

ПРИКЛАДНЫЕ ПРОБЛЕМЫ

<https://doi.org/10.30758/0555-2648-2020-66-4-515-533>
УДК 629.564.7: 629.5.015.4



ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

ORIGINAL ARTICLE

МЕТОДИКА ФОРМИРОВАНИЯ АРХИТЕКТУРЫ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА ЛЕДОВЫХ НАГРУЗОК ДЛЯ ЛЕДОСТОЙКОЙ САМОДВИЖУЩЕЙСЯ ПЛАТФОРМЫ

А.В. ЧЕРНОВ*, П.В. МАКСИМОВА, В.А. ЛИХОМАНОВ,
И.А. СВИСТУНОВ, Н.А. КРУПИНА, А.В. САВИЦКАЯ

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

*chernov@aari.ru

Резюме

В статье описывается разработка технических требований к системе мониторинга ледовых нагрузок для ледостойкой самодвижущейся платформы (ЛСП) «Северный полюс», выполненная в отделе ледовых качеств судов ААНИИ. Процесс разработки технических требований включал в себя анализ эксплуатационных ледовых условий ЛСП, определение сценариев взаимодействия льда с корпусом ЛСП, постановку задач для системы мониторинга ледовых нагрузок (СМЛН), разработку архитектуры СМЛН, конечно-элементный анализ напряженно-деформированного состояния корпуса ЛСП, а также разработку требований к размещению датчиков на конструкциях корпуса ЛСП. Основной целью работы является создание комплексной системы исследования процессов воздействия льда на сооружения для получения новых данных по параметрам и характеру действия ледовых нагрузок.

Ключевые слова: конечно-элементное моделирование, ледовые нагрузки, ледовые условия, ледостойкая платформа, система мониторинга.

Для цитирования: 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. Т. 66. №. 4. С. 515–533. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2020-66-4-515-533>.

Поступила 28.08.2020

После переработки 22.10.2020

Принята 24.10.2020

METHODOLOGY FOR DEVELOPING THE CONFIGURATION OF AN ICE LOAD MONITORING SYSTEM FOR AN ICE- RESISTANT SELF-PROPELLED DRIFTING PLATFORM

ALEKSEY V. CHERNOV*, POLINA V. MAKSIMOVA, VLADIMIR A. LIKHOMANOV,
IVAN A. SVISTUNOV, NINA A. KRUPINA, ANNA V. SAVITSKAYA

Summary

The ice-resistant self-propelled platform (IRSP) named North Pole that is currently under construction at the JSC Admiralty Shipyards is designed to carry out year-round scientific research in the Arctic Ocean. The IRSP will be equipped with a unique ice loads monitoring system (ILMS). The technical requirements for the ILMS were developed in the Department of Ship Performance in Ice of the AARI. The ILMS should ensure a safe operation of the IRSP in ice conditions (operational function) and serve as a measuring tool for researching of the mechanics of deformation and destruction of ice (scientific function). Analysis of ice conditions at different stages of IRSP operation showed that the main scenario of ice interaction with the IRSP hull will be the action of ice under compression on the middle part of the hull during drift.

The monitoring of the stress-strain state of the hull is carried out by a complex system of fiber-optic strain sensors placed on different elements of the hull structures. The largest number of sensors are located on the side plating in the middle part of the IRSP hull. The locations of the sensors were determined by finite element analysis of the stress-strain state of the IRSP hull under the action of ice load. To monitor the stress-strain state of the surrounding ice field, up to 16 pressure sensors frozen into the ice are provided. Also, the system receives and stores data on the angles of roll, trim, yaw of IRSP, its longitudinal, lateral and vertical accelerations, and the surrounding hydrometeorological conditions: wind speed and direction, air temperature, atmospheric pressure, and the geographical position of the platform.

ILMS will significantly improve the safety of IRSP operation during prolonged drift in ice conditions. Besides, the ILMS provides the platform hull with the functions of a measuring tool for studying the mechanics of deformation and destruction of sea ice in interaction with the engineering structures.

The main purpose of this work is to create a comprehensive system for studying the processes of ice impact on structures in order to obtain new data about the parameters and nature of ice loads.

Keywords: finite element method, ice conditions, ice loads, ice-resistant platform, monitoring system.

For Citation: 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. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Arctic and Antarctic Research. 2020, 66 (4): 515–533. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2020-66-4-515-533>.

Received 28.08.2020

Revised 22.10.2020

Accepted 24.10.2020

ВВЕДЕНИЕ

Строющаяся в настоящее время на АО «Адмиралтейские верфи» ледостойкая самодвижущаяся платформа (ЛСП) «Северный полюс» предназначена для осуществления круглогодичных комплексных научных исследований в высоких широтах Северного Ледовитого океана. ЛСП должна заменить классические дрейфующие научно-исследовательские станции «Северный полюс», круглогодичная работа которых стала затруднительной из-за отсутствия дрейфующих ледяных полей, пригодных для размещения станций [1]. Использование ЛСП позволит решать научные задачи в арктическом секторе, обеспечивая при этом безопасные и комфортные условия для членов экспедиции. При этом задачи будут выполняться как в период дрейфа во льдах, так и во время переходов к месту начала дрейфа и от точки окончания дрейфа к пункту базирования, поскольку платформа будет оснащена собственным двигателем, а форма корпуса — иметь обводы, близкие к судовым.

Система мониторинга ледовых нагрузок (СМЛН) — комплексная система, осуществляющая непрерывный контроль с помощью инструментальных методов напряженно-деформированного состояния объекта, эксплуатирующегося в ледовых условиях. СМЛН состоит из аппаратной части, основная задача которой — измерение физических величин, и программной части, которая предназначена для обработки сигналов. В случае превышения установленных пороговых значений сигналов осуществляется сигнализация оператору СМЛН. В настоящее время практически все инженерные сооружения и суда, предназначенные для эксплуатации в ледовых условиях, оборудуются системами мониторинга ледовых нагрузок, которые служат для оповещения экипажа о возможном возникновении внештатных или опасных ситуаций при взаимодействии объекта со льдом, снижая тем самым риск неблагоприятного исхода такого события [2]. Применительно к ЛСП система мониторинга ледовых нагрузок будет иметь ряд особенностей, в силу специфики назначения ЛСП и режима ее эксплуатации.

Основной целью работы является создание комплексной системы исследования процессов воздействия льда на сооружения для получения новых данных по параметрам и характеру действия ледовых нагрузок.

ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И УСЛОВИЯ ЭКСПЛУАТАЦИИ ЛСП

Общее описание ЛСП

Ледостойкая самодвижущаяся платформа «Северный полюс» предназначена для выполнения функций дрейфующей исследовательской станции в условиях длительного, продолжительностью до двух лет, дрейфа вместе с окружающим ее ледяным массивом. В состав научного комплекса ЛСП включено 16 различных лабораторий, в том числе и лаборатория мониторинга ледовых нагрузок, которая входит в состав ледоисследовательского научного комплекса [1]. ЛСП представляет собой самоходное водоизмещающее стальное судно (рис. 1). Прочность корпуса по бортам



Рис. 1. Общий вид ЛСП

Fig. 1. General view of the IRSPP

и днищу соответствует классу Arc8, что позволяет выдерживать сжатия многолетних льдов. ЛСП будет иметь следующие главные размерения: длина наибольшая / по КВЛ — 83,1 / 76,7 м, ширина наибольшая / по КВЛ — 22,5 / 21,8 м, высота борта на миделе — 11,4 м, осадка по КВЛ / минимальная — 8,6 / 7,5 м. Максимальное водоизмещение ЛСП составит около 10400 т. При мощности ГЭУ 4200 кВт скорость хода на тихой глубокой воде составит не менее 10 узлов.

Цикл использования ЛСП

Предполагаемый цикл использования ЛСП состоит из нескольких этапов:

- переход из пункта базирования к месту дрейфа с выполнением комплексных исследований на ходу и в дрейфе ЛСП (около 20 суток);
- дрейф во льдах с выполнением полного комплекса исследований с ЛСП и ледовых площадок (около 730 суток);
- переход от места окончания дрейфа в пункт базирования с выполнением комплексных исследований на ходу и в дрейфе ЛСП (около 20 суток).

Таким образом, доля времени, проведенного ЛСП в дрейфе в предполагаемом цикле, превысит 95 %. Поэтому приоритетной задачей для СМЛН является контроль ледовых нагрузок в период нахождения платформы в дрейфе.

Ледовые условия на различных этапах эксплуатации ЛСП

Предполагается, что ЛСП будет начинать свой дрейф в восточном секторе Арктики так же, как и традиционные дрейфующие станции «Северный полюс». Таким образом, маршрут к точке начала дрейфа будет проходить с запада на восток, пересекая моря российского сектора Арктики.

Ледовые условия на переходе

Обобщение среднесезонных данных об условиях плавания на трассах Северного морского пути (СМП) в летне-осенний период показывает, что с июля по сентябрь плавание осуществляется преимущественно в легких ледовых условиях [4–9].

Доля пути по чистой воде и в разреженных льдах составляет 68 % в июле, 87 % в августе и 90 % в сентябре. Минимальная протяженность сплошных льдов на трассах наблюдается в августе и сентябре — менее 10 %. Соответственно, именно эти месяцы являются наиболее благоприятными для следования ЛСП к месту начала дрейфа. Протяженность пути в сплошных льдах в августе–сентябре будет составлять около 300 миль. Несмотря на относительно небольшие толщины остаточного сплошного льда в летне-осенний период, ударные нагрузки на ЛСП, в первую очередь на носовую оконечность, могут вызываться взаимодействием с ледяными образованиями толщиной до 3 м, представляющими собой остатки всторошенного или наслоенного льда. При этом необходимо принимать во внимание, что скорость движения ЛСП не будет превышать 10 узлов даже при максимальной мощности на валах, а лед в этот период находится в стадии разрушения и будет иметь низкую прочность.

Таким образом, уровень ударных ледовых нагрузок на оконечности ЛСП будет относительно невысоким.

Ледовые условия в дрейфе

Традиционно высадка на лед дрейфующих станций «Северный полюс» происходила в сентябре в восточном секторе Арктики. На каждой из станций в период дрейфа выполнялись регулярные прямые измерения толщины льда. Поскольку ЛСП будет начинать свой дрейф в тех же районах, что и традиционные станции, для оценки

ледовых условий эксплуатации ЛСП был проведен анализ данных о состоянии льда со станций «Северный полюс», работавших в 2004–2015 гг. В момент начала дрейфа (сентябрь–октябрь) толщины льда преимущественно составляли более 150–200 см. Максимальные толщины льда достигаются в весенний период и в большинстве измерений превышают 2–2,5 м. При этом прочность льда в это время существенно снижается под воздействием солнечной радиации и повышения температуры воздуха. Таким образом, ЛСП во время дрейфа может находиться под действием нагрузок от сжатий льда различной прочности толщиной до 3 метров.

Сценарии дрейфа ЛСП

Моделью использования ледостойкой самодвижущейся платформы «Северный полюс» предполагается три варианта дрейфа:

- дрейф платформы, ошвартованной к ледяному полю (рис. 2);
- дрейф платформы в разводе между ледяными полями (рис. 3);
- дрейф платформы, заведенной по ледяному полю с помощью ледокола или самостоятельно (рис. 4).

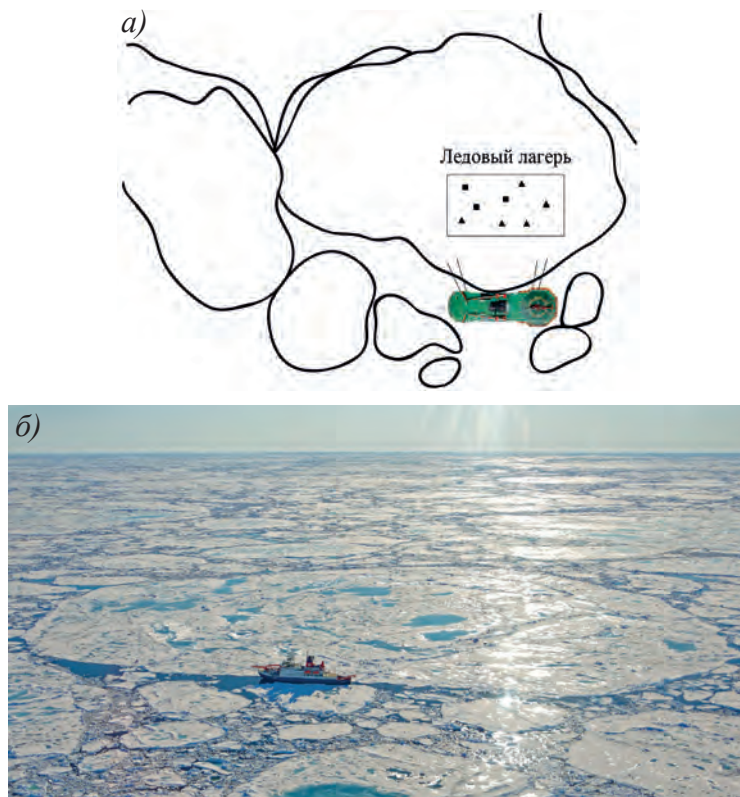


Рис. 2. Дрейф платформы, ошвартованной к ледяному полю: а) — схема дрейфа платформы, ошвартованной к ледяному полю; б) — дрейф ледокола “Polarstern”, ошвартованного к ледяному полю, в экспедиции MOSAiC в 2020 г. (Фото: MelindaWebster, MarkusRex)

Fig. 2. The drift of the platform moored to the ice field: а) — the drift diagram of the platform moored to the ice field; б) — the drift of the icebreaker “Polarstern” moored to the ice field in the MOSAiC expedition in 2020. (Photo: Melinda Webster, MarkusRex)

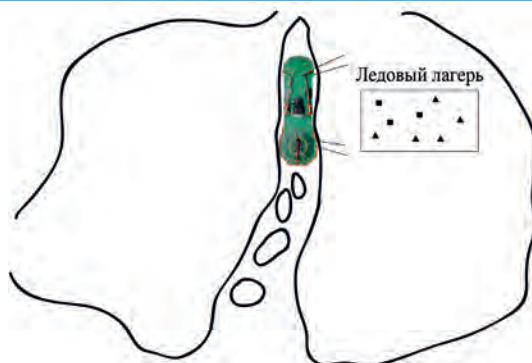


Рис. 3. Схема дрейфа платформы в разводе между ледяными полями

Fig. 3. Diagram of the platform drift in the gap between the ice fields

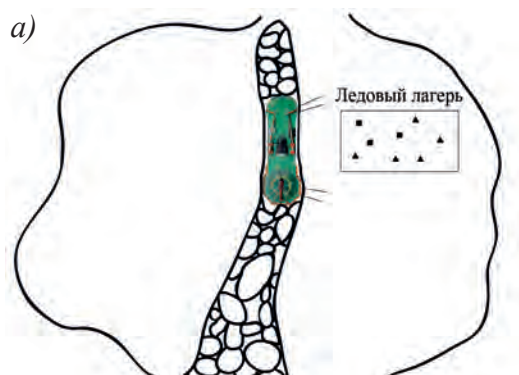


Рис. 4. Дрейф платформы, заведенной по ледяному полю с помощью ледокола или самостоятельно: а) — схема дрейфа платформы; б) — дрейф научно-экспедиционного судна «Академик Трёшников», самостоятельно зашедшего в ледяное поле, в экспедиции «Трансарктика-2019»

Fig. 4. The drift of the platform started on the ice field with the help of an icebreaker or independently: а) — diagram of the drift ; б) — the drift of the scientific research vessel “Akademik Tryoshnikov”, which independently entered the ice field, in the expedition “Transarktika-2019”

В течение двухгодичного дрейфа ЛСП возможны неоднократные изменения вариантов дрейфа в зависимости от фактических гидрометеорологических условий и ледовой обстановки. Во всех трех вариантах корпус ЛСП может подвергаться как ударным нагрузкам со стороны льда в момент постановки в ледяное поле, так и сжатиям во время длительного дрейфа [3].

Сценарии воздействия ледовой нагрузки на корпус ЛСП

Таким образом, предполагается три основных сценария воздействия ледовых нагрузок на корпус ЛСП:

- ударные нагрузки на носовую и кормовую оконечность при движении в ледовых условиях;
- ударные нагрузки на носовую и кормовую оконечность при постановке в дрейф;
- нагрузки от сжатий на среднюю часть корпуса во время дрейфа.

Во всех сценариях возможно взаимодействие корпуса ЛСП со льдом, толщина которого достигает 3 метров. Исходя из анализа ледовых условий на различных этапах эксплуатации ЛСП, а также прочности корпуса, следует полагать, что ледовые нагрузки, возникающие при движении ЛСП, представляют значительно меньшую опасность по сравнению с нагрузками, возникающими при длительном дрейфе.

Для оценки влияния ледовых сжатий на корпус ЛСП в ледовом бассейне ААНИИ были проведены модельные испытания, в ходе которых была выполнена экспериментальная оценка величины давления от ледовых сжатий на участке борта модели. При проведении экспериментов было зафиксировано распространение навалов льда, возникающих у борта ЛСП при сжатиях, по высоте борта вплоть до днища, а также по днищу на всю ширину корпуса. По результатам модельных испытаний были определены районы, которые требуется оборудовать для осуществления мониторинга с помощью СМЛН во время дрейфа ЛСП [10, 11].

ПРЕДПОСЫЛКИ РАЗРАБОТКИ СМЛН

Функции системы мониторинга ледовых нагрузок ЛСП

Как было сказано выше, СМЛН должна являться:

- системой обеспечения безопасной эксплуатации ЛСП в ледовых условиях (оперативная функция СМЛН);
- измерительным инструментом для изучения механики деформации и разрушения льдов при взаимодействии с инженерными сооружениями и природными объектами (научная функция СМЛН).

Обеспечение безопасной эксплуатации ЛСП в ледовых условиях

Оперативная функция СМЛН является достаточно традиционной и включает в себя:

- инструментальную оценку уровня напряженно-деформированного состояния (НДС) корпуса ЛСП;
- обеспечение судоводителя информацией в режиме реального времени о состоянии корпуса ЛСП при движении во льдах и во время дрейфа;
- сопоставление фактического уровня НДС с установленными пороговыми значениями;
- выдачу предупреждения в случае, если показания какой-либо подсистемы приближаются к пороговым значениям.

Следует отметить, что архитектурно-конструктивный тип и соотношение главных размерений ЛСП таковы, что общая прочность корпуса ЛСП будет заведомо обеспечена. В связи с этим функция контроля общей прочности корпуса ЛСП была исключена при разработке СМЛН.

Система мониторинга ледовых нагрузок как элемент научного комплекса ЛСП

Точная формулировка стоящих перед системой мониторинга научных задач позволяет выработать особые требования к ее архитектуре, размещению датчиков, их характеристикам и так далее.

Важнейшими направлениями исследований будут изучение локального ледового воздействия на корпус ЛСП, а также совместные исследования ледовых нагрузок на бортовые перекрытия и напряженно-деформированного состояния прилегающего ледяного покрова.

Наибольший интерес представляют процессы взаимодействия корпуса ЛСП со льдом, возникающие во время дрейфа при ледовых сжатиях. Актуальной проблемой являются натурные измерения давления на корпус, в частности оценка неравномерности ледовых давлений, оценка зависимости давления от характеристик льда и параметров пятна контакта, оценка соотношения пикового и среднего давлений. Например, в обзоре [15], основываясь на результатах обработки данных натурных наблюдений [14] и [16], делается вывод, что нагрузки убывают по мере увеличения длины зоны контакта конструкции со льдом, а отношение средней нагрузки к локальной снижается пропорционально $l_c^{-0.4}$, где l_c — длина пятна контакта.

Использование СМЛН позволит изучать процессы распространения разрушающегося льда по корпусу ЛСП, в частности образование подсовов у борта и распространение льда под днище, а также выполнять измерения оказываемой этим льдом нагрузки. Выполнение таких исследований ранее не представлялось возможным, так как системы мониторинга, устанавливаемые на судах, не предназначены для измерения нагрузок в условиях ледовых сжатий.

Другим важным направлением являются совместные исследования напряженно-деформированного состояния прилегающего ледяного покрова и нагрузок на бортовые перекрытия ЛСП как часть фундаментальных исследований механики деформирования и разрушения морских льдов. Инструментальное измерение возникающих на корпусе ЛСП усилий позволит дополнить информацию о напряженно-деформированном состоянии ледяного покрова, получаемую путем измерения усилий и перемещений льда. В частности, информация о формах разрушения, периодическом характере и сопровождающих разрушение льда процессах [17] будет дополняться данными об интегральных характеристиках усилий, действующих в ледяном покрове.

Наконец, важным направлением будет являться верификация существующих методов расчета напряженно-деформированного состояния корпуса при действии ледовой нагрузки. Так, для оценки соотношения напряжений в различных точках бортового набора ряд шпангоутов должен быть оснащен несколькими датчиками, расположенными в наиболее характерных точках. Результатом исследований могут быть соотношения напряжений, полученные в результате расчетов, а также зарегистрированные в натурных условиях.

Апробация технологии мониторинга ледовых нагрузок в условиях дрейфа

Апробация технологии мониторинга ледовых нагрузок в условиях дрейфа была проведена весной 2019 г. в ходе экспедиции «Трансарктика-2019» на НЭС «Академик Трёшников» [12]. В качестве основного измерительного инструмента использовалась штатная СМЛН НЭС «Академик Трёшников», а также дополнительно установленные тензометрические датчики на борту судна для оценки ледовых сжатий. В частности, были отработаны следующие вопросы:

- предполагаемый уровень напряжений, возникающий в результате сжатий;
- объем необходимых измерений на прилегающем льду;
- методика выбора мест установки датчиков;
- необходимые типы датчиков.

Вся полученная информация об особенностях проведения мониторинга была учтена при проектировании СМЛН ЛСП.

АРХИТЕКТУРА СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА ЛЕДОВЫХ НАГРУЗОК ЛСП

На основании изложенных выше соображений была разработана архитектура СМЛН (рис. 5). Для решения поставленных задач в состав СМЛН включены следующие подсистемы:

- подсистема контроля напряженно-деформированного состояния корпуса;
- подсистема контроля параметров перемещений;
- подсистема оценки параметров напряженно-деформированного состояния прилегающего к ЛСП льда;
- подсистема контроля метеорологической обстановки;
- подсистема определения координат ЛСП;
- подсистема сбора и обработки данных.

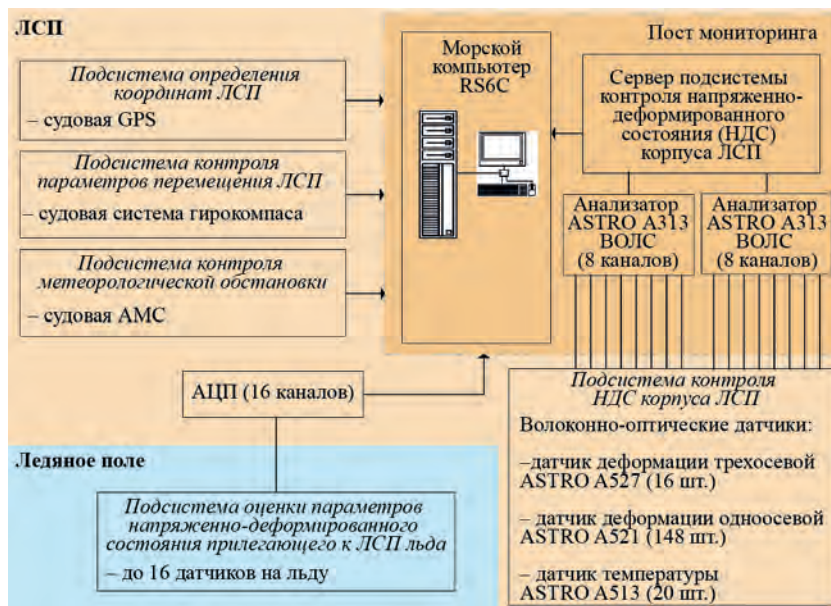


Рис. 5. Архитектура системы мониторинга ледовых нагрузок ЛСП

Fig. 5. Configuration of the IRSPP ice load monitoring system

Подсистема контроля напряженно-деформированного состояния корпуса

Подсистема контроля напряженно-деформированного состояния корпуса является основной подсистемой СМЛН и необходима для измерения параметров напряженно-деформированного состояния корпуса ЛСП при действии ледовых нагрузок в различных режимах эксплуатации. Измерения будут выполняться с использованием разветвленной системы датчиков деформации, размещенных на элементах корпусных конструкций. Основным видом ледовой нагрузки в этом режиме будут являться ледовые сжатия, вызванные различными природными факторами. Исходя из этого, наибольшее количество датчиков, которые являются основным измерительным элементом СМЛН, расположено таким образом, чтобы контролировать ледовые нагрузки и прочность корпусных конструкций бортовых перекрытий в средней части корпуса ЛСП, при этом в носовой части ЛСП размещено ограниченное количество датчиков. Также, в связи с существенным изменением осадки ЛСП во время дрейфа, датчики должны перекрывать диапазон возможных осадок. Для этого они должны быть расположены в виде двух горизонтальных линий, которые соответствуют максимальной и минимальной осадкам. Часть датчиков расположена на днище из-за возможного распространения льда при сжатии под корпус ЛСП.

В качестве измерительных элементов подсистемы напряженно-деформированного состояния корпуса были выбраны волоконно-оптические датчики, которые имеют ряд преимуществ перед электрическими, используемыми, например, в СМЛН НЭС «Академик Трёшников». Волоконно-оптические датчики обладают абсолютной невосприимчивостью к электромагнитным помехам, устойчивостью к сложным климатическим условиям и агрессивным химическим средам, абсолютной пожаро-, электро- и взрывобезопасностью [13]. Волоконно-оптические датчики имеют малое время отклика, малую тепловую инерционность, высокое разрешение и меньшую погрешность по сравнению с электрическими тензодатчиками.

В состав подсистемы напряженно-деформированного состояния корпуса включены следующие датчики компании ООО «Инверсия-Сенсор» (Пермь, Россия):

- одноосевой волоконно-оптический датчик деформации ASTRO A521;
- трехосевой волоконно-оптический датчик деформации ASTRO A527;
- волоконно-оптический датчик температуры ASTRO A513.

Волоконно-оптический датчик деформации ASTRO A521 является одним из ключевых элементов данной подсистемы. Датчик предназначен для измерения деформаций конструктивного элемента в единственном направлении. В связи с этим точки расположения датчиков этого типа выбираются таким образом, чтобы в них возникало напряжение, близкое к одноосевому. Таким условиям соответствуют деформации свободных поясков холостых шпангоутов, возникающие под действием ледовой нагрузки.

Волоконно-оптический датчик деформации ASTRO A527 позволяет производить измерения деформации одновременно по трем осям и определять полный тензор деформаций при плоском НДС элемента конструкции. Датчики такого типа целесообразно размещать на наружной обшивке корпуса, в районах, подверженных ледовой нагрузке.

Волоконно-оптический датчик температуры ASTRO A513 предназначен для измерения температуры элементов конструкции ЛСП. Второе назначение датчиков этого типа — обеспечение температурной компенсации показаний датчиков деформации.

Сигналы, регистрируемые подсистемой контроля напряженно-деформированного состояния корпуса, поступают на 8-канальный анализатор ASTRO A313, предназначенный для измерений длины волны отраженного от волоконно-оптических датчиков оптического излучения и формирования спектральных данных о состоянии датчиков. На каждый канал может быть подключено до 25 измерительных элементов.

Подсистема оценки напряженно-деформированного состояния окружающего льда

Подсистема оценки НДС окружающего льда необходима для исследований процессов взаимодействия ледяного поля с корпусом ЛСП. Данная подсистема является дополнительной и будет подключаться к СМЛН только во время дрейфа ЛСП. Для сбора данных подсистемы будет использоваться 16-канальный аналого-цифровой преобразователь (АЦП), с частотой опроса каждого канала не менее 100 Гц. Оцифрованный сигнал будет передаваться на сервер СМЛН для записи в единую базу данных. На начальном этапе эксплуатации ЛСП в составе данной подсистемы в качестве измерительных элементов предусматривается использование 6 датчиков давления мембранного типа. Данные датчики предназначены для вмораживания в ледяной покров на удалении от ЛСП не менее 100 метров. Мембранный корпус обеспечивает измерение давлений, возникающих в ледяном покрове величиной до 5 МПа. Измерительным элементом является датчик давления APZ 3420, производства ООО «Пьезус» (Россия). Следует отметить, что количество каналов АЦП обеспечивает расширение измерительных возможностей подсистемы в будущем, на основе опыта реальной эксплуатации ЛСП.

Решение о схеме размещения датчиков будет приниматься исходя из фактического выбранного варианта дрейфа, а также морфометрических особенностей льдины, вместе с которой дрейф будет происходить. Также предполагается, что при швартовке ЛСП к льдине будет учитываться, что большинство датчиков размещены на правом борту.

Подсистема контроля параметров перемещений корпуса ЛСП как твердого тела

Подсистема контроля параметров перемещений корпуса ЛСП как твердого тела получает от общесудовой системы гирокомпаса данные об углах крена, дифферента, рыскания, продольном, поперечном и вертикальном ускорениях корпуса ЛСП во время качки и при различных ледовых воздействиях.

Подсистема контроля метеорологической обстановки

Подсистема контроля метеорологической получает данные о скорости и направлении ветра, температуре окружающей среды, атмосферном давлении от общесудовой системы автоматической метеорологической станции.

Подсистема определения координат ЛСП

Подсистема определения координат ЛСП принимает данные о географических координатах ЛСП и параметрах ее движения от общесудовой навигационной системы.

Подсистема сбора, обработки и анализа данных

Данные, получаемые со всех измерительных подсистем СМЛН, передаются в подсистему сбора, хранения и обработки данных. Запись осуществляется с частотой 100 Гц в виде единой базы данных, при этом емкость хранилища будет позволять осуществлять хранение информации в течение 1 года непрерывной записи.

Разработку программного обеспечения, включая интеграцию данных всех описанных выше подсистем, выполняла компания НТИ (Санкт-Петербург, Россия) на основании технических требований, разработанных отделом ледовых качеств судов ААНИИ.

Программное обеспечение позволяет:

- отображать в реальном времени текущие параметры всех подсистем;
- сохранять данные, полученные от подсистем в виде единой базы данных;
- отображать на экране сохраненные данные из архива на выбранном пользователем интервале;
- выдавать предупреждения судоводителю о превышении показаниями какого-либо датчика заранее установленного уровня;
- осуществлять настройку параметров системы.

Конечно-элементный анализ напряженно-деформированного состояния корпусных конструкций ЛСП

Корпус ЛСП выполнен по поперечной системе набора со шпацией 700 мм в средней части и 600 мм в оконечностях. Помимо основных, корпус подкреплен ледовыми шпангоутами, установленными с половинной шпацией. Рамные шпангоуты установлены со шпацией 2100 мм. Рамные бортовые стрингеры размещены по одному между палубами и платформами. Расстояние по вертикали между продольными горизонтальными рамными связями составляет около 1700 мм. Рамные шпангоуты и бортовые стрингеры выполнены в виде листовых конструкций, распространяющихся между наружной обшивкой и внутренним бортом.

Для определения точек установки датчиков был выполнен конечно-элементный анализ элементов конструкции корпуса ЛСП.

Поскольку конструкция корпуса практически постоянна на большей части корпуса, конечно-элементная модель выполнена для одного из отсеков в средней части корпуса ЛСП, между главными поперечными переборками по длине, и между основной плоскостью и верхней палубой по высоте борта (рис. 6).

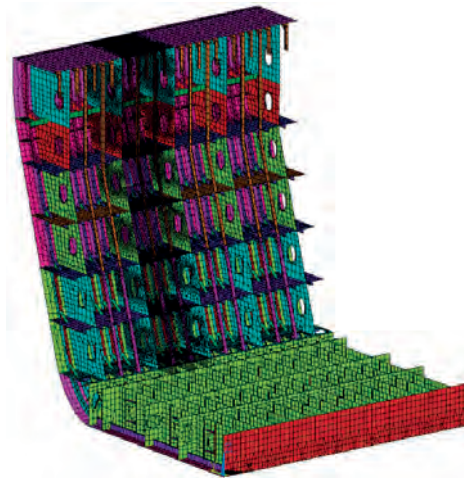


Рис. 6. Вид расчетной конечно-элементной модели

Fig. 6. Example of a finite element design model

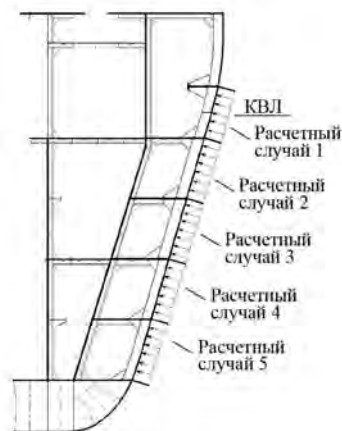


Рис. 7. Схема расчетных случаев

Fig. 7. Scheme of design cases

При разработке конечно-элементной модели использованы четырехузловые пластинчатые конечные элементы, допускающие проведение расчетов в области упругого деформирования с учетом больших перемещений. При разбиении твердотельной модели на конечные элементы шаг сетки был задан равным 175 мм (1/4 от шпации поперечного набора), а в районе приложения нагрузки шаг сетки был уменьшен в два раза и был принят равным 87 мм. Граничные условия, наложенные на модель, соответствуют жесткому закреплению на границах с соседними отсеками и с вышележащими частями ЛСП. На узлы, лежащие в диаметральной плоскости (ДП), наложены условия, соответствующие симметричному деформированию относительно ДП. Используемые граничные условия обеспечивают адекватное моделирование НДС. В качестве расчетной нагрузки было применено единичное давление, равномерно распределенное по наружной обшивке. Длина пятна контакта соответствовала одной рамной шпации. Высота пятна контакта соответствовала расстоянию между продольными бортовыми рамными связями, что привело к появлению пяти расчетных случаев (рис. 7). Расчеты выполнены в статической постановке, что соответствует представлениям о ледовых нагрузках при сжатиях.

Результаты расчетов показывают, что во всех рассмотренных случаях напряжения в бортовом наборе превышают напряжения в наружной обшивке. Отсюда можно сделать вывод, что чувствительность датчиков, размещенных на поясках холостого набора, будет выше, чем у датчиков, размещенных на наружной обшивке.

В 1-м расчетном случае максимальные эквивалентные напряжения возникают на полке холостого шпангоута, примерно посередине пролета (рис. 8).

Во 2-м, 3-м и 4-м расчетных случаях максимальные эквивалентные напряжения возникают в стенках бимсов платформ и ребер жесткости бортового стрингера, в районах их крепления к кницам холостых шпангоутов. В 5-м расчетном случае максимальные эквивалентные напряжения возникают в кницах холостых шпангоутов в районе их крепления к настилу второго дна.

Следует отметить, что изменения напряжений на свободном пояске шпангоута носят плавный характер (см. рис. 8). В связи с этим возможные небольшие ошибки в координатах при монтаже датчика деформации не приведут к значимой погрешности измерений. В отличие от свободного пояска шпангоутов, максимальные напряжения

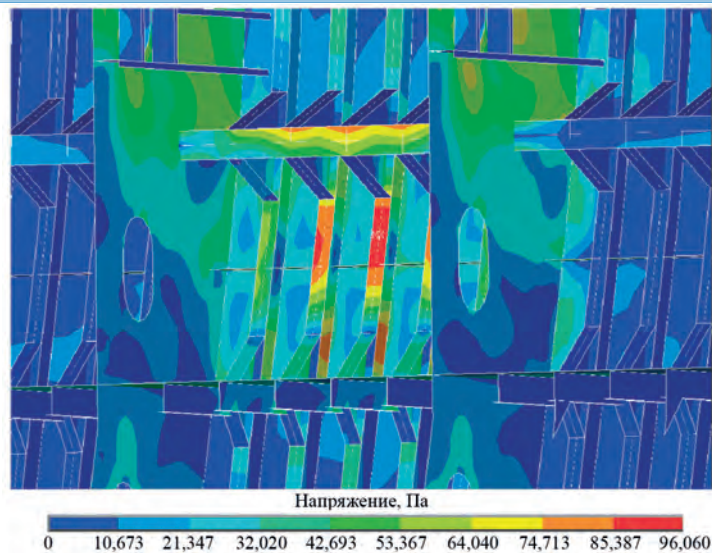


Рис. 8. Расположение точек с максимальными эквивалентными напряжениями по фон Мизесу (Па) в 1-м расчетном случае

Fig. 8. Location of points with maximum equivalent von Mises stresses (in Pa) in the 1st design case

в случаях 2–4 носят локальный характер и быстро затухают при удалении от точки максимума. Это делает их непригодными для размещения датчиков деформации.

Таким образом, для установки датчиков деформаций выбраны полки центральных в данной рамной шпации холостых шпангоутов. Датчики устанавливаются вдоль полки шпангоута в точке, соответствующей расчетному максимуму эквивалентных напряжений.

В качестве критерия для сигнализации судоводителю приняты максимальные эквивалентные напряжения в элементах конструкции. Эти напряжения определяются расчетным путем, как произведение напряжений в датчиках деформаций на коэффициент пропорциональности между напряжением в датчике и максимальным напряжением. Эти коэффициенты также были определены в результате конечно-элементного анализа.

Поскольку задача решалась в линейной постановке, давления отказа были определены из значений максимальных эквивалентных напряжений и предела текучести материала связи, в которой эти напряжения возникают.

Результатом расчета стали максимальные эквивалентные напряжения в наружной обшивке и в бортовом наборе, продольные напряжения в пояске шпангоута при единичном давлении, максимальные эквивалентные напряжения в конструкции перекрытия при единичном давлении, величина коэффициента максимальных напряжений, а также значения давления отказа.

Расположение датчиков на корпусе ЛСП

Количество датчиков было определено с учетом ограничений возможностей обработки сигналов 8-канальных анализаторов ASTRO A313. Всего в составе системы предусматривается 20 датчиков температуры A513, 148 одноосевых датчиков деформации A521 и 16 трехосевых датчиков деформации A527. Схема размещения датчиков показана на рис. 9.

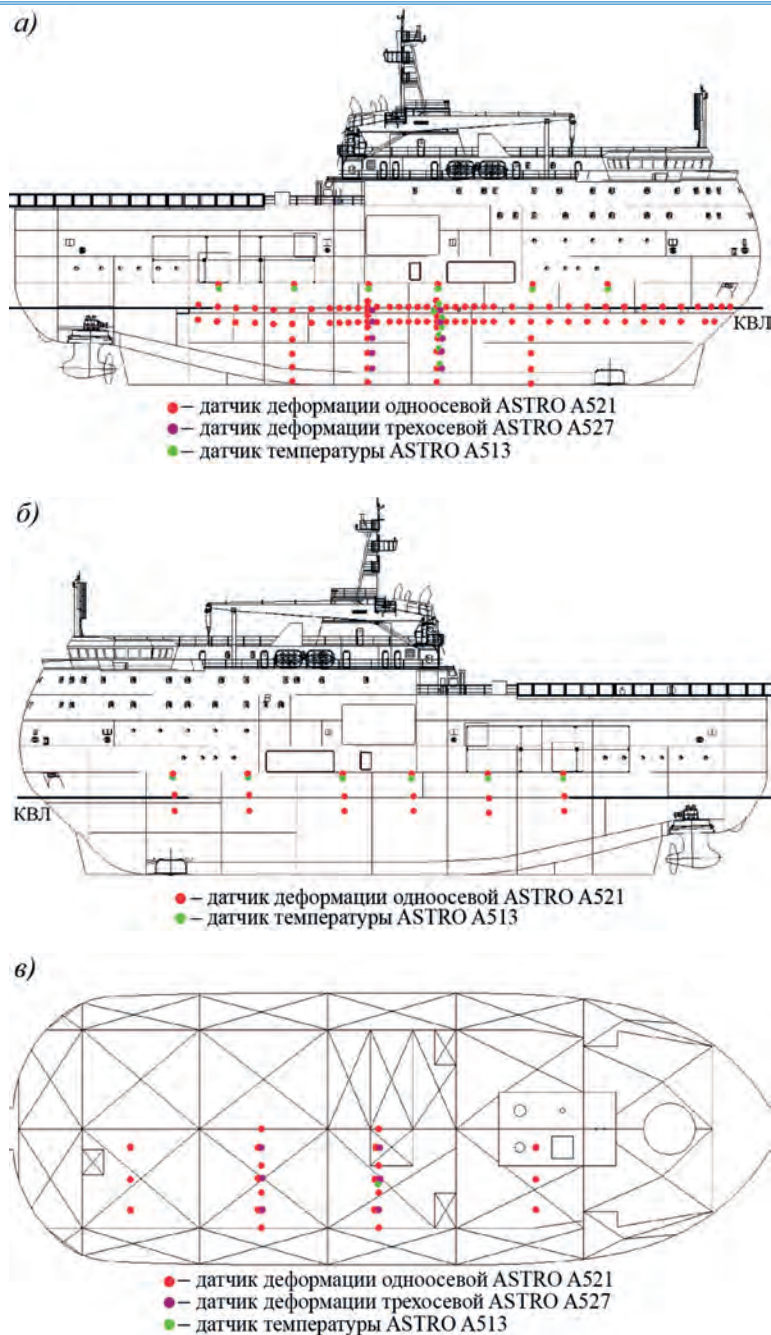


Рис. 9. Схема размещения датчиков подсистемы контроля напряженно-деформированного состояния корпуса: а) — правый борт; б) — левый борт; в) — днище

Fig. 9. Location of sensors for monitoring the stress-strain state of the hull: а) — starboard; б) — port side; в) — bottom

Одноосевые датчики типа А521 располагаются на наборе корпуса, в точках, определенных с помощью конечно-элементного анализа, в которых отчетливо выделяется характерное направление деформации. Под верхней палубой размещаются одноосные датчики, предназначенные для определения деформации корпуса, возникающей вследствие температурного воздействия окружающей среды. Их расположение выбрано таким образом, чтобы на них не оказывалось воздействие льда. На левом борту установлено 18 датчиков типа А521, на правом борту — 124, из которых 20 располагаются на днище.

Трехосевые датчики типа А527 располагаются на наружной обшивке, для измерения компонент плоского напряженно-деформированного состояния. Для оценки соотношения напряженно-деформированного состояния набора и обшивки датчики располагаются вблизи от шпангоутов, оснащенных одноосными датчиками деформации. Все 16 датчиков типа А527 установлены с правого борта (6 из них расположены на днище).

Температурные датчики типа А513 располагаются на наружной обшивке вблизи датчиков деформации, размещенных под верхней палубой, а также в плоскости сечения шпангоута 55½. На левом борту установлено 6 датчиков типа А513, на правом — 14, из которых 1 расположен на днище.

ОБСУЖДЕНИЕ

Установка СМЛН на ледостойкой самодвижущейся платформе позволит существенно повысить безопасность ее эксплуатации в условиях длительного дрейфа. Авторы полагают, что СМЛН станет важным инструментом в руках судоводителя и существенно дополнит «Наставление по эксплуатации в полярных водах (НЭПВ)» для ЛСП. Оснащение ЛСП такой системой мониторинга придает корпусу платформы функции измерительного инструмента для широкого спектра исследований. Использование СМЛН ЛСП в условиях дрейфа во льдах позволит проводить уникальные измерения для изучения процессов взаимодействия морских объектов со льдом. В этом случае будут получены данные не только об отклике конструкции корпуса на ледовые воздействия, но и параметры состояния окружающей среды, в том числе ледяного покрова. Это позволит в дальнейшем решать задачи по изучению механики деформации и разрушения морских льдов при взаимодействии с инженерным оборудованием и природными объектами.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Ледостойкая самодвижущаяся платформа «Северный полюс» является новым объектом не только для отечественного, но и для мирового судостроения, уникальным по назначению, принципам эксплуатации и конструктивным решениям. Эти особенности потребовали разработки не менее уникальной системы мониторинга ледовых нагрузок. Научная новизна состояла в разработке самого процесса формирования архитектуры системы. Этот процесс описывается в статье, начиная с формулирования задач, стоящих перед системой, анализа конструктивных и эксплуатационных особенностей ЛСП, анализа ледовых условий ее эксплуатации и, соответственно, определения преобладающего сценария взаимодействия ЛСП со льдом. После подбора основных технических средств, с учетом их технических возможностей, разработана архитектура системы. На основании конечно-элементного анализа определены точки размещения датчиков деформации — основных элементов разрабатываемой системы.

СМЛН будет являться основной системой обеспечения безопасной эксплуатации ЛСП в ледовых условиях. Кроме того, СМЛН позволяет использовать корпус ЛСП в качестве измерительного инструмента для натурного изучения механики деформации и разрушения морских льдов. Разработка технических требований к СМЛН для ЛСП была выполнена в отделе ледовых качеств судов ААНИИ. Процесс разработки технических требований включал в себя:

- анализ эксплуатационных ледовых условий ЛСП;
- определение сценариев взаимодействия льда с корпусом ЛСП;
- постановку задач для СМЛН;
- разработку архитектуры СМЛН;
- конечно-элементный анализ напряженно-деформированного состояния корпуса ЛСП;
- разработку требований к размещению датчиков на конструкциях корпуса ЛСП;
- определение типа и количества датчиков, входящих в СМЛН.

СМЛН позволит существенно повысить безопасность эксплуатации ЛСП в условиях длительного дрейфа. СМЛН придает корпусу платформы функции измерительного инструмента для исследований механики деформации и разрушения морских льдов при взаимодействии с инженерным сооружениями.

Разработанная СМЛН является уникальной в силу специфики назначения и условий эксплуатации ЛСП и позволит проводить комплексные исследования механики деформации и разрушения морских льдов при взаимодействии с инженерным сооружениями.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Финансирование. Работа выполнена в рамках договора с ООО «НТИ».

Благодарности. Авторы выражают благодарность специалистам АО КБ «Вымпел» (Нижний Новгород), АО «ОСК-Технологии» (Санкт-Петербург) и ООО «НТИ» (Санкт-Петербург), принимавшим участие в проектировании системы мониторинга ледовых нагрузок. Авторы также благодарны Роману Сергеевичу Мудрику, выполнившему большой объем конечно-элементных расчетов.

Competing interests. The authors have no competing interests.

Funding. This work was carried out under the agreement with NTI LLC.

Acknowledgments. The authors are grateful to JSC DO Vypel (Nizhny Novgorod), OSK-Technologies (St. Petersburg), NTI LLC (St. Petersburg). The authors would also like to thank Roman Mudrik, who performed a large volume of finite element calculations.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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. № 3 (31). С. 65–75.
2. Максимова П.В., Крутина Н.А., Лихоманов В.А., Чернов А.В., Свистунов И.А. Системы мониторинга ледовых нагрузок для судов и инженерных сооружений: К вопросу о создании системы мониторинга состояния объекта // Проблемы Арктики и Антарктики. 2016. № 2. С. 101–112.
3. Makarov A.S., Maksimova P.V., Likhomanov V.A., Sokolov V.T., Frolov, I.Ye., Chernov A.V., Svistunov I.A., Savitskaya A.V. Perspectives of using a drifting ice-resistant platform of the “North Pole” type, which is under construction, as a multifunctional research complex in the Arctic // Proceedings of the 25th International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions June

9–13, 2019, Delft, The Netherlands. URL: <http://poac.com/Papers/2019/pdf/POAC19-123.pdf> (дата обращения 16.06.2020).

4. *Бородачев В.Е.* Льды Карского моря. СПб.: Гидрометеиздат, 1998. 182 с.
5. *Бузуев А.Я.* Изменчивость ледовых условий на пути плавания // Метеорология и гидрология. 1981. № 2. С. 69–76.
6. *Бузуев А.Я., Федяков В.Е.* Справочное пособие для учета ледовых условий на трассах Северного морского пути. Л.: ААНИИ, 1977. 133 с.
7. *Бузуев А.Я., Дубовцев В.Ф., Захаров В.Ф., Смирнов В.И.* Условия плавания судов во льдах морей Северного полушария. М.: Изд. Главного управления навигации и океанографии Министерства обороны СССР, 1988. 280 с.
8. *Лавров А.М.* Северный морской путь. Карское море, Лаптевых и Восточно-Сибирское море. Морской сборник. 1931. № 8. С. 80–93.
9. Международная символика для морских ледовых карт и номенклатура морских льдов. Л.: Гидрометеиздат, 1984. 56 с.
10. *Svistunov I.A., Maksimova P.V., Likhomanov V.A., Chernov A.V., Krupina N.A.* Experimental-analytical study of the platform “North Pole” stability under the conditions of intensive ice pressures // Proceedings of the 25th International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions June 9–13, 2019, Delft, The Netherlands. URL: <http://poac.com/Papers/2019/pdf/POAC19-124.pdf> (дата обращения 27.06.2020).
11. *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). С. 97–106.
12. *Максимова П.В., Чернов А.В., Лихоманов В.А., Крупина Н.А., Лихоманов В.А.* Исследование реакций корпусных конструкций НЭС «Академик Трёшников» на ледовые воздействия в рамках первого этапа экспедиции «Трансарктика-2019» // Проблемы Арктики и Антарктики. 2020. № 66 (1). С. 82–101.
13. *Удд Э.* Волоконно-оптические датчики: Вводный курс для инженеров и научных работников. М.: Техносфера, 2008. 518 с.
14. *Blanchet D., DeFranco S.J.* Global first-year ice loads: scale effect and non-simultaneous failure // Proceedings of the 13th International Symposium on Ice (IAHR). Beijing, China, August 27–30, 1996. P. 203–211.
15. *Løset S., Shkhinek K., Uvarova E.* An overview of the influence of structure width and ice thickness on the global load // Proceedings of the 15th International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions, POAC’99. Espoo, Finland, August 23–27, 1999. P. 425–434.
16. *Wright B.D.* Insights from Molikpaq ice loading data // Report of the LOLEIF Project. NTNU, Department of Structural Engineering, Trondheim, Norway. 1998. 45 p.
17. *Смирнов В.Н., Ковалев С.М., Ньюбом А.А.* Автоколебания в дрейфующем ледяном покрове Северного Ледовитого океана // Океанологические исследования. 2019. Т. 47. № 3. С. 122–138.

REFERENCES

1. *Makarov A.S., Likhomanov V.A., Sokolov V.T., Chernov A.V., Polovinkin V.N., Timofeev O.Ya., Mogutin Yu.B., Simonov Yu.A.* Conceptual principles for creation of the drifting polar research platform. *Arktika: ekologiya i ekonomika*. Arctic: ecology and economy. 2018, 3 (31): 65–75. [In Russian].
2. *Maksimova P.V., Krupina N.A., Likhomanov V.A., Chernov A.V., Svistunov I.A.* Ice loads monitoring systems for ships and engineering structures. On the problem of creating an object state monitoring system. *Problemy Arktiki i Antarkтики*. Problems of Arctic and Antarctic. 2016, 2: 101–112. [In Russian].

3. Makarov A.S., Maksimova P.V., Likhomanov V.A., Sokolov V.T., Frolov I.Ye., Chernov A.V., Svistunov I.A., Savitskaya A.V. Perspectives of using a drifting ice-resistant platform of the "North Pole" type, which is under construction, as a multifunctional research complex in the Arctic. Proceedings of the 25th International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions June 9–13, 2019, Delft, The Netherlands. Available at: <http://poac.com/Papers/2019/pdf/POAC19-123.pdf>. (accessed 16.06.2020).
4. Borodachev V.E. *L'dy Karskogo moria*. The Kara Sea ice. St. Petersburg: Gidrometeoizdat, 1998: 182 p. [In Russian].
5. Buzuev A.Ia., Fediakov V.E. Variability of ice conditions on the way of navigation. *Meteorologiya i gidrologiya*. Meteorology and hydrology. 1981, 2: 69–76. [In Russian].
6. Buzuev A.Ia. *Spravochnoe posobie dlia ucheta ledovykh uslovii na trassakh Severnogo morskogo puti*. Reference guide for accounting for ice conditions on the Northern sea route. Leningrad: AANII, 1977: 133 p. [In Russian].
7. Buzuev A.Ia., Dubovtsev V.F., Zakharov V.F., Smirnov V.I. *Usloviia plavaniia sudov vo l'dakh morei Severnogo polushariia*. Conditions of navigation of vessels in the ice seas of the Northern hemisphere. Moscow: Izd. Glavnogo upravleniia navigatsii i okeanografii Ministerstva oborony SSSR, 1988: 280 p. [In Russian].
8. Lavrov A.M. Northern sea route. Kara sea, Laptev sea and East Siberian sea. *Morskoi sbornik*. Marine collection. 1931. 8: 80–93. [In Russian].
9. *Mezhdunarodnaia simvolika dlia morskikh ledovykh kart i nomenklatura morskikh l'dov*. International symbols for sea ice maps and nomenclature of sea. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1984: 56 p. [In Russian].
10. Svistunov I.A., Maksimova P.V., Likhomanov V.A., Chernov A.V., Krupina N.A. Experimental-analytical study of the platform "North Pole" stability under the conditions of intensive ice pressures. Proceedings of the 25th International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions June 9–13, 2019, Delft, The Netherlands. Available at: <http://poac.com/Papers/2019/pdf/POAC19-124.pdf>. (accessed 27.06.2020).
11. Svistunov I.A. Determination of the heeling moment acting during ice compression on the ice-resistant self-propelled platform "North Pole" by the method of model tests. *Arktika: ekologiya i ekonomika*. Arctic: ecology and economy. 2019, 3 (35): 97–106. [In Russian].
12. Maksimova P.V., Chernov A.V., Likhomanov V.A., Krupina N.A., Likhomanov V.A. Research of R/V "Akademik Tryoshnikov" hull structures response to ice actions during the first stage of the expedition "Transarktika-2019". *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Arctic and Antarctic Research. 2020, 66 (1): 82–101. [In Russian].
13. Udd E. *Volokonno-opticheskie datchiki. Vvodnyi kurs dlia inzhenerov i nauchnykh rabotnikov*. Fiber Optic Sensors: An Introduction for Engineers and Scientists. Moscow: Tekhnosfera, 2008: 518 p. [In Russian].
14. Blanchet D., DeFranco S.J. Global first-year ice loads: scale effect and non-simultaneous failure. Proceedings of the 13th International Symposium on Ice (IHAR), Beijing, China, August 27–30, 1996: 203–211.
15. Løset S., Shkhine K., Uvarova E. An overview of the influence of structure width and ice thickness on the global load. Proc. of the 15th International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions, POAC'99, Espoo, Finland, August 23–27, 1999: 425–434.
16. Wright B.D. Insights from Molikpaq ice loading data. Report of the LOLEIF Project. Norwegian University of Science and Technology, Trondheim. Norway. 1998: 45 p.
17. Smirnov V.N., Kovalev S.M., Niubom A.A. Self-oscillation in the drifting ice cover of the Arctic ocean. *Okeanologicheskie issledovaniia*. Journal of Oceanological research. 2019, 47 (3): 122–138. [In Russian].