6.

Изменения показателей ледовой ходкости ледокола во время преодоления тороса представлены на рис. 7 (см. вклейку).

После выполнения режимов 5.1 и 5.2 в ходе занятия ледоколом положения для движения кормой вперед был выполнен маневр «звезда» (пункт программы 8), в ходе которого ледокол также вышел из собственного канала носом вперед (пункт программы 9). Последовательность выполнения маневра показана на рис. 8 (см. вклейку). После окончания режима 5.2 ледокол успешно осуществил выход из собственного канала при движении кормой вперед.

Движения ледокола на циркуляции изучались 13 июня 2023 г. на соседнем с предыдущим полигоне. Вначале были выполнены циркуляции при движении носом вперед при использовании 80 % мощности. Маневры осуществлялись при последовательных углах перекадки руля при 10°, 15°, 25°, а также при наибольшем угле 35°. Затем была выполнена циркуляция при движении кормой вперед,

для чего двигатели судна работали «враздрай». При каждом угле перекадки руля ледокол описывал траекторию, соответствующую изменению угла курса на 20–30°. Учитывая, что толщина льда на полигоне для испытаний ледокола «Арктика» была меньше, чем на полигоне для испытаний «Сибири», циркуляция на заднем ходу была осуществлена в непрерывном режиме движения на устойчивой скорости хода.

Результаты циркуляционных испытаний на переднем и заднем ходу представлены в табл. 8 и на рис. 9 (см. вклейку). Средняя толщина ледяного поля при циркуляционных испытаниях ледокола «Арктика» составила 1,5 м.

Анализ и обсуждение полученных результатов

Results and discussion

Одной из основных задач проведения натуральных испытаний является подтверждение величины предельной ледопроеходимости ледокола, ранее спрогнозированной по результатам модельных испыта-

Таблица 6. Средние показатели ледовой ходкости ледокола «Арктика» на режиме движения передним ходом

Table 6. Average ice propulsion performance parameters of *Arktika* icebreaker: ahead running

Частота вращения, об/мин			Установочная мощность, %	Мощность, МВт			Скорость, уз	Толщина льда, м
Л.Б.	Ср.	П.Б.		Л.Б.	Ср.	П.Б.		
Без работающего ПОУ								
88,0	91,6	88,3	40	8,00	7,86	7,81	5,8	1,62
93,1	106,0	103,2	60	8,75	11,9	11,9	8,0	1,63
98,6	119,4	116,0	80	8,77	16,0	16,0	9,6	1,58
С работающим ПОУ								
88,4	91,0	88,4	40	7,97	7,9	7,8	5,18	1,62
93,9	106,3	104,6	60	8,70	11,9	11,9	7,20	1,63
98,7	120,2	120,2	80	8,73	16,0	16,0	8,74	1,61

Таблица 7. Средние показатели ледовой ходкости ледокола «Арктика» на режиме движения задним ходом

Table 7. Average ice propulsion performance parameters of *Arktika* icebreaker: astern running

Частота вращения, об/мин			Установочная мощность, %	Мощность, МВт			Скорость, уз	Толщина льда, м
П.Б.	Ср.	Л.Б.		П.Б.	Ср.	Л.Б.		
-86,2	-90,3	-86,2	40	8,0	7,8	7,8	-2,54	1,58
-106,5	-111,5	-87,6	60	14,0	14,0	7,6	-4,26	1,59
-120,0	-124,0	-94,4	80	18,8	18,8	8,8	-5,70	1,60

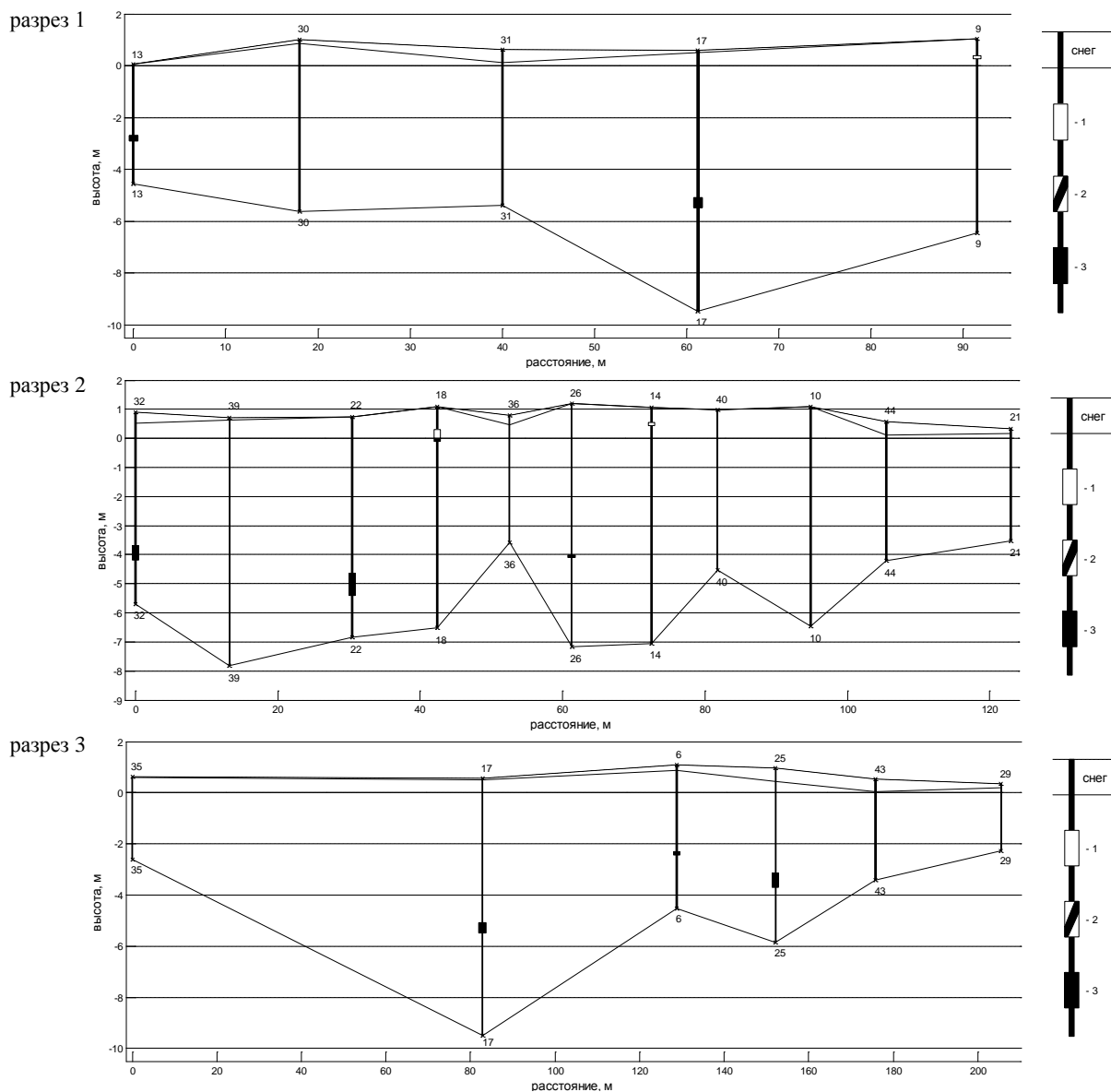


Рис. 6. Профили торосистого образования, которое преодолел ледокол «Арктика»: 1 – провалы, заполненные воздухом и/или снегом; 2 – провалы, заполненные шугой; 3 – провалы, заполненные водой
Fig. 6. Profiles of ridges penetrated by *Arktika* icebreaker

Таблица 8. Результаты циркуляционных испытаний
Table 8. Turning-circle test results

Направление движения	Угол перекладки руля, °	Угол изменения курса, °	Относительный радиус циркуляции
Передний ход	10	179,0–153,9	5,00
	15	153,9–128,4	4,94
	25	128,4–103,2	4,38
	35	103,2–79,3	4,00
Задний ход	0	78,9–127,0	4,88

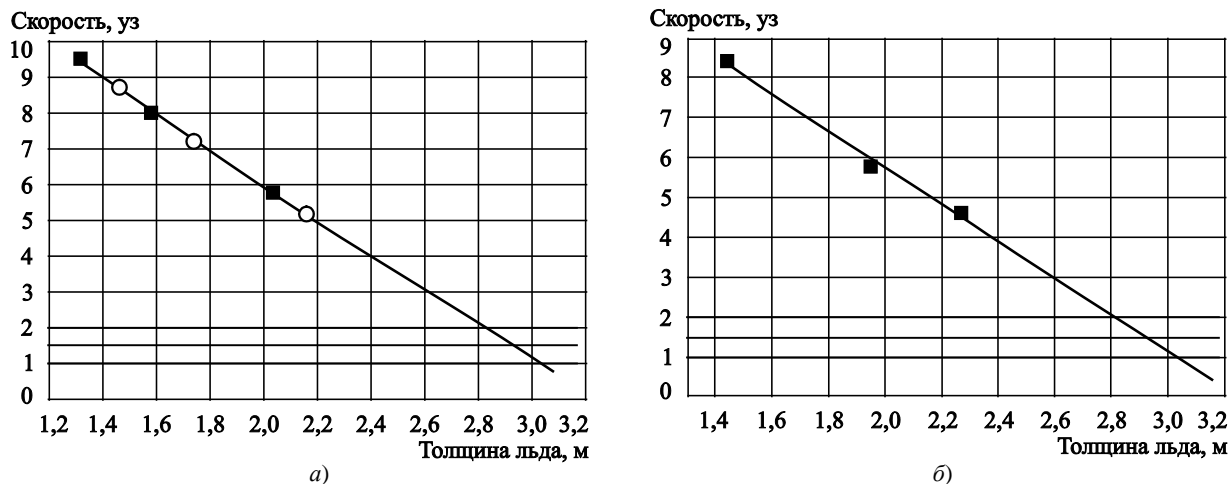


Рис. 10. Кривые ледопроеходимости атомных ледоколов «Арктика» (а) и «Сибирь» (б) для режимов движения передним ходом

Fig. 10. Ice-breaking capability curves for *Arktika* (a) and *Sibir* (b) nuclear icebreakers: ahead running

ний в ледовом бассейне Крыловского центра. Для анализа результатов испытаний передним ходом была использована новая методика, базирующаяся на применении диаграмм ледовой ходкости судов [6]. Применение этих диаграмм позволяет приводить данные натурных измерений, полученных при парциальных значениях мощности, к ее 100%-му значению. Это дает возможность построения кривой ледопроеходимости по результатам испытаний ледокола в одном ледяном поле постоянной толщины. Подробно предложенная методика описана в работе [7].

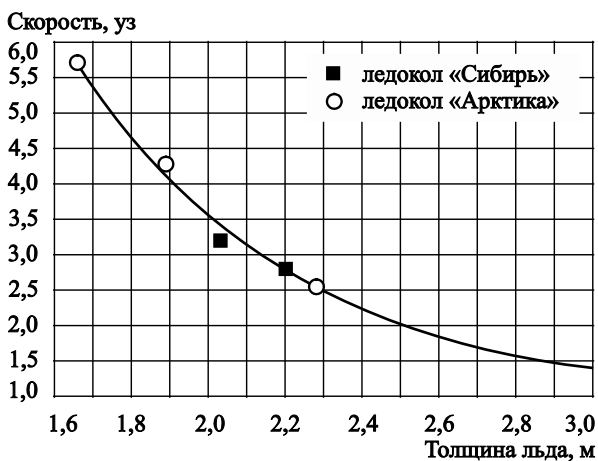


Рис. 11. Кривая ледопроеходимости атомных ледоколов «Арктика» и «Сибирь» для режимов движения задним ходом

Fig. 11. Ice-breaking capability curves for *Arktika* and *Sibir* nuclear icebreakers: astern running

На рис. 10 представлены кривые ледопроеходимости ледоколов «Арктика» и «Сибирь». Для «Арктики» на этом рисунке нанесены данные ПОУ и без него. Данные рисунка показывают, что предельная ледопроежимость ледоколов при скорости движения 2 уз составляет 2,81 м, при скорости 1,5 уз – 2,92 м, а при скорости 1 уз – 3,03 м, что полностью удовлетворяет спецификационным требованиям.

В соответствии с программой испытаний (режим 5.2) было исследовано влияние ПОУ на характеристики движения ледокола «Арктика». Как следует из табл. 5 и рис. 10а, влияние ПОУ на эти характеристики не обнаружено. На самом деле отсутствие эффекта от работы ПОУ во многом определяется ледовой обстановкой в районе проведения натурных испытаний. Известно, что эффективность ПОУ проявляется в заснеженных льдах [8, 9]. Испытания же проводились в бесснежных, подверженных термическому разрушению льдах. Поэтому судить о неэффективности ПОУ по полученным данным нельзя. По оценке капитанов ледоколов, существует целый ряд ситуаций при их эксплуатации, когда ПОУ оказывает существенную помощь в выполнении технологических операций.

В соответствии с программой были проведены натурные испытания движения ледоколов задним ходом в припайных льдах. По ряду технических причин эти испытания были выполнены при уровне мощности меньшем, чем 100 % (табл. 3 и 6). Анализ полученных данных осуществлялся традиционными методами потому, что диаграмм ледовой ходкости для режима движения задним ходом пока не имеется.

Результаты обработки данных представлены на рис. 11. При движении кормой вперед ледопроечность при скорости 1,6 уз составила 2,8 м.

В ходе проведения натуральных испытаний оба ледокола продемонстрировали возможность выполнять маневры по выходу из собственного канала носом и кормой вперед, а также по развороту способом «звезда» во льдах различной толщины. Циркуляционные характеристики ледоколов соответствуют стандартным показателям ледовой управляемости [10–12].

Натурные испытания показали, что оба ледокола могут преодолевать торосистые образования довольно большой величины (рис. 2 и 8) без остановки.

Выводы

Conclusion

Обобщенный анализ натуральных испытаний новых атомных ледоколов проекта 22220 «Арктика» и «Сибирь» показал, что они обладают отличными ледовыми качествами и способны обеспечивать судоходство на трассе Северного морского пути. Испытания подтвердили основной спецификационный показатель – предельную ледопроечность ледоколов. Она составила 2,81 м. Столь высокая предельная ледопроечность обеспечивает ледоколам возможность прокладывать каналы во льдах толщиной 1,5–2,0 м с повышенной скоростью.

Во время натуральных испытаний ледоколы продемонстрировали возможность уверенно маневрировать во льдах, выполняя циркуляции, разворот способом «звезда» и выход из собственного канала носом и кормой вперед. Также уверенно ледоколы преодолевают и значительные торосистые образования.

Ледоколы проекта 22220, несомненно, являются наиболее эффективными из всех существующих ледоколов, они способны осуществлять проводки современных крупнотоннажных судов ледового плавания.

Список использованной литературы

1. “Yury Topchev” and “Vladislav Strizhov” multipurpose ice-breaking vessels for Prirazlomnaya platform maintenance: field and model tests / V.A. Belyashov, A.V. Grozdov, K.E. Sazonov, A.P. Tumashik // Proceedings of 8th international conference and exhibition on performance of ships and structures in ice (ICETECH 2008). Calgary, 2008. P. 106-RF, p. 105–113. DOI: 10.5957/ICETECH-2008-106.

2. Исследование ледовой ходкости ледокола «Санкт-Петербург» в Карском море / Е.М. Апполонов, В.А. Беляшов, К.Е. Сазонов [и др.] // Судостроение. 2011. № 4. С. 9–12.
3. Ледовые натурные испытания ледокола «Владивосток» / А.И. Костылев, К.Е. Сазонов, О.Я. Тимофеев [и др.] // Судостроение. 2016. № 6. С. 9–12.
4. Лопашев К.А., Сазонов К.Е., Тимофеев О.Я. Ледовые натурные испытания ледокола «Новороссийск» в Карском море // Труды Крыловского государственного научного центра. 2017. Вып. 3(381). С. 35–42. DOI: 10.24937/2542-2324-2017-3-381-35-42.
5. Сазонов К.Е. Модельный и натурный эксперимент в морской ледотехнике. Санкт-Петербург: Крыловский государственный научный центр, 2021. 306 с.
6. Каневский Г.И., Клубничкин А.М., Сазонов К.Е. Диаграммы ледовой ходкости судна // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова. 2022. Т. 14, № 6. С. 805–814. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-6-805-814.
7. Добродеев А.А., Сазонов К.Е. Применение диаграмм ледовой ходкости судов для анализа натуральных испытаний // Труды Крыловского государственного научного центра. 2023. Вып. 3(405). С. 81–88. DOI: 10.24937/2542-2324-2023-3-405-81-88.
8. Иерусалимский А.В. Исследование эффективности пневмоомывающего устройства на судах ледового плавания // Труды ЦНИИМФ. 1981. Вып. 265: Перспективные типы судов. С. 82–88.
9. Каштелян В.И., Попов Ю.А., Цой Л.Г. Об эффективности ПОУ и области его применения на судах, плавающих во льдах // Труды ААНИИ. 1981. Т. 376. С. 67–84.
10. Ледоколы / В.И. Каштелян, А.Я. Рывлин, О.В. Фаддеев, В.Я. Ягодкин. Ленинград: Судостроение, 1972. 288 с.
11. Рывлин А.Я., Хейсин Д.Е. Испытания судов во льдах. Ленинград: Судостроение, 1980. 208 с.
12. Ионов Б.П., Грамузов Е.М. Ледовая ходкость судов. Санкт-Петербург: Судостроение, 2001. 512 с.

References

1. “Yury Topchev” and “Vladislav Strizhov” multipurpose ice-breaking vessels for Prirazlomnaya platform maintenance: field and model tests / V.A. Belyashov, A.V. Grozdov, K.E. Sazonov, A.P. Tumashik // Proceedings of 8th international conference and exhibition on performance of ships and structures in ice (ICETECH 2008). Calgary, 2008. P. 106-RF, p. 105–113. DOI: 10.5957/ICETECH-2008-106.
2. Investigation of ice propulsion performance of *Sankt-Peterburg* icebreaker in the Kara Sea / E.M. Appolonov,

- V.A. Belyashov, K.E. Sazonov [et al.] // *Sudostroenie (Shipbuilding)*. 2011. No. 4. P. 9–12 (in Russian).
3. Full-scale ice trials of Vladivostok icebreaker / A.I. Kostylev, K.E. Sazonov, O.Ya. Timofeev [et al.] // *Sudostroyeniye (Shipbuilding)*. 2016. No. 6. P. 9–12 (in Russian).
 4. Lopashev K.A., Sazonov K.E., Timofeev O.Ya. Full-scale ice trials of Novorossiysk icebreaker in the Kara Sea // *Transactions of Krylov State Research Centre*. 2017. Vol. 3(381). P. 35–42. DOI: 10.24937/2542-2324-2017-3-381-35-42 (in Russian).
 5. Sazonov K.E. Model and full-scale experiment in marine ice engineering. St. Petersburg : Krylov State Research Centre, 2021. 306 p. (in Russian).
 6. Kanevsky G.I., Klubnichkin A.M., Sazonov K.E. Ice propulsion performance diagrams for ships // *Bulletin of Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping*. 2022. Vol. 14, No. 6. P. 805–814. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-6-805-814 (in Russian).
 7. Dobrodeev A.A., Sazonov K.E. Ice propulsion performance diagrams in analysis of full-scale ship trials // *Transactions of Krylov State Research Centre*. 2023. Vol. 3(405). P. 81–88. DOI: 10.24937/2542-2324-2023-3-405-81-88 (in Russian).
 8. Ierusalimsky A.V. Efficiency of pneumatic washing systems for ice-going ships // *Transactions of TsNIMF*. 1981. Vol. 265: Future ship types. P. 82–88 (in Russian).
 9. Kashtelyan V.I., Popov Yu.A., Tsoy L.G. Efficiency and applications of pneumatic washing systems at ice-going ships // *Transactions of AARI*. 1981. Vol. 376. P. 67–84 (in Russian).
 10. Icebreakers / V.I. Kashtelyan, A.Ya. Ryvlin, O.V. Faddeev, V.Ya. Yagodkin. Leningrad : Sudostroyeniye, 1972. 288 p. (in Russian).
 11. Ryvlin A.Ya., Kheisin D.E. Ice tests of ships. Leningrad : Sudostroyeniye, 1980. 208 p. (in Russian).
 12. Ionov B.P., Gramuzov E.M. Ice propulsion performance of ships. St. Petersburg ; Sudostroeniye, 2001 512 p. (in Russian).

Сведения об авторах

Сазонов Кирилл Евгеньевич, д.т.н., начальник лаборатории ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196158, Россия, Санкт-Петербург, Мос-

ковское шоссе, д. 44. Тел.: +7 (812) 415-45-23. E-mail: kirsaz@rambler.ru. <https://orcid.org/0000-0003-3364-1309>.

Добродеев Алексей Алексеевич, к.т.н., заместитель начальника лаборатории – начальник сектора ФГУП «Крыловский государственный научный центр»; доцент ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный морской технический университет». Адрес: 196158, Россия, Санкт-Петербург, Московское шоссе, д. 44. Тел.: +7 (812) 386-69-78. E-mail: A_Dobrodeev@ksrc.ru. <https://orcid.org/0000-0001-6305-5090>.

Бокатова Елизавета Антоновна, инженер 1-й категории ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196158, Россия, Санкт-Петербург, Московское шоссе, д. 44. E-mail: E_Bokatova@ksrc.ru.

Бабич Евгений Михайлович, главный конструктор АО «ЦКБ «Айсберг». Адрес: 199034, Россия, Санкт-Петербург, Большой пр. В.О., д. 36. E-mail: babich@iceberg.sp.ru.

Крупина Нина Артуровна, старший научный сотрудник ФБГУ «Арктический и антарктический научно-исследовательский институт». Адрес: 199397, Россия, Санкт-Петербург, ул., 38. E-mail: olks@aari.ru.

About the authors

Kirill E. Sazonov, Dr. Sci. (Eng.), Head of Laboratory, Krylov State Research Centre. Address: 44, Moskovskoye sh., St. Petersburg, Russia, post code 196158. Tel.: +7 (812) 415-45-23. E-mail: kirsaz@rambler.ru. <https://orcid.org/0000-0003-3364-1309>.

Aleksey A. Dobrodeev, Cand. Sci. (Eng.), Head of Sector, Krylov State Research Centre; Associate Professor, St. Petersburg State Marine Technical University. Address: 44, Moskovskoye sh., St. Petersburg, Russia, post code 196158. Tel.: +7 (812) 386-69-78. E-mail: A_Dobrodeev@ksrc.ru. <https://orcid.org/0000-0001-6305-5090>.

Elizaveta A. Bokatova, 1st Category Engineer, Krylov State Research Centre. Address: 44, Moskovskoye sh., St. Petersburg, Russia, post code 196158. E-mail: E_Bokatova@ksrc.ru.

Evgeny M. Babich, Chief Designer, Central Design Bureau Aisberg JSC. Address: 36, Bolshoy pr. of Vasilyevsky Ostrov, St. Petersburg, Russia, post code 199034. E-mail: babich@iceberg.sp.ru.

Nina A. Krupina, Senior Researcher, Arctic and Antarctic Research Institute. Address: 38, Beringa st., St. Petersburg, Russia, post code 199397. E-mail: olks@aari.ru.

Поступила / Received: 03.07.23
Принята в печать / Accepted: 31.08.23
© Коллектив авторов, 2023

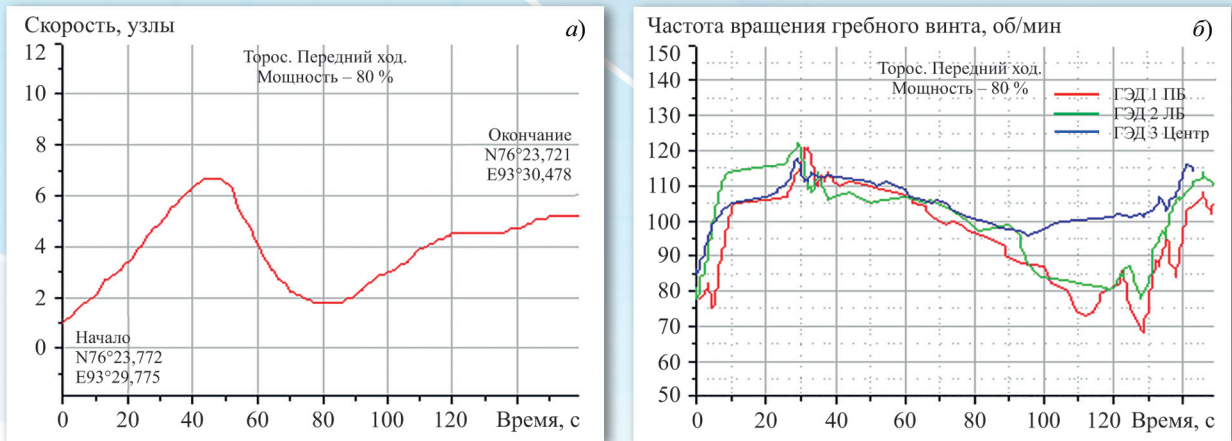


Рис. 3. Временная зависимость скорости движения СУАЛ «Сибирь» (а) и частоты вращения гребных винтов при преодолении тороса (б)

Fig. 3. Time history for *Sibir* icebreaker running speed (a) and ridge-penetration RPM (b)

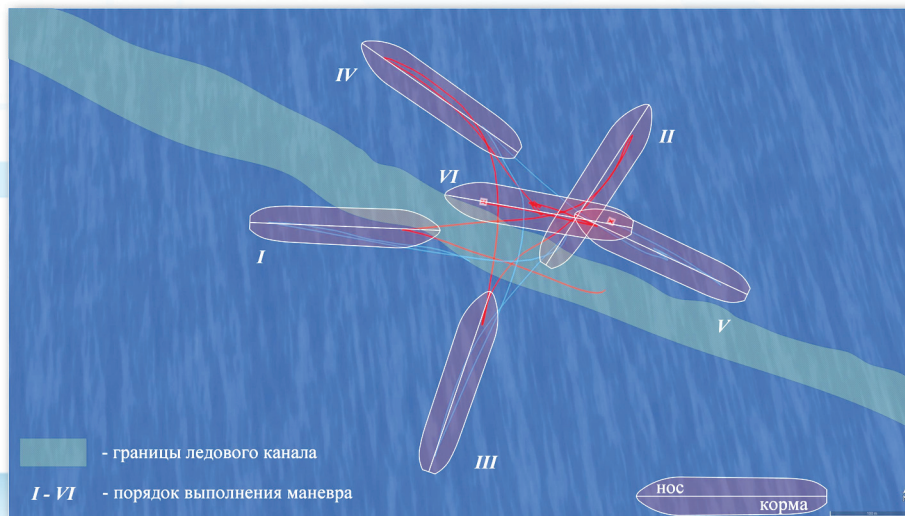


Рис. 4. Последовательные стадии I-VI выполнения маневра «звезда»

Fig. 4. All consecutive stages (I-VI) of "star" maneuver

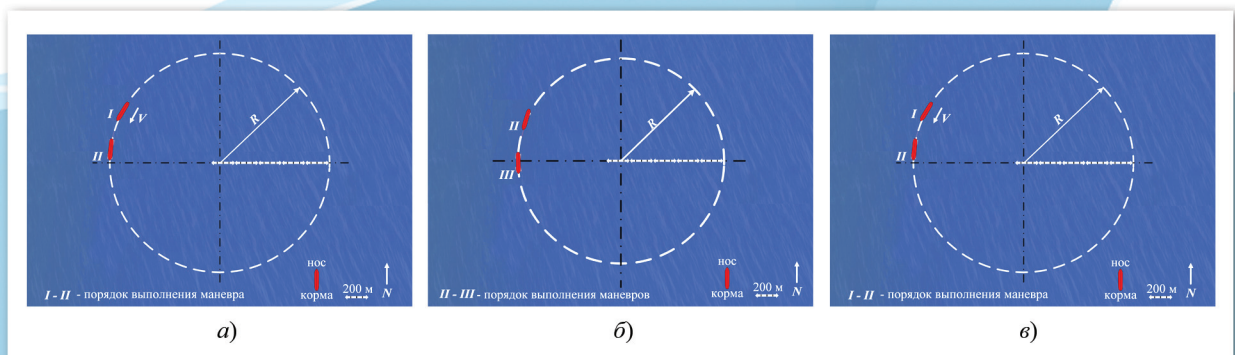


Рис. 5. Рассчитанная по результатам испытаний траектория движения ледокола «Сибирь» на режиме циркуляции передним ходом: а) угол перекладки руля 10° (режим I-II); б) угол перекладки руля 15° (режим II-III); в) угол перекладки руля 30° (режим III-IV)

Fig. 5. Ahead-running turning-circle trajectory of *Sibir* icebreaker as per the results of trials: а) rudder angle 100° (Scenarios I-II); б) rudder angle 150° (Scenarios II-III); с) rudder angle 300° (Scenarios III-IV)

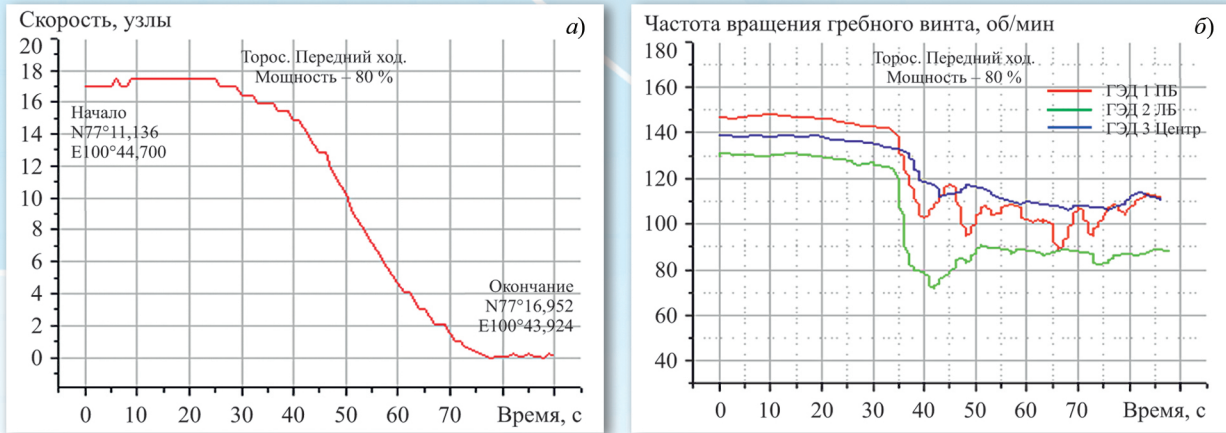


Рис. 7. Временная зависимость скорости движения ГУАЛ «Арктика» (а) и частоты вращения гребных винтов при преодолении тороса (б)

Fig. 7. Time history for *Arktika* icebreaker running speed (a) and ridge-penetration RPM (b)

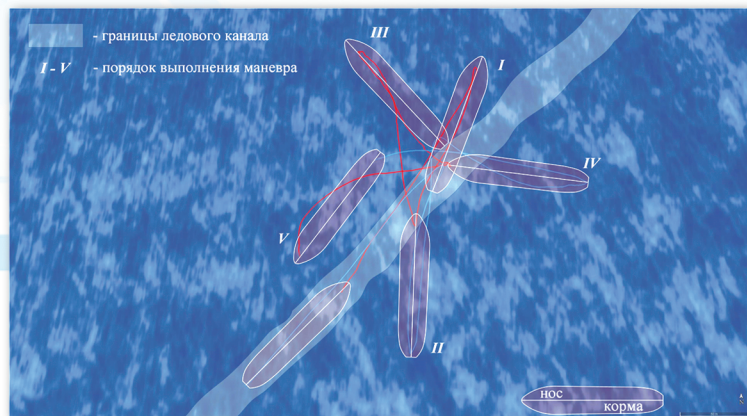


Рис. 8. Выход из канала носом вперед (этап I) и последовательные стадии I–V выполнения маневра «звезда» ледоколом «Арктика»

Fig. 8. Bow-first channel breakout (Stage I) and all consecutive stages (I–V) of "star" maneuver – *Arktika* icebreaker

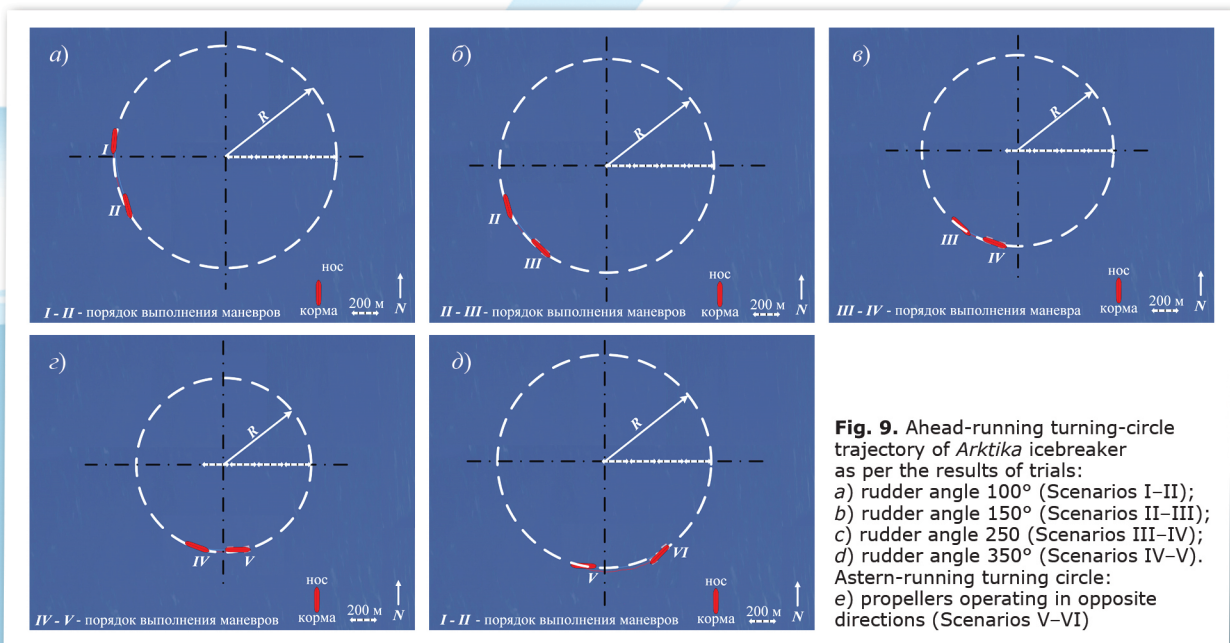


Fig. 9. Ahead-running turning-circle trajectory of *Arktika* icebreaker as per the results of trials:
 a) rudder angle 10° (Scenarios I–II);
 b) rudder angle 15° (Scenarios II–III);
 c) rudder angle 25° (Scenarios III–IV);
 d) rudder angle 35° (Scenarios IV–V).
 Astern-running turning circle:
 e) propellers operating in opposite directions (Scenarios V–VI)

Рис. 9. Рассчитанная по результатам испытаний траектория движения ледокола «Сибирь». На режиме циркуляции передним ходом: а) угол перекладки руля 10° (режим I–II); б) угол перекладки руля 15° (режим II–III); в) угол перекладки руля 25° (режим III–IV); г) угол перекладки руля 35° (режим IV–V). На режиме циркуляции задним ходом: д) работа гребных винтов «враздрай» (режим V–VI)