ПРИКЛАДНЫЕ ПРОБЛЕМЫ APPLIED PROBLEMS

https://doi.org/10.30758/0555-2648-2020-66-1-82-101 УЛК 629.564.7:629.018:629.5.015.4



ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

ORIGINAL ARTICLE

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕАКЦИЙ КОРПУСНЫХ КОНСТРУКЦИЙ НЭС «АКАДЕМИК ТРЁШНИКОВ» НА ЛЕДОВЫЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ В РАМКАХ ПЕРВОГО ЭТАПА ЭКСПЕДИЦИИ «ТРАНСАРКТИКА-2019»

П.В. МАКСИМОВА*, А.В. ЧЕРНОВ, В.Ал. ЛИХОМАНОВ, Н.А. КРУПИНА, В.Ан. ЛИХОМАНОВ

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

*maximova@aari.ru

Резюме

В настоящее время нефтедобывающие инженерные сооружения, а также транспортные суда, перевозящие добываемые в морях арктического шельфа России нефтепродукты, в целях предотвращения экологических катастроф оборудуются системами мониторинга ледовых нагрузок (СМЛН). Строящаяся ледостойкая самодвижущаяся платформа (ЛСП), согласно проекту, должна быть оборудована такой системой, которая, во-первых, является основной системой обеспечения безопасности работы платформы в ледовых условиях, во-вторых, делает сам корпус платформы уникальным инструментом решения широкого комплекса задач по изучению воздействия льда на сооружения.

В рамках экспедиции выполнялись измерения напряжений, возникающих в корпусе НЭС «Академик Трёшников» во время ледовых воздействий, с целью получения необходимых данных для разработки системы мониторинга ледовых нагрузок строящейся ЛСП и апробации прототипа СМЛН в условиях дрейфа.

Были проанализированы данные, полученные при движении судна в ледовых условиях во время выполнения набегов, а также во время дрейфа. Анализ данных позволил выделить ряд особенностей для эксплуатации СМЛН в условиях дрейфа, которые будут учтены при реализации проекта СМЛН ЛСП.

Ключевые слова: инженерные сооружения, ледовые нагрузки, ледостойкая платформа, ледовые условия, система мониторинга.

Для цитирования: *Максимова П.В., Чернов А.В., Лихоманов В.Ал., Крупина Н.А., Лихоманов В.Ан.* Исследование реакций корпусных конструкций НЭС «Академик Трёшников» на ледовые воздействия в рамках первого этапа экспедиции «Трансарктика-2019» // Проблемы Арктики и Антарктики. 2020. Т. 66. Вып. 1. С. 82–101. https://doi.org/10.30758/0555-2648-2020-66-1-82-101.

Поступила 05.12.2019

После переработки 28.02.2020

Принята 11.03.2020

RESEARCH OF R/V "AKADEMIK TRYOSHNIKOV" HULL STRUCTURES RESPONSE TO ICE ACTIONS DURING THE FIRST STAGE OF THE EXPEDITION "TRANSARKTIKA-2019"

POLINA V. MAKSIMOVA*, ALEXEY V. CHERNOV, VLADIMIR Al. LIKHOMANOV, NINA A. KRUPINA, VLADIMIR An. LIKHOMANOV

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

*maximova@aari.ru

Summary

At present, oil-producing offshore structures, as well as transport vessels transporting oil products extracted in the seas of the Russian Arctic are equipped with ice load monitoring systems (ILMS) to prevent environmental disasters. The ice-resistant self-propelled platform (IRSPP) that is under construction now, according to the design should be equipped with this system. First of all this system is the main system for ensuring the platform's safety in ice conditions, and secondly makes the platform's hull a unique tool for solving a wide range of tasks to study the effects of ice on any construction.

The main goal of the research during the expedition "Transarktika-2019" was to obtain the necessary data for the development of an ice load monitoring system of the constructing IRSPP "North Pole" and testing the prototype of the ILMS at long vessel's drift in ice.

The measurements of stresses in the hull structures of the R/V "Akademik Tryoshnikov" were carried out during impacts on ice ridges and during ice compressions.

The standard ship ice load monitoring system (SILMS) of the R/V "Akademik Tryoshnikov" and strain gauges additionally installed on the frames and a shell plating in the middle part of the hull were used to perform the measurements.

The analysis of the obtained data showed that the maximal loads on the hull occurred during the forcing of ice ridges but the level of maximum stresses was not a danger to the hull.

Compressions during the drift did not have a strong effect on the ship's hull. The data obtained made it possible to identify a number of features for the operation of ILMS in similar conditions.

Based on the results of the expedition research, recommendations for the design of the architecture of the ILMS for IRSPP were issued. The results of further analysis of the obtained materials will be used in the development of data processing algorithms for ILMS for IRSPP, as well as for the development of the prospective programs of scientific research of deformation, fracture and other processes of various scales that occur in drifting ice during the future drifts of the IRSPP "North Pole".

Keywords: engineering structures, ice conditions, ice loads, ice-resistant platform, monitoring system.

For Citation: *Maksimova P.V., Chernov A.V., Likhomanov V.Al., Krupina N.A., Likhomanov V.An.* 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]. https://doi.org/10.30758/0555-2648-2020-66-1-82-101.

Received 12.05.2019

Revised 02.28.2020

Accepted 03.11.2020

ВВЕДЕНИЕ

Дрейфующие станции типа «Северный полюс» (СП) в течение долгого времени являлись традиционным средством исследования Центральной Арктики. Станции разворачивались на дрейфующих льдах в глубоководной части Северного Ледовитого океана (СЛО) и позволяли выполнять комплексные круглогодичные исследования

в области океанологии, метеорологии, физики и динамики льдов, аэрологии, геофизики и др.

Первая станция СП была развернута в 1937 г. В 1990-х гг. развертывание станций было прервано и возобновлено в 2003 г. Последняя станция СП-40 закончила свою работу в 2013 г. В настоящее время организация станций типа СП в круглогодичном варианте работы стала затруднительной из-за отсутствия дрейфующих ледяных полей, пригодных для размещения станций [1].

С целью продолжения круглогодичных исследований и получения важной научной информации в труднодоступных районах СЛО в Арктическом и антарктическом научно-исследовательском институте (ААНИИ) было предложено создать новый тип исследовательской станции в виде дрейфующей платформы, на борту которой находится все необходимое для исследовательских работ научное оборудование, расходные материалы и персонал, обеспеченный комфортными условиями пребывания. Проект получил название «Ледостойкая самодвижущаяся платформа (ЛСП) "Северный полюс"». В апреле 2018 г. Росгидромет и АО «Адмиралтейские верфи» подписали контракт на строительство ЛСП проекта 00903, первый рейс которой запланирован на 2021 г. [2].

C целью апробации технологий эксплуатации ЛСП была организована экспедиция «Трансарктика-2019» (1 этап) на научно-экспедиционном судне (НЭС) «Академик Трёшников» (рис. 1), поводившаяся в период с 20 марта по 20 мая 2019 г. В рамках экспедиции судно совершило месячный дрейф, выполняя научные исследования системы «океан — лед — атмосфера». Общее описание работ экспедиции «Трансарктика-2019» (1 этап) дано в работе [3].

Одним из научных комплексов, которым будет оснащена ЛСП, является система мониторинга ледовых нагрузок (СМЛН), разработка которой ведется в отделе ледовых качеств судов ААНИИ. Основная практическая задача СМЛН — обеспечение безопасной эксплуатации платформы путем информирования об уровне механических напряжений в корпусных конструкциях, возникающих при ледовом воздействии. В состав СМЛН будут входить несколько подсистем: подсистема контроля напряженно-деформированного состояния корпуса; подсистема контро-



Рис. 1. НЭС «Академик Трёшников» во время дрейфа

Fig.1. R/V «Akademik Tryoshnikov» during ice drift

ля параметров перемещений ЛСП; подсистема оценки параметров напряженнодеформированного состояния прилегающего к ЛСП льда; подсистема контроля метеорологической и ледовой обстановки; подсистема сбора и обработки данных. Такой состав измерительной части СМЛН ЛСП делает ее уникальным научным комплексом для широкого диапазона исследований механики деформации и разрушения морских льдов при взаимодействии с инженерными сооружениями и природными объектами: определение площади пятна контакта со льдом и распределения давлений, уточнение теоретических и полуэмпирических методов оценки ледовой нагрузки и др.

С целью получения необходимых данных для разработки СМЛН ЛСП и апробации прототипа СМЛН в условиях дрейфа во время экспедиции «Трансарктика-2019» были проведены исследования реакций корпусных конструкций НЭС «Академик Трёшников» на ледовые воздействия как во время движения судна, так и во время дрейфа. Основными задачами исследований в рамках экспедиции являлись:

- получение оперативной информации о состоянии корпуса судна в ходе дрейфа, а также на переходе судна к месту дрейфа и обратно;
- получение данных о деформациях корпуса, которые будут использованы для разработки системы мониторинга ледовых нагрузок для ЛСП;
- сбор исходных данных для оценки локальных и глобальных ледовых нагрузок, действующих на корпус судна;
- выдача рекомендаций к разработке системы мониторинга ледовых нагрузок для ЛСП.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для выполнения поставленных задач использовалась штатная судовая система мониторинга ледовых нагрузок (ШСМЛН) НЭС «Академик Трёшников» при следовании судна во льдах и во время дрейфа. Учитывая особенности программы рейса и усиленное внимание к исследованию воздействия льда во время сжатий, дополнительно были установлены тензометрические датчики на наборе и обшивке в средней части корпуса.

Методика проведения измерений

Штатная СМЛН НЭС «Академик Трёшников»

ШСМЛН НЭС «Академик Трёшников» использовалась как основной инструмент для непрерывного контроля прочности корпуса в режиме реального времени и оценки нагрузок на корпус при движении судна в ледовых условиях, а также во время дрейфа. ШСМЛН представляет собой сложный измерительный комплекс, который состоит из нескольких подсистем. Подробное описание измерительной части ШСМЛН представлено в статье [4]. Далее приведено описание тензометрической подсистемы ШСМЛН, предназначенной для регистрации деформаций корпуса судна при действии локальной и глобальной ледовой нагрузки [5].

Задающим элементом тензометрической подсистемы ШСМЛН является электрический датчик деформации типа «разрезная балка» фирмы SCAIME, который предназначен для измерения деформации сжатия и растяжения конструкции.

Установочные площадки для монтажа датчиков распределены по разным районам обшивки и набора корпуса судна. На момент испытаний было задействовано 33 датчика:



Рис. 2. Датчик деформации SCAIME EPSI-AX V в нержавеющем корпусе

Fig. 2. Strain gauge SCAIME EPSI-AX V in stainless steel housing

- группа датчиков в носовой части для изучения локальных ледовых нагрузок, возникающих вследствие ударного воздействия льда при движении судна передним ходом: 9 датчиков на наружной обшивке (S29, S30, S33, S34, S58, S60, S65, S67, S70), 2 датчика на бортовых стрингерах левого и правого бортов (S18, S32) и 2 датчика на форштевне (S77, S78);
- группа датчиков в кормовой части для определения параметров локального воздействия на корпус и винторулевой комплекс при движении судна задним ходом: 3 датчика на наружной обшивке, 3 датчика на фундаментах рулей, 2 датчика на упорных подшипниках;
- группа датчиков в миделевой части для определения параметров локальных воздействий, возникающих в результате ледовых сжатий, а также для определения деформаций при общем продольном изгибе: 5 датчиков на верхней палубе (S12, S13, S14, S83, S84), 2 датчика в междубортном пространстве правого борта (S10, S11), 5 датчиков на вертикальном киле (S3, S4, S5, S6, S7).

Для доступа к ШСМЛН на судне установлено два клиентских терминала. Один находится на ходовом мостике и выдает судоводителю информацию, поступающую со всех датчиков в режиме реального времени. Второй находится в помещении поста мониторинга состояния судна и предназначен для доступа к данным системы в оперативном и неоперативном режимах, конфигурирования и настройки системы.

ШСМЛН автоматически сохраняет все полученные данные на сервере системы в текстовом формате с частотой 125 Γ ц.

Обработка данных ШСМЛН проводилась с помощью программного комплекса, разработанного в ААНИИ и зарегистрированного в 2014 г., — «Программа автоматизированной обработки данных измерений штатной судовой системы мониторинга ледовых нагрузок НЭС "Академик Трёшников"» (№ регистрации 2014611728).

Дополнительная тензометрическая система

С целью мониторинга состояния корпуса во время ледовых сжатий в дополнение к ШСМЛН в средней части корпуса была установлена тензометрическая система, состоящая из 12 тензометрических датчиков.

В качестве чувствительных элементов для изготовления датчиков были использованы тензорезисторы производства фирмы Omega Engineering Inc. (США), модели

SGD-10/350-LY11 сопротивлением 350 Ом, с длиной измерительной решетки 10 мм и коэффициентом тензочувствительности (GF) равным 2,13.

Тензодатчики на базе указанных тензорезисторов монтировались по схеме «полный мост», при этом в два диагональных плеча измерительного моста были включены тензорезисторы, смонтированные на корпусных конструкциях судна, а в двух других диагональных плечах устанавливались обычные резисторы равного сопротивления. Тензорезисторы были ориентированы параллельно друг другу, что позволило избавиться от неопределенности в соотношении продольных и поперечных деформаций. При такой схеме монтажа тензодатчиков для определения деформаций в корпусных конструкциях используется выражение:

$$\varepsilon = \frac{2}{GF} \cdot \frac{V}{U},$$

где: $GF = (\Delta R/R)/(\Delta L/L) = (\Delta R/R)/\varepsilon$ — коэффициент тензочувствительности, являющийся паспортной величиной тензорезистора, V/U — отношение измеряемого сигнала к базовому напряжению.

Таким образом оценивается одна из компонент деформации. Для определения полной картины напряженно-деформированного состояния (НДС) в точках размещения тензодатчиков и для оценки НДС бортового перекрытия предполагается разработка конечно-элементной модели корпуса НЭС «Академик Трёшников».

Датчики были установлены в сухих отсеках № 1, № 2 и № 3 на уровне платформы 1 по правому борту (рис. 3) в районе цилиндрической вставки, так как именно

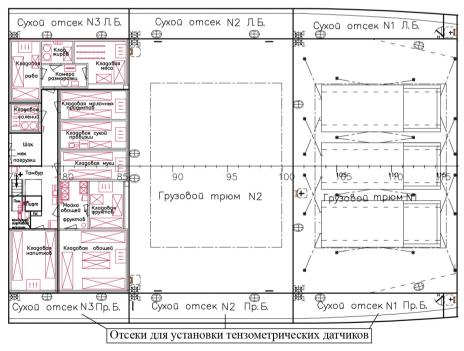


Рис. 3. Расположение отсеков для установки тензометрических датчиков

Fig. 3. Location of compartments for strain gauges installation

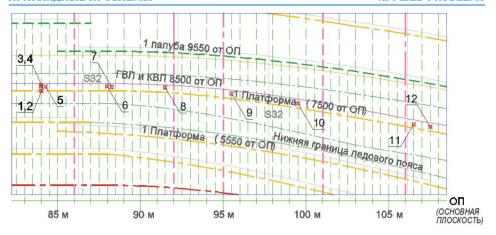


Рис. 4. Схема мест установки тензометрических датчиков.

I — шпангоут 84, кница, 2 — шпангоут 84, поясок кницы, 3 — шпангоут 84, 7980 мм от основной плоскости (ОП), 4 — шпангоут 84, 8350 мм от ОП, 5 — обшивка между шпангоутом 84 и 84½, 7950 мм от ОП, 6 — шпангоут 88, 7930 мм от ОП, 7 — обшивка между шпангоутом 88 и 88½, 7870 мм от ОП, 8 — шпангоут 91½, 7900 мм от ОП, 9 — шпангоут 95½, 7870 мм от ОП, 10 — шпангоут 99½, 7880 мм от ОП, 11 — шпангоут 106½, 7880 мм от ОП, 12 — шпангоут 107½, 7920 мм от ОП

Fig. 4. Diagram of the places of strain gauges installation.

I — frame 84, bracket, 2 — frame 84, bracket's flange, 3 — frame 84, 7980 mm from the base line (BL), 4 — frame 84, 8350 mm from BL, 5 — shell plating between frames 84 and 84½, 7950 mm from BL, 6 — frame 88, 7930 mm from BL, 7 — shell plating between frames 88 and 88½, 7870 mm from BL, 8 — frame 91½, 7900 mm from BL, 9 — frame 95½, 7870 mm from BL, 10 — frame 99½, 7880 mm from BL, 11 — frame 106½, 7880 mm from BL, 12 — frame 107½, 7920 mm from BL

эта часть корпуса подвергается наибольшей нагрузке при воздействии сжатий. На рис. 4 изображен фрагмент чертежа растяжки наружной обшивки с указанием мест монтажа датчиков. Для примера на рис. 5 показан тензометрический датчик, смонтированный на одном из шпангоутов НЭС «Академик Трёшников».

Регистрация сигнала, поступающего с каждого датчика, осуществлялась с помощью 4-жильного телефонного кабеля через тензометрическую станцию. Тензометрическая станция производства компании National Instruments Corporation



Рис. 5. Пример установки тензодатчика на шпангоуте

Fig. 5. Example of strain gauge installation on the frame

(США) включает в себя 5 тензометрических модулей, каждый из которых имеет 4 одновременно опрашиваемых аналоговых входа (канала). При измерениях было залействовано 12 каналов.

Управление работой тензометрической станции и регистрация данных производились с помощью специализированного программного обеспечения, позволяющего осуществлять выбор каналов для записи, устанавливать частоту опроса каналов, производить запуск записи, сохранять и осуществлять экспорт данных в общедоступные форматы. Программное обеспечение было установлено на ноутбуке, при этом обмен информацией с контроллером тензометрической станции осуществлялся по Ethernet-интерфейсу. Сборка тензометрической станции и разработка программного обеспечения осуществлялась фирмой «Витэк» (Санкт-Петербург, Россия), являющейся членом National Instruments Alliance.

Установка дополнительной тензометрической системы проводилась после постановки судна в дрейф. Для монтажа датчиков был выбран правый борт, так как все виды исследовательских работ проводились с правого борта. Высота установки датчиков была определена в соответствии с осадкой судна на момент начала дрейфа.

Регистрация данных с помощью дополнительной тензометрической системы велась непрерывно в течение всего дрейфа сеансами продолжительностью не более четырех часов. Данные сохранялись в текстовом формате с частотой 100 Гц.

Для анализа данных тензометрической системы было разработано специальное программное обеспечение, позволяющее проводить первичную обработку записей большого объема.

Дополнительные измерения

Во время движения судна велись наблюдения с ходового мостика за окружающей ледовой обстановкой, фиксировались маневры и характеристики движения судна. Для записи выполняемых маневров и скорости хода судна использовалось портативное GPS-устройство Garmin GPSMAP 64st.

Во время дрейфа судна выполнялись визуальные наблюдения за состоянием ледяного покрова, регистрировались метеоусловия: температура воздуха, скорость и направление ветра. Необходимые параметры измерялись с помощью метеорологического комплекса, установленного на льду, и были предоставлены метеорологическим отрядом. Также выполнялись наблюдения за параметрами остойчивости судна (осадка, крен, дифферент).

РЕЗУЛЬТАТЫ

На рис. 6 показана схема переходов и дрейфа НЭС «Академик Трёшников» во время экспедиции «Трансарктика-2019».

С 24 по 27 марта НЭС «Академик Трёшников» выполняло переход из п. Мурманск к предполагаемому месту дрейфа в различных ледовых условиях. С 27 марта судно начало выполнение первого дрейфа. Выбранное ледяное поле представляло собой поле сморози, состоящее из однолетнего среднего льда (толщиной 70–120 см) с вставками однолетнего тонкого льда (30–70 см). Толщина снежного покрова варьировалась в пределах 15–20 см на ровном льду и 40–70 см в районе торосов. 29 апреля около четырех утра МСК были зафиксированы ледовые сжатия, в результате чего произошло разрушение ледяного поля.

С 29 по 30 апреля выполнялся переход ко второму месту дрейфа.

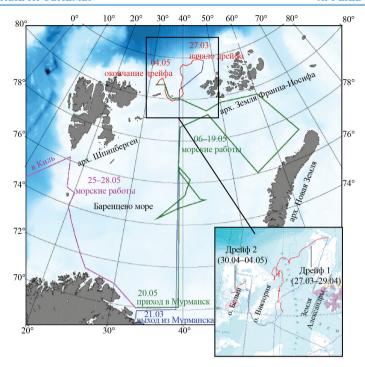


Рис. 6. Схема переходов и дрейфа НЭС «Академик Трёшников» с 21.03 по 28.05 2019 г. Синим цветом показан переход из п. Мурманск в точку начала дрейфа с гидрологическими разрезами; красным цветом показана траектория дрейфа и разрезы, выполненные с помощью вертолета; зеленым цветом показан обратный переход в п. Мурманск с гидрологическими разрезами; фиолетовым цветом показан обратный переход в Киль с гидрологическим разрезом [3]

Fig. 6. The expedition route of the R/V «Akademik Tryoshnikov» from March 21 to May 28, 2019. The blue color shows the way from Murmansk to the point of the beginning of the drift with hydrological profiles; the red color shows the drift pathway and the profiles, done with the helicopter; the green color shows the way back to Murmansk with hydrological profiles; the magenta color shows the return way to Kiel with hydrological profiles [3]

Второй дрейф начался 30 апреля в поле, состоящем из нескольких обломков полей двухлетнего льда, соединенных между собой вставками толстого льда. Толщина льда достигала 2 м. Толщина снежного покрова составляла от 35–40 см на ровных участках до 70–100 см в районе гряд торосов. Дрейф продолжался до 4 мая и сопровождался ежедневным образованием новых трещин в ледяном поле. С 1 по 3 мая были зафиксированы сжатия и образование небольшого навала вдоль борта.

5 мая судно начало движение в сторону п. Мурманск с выполнением попутных работ в различных ледовых условиях. 14 мая судно вышло на чистую воду.

Измерения с помощью ШСМЛН велись непрерывно с момента входа судна в дрейфующие льды, во время дрейфа судна в ледяном поле и до момента выхода на чистую воду при возвращении. Мониторинг состояния корпуса судна с помощью ШСМЛН осуществлялся в режиме реального времени в течение всего рейса. Записи в ледовых условиях на пути следования судна к первому месту дрейфа составили около 60 часов. Записи в первом дрейфе — около 825 часов. Записи на переходе

ко второму места дрейфа — около 28 часов. Записи во втором дрейфе — около 92 часов. Записи в ледовых условиях по пути следования в п. Мурманск — 260 часов.

Измерения с помощью дополнительной тензометрической системы выполнялись в период первого дрейфа судна, во время перехода от первого места дрейфа ко второму и во время второго дрейфа. Продолжительность записей составила около 792 часов в период с 31 марта по 04 мая.

Обработка результатов измерений

Полученные записи реакций корпусных конструкций НЭС «Академик Трёшников» на ледовые воздействия были разделены на три группы:

- записи, полученные во время движения судна при работе набегами;
- записи, полученные во время ледовых сжатий;
- записи, на которых выявлены температурные деформации корпусных конструкций.

При работе судна набегами основным районом, подверженным ударным ледовым нагрузкам, является носовая оконечность судна, при этом корпус судна также подвергается действию изгибающего момента. В связи с этим при обработке данных была рассмотрена как местная прочность корпуса, так и общая прочность корпуса. Основной объем данных при работе судна набегами был получен с помощью ШСМЛН. При рассмотрении местной прочности основное внимание было уделено изучению реакций тензометрических датчиков, установленных в помещении носового подруливающего устройства (НПУ). При рассмотрении общей прочности рассматривались реакции датчиков ШСМЛН, установленных в миделевом сечении корпуса.

Во время дрейфа судна ШСМЛН использовалась с целью мониторинга состояния корпуса судна в реальном времени, что позволяло определять наличие или отсутствие сжатий.

Основной массив данных при нахождении судна в дрейфе был получен с помощью дополнительной тензометрической системы. Также были получены данные о локальных напряжениях в корпусе судна, возникающих при движении в ледовых условиях во время выполнения набегов.

Реакции корпусных конструкций при движении судна

За весь рейс было зарегистрировано 157 событий (набегов). Для каждого события фиксировались окружающие ледовые условия, скорость судна при форсировании ледяных образований и максимальные напряжения, достигнутые датчиками в ходе каждого набега. Средняя скорость при выполнении набегов составляла 8–10 узлов.

Пример типичной реакции датчиков ШСМЛН в носовой оконечности и в миделевой части на ударные ледовые нагрузки показан на рис. 7.

По результатам полученных данных построены гистограммы максимальных напряжений для оценки местной прочности (рис. 8a) и общей прочности (рис. 8δ).

Как видно из графиков, напряжения в обшивке в носовой части судна на уровне 6300 мм от ОП были заметно выше, чем на уровне 7800 мм. Несмотря на то, что осадка носом составляла около 7,8 м, во время выполнения набегов происходило взаимодействие носовой оконечности судна с консолидированным слоем торосистых образований, который располагается ниже уровня воды. Это привело к тому, что наиболее нагруженной частью носовой оконечности оказался район на уровне ватерлинии 6,3 м.

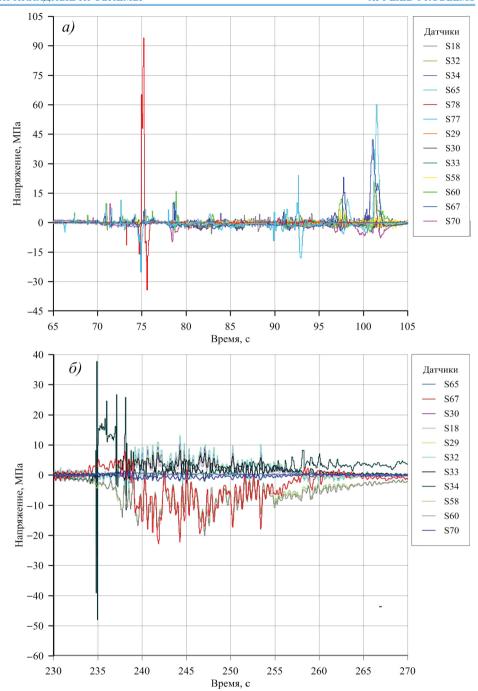


Рис. 7. Характерные картины реакции датчиков деформаций ШСМЛН на ударные ледовые нагрузки: a — в носовой оконечности; δ — в миделевой части

Fig. 7. Reaction of SILMS strain gauges to impact ice loads: a — bow, δ — midship

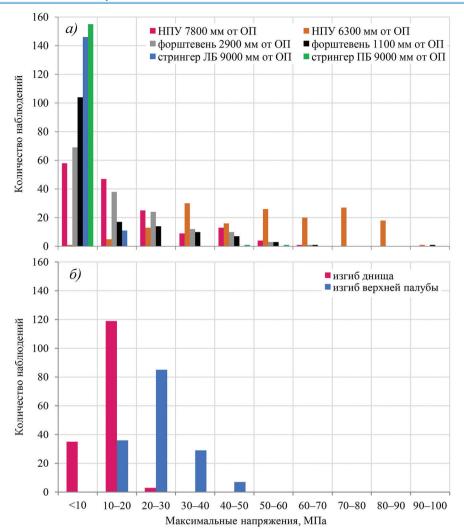


Рис. 8. Гистограмма максимальных напряжений судна при работе набегами: a — в носовой части судна; δ — в миделевой части судна

Fig. 8. Histogram of maximal stresses of the hull during ramming: a — in the bow part; b — in the midship part

Сталь, использованная для изготовления наружной обшивки корпуса НЭС «Академик Трёшников», имеет предел текучести, равный 235 МПа. При форсировании ледяных образований набегами максимальный уровень напряжений, зафиксированный датчиками в носовой части, составляет 93,94 МПа, что равно 40 % от предела текучести стали корпусных конструкций. Максимальные напряжения в конструкциях днища в миделевой части судна составили 20,7 МПа, в конструкциях верхней палубы и верхней части борта — 47,98 МПа, что не превышает 21 % от предела текучести.

Реакции корпусных конструкций при работе набегами также были зарегистрированы с помощью дополнительной тензометрической системы, которая осуществляла

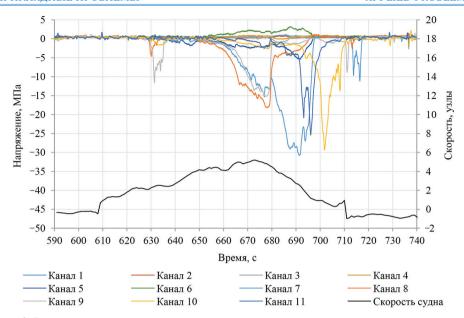


Рис. 9. Реакция датчиков дополнительной тензометрической системы во время выполнения серии набегов (отрицательные значения скорости — движение задним ходом)

Fig. 9. The signal of additional strain gauges at ramming (negative speed values mean that ship moves astern)

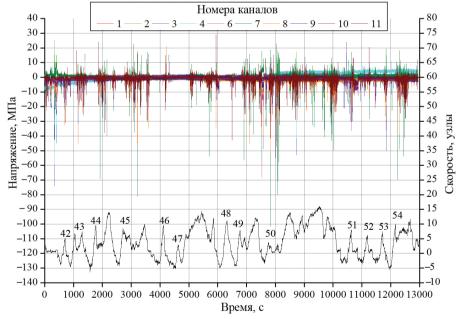


Рис. 10. Пример типичной реакции датчиков дополнительной тензометрической системы на ударные ледовые нагрузки (событие 42)

Fig. 10. Example of typical signal of additional strain gauges on impact ice loads (event 42)

запись данных во время перехода ко второму месту дрейфа. Максимальное значение напряжений было получено во время выполнения набегов (события 49–50) 30 апреля и составило 101 МПа (рис. 9), что не превышает 43 % от предела текучести.

В качестве примера типичной реакции датчиков дополнительной тензометрической системы на ударные ледовые нагрузки на рис. 10 рассмотрено событие 42. Как видно из рисунка, на этапе разгона судно взаимодействует с ранее разрушенным льдом в канале, затем происходит внедрение в сплошной неразрушенный лед, и скорость судна падает, а нагрузка на корпус возрастает. Пики нагрузок соответствуют малым скоростям, так как взаимодействие льда с датчиками на миделе происходит позднее, чем для носовых датчиков

Реакции корпусных конструкций на ледовые сжатия

По результатам мониторинга, а также визуальным наблюдениям за ледовой обстановкой реакции корпуса на сжатия, возникавшие во время дрейфа, являлись незначительными.

С помощью дополнительной тензометрической системы наибольшие сжатия были зафиксированы во время второго дрейфа 1 мая (рис. 11). В результате сжатий в ледяном поле прошла трещина, начал образовываться небольшой навал с правого борта, при этом произошло заклинивание судна, из-за чего продвижение в глубь ледяного поля для продолжения научно-исследовательских работ оказалось невозможным.

Максимальное полученное значение напряжений во время дрейфа составило 54 МПа, что не представляет опасности для корпуса НЭС «Академик Трёшников», так не превышает 23 % от предела текучести стали, из которой изготовлен корпус судна.

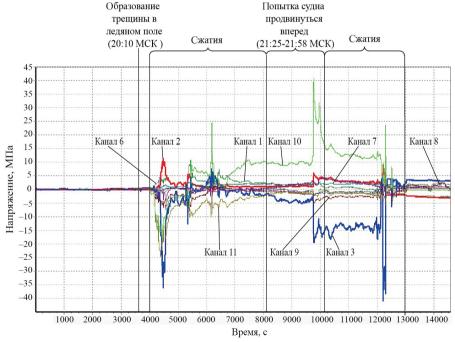


Рис. 11. Сжатия, зарегистрированные дополнительной тензометрической системой 1 мая

Fig. 11. Ice compressions registered by additional strain gauge system on 1st of May

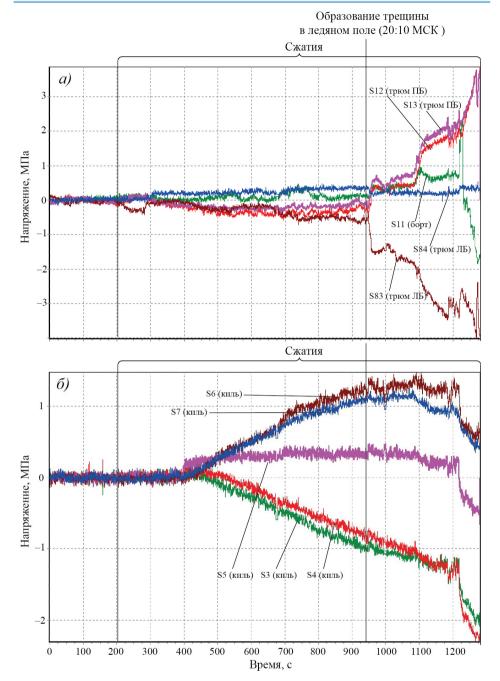


Рис. 12. Показания миделевых датчиков ШСМЛН, установленных на борту судна (a) и на днище (δ), во время ледовых сжатий (01.05.2019 19:59:15 – 20:20:35 МСК)

Fig. 12. Signals of strain gauges of SILMS installed on side (a) and on bottom (δ) in midship part during ice compressions (01.05.2019 19:59:15 – 20:20:35 Moscow time)

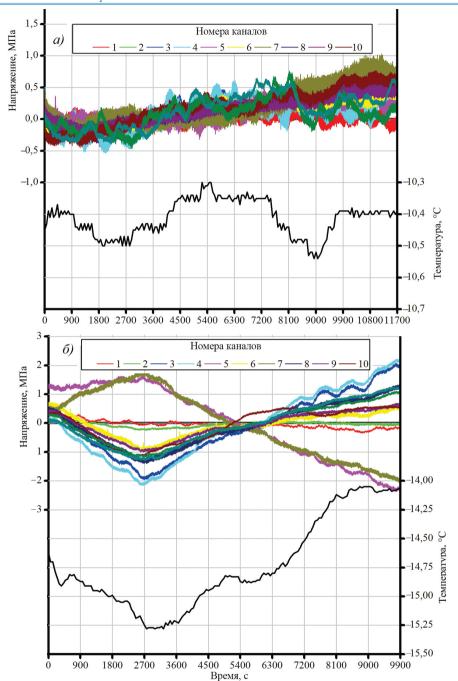


Рис. 13. Показания датчиков дополнительной тензометрической системы при изменении температур (a) и при относительно постоянной температуре (δ)

Fig. 13. Signals of additional strain gauges at temperature changes (a) and at a relatively constant temperature (δ)

В качестве примера записи ШСМЛН, сделанной во время ледовых сжатий, на рисунке 12*a*, *б* показаны обработанные 20-минутные записи датчиков в миделевой части судна, также полученные 1 мая. На графиках отображены данные с датчиков, описывающих общий изгиб судна. Единственный датчик, отображающий локальные напряжения, возникающие в конструкции правого борта судна, — S11.

В целом напряжения в корпусе во время сжатий по данным датчиков ШСМЛН, определяющих общий изгиб судна, не превышали 4 МПа. При этом для датчика S11, установленного с правого борта для определения локальных напряжений, максимальное полученное значение составило 6,05 МПа во время сжатий 2 мая.

Температурные деформации

Помимо деформаций, возникающих при ледовых сжатиях, была также отмечена корреляция между изменением температуры наружного воздуха и показаниями тензометрических датчиков. На рис. 13*а* показаны изменения показаний датчиков дополнительной тензометрической системы при колебании температуры воздуха. На рис. 13*6* для сравнения показан график напряжений при относительно постоянной температуре. Такие температурные деформации также отчетливо видны на 24-часовых трендах ШСМЛН. Приведенные в статье данные позволяют оценить погрешность измерений, возникающую из-за изменения температуры, как небольшую, в пределах 5 %, в связи с чем она не оказывает существенного влияния на результаты измерений. В то же время отметим, что этот вывод справедлив только применительно к датчикам дополнительной тензометрической системы, установленной на НЭС «Академик Трёшников». При иной конструкции корпуса и ином размещении тензометрических датчиков температурные деформации могут более значительно искажать картину напряженно-деформированного состояния корпуса, в связи с чем необходима разработка методики учета температурных деформаций для использования в штатной СМЛН для ЛСП.

ОБСУЖДЕНИЕ

Наибольшие нагрузки на корпус НЭС «Академик Трёшников» при движении в ледовых условиях были зарегистрированы во время выполнения набегов при прохождении всторошенных ледяных полей. При форсировании ледяных образований набегами максимальные напряжения в корпусе по данным ШСМЛН не превысили 40 % от предела текучести стали, из которой выполнен корпус НЭС, и 43 % по данным дополнительной тензометрической системы.

Для более подробной информации о напряжениях, возникающих в корпусе во время сжатий, использовалась дополнительная тензометрическая система, установленная на правом борту НЭС «Академик Трёшников». По результатам мониторинга с помощью ШСМЛН и тензометрической системы, а также визуальным наблюдениям за ледовой обстановкой и параметрами остойчивости судна реакции конструкций корпуса на сжатия, возникавшие во время дрейфа, являлись незначительными. По данным дополнительной тензометрической системы полученные напряжения в процессе сжатий не превышают 23 % от предела текучести стали, из которой изготовлен корпус.

Уточнение картины распределения напряжений предполагается в дальнейшем с использованием конечно-элементной модели бортового перекрытия НЭС «Академик Трёшников».

Необходимо отметить, что проведение тензометрических измерений является традиционным видом работ отдела ледовых качеств судов ААНИИ. Однако тензо-

метрические испытания прочности корпуса НЭС «Академик Трёшников» по столь обширной программе с измерениями во время сжатий производились впервые.

Несмотря на то, что сжатия не оказывали сильного влияния на корпус судна, полученные данные позволили выделить ряд особенностей при использовании как ШСМЛН, так и дополнительной тензометрической системы, которые будут учтены при реализации проекта СМЛН ЛСП.

Например, если записи напряжений в конструкции корпуса при ударных ледовых нагрузках имеют ярко выраженный характер, то записи температурных деформаций во время дрейфа в некоторых случаях визуально сложно отличить от записей напряжений при постоянно действующей нагрузке со стороны ледяного поля. Это может повлечь за собой неправильную интерпретацию данных, когда необходимо осуществлять мониторинг состояния корпуса в реальном времени. Для устранения этого недостатка в состав СМЛН ЛСП необходимо включить датчики температуры, которые позволят выполнять температурную компенсацию при измерениях, и подсистему контроля метеорологической обстановки, что даст возможность отслеживать изменение температуры окружающей среды.

Помимо этого, в СМЛН ЛСП в качестве измерительных элементов предлагается использовать волоконно-оптические датчики, а не электрические. Использование волоконно-оптических сенсоров позволит избежать необратимых смещений нуля, которые характерны для электрических датчиков, в результате длительных переменных нагрузок, что позволит существенно повысить точность измерений. Также преимуществами использования волоконно-оптических технологий являются: отсутствие чувствительности к электромагнитным воздействиям; стойкость к вредным воздействиям среды; абсолютная взрыво- и пожаробезопасность; большой диапазон контроля деформаций; высокая механическая прочность; стойкость к повышенным температурам, вибрациям и др.; высокая скорость передачи данных [6, 8].

Опыт использования ШСЛМН во время дрейфа показал необходимость добавления в измерительный блок СМЛН ЛСП подсистемы напряженно-деформированного состояния ледяного поля, в которую входят датчики деформаций, устанавливаемые на льду. Такое решение предоставит возможность заблаговременно предупредить о возможных опасных ситуациях, например, о начинающемся разрушении ледяного поля.

Данные, полученные в ходе экспедиции, позволили пополнить статистику параметров, характеризующих ледовую нагрузку в наблюдаемых ледовых условиях, а именно: размеры зоны контакта со льдом, продолжительность соударения и т.д. Выбор этих параметров при определении ледовых нагрузок расчетными методами существенно влияет на результаты расчетов.

В будущем также планируется создание конечно-элементной модели ЛСП, с помощью которой возможно восстановить параметры ледовых нагрузок по полученным данным СМЛН.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные в ходе экспедиции измерения ледовых нагрузок на корпусные конструкции НЭС «Академик Трёшников» подтвердили высокую прочность его корпуса, соответствие прочности корпуса требованиям Российского морского регистра судоходства к присвоенной ледовой категории и возможность его длительной автономной работы в более сложных ледовых условиях при обязательном контроле уровня напряжений с помощью ШСМЛН.

Основным результатом проведенных в ходе экспедиции исследований следует считать подтверждение правильности подходов к проектированию архитектуры СМЛН ЛСП, подтверждение работоспособности узлов системы при длительных сеансах записи и целесообразность установки подобной системы мониторинга реакций корпусных конструкций на ледовые воздействия для судов и сооружений, предполагающих долговременное базирование во льдах.

Результаты дальнейшего анализа полученных материалов будут использованы при разработке алгоритмов обработки данных для системы мониторинга ледовых нагрузок ЛСП, а также для разработки перспективных программ научных исследований деформации, разрушения и других процессов разного масштаба, происходящих в дрейфующих льдах СЛО во время будущих дрейфов ЛСП «Северный полюс».

Конфликт интересов. Конфликт интересов отсутствует.

Финансирование. Все исследовательские работы и логистика экспедиционного проекта ТРАНСАРКТИКА 2019 финансировались Росгидрометом.

Благодарности. Авторы выражают благодарность экипажу НЭС «Академик Трёшников» за помощь в проведении научных исследований в ходе экспедиции.

Competing interests. The authors have no competing interests.

Funding. All research work and logistics of the TRANSARKTIKA 2019 expedition project were funded by Roshydromet.

Acknowledgments. The authors would like to thank the ship crew of R/V "Akademik Tryoshnikov" for assistance in providing scientific research during the expedition.

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. Т. 3 (31). С. 65–75.
- 2. Makarov A.S., Maksimova P.V., Likhomanov V.A., Sokolov V.T., Frolov, I.Ye., Chernov A.V., Svistunov I.A. 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 04.03.2020).
- 3. Фролов И.Е., Иванов В.В., Фильчук К.В., Макштас А.П., Кустов В.Ю., Махотина И.А., Иванов Б.В., Уразгильдеева А.В., Сёмин В.Л., Зимина О.Л., Крылов А.А., Богин В.А., Захаров В.Ю., Малышев С.А., Гусев Е.А., Барышев П.Е., Пильгаев С.В., Ковалев С.М., Тюряков А.Б. Трансарктика-2019: зимняя экспедиция в Северный Ледовитый океан на НЭС «Академик Трёшников» // Проблемы Арктики и Антарктики. 2019. Т. 65 (3). С. 255–274.
- 4. *Максимова П.В., Крупина 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 (108). С. 101–112.
- 5. *Крупина Н.А., Лихоманов В.А., Чернов А.В.* Оценка ледовой ходкости НЭС «Академик Трёшников» // Проблемы Арктики и Антарктики. 2013. № 3 (97). С. 57–64.
- 6. *Клекерс Т., Гюнтер Б.* Измерение деформаций: оптоволоконные сенсоры компании НВМ // Электроника: Наука, Технология, Бизнес. 2008. № 1. С. 76–78.
- 7. Svistunov I.A., Maksimova P.V., LikhomanovV.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 04.03.2020).

- 8. $V\partial \partial$ Э. Волоконно-оптические датчики: Вводный курс для инженеров и научных работников. М.: Техносфера, 2008. 518 с.
- 9. *Крупина Н.А., Лихоманов В.А., Чернов А.В.* Ледовые испытания НЭС «Академик Трёшников» в первом антарктическом рейсе // Российские полярные исследования. 2013. № 2 (12), С. 39–44.
- 10. Максимова П.В., Тимофеев О.Я. Формирование систем мониторинга, эксплуатирующихся в ледовых условиях морских объектов // Труды Крыловского государственного научного центра. 2016. Т. 94 (378). С. 75–90.

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: ekologiia i ekonomika. Arctic: ecology and economy. 2018, 3(31): 65–75. [In Russian].
- 2. Makarov A.S., Maksimova P.V., Likhomanov V.A., Sokolov V.T., Frolov, I.Ye., Chernov A.V., Svistunov I.A. 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 14.03.2019).
- 3. Frolov I.E., Ivanov V.V., Filchuk K.V., Makshtas A.P., Kustov V.Y., Mahotina I.A., Ivanov B.V., Urazgildeeva A.V., Syoemin V.L., Zimina O.L., Krylov A.A., Bogin V.A., Zakharov V.Y., Malyshev S.A., Gusev E.A., Baryshev P.E., Pilgaev S.V., Kovalev S.M., Turyakov A.B. Transarktika-2019: winter expedition in the Arctic Ocean on the R/V "Akademik Tryoshnikov". Problemy Arktiki i Antarktiki. Arctic and Antarctic Research. 2019, 65, 3: 255–274.
- 4. *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 Antarktiki.* Arctic and Antarctic Research. 2016, 2 (108): 101–112. [In Russian].
- 5. Krupina N.A., Likhomanov V.A., Chernov A.V. Estimation of ice capability of research vessel "Akademik Tryoshnikov". Problemy Arktiki i Antarktiki. Arctic and Antarctic Research. 2013, 3 (97): 57–64. [In Russian].
- 6. Kleckers T., Gunther B. Izmerenie deformatsii: optovolokonnye sensory kompanii HBM. Deformations measurement: HBM's fiber-optic sensors. *Elektronika: Nauka, Tekhnologiia, Biznes*. Electronics: Science, Technology, Business. 2008, 1: 76–78. [In Russian].
- 7. 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 14.03.2019).
- 8. *Udd E.* Fiber Optic Sensors: An Introduction for Engineers and Scientists. Moscow: Tekhnosfera, 2008. 518 p. [In Russian].
- 9. *Krupina N.A., Likhomanov V.A., Chernov A.V.* Ice trials of the R/V "Akademik Tryoshnikov" on the first Antarctic voyage. *Rossiyskie Polyarnye Issledovaniya*. Russian Polar Research. 2014, 3 (17): 10–12. [In Russian].
- 10. *Maksimova P.V., Timofeev O.Ya*. Setting up of ice-load monitoring systems for marine vessels operating in ice. *Trudy TsNII im. akad. A. N. Krylova*. Transactions of the Krylov State Research Centre. 2016, 94 (378): 75–90. [In Russian].