

МАКРОМАСШТАБНЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЛЕДОВЫХ СЖАТИЙ В СЕВЕРНОМ ЛЕДОВИТОМ ОКЕАНЕ В ПЕРИОД ПЕРВОГО ДРЕЙФА ЛЕДОСТОЙКОЙ САМОХОДНОЙ ПЛАТФОРМЫ «СЕВЕРНЫЙ ПОЛЮС» В СОСТАВЕ ПОЛЯРНОЙ ДРЕЙФУЮЩЕЙ СТАНЦИИ «СЕВЕРНЫЙ ПОЛЮС-41» В 2022—2023 ГГ.

И. А. Свистунов, К. В. Фильчук, А. В. Бакланов,
Д. Л. Раев, О. Ю. Стрибный, Ю. Г. Гаврилов
ФГБУ «Арктический и антарктический научно-исследовательский институт»
(Санкт-Петербург, Российская Федерация)

Статья поступила в редакцию 25 марта 2024 г.

Для цитирования

Свистунов И. А., Фильчук К. В., Бакланов А. В. и др. Макромасштабные экспериментальные исследования ледовых сжатий в Северном Ледовитом океане в период первого дрейфа ледостойкой самоходной платформы «Северный полюс» в составе полярной дрейфующей станции «Северный полюс-41» в 2022—2023 гг. // Арктика: экология и экономика. — 2024. — Т. 14, № 2. — С. 274—285. — DOI: 10.25283/2223-4594-2024-2-274-285.

Проблема ледовых сжатий представляет научно-практический интерес с позиции стратегии развития ледового судостроения и судоходства России в Арктике, а также носит фундаментальный характер при изучении самой природы явления. Решение задач в рамках проблемы возможно лишь контактным методом исследования при длительном пребывании специализированного судна в дрейфующих льдах. В обзорной статье представлены описания проведенных экспериментальных и аналитических исследований по данной проблеме за период первого года работы дрейфующей станции «Северный полюс-41», организованной на базе ледостойкой самоходной платформы «Северный полюс».

Ключевые слова: дрейфующая станция СП-41, ледостойкая платформа «Северный полюс», ледовые сжатия, ледовые нагрузки, натурный эксперимент.

Введение

Ледовое сжатие — одно из наиболее опасных природных явлений с точки зрения эксплуатации инженерных объектов в ледовых условиях. Возникновение ледовых сжатий в Северном Ледовитом океане (СЛО) по современным представлениям [1] обусловлено главным образом влиянием ветра и течений, в результате чего отдельные ледяные поля начинают наслаиваться, дробиться и нагромождаться. Суда ледового плавания, ледоколы и прочие специализированные плавучие объекты эпизодически становятся вынужденными участниками этих процессов. Воздействие льда может вызвать по-

вреждения корпусных конструкций, что порой приводит к серьезным авариям с самыми трагическими последствиями [2].

Наиболее надежный подход к исследованию ледовых нагрузок от ледовых сжатий, как, собственно, и самой природы ледовых сжатий, может быть реализован только в натурных условиях при длительном пребывании плавучего объекта во льдах СЛО. Возможность решения таких задач предусматривалась при проектировании первой в мире ледостойкой самоходной платформы (ЛСП) «Северный полюс» (ее фото помещено на обложке журнала) [3], предназначенной для возобновления научной деятельности России в Арктике в формате дрейфующих станций [4].

Главным инструментом для сбора данных о силовом потенциале ледовых сжатий является сам кор-

© Свистунов И. А., Фильчук К. В., Бакланов А. В., Раев Д. Л., Стрибный О. Ю., Гаврилов Ю. Г., 2024

пус ЛСП, оборудованный уникальным измерительным комплексом — системой мониторинга ледовых нагрузок (СМЛН) [5]. Волоконно-оптические датчики СМЛН позволяют фиксировать механические напряжения в конструкциях под влиянием внешних сил со стороны льда. Фактически корпус платформы выступает в роли динамометра для измерения в натурном масштабе сил, действующих в ледяных полях СЛО при подвижках и ледовых сжатиях.

В период первого дрейфа ЛСП «Северный полюс» как базы для дрейфующей станции «Северный полюс-41» (СП-41), открытой в октябре 2022 г. и функционирующей по настоящее время, в этом ключе решались задачи, направленные на введение СМЛН в эксплуатацию и отработку методики проведения исследований ледовых сжатий с помощью СМЛН.

В настоящей статье приводятся сведения о проведенных наблюдениях за картиной физического взаимодействия платформы с ледяным покровом при действии ледовых сжатий, формализуется комплексная научно-практическая задача под СМЛН при исследовании ледовых сжатий, а также описывается ряд проводимых во время дрейфа экспериментов, ориентированных на тестирование датчиков СМЛН и исследование ледовых нагрузок на корпус ЛСП.

Таким образом, объектом исследования в проведенной работе выступает непосредственно ледостойкая платформа «Северный полюс», рассматриваемая, с одной стороны, как плавучее твердое тело в водно-ледовой среде, а с другой — в качестве измерителя внешних сил этой же среды. Предметами исследования являются сценарий взаимодействия дрейфующей платформы с ледяным полем при ледовых сжатиях, экспериментальные методы тестирования и калибровки измерительной части корпуса платформы, а также экспериментальный метод исследования характеристик внешнего трения в системе платформа-льдина.

Методы исследования, приборы и оборудование

В работе применялись комплексные методы исследования, включившие в себя инструментально-измерительные, аналитические и экспериментальные подходы.

Как упоминалось выше, базовым измерительным инструментом при исследовании ледовых сжатий является волоконно-оптическая система мониторинга напряженно-деформированного состояния корпуса платформы, вмораживаемой в ледяное поле. СМЛН базируется на деформационных (одноосевых и трехосевых) датчиках ASTRO A521 и ASTRO A527 и температурных датчиках ASTRO A513, производимых компанией ООО «Инверсия-Сенсор». Детальные сведения по архитектуре СМЛН представлены в работе [5].

Для отслеживания динамики ледяного покрова вблизи и на удалении от ЛСП использовались радиолокационный индикатор контроля ледовой

обстановки «Ice Vision» и ледовый радар «RUTTER Sigma S6 Ice Navigator». Картина взаимодействия в зоне контакта корпуса со льдом фиксировалась с помощью фотовидеорегистрирующей аппаратуры. Также применялся метод визуальных наблюдений с борта платформы. Значения требуемых характеристик ледяного покрова были получены контактными методами измерения с привлечением ледоисследовательского оборудования: буровой машинки со шнеками, снегомерной и ледомерной реек и др.

Феноменологическое и аналитическое описание натурной картины наблюдаемых процессов проводилось на основании сведений из теоретической механики [6], механики разрушения ледяного покрова [7], теории упругости [8], теории корабля [9], ледовой ходкости судов и ледотехники [10].

Экспериментальные работы по тестированию и калибровке датчиков СМЛН осуществлялись при использовании гидравлической системы (номинальное давление 70 МПа) с гидроцилиндром для создания внешнего статического усилия и динамометра сжатия серии ДОС-3 с наибольшим пределом измерения 100 кН. Эксперименты по исследованию трения в парах обшивка-лед и лед-лед проводились методом буксировки с помощью электрической аккумуляторной лебедки с регулятором скорости или посредством снегохода при использовании динамометра растяжения серии ДОР-3 с верхним пределом измерения 1 кН.

Результаты исследований и их обсуждение

Особенности поведения системы платформа-льдина при ледовых сжатиях

Все существенные подвижки ледяных полей вблизи дрейфующей станции СП-41, приводившие к возникновению реакций деформационных датчиков корпуса ЛСП, за период с октября 2022 г. по август 2023 г. пришлись на время полярной ночи. Наибольший интерес для анализа картины взаимодействия ледяного поля с вмороженной в него платформой представляют события, происходившие в конце ноября и в декабре 2022 г. и в феврале 2023 г. С периодичностью от нескольких часов до нескольких дней перемещения льдин приводили платформу к затиранию, сопровождавшемуся сжатием корпуса, его выжиманием и кренением, выламыванием ледяных секторов в контактных точках, скоплением обломков льда под бортами ЛСП и кромками льдины, а также формированием навалов и торосистых гряд.

Детальный анализ наблюдений позволяет сформулировать следующие характерные особенности поведения системы платформа-льдина при возникновении интенсивных подвижек ледяного покрова.

1. Во всех наблюдаемых сценариях, включая случаи движения ледяных полей перпендикулярно к диаметральной плоскости платформы, фиксировались продольные перемещения корпуса. Таким образом, при ледовых сжатиях помимо действия нормальных



Рис. 1. Картина взаимодействия платформы и льдины при ледовых подвижках и сжатиях: слева – образование радиальных относительно поверхности корпуса сквозных трещин на начальном этапе (фото С. А. Чигрина, 2023 г.), справа – выламывание ледяных секторов под бортом платформы при интенсивных сжатиях (фото И. А. Свистунова, 2022 г.)

Fig. 1. Figure of the platform – ice floe interaction during ice movements and nipping: on the left – formation of through radial cracks relative to the surface of the platform hull at the initial stage (photo by S. A. Chigrin, 2023), on the right – breaking out of ice sectors under the side of the platform during intense nipping (photo by I. A. Svistunov, 2022)

к борту усилий, всегда есть продольная проекция результирующего вектора ледовой силы, которая приводит к движению платформы в направлении носа или кормы. При этом скорость перемещения зависит от долевого участия этой составляющей в главном векторе ледовых сил.

2. На начальном этапе подвижек поле, находящееся в контакте с платформой, разрушается преимущественно от касательных напряжений: образуются сквозные трещины, проходящие целиком через льдину в радиальном направлении по отношению к корпусу ЛСП (рис. 1, слева).

3. При дальнейшем действии сжимающих сил в отдельных контактных зонах ледяной пластины с бортом происходит локальное раздробление и смятие кромок льда. Далее под бортом начинается выламывание ледяных секторов изгибом сверху вниз (рис. 1, справа). Образующиеся сектора могут иметь значительную протяженность, достигающую в отдельных случаях половины длины корпуса на уровне ватерлинии. Такие сектора, как правило, в процессе взаимодействия разрушаются на более мелкие сегменты в результате появления в них радиальных и (или) концентрических трещин. Наибольший сектор зафиксирован длиной до 35 м с максимальной шириной в поперечнике до 7 м при средней толщине льда около 1 м. Наблюдаемая картина хорошо согласуется с результатами модельных испытаний платформы, проводившихся в ледовом бассейне Арктического и антарктического научно-исследовательского института (АНИИ) [11].

4. В процессе сжатий платформа незначительно подвсплывает, а после выламывания из ледяного поля сектора(ов) может получить крен (максимальный угол крена не превысил 3°). При этом по-

сле крена корпуса разрушение льда происходит преимущественно со стороны приглубленного борта. Такой эффект был также отмечен на этапе модельных испытаний платформы при исследовании поведения корпуса при ледовых сжатиях [11].

5. По завершении этапов интенсивного воздействия льда на платформу с помощью подводной видеосъемки обследовалась подводная часть корпуса (рис. 2). Анализ показал, что после ледовых сжатий основной массив битого льда распределяется вдоль бортов, а также в виде подсовов под кромками льдины. Отдельные фрагменты льдин концентрируются в районе кормового подзора и вокруг стойки винто-рулевой колонки. Область плоского днища полностью свободна ото льда, однако вероятность появления и наращивания ледяной подушки во время дрейфа, как было получено в лабораторных условиях [11], все же сохраняется.

Постановка научно-практической задачи исследования ледовых сжатий

На основании полученных натурных наблюдений с учетом проведенных ранее аналитического и экспериментального исследований в [11]¹ справедливо будет использовать следующую схему сил, позволяющую формализовать комплексную задачу по

¹ В работе [11] (журнал «Арктика: экология и экономика» №1 за 2023 г.) на с. 89 (рис. 4) в уравнениях системы судно-вода-лед допущены опечатки. Системы уравнений имеют вид:

$$\begin{cases} \sum F_{Ox} = 0 = F_{c_1} + F_{c_2} + \rho_w g V^* - D_0, \\ \sum F_{On} = 0 = F_{n_1} - F_{n_2}, \\ \sum M = 0 = M_0 - M_2, \end{cases} \quad \begin{cases} \sum F_{Ox} = 0 = F_{c_1} + F_{c_2} + \rho_w g V^* - D_0, \\ \sum F_{On} = 0 = F_{n_1} - F_{n_2}, \\ \sum M = 0 = M_0 + M_1 - M_2. \end{cases}$$

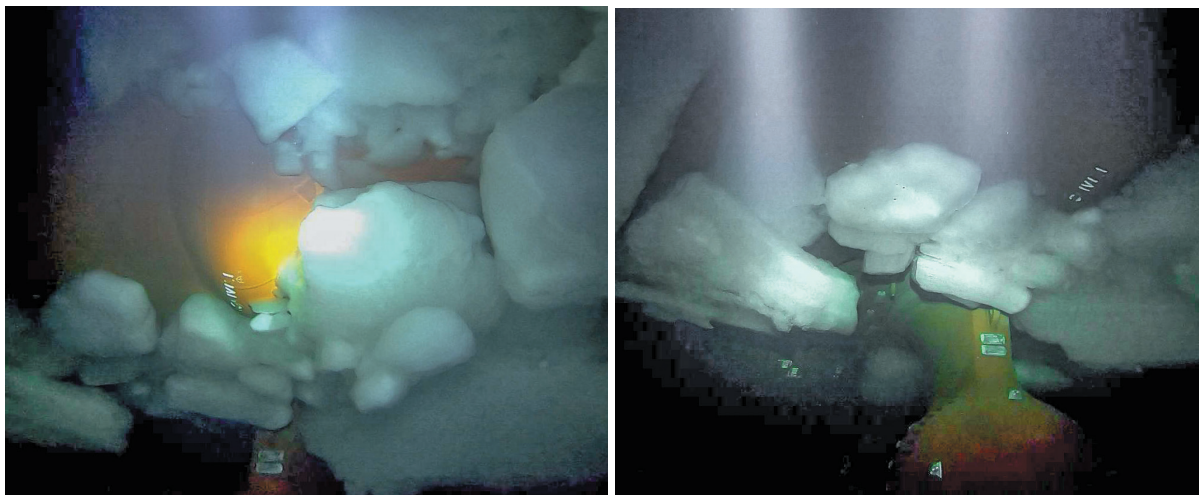


Рис. 2. Скопление ледяных блоков в районе кормового подзора и вокруг стойки винто-рулевой колонки. Фото И. А. Свистунова и В. А. Лихоманова, 2022 г.

Fig. 2. Accumulation of ice blocks in the area of the stern counter and around the rudder column. Photo by I. A. Svistunov and V. A. Likhomanov, 2022

проблеме ледовых сжатий, решаемую посредством СМЛН (см. рис. 3).

На схеме слева показан главный вектор ледовых сил P , действующий в результате возникшего давления ледяных полей p . Приложив в центре тяжести платформы G две взаимно уравновешивающиеся силы P' и P'' , равные P и пару сил P и P'' . F — компонента ледовой силы P' , представляющая собой силу ледовых сжатий; R — другая составляющая той же силы, приводящая к продольному перемещению платформы в направлении носа

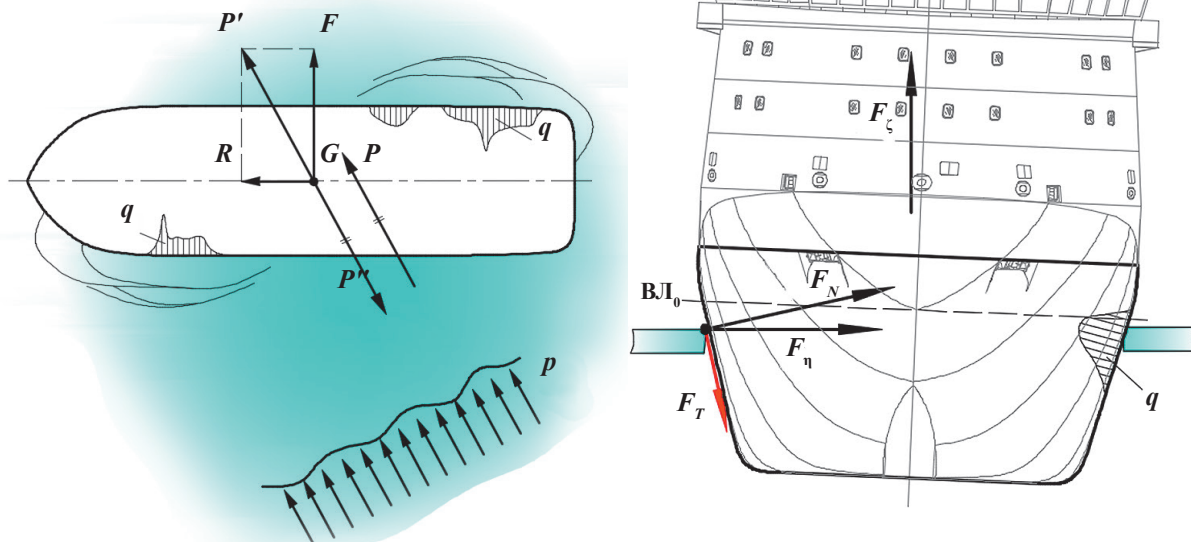


Рис. 3. Схема сил, действующих на платформу во время ледовых сжатий: p — давление ледяных полей, P — главный вектор ледовых сил, F — сила ледовых сжатий, F_N — нормальная составляющая силы ледовых сжатий, F_T — касательная составляющая силы ледовых сжатий в плоскости миделя, $F_ζ$ — сила ледового вытеснения, $F_η$ — проекция ледовой силы в плоскости ледяного поля, R — продольная проекция главного вектора ледовых сил, q — эпюры локальных ледовых нагрузок на корпус платформы, G — центр тяжести платформы, $ВЛ_0$ — положение исходной ватерлинии

Fig. 3. Diagram of forces acting on the platform during nipping: p — pressure of ice fields, P — main vector of ice forces, F — ice nipping force, F_N — normal component of the ice nipping force, F_T — tangential component of the ice nipping force in the midsection plane, $F_ζ$ — ice displacement force, $F_η$ — projection of ice force in the plane of the ice field, R — longitudinal projection of the main vector of ice forces, q — diagrams of local ice loads on the platform hull, G — platform center of gravity, $ВЛ_0$ — initial waterline

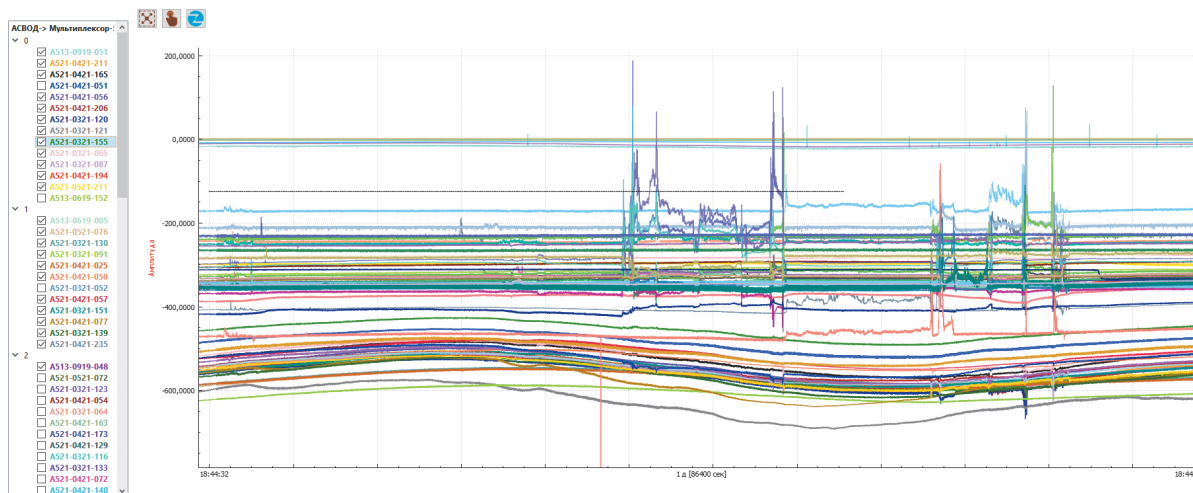


Рис. 4. Реакции волоконно-оптических датчиков системы мониторинга ледовых нагрузок при ледовых сжатиях на суточном временном интервале измерений
Fig. 4. Reactions of fiber-optic sensors of the ice load monitoring system (ILMS) during nipping on a daily measurement time interval

(кормы), равная по модулю силе сопротивления трения корпуса о лед [10]. Последняя определится при известном значении силы F через коэффициент трения пары обшивка-лед f_T в соответствии с выражением $R = f_T F$. Момент пары сил P и P'' разворачивает платформу вокруг вертикальной оси. Согласно натурным наблюдениям существенных изменений курса платформы при подвижках и сжатиях не происходило, что свидетельствует о малом влиянии вращающего момента в рассматриваемых конкретных случаях.

Как показано на схеме справа, сила ледового сжатия F при проецировании на плоскость мидель-шпангоута также может быть разложена на составляющие: F_N — нормальное к борту усилие; F_T — сила трения, действующая вдоль линии борта в вертикальном направлении, определяемая аналогичным образом, как описано выше; F_ζ — результирующая сила ледового вытеснения, образованная проекцией силы F на ось, перпендикулярную зеркалу воды; F_η — горизонтальная проекция ледовой силы, действующая в плоскости ледяного поля.

Главный вектор ледовых сил P (или P'') по сути представляет собой глобальную ледовую нагрузку, воспринимаемую плавучим сооружением в целом. В то же время он дает локальную оценку внутренним усилиям в поле напряжений, создаваемом в ледяном покрове в период подвижек и ледовых сжатий. Данная характеристика важна при исследовании природы ледовых сжатий в СЛО, при выявлении основных факторов, обуславливающих возникновение напряжений в ледяных полях, и их долевого участия в общем балансе сил, а также в чисто практических вопросах судоходства при ледовом плавании.

Основная составляющая вектора P' — сила ледовых сжатий F_N — определяется как интегральная функция всех контактных (локальных) ледовых нагрузок q , действующих на корпус одновременно. Величина и форма распределения последних могут быть получены на основании данных измерений деформационных датчиков СМЛН. На рис. 4 в качестве примера показан скриншот программы регистрации показаний СМЛН, на котором прослеживается характер изменения ледовых сил во времени (масштаб временной шкалы — 24 ч) и пространстве (датчики разнесены по длине корпуса) при ледовых сжатиях. Максимальные пиковые значения ледовых нагрузок (давлений) и их статистическая обеспеченность являются предметом исследования самостоятельных научных дисциплин судостроительной отрасли, объединенных проблемой ледовой прочности проектируемых судов и гидротехнических сооружений [12].

Таким образом, решение различных задач по обозначенным направлениям в рамках проблемы ледовых сжатий сводится к определению базовых параметров q и f_T , на основании которых уже могут быть рассчитаны искомые остальные.

Определение локальных ледовых нагрузок q напрямую связано с тестированием и настройкой СМЛН в эксплуатационных условиях, а также с разработкой методики обработки натуральных данных, получаемых от СМЛН. Для этого в рамках первого дрейфа платформы с системой мониторинга был проведен ряд специальных экспериментов, речь о которых идет ниже.

Исследование внешнего трения льда неоднократно проводилось при рассмотрении вопросов плавания ледокольных судов и функционирования других инженерных объектов в ледовых условиях [13; 14]. Тем не менее актуальность определения фактиче-

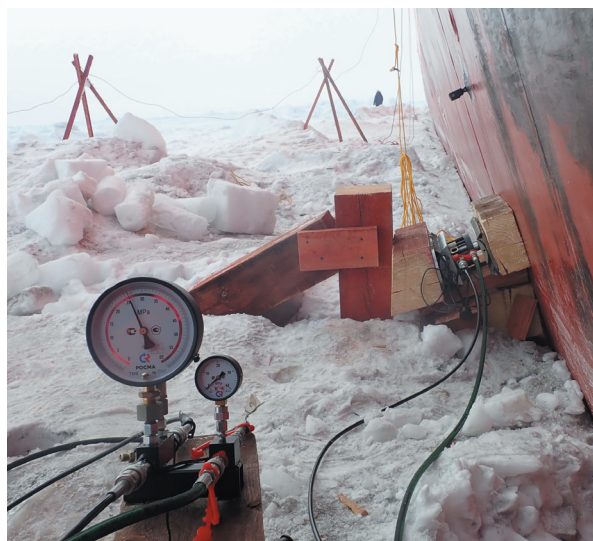
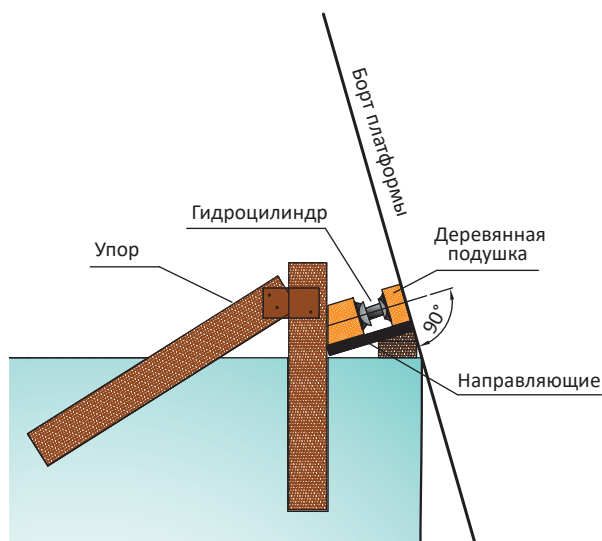


Рис. 5. Экспериментальная установка для проведения тестов по статическому нагружению бортового шпангоута. Схема и фото И. А. Свистунова, 2023 г.

Fig. 5. Experimental facility for tests on static loading of the side frame. Diagram and photo by I. A. Svistunov, 2023

ского коэффициента трения в системе платформа-льдина на момент измерения ледовых сжатий сохраняется. При этом требуется оценить статический и динамический (на малых скоростях скольжения) коэффициенты трения в паре обшивка-льдина. Те же коэффициенты определяются для пары лед-лед при изучении взаимодействия льдин между собой. Описания экспериментов по исследованию трения льда также приведены ниже.

Экспериментальное тестирование системы мониторинга ледовых нагрузок

Во время подвижек ледяного покрова, происшедших вблизи ЛСП «Северный полюс», непрерывно регистрировались показания волоконно-оптических датчиков СМЛН. Таким образом были замерены действующие напряжения (упругие деформации) в корпусных конструкциях платформы при естественных природных ледовых сжатиях.

Для определения искомых ледовых усилий по данным измерений сигналов СМЛН выполняется процедура восстановления параметров местной ледовой нагрузки, приложенной к корпусу, в результате применения конечно-элементного анализа [15]. Согласно такому подходу в программной среде, основанной на методе конечных элементов, разрабатывается численная модель нагружаемого участка корпуса. Вид конечно-элементной модели бортового перекрытия ЛСП «Северный полюс» под действием на него статической распределенной нагрузки приведен в [5].

По результатам расчетов определяются размеры пятна контакта и эпюра контактного давления, способные вызвать такое же поле напряжений в модели, как и в реальной конструкции при ее нагружении ледяным полем. Решение задачи восстановления

параметров ледовой нагрузки от ледовых сжатий дополнительно затруднено из-за сложного напряженно-деформированного состояния корпуса платформы, возникающего при всестороннем обжатии. Повысить достоверность результатов при расшифровке натуральных данных можно после проведения серии специальных экспериментов, направленных на верификацию численной конечно-элементной модели.

В рамках таких испытаний выбранный участок борта платформы, оборудованный датчиками СМЛН, нагружается внешним статическим усилием, имитирующим действие ледовых сжатий. При этом характеристики создаваемой нагрузки задаются, а вызываемые в ходе эксперимента упругие деформации конструкции измеряются. По результатам испытаний строятся эмпирические зависимости усилия (давления, погонной нагрузки) от напряжения (деформации). Аналогичные функции определяются по результатам численных расчетов в точках модели, соответствующих местам установки волоконно-оптических датчиков на элементах бортового перекрытия, при тех же параметрах внешней нагрузки. После сопоставления полученных кривых выполняется калибровка конечно-элементной модели корпуса платформы.

Для проведения серии экспериментов в период первого дрейфа ЛСП «Северный полюс» была реализована следующая схема экспериментальной установки (рис. 5). Вблизи борта в ледяное поле напротив тензометрированного шпангоута вмонтируется упор, состоящий из двух жестко связанных между собой брусков размерами профиля 200×200 мм, ориентированных относительно друг друга в соответствии со схемой. Между вертикальным брусом и наклонным бортом платформы раз-

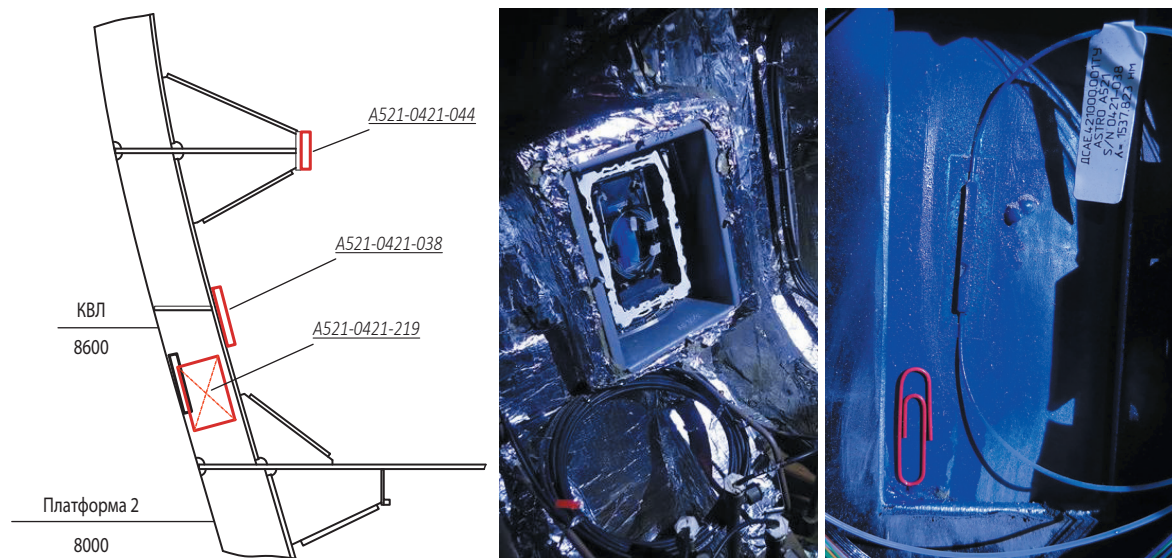


Рис. 6. Схема расположения тестируемых волоконно-оптических датчиков СМЛН (слева) и общий вид одноосевого датчика СМЛН в защитном коробе на примере A521-0421-038 (по центру и справа). Фото И. А. Свистунова, 2023 г.
Fig. 6. Layout of the tested ILMS fiber-optic sensors (left) and general view of the ILMS single-axis sensor in a protective box using the example of A521-0421-038 (center and right). Photo by I. A. Svistunov, 2023

мещаются направляющие таким образом, чтобы они образовали с плоскостью борта прямой угол. К направляющим закрепляется гидроцилиндр, оборудованный с двух сторон упорными металлическими плитами. Усилие от плиты на борт передается через деревянную подушку.

При такой конструкции экспериментальной установки статическая нагрузка создается перпендикулярно борту, при этом можно варьировать точки приложения центра давления по вертикали (вдоль шпангоута), а также характеристики пятна контакта (высоту и длину для прямоугольной формы). Последние задаются размерами деревянной подушки, прилегающей к обшивке борта.

Для нагружения был выбран шпангоут 55 1/2, оборудованный со стороны правого борта волоконно-оптическими датчиками СМЛН: на стенке шпангоута (A521-0421-219) и на пояске шпангоута (A521-0421-038), как показано на рис. 6 (слева). В плоскости шпангоута также находится датчик, размещенный на пояске бортового стрингера (A521-0421-044). На рис. 6 по центру и справа в качестве примера представлен одноосевой деформационный датчик ASTRO A521-0421-038, находящийся внутри защитного короба, заливаемого компаундом.

Во время эксперимента усилие на борт создается и поддерживается за счет давления в гидравлической системе. Предварительно проводится тарировка гидроцилиндра для определения коэффициента пропорциональности между внутренним давлением в системе и создаваемой штоком гидроцилиндра внешней силой. После выбора координат приложения и параметров нагрузки производится поэтапное повышение давления в гидросистеме.

ме. На рис. 7 на графике с показаниями реакций СМЛН представлен сигнал датчика A521-0421-038 с характерной ступенчатой изменчивостью, соответствующей картине нагружения. Изменчивость базового сигнала, не связанная с механическим воздействием, обусловлена термическими деформациями корпуса из-за температурных перепадов окружающей среды.

В конечном счете по предложенной схеме было выполнено порядка 30 тестов при варьировании размеров пятна контакта, а также аппликаты центра давления вдоль линии шпангоута, таким образом перекрывая диапазон ватерлиний платформы, на которых корпус подвергался естественным ледовым сжатиям². Результаты экспериментов находятся в обработке и будут доступны для опубликования после завершения дрейфа станции СП-41.

Помимо статической нагрузки тестирование СМЛН предполагает также проверку реакций волоконно-оптических датчиков при кратковременной (ударной) нагрузке. Результаты серийных испытаний при динамическом характере воздействия на корпус будут востребованы для исследования ледовых нагрузок на платформу при ее самостоятельном следовании в ледовых условиях на переходах или при смене точки базирования [3].

Для проведения экспериментов по динамическому нагружению борта из ледяного поля выпиливались крупномасштабные призматические образцы,

² Платформа во время дрейфа постепенно подвсплывает по мере расхода топлива и провизии и может быть приглублена до исходной ватерлинии путем балластирования заборной водой.

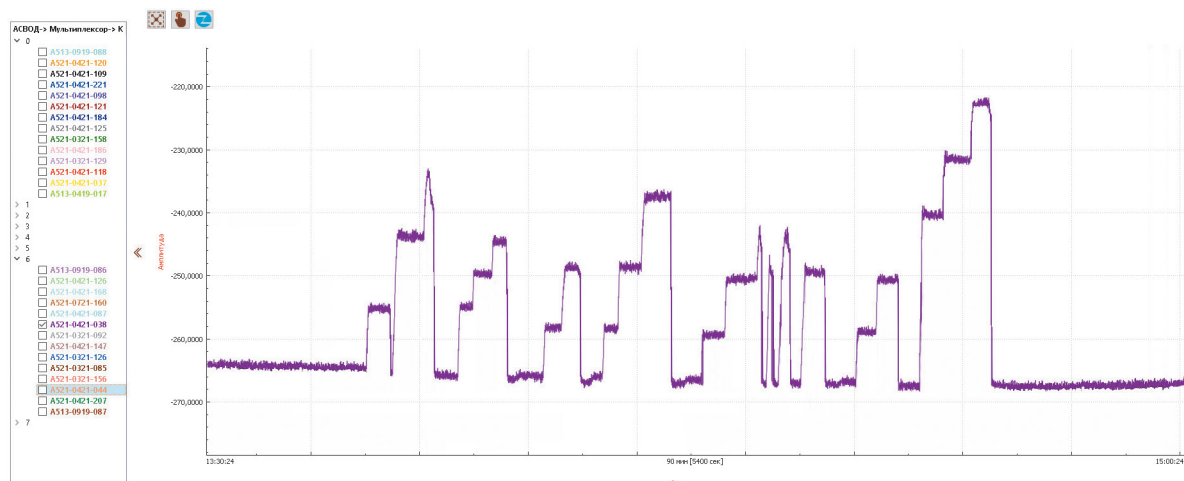


Рис. 7. Реакция деформационного датчика A521-0421-038 во время эксперимента при ступенчатом статическом нагружении шпангоута

Fig. 7. Reaction of strain sensor A521-0421-038 during an experiment with stepwise static loading of the frame

которые затем подвешивались с помощью высокопрочной веревки, закрепляемой противоположным концом на уровне палубы ходового мостика (длина маятника порядка 14 м). Ледяная призма отклонялась от положения равновесия, после чего под действием силы тяжести и инерции образца совершался удар о борт (рис. 8, слева). Контактующая с обшивкой грань призмы предварительно окрашивалась, что позволяло зафиксировать размеры контактного пятна после соударения. Ударному воздействию подвергался тот же участок борта со шпангоутом 55 ½.

Сила удара может быть определена на основании теоремы о количестве движения либо через решение уравнения движения маятника [6]. В ходе тестов для расчета измерялись масса и размеры ледяной призмы, скорость в момент удара,

время соударения, угол отклонения (или размах) маятника.

На графике (рис. 8, справа) приведен пример импульса, зарегистрированного СМЛН во время ударного воздействия ледяной призмы на шпангоут, откуда могут быть сняты такие характеристики, как время соударения и величина (амплитуда) упругой деформации. Перед разрушением образца определялись физико-механические свойства льда, включая прочность при сжатии в направлении, совпадающем с осью соударения. Результаты экспериментов будут использоваться при конечно-элементном анализе бортового перекрытия для случая динамического приложения нагрузки.

Экспериментальное исследование трения в системе платформа-льдина

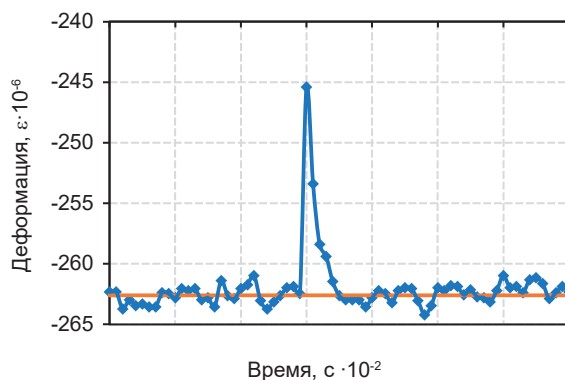


Рис. 8. Схема проведения эксперимента по динамическому нагружению бортового шпангоута (слева) и пример реакции датчика СМЛН на ударное воздействие (справа). Фото И. А. Свистунова, 2023 г.

Fig. 8. Scheme of the experiment on dynamic loading of the side frame (left), and an example of the ILMS sensor impact reaction (right). Photo by I. A. Svistunov, 2023



Рис. 9. Испытательный стенд для экспериментального исследования трения в парах обшивка-лед (слева) и лед-лед (справа). Фото И. А. Свистунова, 2023 г.

Fig. 9. Test bench for an experimental study of friction in plank-ice (left) and ice-ice (right) pairs. Photo by I. A. Svistunov, 2023

Для экспериментальной оценки статического и динамического коэффициентов трения в трущихся парах обшивка-лед и лед-лед использовался метод буксировки [13; 14], в соответствии с которым равномерно нагруженный фрагмент судовой обшивки или выпиленный ледяной куб буксируются по поверхности ледяного покрова. В процессе эксперимента фиксируется усилие натяжения троса и регистрируется скорость буксировки. Масса буксируемых объектов также должна быть известна. Тогда, исходя из простой силовой схемы [6], коэффициент трения определится как отношение буксировочного усилия к силе тяжести объекта.

Коэффициент статического трения вычисляется по замерам, полученным в начальный момент движения при страгивании образца с места, а коэффициент динамического трения — при равномерном установившемся скольжении образца по поверхности.

Для серийных испытаний в соответствии с указанной методикой в период дрейфа СП-41 вблизи платформы на льду был подготовлен испытательный стенд, представленный на рис. 9. С помощью регулируемой буксирной лебедки ледяной блок или груженная волокуша протаскиваются по ледяной трассе с заданной скоростью.

Трущаяся поверхность железной волокуши окрашивалась эпоксидной двухкомпонентной судовой краской (производства ООО «Jotun Paints»), имитируя таким образом наружную обшивку корпуса платформы. Скорость буксировки измерялась с помощью размеченного бруса, располагаемого вдоль трассы, и видеокамеры, закрепляемой на буксируемом объекте над шкалой. Буксировочное усилие регистрировалось с помощью динамометра, встраиваемого в схему буксирной линии. Индикатор динамометра и источник бесперебойного питания устанавливались на буксируемые объекты.

Состояние поверхности ледяной трассы в экспериментах также подвергалось изменениям: в трущихся парах исследовались заснеженная поверхность, поверхность фирна³, бесснежная ледяная поверхность, а также ледяная поверхность при наличии жидкостной прослойки. При исследовании коэффициента трения в паре лед-лед с водной прослойкой эксперимент выполнялся буксировкой снегоходом из-за высокой степени сцепления трущихся поверхностей льда, а также эффекта присасывания.

Предварительная оценка показала, что динамический коэффициент трения колеблется в диапазоне 0,02—0,08, а статический коэффициент трения может достигать 0,16. Коэффициент трения льда о лед при страгивании лежит в диапазоне 0,4—0,6. Итоговый анализ результатов может быть проведен после закрытия дрейфующей станции СП-41.

Выводы

В работе представлен краткий анализ физической картины взаимодействия ЛСП «Северный полюс» с ледяным полем при совместном дрейфе в условиях ледовых сжатий, полученный на базе натурных наблюдений, проведенных авторами в первый год работы дрейфующей станции «Северный полюс-41». Результаты наблюдений подтвердили справедливость основных выводов, полученных еще на стадии модельных испытаний платформы в ледовом опытовом бассейне АНИИ [11].

На основании натурных данных первого дрейфа платформы в СЛО при использовании имеющегося опыта физического моделирования и результатов аналитического исследования [11] формализована

³ Прослойка старого снега, рекристаллизовавшегося в плотную зернистую ледяную массу.

комплексная задача для СМЛН на решение проблемы ледовых сжатий, включающей как фундаментальные, так и научно-практические вопросы.

Приводятся обзор и описание выполненных в условиях дрейфа экспериментов, необходимых для реализации сформулированной концепции.

Описана схема проведения экспериментов по статическому нагружению корпуса, имитирующему действие ледовых сжатий при сосредоточенном усилии на бортовой шпангоут, оборудованный волоконно-оптическими датчиками СМЛН. Также описаны тесты по динамическому нагружению корпуса, имитирующему действие ударных ледовых нагрузок при локальном воздействии на тот же шпангоут. Эксперименты ориентированы на тестирование СМЛН, тарировку выбранных деформационных датчиков, а также на верификацию численной конечно-элементной модели корпуса ЛСП [5]. Описаны экспериментальные исследования внешнего трения льда в системе платформа-льдина в трущихся парах обшивка-лед и лед-лед.

После завершения работы дрейфующей станции «Северный полюс-41» в журнале «Арктика: экология и экономика» будут опубликованы результаты обработки экспериментальных данных, полученных на основании представленной экспедиционной деятельности авторов. В отдельной публикации будет рассмотрен вопрос, также напрямую связанный с проблемой определения нагрузок на корпус от ледовых сжатий, — исследование прочности морского льда «базовой» льдины по систематическим испытаниям образцов за годичный период дрейфа.

Литература/References

1. Опасные ледовые явления для судоходства в Арктике / Под ред. Е. У. Миронова. — СПб.: Изд. АНИИ, 2010. — 320 с.
Opasnye ledovye yavleniya dlya sudokhodstva v Arktike [Dangerous ice phenomena for shipping in the Arctic]. Ed. by E. U. Mironov. St. Petersburg, AARI, 2010, 320 p. (In Russian).
2. Осичанский П. Спасите нас на суше: уроки морских катастроф. — Владивосток, 2010. — 378 с.
Osichansky P. Spasite nas na sushe: uroki morskikh katastrof [Save us on land: lessons from marine disasters]. Vladivostok, 2010, 378 p. (In Russian).
3. Likhomanov V. A., Ugrumov Y. V., Savitskaya A. V., Patseva P. V., Krupina N. A., Chernov A. V., Svistunov I. A., Likhomanov V. A. North Pole ice-resistant self-propelled platform as an innovative complex for research in the Arctic. The First International Interdisciplinary Scientific and Practical Conference Man in the Arctic (IIRPCMIA 2021). E3S Web Conf. Vol. 378. [S. I.], 2023.
4. Угрюмов А. И., Коровин В. П. На льдине к Северному полюсу. История полярных дрейфующих станций. — СПб.: Гидрометеоздат, 2004. — 125 с.
Ugrumov A. I., Korovin V. P. Na l'dine k Severnomu polusu. Istoriya polyarnykh dreyfuyushchikh stantsii [On

an ice floe to the North Pole. History of polar drifting stations]. St. Petersburg, Gidrometeoizdat, 2004, 125 p. (In Russian).

5. Чернов А. В., Максимова П. В., Лихоманов В. А. и др. Методика формирования архитектуры системы мониторинга ледовых нагрузок для ледостойкой самоходной платформы // Проблемы Арктики и Антарктики. — 2020. — Т. 66, № 4. — С. 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), pp. 515—533. (In Russian).
6. Тарг С. М. Краткий курс теоретической механики. — М.: Физматгиз, 1958.
Targ S. M. Kratkii kurs teoreticheskoi mekhaniki [Short course in theoretical mechanics]. Moscow, Fizmatgiz, 1958. (In Russian).
7. Каштелян В. И. Исследования сопротивления сплошного льда движению судна методом модельных испытаний: Дис. ... канд. техн. наук / Ленингр. кораблестроит. ин-т. — Л., 1962. — 191 с.
Kashtelyan V. I. Issledovaniya soprotivleniya sploshnogo l'da dvizheniyu sudna metodom model'nykh ispytaniy [Study of the resistance of solid ice to the movement of a vessel using model tests]. Dis. ... kand. tekhn. nauk / Leningr. korablestroit. in-t. Leningrad, 1962, 191 p. (In Russian).
8. Феодосьев В. И. Сопротивление материалов: Учебник для вузов — 9-е изд., перераб. — М.: Наука, Гл. ред. физ.-мат. лит., 1986. — 512 с.
Feodos'yev V. I. Soprotivlenie materialov: Uchebnik dlya vtuzov [Strength of materials: Textbook for colleges]. 9th ed. Moscow, Nauka. Gl. red. fiz.-mat. lit., 1986, 512 p. (In Russian).
9. Семенов-Тянь-Шанский В. В. Статика и динамика корабля. Теория плавучести, остойчивости и спуска: Учебник для вузов: 2-е изд. — Л.: Судпромгиз, 1960. — 576 с.
Semenov-Tyan-Shanskii V. V. Statika i dinamika korablya. Teoriya plavuchesti, ostoichivosti i spuska [Ship statics and dynamics. Theory of buoyancy, stability and launching]. 2nd ed. Leningrad, Sudpromgiz, 1960, 576 p. (In Russian).
10. Ионов Б. П., Грамузов Е. М. Ледовая ходкость судов. — СПб.: Судостроение, 2001. — 512 с.
Ionov B. P., Gramuzov E. M. Ledovaya khodkost' sudov [Ice movement ships]. St. Petersburg, Sudostroyeniye, 2001, 512 p. (In Russian).
11. 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. — Т. 13, № 1. — С. 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 drift-

ing observatories. Arctic: Ecology and Economy, 2023, vol. 13, no. 1, pp. 85—96. DOI: 10.25283/2223-4594-2023-1-85-96. (In Russian).

12. Tryaskin V. N., Platonov V. V., Svistunov I. A. Development of requirements for ice loads on the hull of large-capacity berth-connected ships, Proc 31th Int Ocean Polar Eng Conf, Rhodes, Greece, ISOPE, 2021, pp. 817—822.

13. Рывлин А. Я. Экспериментальное изучение трения льда // Тр. ААНИИ. — 1973. — Т. 309. — С. 186—199. Rylvlin A. Ya. Eksperimental'noye izuchenie treniya l'da [Experimental study of ice friction]. Trudy AANII, 1973, vol. 309, pp. 186—199. (In Russian).

14. Калинина Н. В., Солдаткин О. Б. Теоретико-экспериментальные исследования влияния состояния ледяного покрова на ходкость судов в условиях продленной навигации // Вестн. Волж. гос. акад. вод. транспорта. — 2019. — Вып. 60. — С. 52—61.

Kalinina N. V., Soldatkin O. B. Teoretiko-eksperimental'nye issledovaniya vliyaniya sostoyaniya ledyanogo pokrova na khodkost' sudov v usloviyakh prodlennoi navigatsii [Theoretical and experimental studies of the influence of the state of the ice cover on the speed of ships under conditions of extended navigation]. Vestnik Volzhskoi gosudarstvennoi akademii vodnogo transporta, 2019, iss. 60, pp. 52—61. (In Russian).

15. Тимофеев О. Я. Прогнозирование показателей надежности конструкций ледового пояса: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.08.03 / СПбГМТУ — СПб., 2002. — 43 с.

Timofeev O. Ya. Prognozirovaniye pokazatelei nadezhnosti konstruksii ledovogo poyasa [Forecasting reliability indicators of ice belt structures]. Abstract of thesis ... Doctor of Technical Sciences: 05.08.03 / SPbGMTU. St. Petersburg, 2002, 43 p. (In Russian).

Информация об авторах

Свистунов Иван Андреевич, кандидат технических наук, руководитель группы исследований ледовых качеств судов в составе дрейфующей станции «Северный полюс-41» на базе ЛСП «Северный полюс» (Северный Ледовитый океан), e-mail: olks-lsp@aari.ru.

Фильчук Кирилл Валерьевич, кандидат физико-математических наук, начальник дрейфующей станции «Северный полюс-41» на базе ЛСП «Северный полюс» (Северный Ледовитый океан), e-mail: leader-lsp@aari.ru.

Бакланов Алексей Викторович, заместитель начальника дрейфующей станции «Северный полюс-41» на базе ЛСП «Северный полюс» (Северный Ледовитый океан), e-mail: zam-lsp@aari.ru.

Раев Дмитрий Леонидович, ведущий специалист группы геофизических исследований в составе дрейфующей станции «Северный полюс-41» на базе ЛСП «Северный полюс» (Северный Ледовитый океан), e-mail: geo-lsp@aari.ru.

Стрибный Олег Юрьевич, руководитель группы геофизических исследований в составе дрейфующей станции «Северный полюс-41» на базе ЛСП «Северный полюс» (Северный Ледовитый океан), e-mail: geo-lsp@aari.ru.

Гаврилов Юрий Георгиевич, ведущий специалист-ледоисследователь в составе дрейфующей станции «Северный полюс-41» на базе ЛСП «Северный полюс» (Северный Ледовитый океан), e-mail: ice-lsp@aari.ru.

MACROSCALE EXPERIMENTAL STUDIES OF ICE NIPPING IN THE ARCTIC OCEAN DURING THE FIRST DRIFT OF THE ICE-RESISTANT SELF-PROPELLED PLATFORM “NORTH POLE” AS PART OF THE POLAR DRIFTING STATION “NORTH POLE-41” IN 2022—2023

Svistunov, I. A., Filchuk, K. V., Baklanov, A. V., Raev, D. L., Stribny, O. Yu., Gavrilov, Yu. G.

Federal State Budgetary Institution “Arctic and Antarctic Research Institute” (St. Petersburg, Russian Federation)

The article was received on March 25, 2024

For citing

Svistunov I. A., Filchuk K. V., Baklanov A. V., Raev D. L., Stribny O. Yu., Gavrilov Yu. G. Macroscale experimental studies of ice compression in the Arctic Ocean during the first drift of the ice-resistant self-propelled platform “North Pole” as part of the polar drifting station “North Pole-41” in 2022—2023. *Arctic: Ecology and Economy*, 2024, vol. 14, no. 2, pp. 274—285. DOI: 10.25283/2223-4594-2024-2-274-285. (In Russian).

Abstract

The nipping problem is of scientific and practical interest from the perspective of the strategy for the development of ice shipbuilding and shipping in Russian Arctic, and is fundamental in studying the very nature of the phenomenon. It is possible to solve the tasks within the framework of the problem only by the contact research method during a long stay of a specialized vessel in drifting ice. The review article presents descriptions of the experimental and analytical studies carried out on the issue during the first year of operation of the drifting station “North Pole-41”, organized on the ice-resistant self-propelled platform “North Pole”.

Keywords: *drifting polar station “North Pole-41”; ice-resistant self-propelled platform “North Pole”; ice nipping, ice loads, full-scale experiment.*

Information about the authors

Svistunov, Ivan Andreevich, PhD of Engineering Science, Head of the research group for the ice performance of ships as part of the drifting station “North Pole-41” based on the platform “North Pole” (Arctic Ocean), e-mail: olks-lsp@aari.ru.

Filchuk, Kirill Valerievich, PhD of Physical and Mathematical Sciences, Head of the drifting station “North Pole-41” based on the platform “North Pole” (Arctic Ocean), e-mail: leader-lsp@aari.ru.

Baklanov, Alexey Viktorovich, Deputy Head of the drifting station “North Pole-41” based on the platform “North Pole” (Arctic Ocean), e-mail: zam-lsp@aari.ru.

Raev, Dmitry Leonidovich, Leading Specialist of the geophysical research group as part of the drifting station “North Pole-41” based on the platform “North Pole” (Arctic Ocean), e-mail: geo-lsp@aari.ru.

Stribny, Oleg Yurievich, Head of the geophysical research group as part of the drifting station “North Pole-41” based on the platform “North Pole” (Arctic Ocean), e-mail: geo-lsp@aari.ru.

Gavrilov, Yuri Georgievich, Leading Specialist of the ice research group as part of the drifting station “North Pole-41” based on the platform “North Pole” (Arctic Ocean), e-mail: ice-lsp@aari.ru.

© Svistunov I. A., Filchuk K. V., Baklanov A. V., Raev D. L., Stribny O. Yu., Gavrilov Yu. G., 2024