

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ МЕТОДА ОЦЕНКИ  
ГЛОБАЛЬНЫХ ЛЕДОВЫХ НАГРУЗОК В ЭКСПЕДИЦИИ  
«ШТОКМАН-2008»**

канд. техн. наук **В.А.ЛИХОМАНОВ**, мл. науч. сотр. **А.В.ЧЕРНОВ**,  
науч. сотр. **Н.А.КРУПИНА**

*ГНЦ РФ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, г. Санкт-Петербург, e-mail: olks@aari.nw.ru*

*В статье представлено описание методики и оборудования для проведения натуральных полномасштабных экспериментов по оценке глобальной ледовой нагрузки на судно. Эти эксперименты были выполнены ГНЦ РФ ААНИИ при участии сотрудников ВНИИОкеангеология в мае–июне 2008 г. по заказу Shtokman Development AG на ледоколе «Капитан Николаев» в северо-восточной части Баренцева моря (в экспедиции «Штокман-2008»). Исследовалось взаимодействие с различными ледяными образованиями: ровным льдом, различными типами торосов, айсбергами. Для определения сил, действующих на судно, применялись две измерительные системы, основанные на различных физических принципах. Первая система позволяла фиксировать изменение кинематических параметров движения судна в процессе взаимодействия. Вторая система позволяла измерить общий изгиб судна в вертикальной плоскости с помощью тензометрии. По договору с заказчиком проекта все полученные данные являются коммерческой тайной, поэтому в статье приведены только некоторые качественные результаты выполненных исследований, без указания количественных характеристик.*

*Ключевые слова:* глобальная ледовая нагрузка, тензометрическая измерительная система, инерциальная измерительная система, уравнения движения судна, айсберг, торосистое образование.

#### ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время, несмотря на многолетние усилия российских и зарубежных ученых, вопрос разработки достоверной методики расчета глобальных ледовых нагрузок на шельфовые сооружения все еще остается открытым. Так, в статье Тимко и Кроасдейла [8] приводятся результаты расчетов ледовых нагрузок для четырех сценариев взаимодействия девятнадцатью экспертами из различных стран. В работе показано, что наиболее изученным является воздействие ровного однолетнего льда на сооружение с вертикальными стенками. В этом случае оценки экспертов, сделанные по различным методикам, отличались не более чем в 2 раза. Причем большинство исследователей указали данные натуральных измерений как основной источник информации для разработанных ими моделей расчетов. Случай воздействия торосистого льда на сооружение с наклонными стенками оказался самым сложным для оценки ледовых нагрузок — мнения экспертов существенно разошлись, и расчетные значения отличались более чем в 10 раз.

Такое положение вещей во многом связано с отсутствием данных натуральных измерений, необходимых для верификации результатов теоретических расчетов. Эти эксперименты связаны с большими финансовыми и временными затратами, как при подготовке испытаний, так и при обработке и интерпретации полученной информации.

Одним из наиболее перспективных, на наш взгляд, подходов является измерение глобальных нагрузок на судно и последующий пересчет полученных результатов на сооружение. Такой подход обладает рядом преимуществ. Во-первых, в качестве аналога сооружения выступает судно – объект, сравнимый с ним по своим размерам, что исключает проблемы, связанные с влиянием масштабного эффекта. Во-вторых, судно взаимодействует с натурным льдом, двигаясь при этом в различных ледовых условиях, что, соответственно, позволяет имитировать различные сценарии взаимодействия сооружения с ледяными образованиями.

Первой попыткой натуральных экспериментов по определению глобальных нагрузок, действующих на судно при взаимодействии со льдом, являются серии испытаний, проведенных Канадским гидравлическим центром [6, 7]. В ходе экспериментов с помощью двух приборов MOTAN (MOTion ANalysis) фиксировались кинематические параметры судна в процессе удара. В дополнение к системе MOTAN, в носовой части судна была смонтирована система тензометрических датчиков, с помощью которой, по замыслу авторов, можно было восстановить параметры пятна контакта с ледяным образованием.

Работы по оценке глобальной ледовой нагрузки в рамках экспедиции «Штокман-2008» имеют схожий замысел. Сама идея использовать для оценки глобальных ледовых нагрузок специально оборудованное судно появилась в ААНИИ в 80-х гг. прошлого века. По мере ее разработки подбирались составляющие элементы измерительной системы, прорабатывались расчетные методы, методика проведения испытаний и алгоритмы обработки результатов. Фрагментарно методика была опробована во время предыдущих арктических экспедиций НЭС «Академик Федоров» в 2007 г. и НЭС «Михаил Сомов» в 2006–2007 гг. Аналогично работам канадских ученых, основным способом измерения глобальной ледовой нагрузки при описываемом подходе является измерение кинематических параметров движения судна, вызванного взаимодействием с ледяным образованием. При этом для повышения надежности измерений и снижения риска отказов в систему было включено два прибора, каждый из которых измерял по шесть компонент движения судна независимо друг от друга.

Серьезным отличием от методологии, разработанной и используемой в Канадском гидравлическом центре, и, по нашему мнению, преимуществом является применение тензометрии для измерения напряжений в корпусных конструкциях при общем изгибе судна вследствие взаимодействия с ледяным образованием. Тензометрические датчики были установлены вдоль борта на баковой палубе, что позволило с помощью конечно-элементного анализа определить значение вертикальной компоненты глобальной ледовой нагрузки, не прибегая к восстановлению размеров пятна контакта и распределения контактного давления. Кроме того, такой подход к применению тензометрии позволил продублировать измерение вертикальной компоненты глобальной ледовой нагрузки еще одним, физически независимым способом.

#### **ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ**

Основной задачей проведенных экспериментов являлось определение глобальной силы, действующей на судно при его взаимодействии с ледяными образованиями. Для этой цели были использованы два измерительных комплекса: тензометрический и инерциальный, основанные на разных физических принципах. Главным критерием оценки корректности методик проведения экспериментов и обработки полученной информации, а также достоверности результатов может быть совпадение величины и характера изменения вертикальной силы, определенной разными способами. Далее приведено описание принципов, на которых основано применение обоих измерительных комплексов.

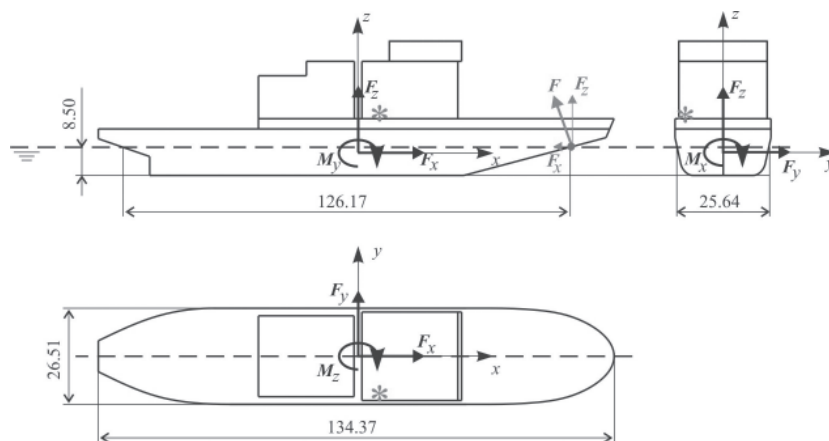
### Инерциальный измерительный комплекс

Базовой идеей теоретического обоснования использования инерциального измерительного комплекса было то, что движение судна при соударении со льдом можно рассматривать как движение твердого тела с шестью степенями свободы. Соответственно, кинематические параметры такого движения являются зависящим от времени вектором шести компонент (продольное, поперечное и вертикальное перемещения центра тяжести судна и три угловых перемещения: углы крена, дифферента и рыскания), а также первыми и вторыми производными этого вектора по времени (т.е. линейные и угловые скорости и ускорения). Соответственно, движение судна может быть описано системой обыкновенных дифференциальных уравнений, которые связывают кинематические параметры с главным вектором сил и главным моментом.

В основе дифференциальных уравнений движения судна лежат уравнения из теории маневренности и качки судна [2, 4, 5], в которые дополнительно включены выражения для сил, действующих на судно со стороны льда, и моментов этих сил. В целом система уравнений включает: три уравнения второго порядка, которые описывают рыскание и продольное и поперечное перемещения судна; два уравнения второго порядка килевой качки; уравнение второго порядка бортовой качки. Дифференциальные уравнения движения судна учитывают: силу тяжести судна; силу, действующую на судно со стороны льда; упор винта; гидродинамические силы на корпусе, включая гидростатические силы, инерционные и демпфирование.

Традиционно такая система дифференциальных уравнений используется для расчета параметров движения судна при известных силах и моментах, действующих на него. Однако в данном случае решается обратная задача. Все параметры движения – линейные и угловые ускорения, скорости и перемещения – являются результатами измерений в ходе экспериментов, а расчетными являются компоненты главного вектора силы и момента.

Для решения задачи определения внешних сил было подготовлено специальное оборудование, позволяющее измерять линейные ускорения и угловые скорости в процессе проведения эксперимента. Остальные параметры, а именно:



- \* Положение датчиков ДКВ и БИМ
- Точка приложения ледовой нагрузки

Рис. 1. Схема ледокола «Капитан Николаев» с указанием главных размерений, используемой системы координат и направлениями действия главных сил и моментов

линейные и угловые перемещения, линейные скорости и угловые ускорения — являются расчетными величинами и могут быть получены в результате первичного анализа данных измерений. С помощью дополнительных устройств также измерялись параметры пропульсивного комплекса.

Принятое при анализе данных измерений направление осей координат и направление компонент вектора действующих сил и моментов показано на рис. 1.

#### Тензометрический измерительный комплекс

Традиционно при измерении ледовых нагрузок на судах и сооружениях тензометрия используется для определения локальных нагрузок. При этом тензодатчиками оборудуется район корпуса, непосредственно контактирующий со льдом. При таком подходе возможно восстановление параметров нагрузки, действующей в месте установки оборудования. В экспериментах на ледоколе «Капитан Николаев» был реализован принципиально другой подход к использованию тензометрии.

Основным положением этого подхода является тот факт, что при взаимодействии с ледяными образованиями на носовую оконечность судна действует вертикальная сила, которая приводит к общему изгибу судна в вертикальной плоскости, в результате чего в корпусных конструкциях возникают дополнительные напряжения и деформации. Измерение этих деформаций позволяет оценить вертикальную компоненту глобальной ледовой нагрузки, не прибегая к восстановлению параметров локальной нагрузки. По мнению авторов, такой подход целесообразен, поскольку при взаимодействии судна с торосом возникает большая неопределенность с количеством пятен контакта, их положением и размерами.

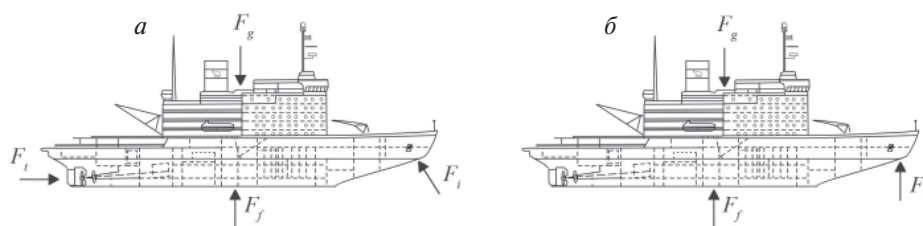


Рис. 2. Схема сил, действующих на судно при движении во льду

На рис. 2 *а* схематично показано распределение сил, действующих на судно при взаимодействии со льдом: силы тяжести ( $F_g$ ), силы поддержания ( $F_f$ ), ледовой силы ( $F_t$ ) и упора винта ( $F$ ). Однако сжимающие напряжения, вызванные действием горизонтальной составляющей ледовой нагрузки и упором винта, существенно меньше изгибных напряжений. Поэтому при анализе результатов можно использовать упрощенную схему сил, показанную на рис. 2 *б*, где на судно действуют 3 силы: сила тяжести, сила поддержания и вертикальная компонента ледовой силы.

#### Перечень измеряемых параметров

Суммируя все вышесказанное, можно составить перечень параметров, которые измеряются в ходе каждого эксперимента на судне, а именно:

- кинематические параметры движения судна: 3 угловые скорости и 3 линейных ускорения;
- напряжения в корпусных конструкциях при общем изгибе судна;
- параметры винторулевого комплекса судна: обороты винтов; угол перекладки руля.

Применение нескольких различных измерителей для фиксирования одних и тех же параметров существенно повышает надежность полученной информации.

Все измерения ведутся непрерывно на протяжении всего эксперимента с частотой опроса датчиков не менее 100 Гц. Использование высокой частоты дискретизации дает возможность минимизировать погрешности при обработке результатов.

Дополнительно, непосредственно перед экспериментом, должен выполняться комплекс ледоисследовательских работ, целью которого является определение массогабаритных характеристик ледяного образования, его внутреннего строения и прочностных свойств.

#### ЛЕДОКОЛ «КАПИТАН НИКОЛАЕВ»

Ледокол «Капитан Николаев» (рис. 3 а) спроектирован и построен фирмой Wärtsilä (Финляндия, Хельсинки) в 1978 г. под надзором Морского регистра СССР (ныне Российский морской регистр судоходства). В 1990 г., по инициативе финских кораблестроителей, ему была заменена носовая часть. Новая носовая оконечность получила форму, близкую к форме усеченного конуса. Чертеж ватерлиний в этом районе корпуса представлен на рис. 3 б.

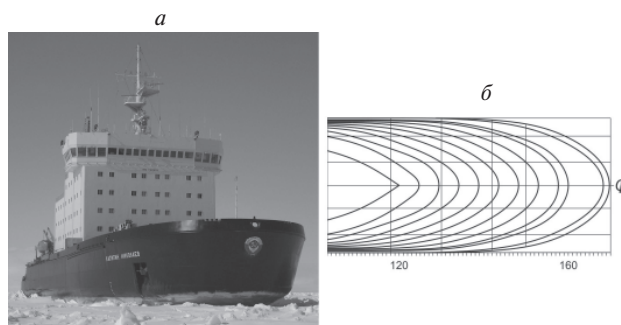


Рис. 3. Ледокол «Капитан Николаев»: общий вид (а) и ватерлинии в носовой оконечности (б)

Как отмечалось в докладе Гудошникова и др. [1], представленном на конференции РАО-2007, именно это судно является наиболее подходящим для проведения экспериментов по оценке глобальной ледовой нагрузки. Его отличительной особенностью является нетрадиционная форма носовой оконечности, имеющая форму, близкую к обратному конусу. Ширина ледокола составляет 26,9 м (табл. 1).

Таблица 1

Параметры ледокола «Капитан Николаев»

Постройка	Wärtsilä, 1978 г.
Классификационное общество	Российский Морской Регистр Судоходства
Категория ледовых усилений	ЛЛЗ
Скорость на чистой воде, узлы:	19,2
Длина наибольшая, м	134,80
Длина между перпендикулярами, м	121,15
Ширина, м	26,69
Высота борта, м	12,30
Осадка, м	8,50
Водоизмещение, т	16017
Главная энергетическая установка:	
тип	дизель-электрическая
количество ГД	6
мощность каждого ГД, кВт	3040
Винты:	
количество и тип	3 ВФШ
диаметр, мм	4300

Можно считать, что имеет место аналогия между взаимодействием ледяного образования с носовой частью этого судна и взаимодействием с шельфовым сооружением, имеющим коническую форму в районе ватерлинии. Соответственно, механизм разрушения льда при взаимодействии с судном, аналогичен процессам, происходящим при взаимодействии льда с сооружением. Следовательно, можно предположить отсутствие влияния масштабного эффекта.

#### **ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ВНЕШНЕГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА СУДНО**

##### **Тензометрический измерительный комплекс**

В качестве системы, позволяющей провести измерение вертикального усилия, был использован многоканальный измерительный тензометрический комплекс, позволяющий измерять деформации при общем изгибе корпуса судна в вертикальной плоскости.

Основным компонентом многоканального измерительного тензометрического комплекса являлась тензометрическая станция производства компании National Instruments Corporation (США). Станция включала в себя 5 модулей NI cRIO-9237. Каждый модуль имеет 4 одновременно опрашиваемых аналоговых входа, при этом частота опроса может варьироваться от максимального значения 50 кГц до минимального – 1,614 кГц. Каждый канал допускает подключение тензодатчиков по схемам «полный мост» и «полумост». Рабочий температурный диапазон станции от –40 до +70 °С. Модули NI cRIO-9237 штатно установлены на реконфигурируемое 8-слотовое шасси модели NI cRIO-9102. Тензостанция управляется встроенным контроллером модели NI cRIO-9012, с тактовой частотой процессора 400 МГц, с объемами оперативной и энергонезависимой постоянной памяти 64 и 128 Мб соответственно. Объем памяти позволяет вести непрерывную запись с 20 каналов на протяжении 3 часов. Для обмена информацией контроллер поддерживает Ethernet, USB и RS-232 интерфейсы. Рабочий температурный диапазон контроллера от –40 до +70 °С. В тензостанцию встроен источник постоянного напряжения 24 В серии LOGO Power производства компании Siemens, включающий блок бесперебойного питания с аккумуляторным модулем. Внешний вид тензометрической станции представлен на рис. 4.

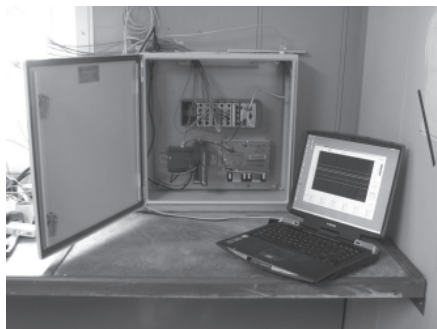


Рис. 4. Тензометрическая станция и управляющий компьютер

Для управления тензометрической станцией, регистрации данных и их последующей обработки был разработан специальный управляющий программный комплекс. Данное программное обеспечение позволяет осуществлять выбор каналов для записи, устанавливать частоту опроса каналов, производить запуск записи, сохранять и осуществлять экспорт данных в общедоступные форматы. Запуск записи может быть цифровой, аналоговый триггерный, по таймеру или по запросу оператора.



### Инерциальный измерительный комплекс

Для определения кинематических параметров судна в процессе удара о лед были использованы два прибора: ДКВ-21 и БИМ-003.12, каждый из которых состоял из трех акселерометров и трех измерителей угловых скоростей (гироскопов), размещенных ортогонально друг другу. Акселерометры измеряют общее ускорение (включая компоненту силы тяжести) вдоль осей  $X$ ,  $Y$  и  $Z$  судна. Гироскопы измеряют три компоненты угловой скорости вращения судна вдоль мгновенных положений осей  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ . Ниже приведено более детальное описание приборов, а на рис. 5 показан их внешний вид.

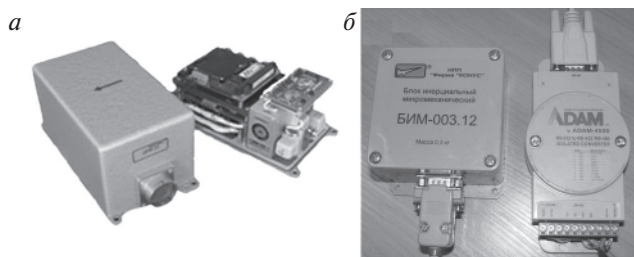


Рис. 5. Прибор ДКВ-21<sup>1</sup> (а) и прибор БИМ-003.12 (б)

Прибор ДКВ-21 производства ОАО АНПП «Темп-Авиа» (Россия) для определения кинематических параметров движения судна. Прибор осуществляет измерение проекций векторов линейного ускорения и угловой скорости на ортогональные оси связанной системы координат подвижного объекта. В качестве чувствительных элементов используются прецизионные акселерометры и оптоволоконные гироскопы.

Технические характеристики:

- диапазон измерения угловых скоростей – до 300 град/с с погрешностью 0,1 %;
- диапазон измерения ускорения – до 4g;
- средняя наработка на отказ – 5000 ч;
- время готовности – 3 мин;
- время непрерывной работы – 12 ч;
- выходной сигнал – аналоговый.

Сигналы с датчика поступали на вход установленной в переносном компьютере многофункциональной платы DAQCard-6062E производства National Instruments Corporation (США). Плата обеспечивала аналогово-цифровое преобразование сигнала и имела следующие технические характеристики: количество входных каналов – до 16, частота опроса каналов – до 500 тыс. считываний в секунду, разрешение – 12 бит. Программное обеспечение измерительной системы, обеспечивающее сбор и запись данных, а также их отображение в ходе испытания, состояло из программы VI Logger версии 1.0.1, выполнявшейся в среде Measurement & Automation Explorer версии 2.2.0.3010 (поставщик – National Instruments Corporation, США).

Прибор БИМ-003.02 производства научно-производственного предприятия ООО «Фирма «КОНУС» (Россия) для определения кинематических параметров движения судна. Прибор осуществляет измерение проекций векторов линейного ускорения и угловой скорости на ортогональные оси связанной системы координат подвижного объекта. В качестве чувствительных элементов используются прецизионные акселерометры и микромеханические гироскопы. Технические характеристики:

<sup>1</sup> Фотография скопирована с интернет-сайта компании ОАО АНПП «Темп-Авиа» – [www.temp-avia.ru](http://www.temp-avia.ru)

- диапазон измерения линейных ускорений – 0–100 м/с<sup>2</sup>;
- погрешность измерений линейных ускорений – не более 0,1 м/с<sup>2</sup>;
- скорость углового разворота – 0–300 угл. град/с;
- погрешность измерений угловой скорости – не более 1,0 угл. град/с;
- канал передачи информации – RS-485; частота выдачи информации – 100 Гц;
- диапазон рабочих температур от –40 до +50 °С;
- ресурс – 150 тыс. ч;
- напряжение питания 10–15 В; средняя потребляемая мощность – 6,0 Вт;
- габаритные размеры – 80×80×60 мм; масса – 0,2 кг.

#### Дополнительное оборудование

При разработке методологии проведения экспериментов большое внимание уделялось дублированию измерений одних и тех же параметров различными способами с целью обеспечить максимальную достоверность полученных результатов. В частности, различными способами измерялись не только основные параметры, определение которых являлось главной задачей экспериментов, но и вспомогательные. Например, изменение скорости в горизонтальной плоскости имеет определяющее значение при расчете горизонтальной компоненты общей силы. В силу важности этой компоненты, в ходе экспериментов применялось несколько способов измерений горизонтальной скорости.

#### *Измерение горизонтальной скорости*

Первый способ – это расчет скорости по изменению географических координат. Для этого использовался GPS-приемник Garmin-72, позволяющий ежесекундно фиксировать координаты судна. Учитывая, что погрешность измерений географических координат с помощью такого GPS-приемника в высоких широтах может достигать 15–20 м, применялись и другие, более точные способы измерения скорости судна.

Второй способ – это определение скорости по обработке видеосъемки разметки на льду. Разметка выполнялась во время работ на ледовой станции с помощью флагов и/или нанесения меток краской непосредственно на поверхности льда или снега вдоль предполагаемого маршрута движения судна. Все точки разметки имели геодезическую привязку, следовательно, с точностью до сантиметров было известно их взаимное расположение. В ходе эксперимента, с помощью видеокамеры, установленной на баковой палубе судна и ориентированной перпендикулярно направлению движения, выполнялась видеосъемка движения судна вдоль размеченного участка. Для расчета скорости видеозапись раскладывалась на отдельные кадры. На рис. 6 проиллюстрирован процесс вычисления скорости движения ледокола в горизонтальной плоскости. На рис. 6 *а* представлен началь-

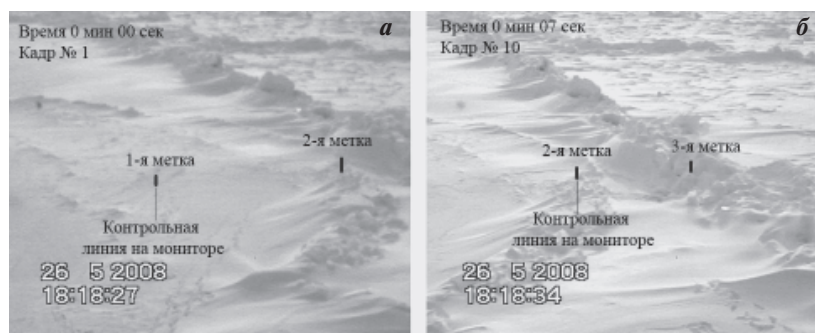


Рис. 6. Иллюстрация определения скорости движения ледокола с помощью разметки на льду и видеосъемки: кадры, соответствующие прохождению первой метки (*а*) и второй метки (*б*)



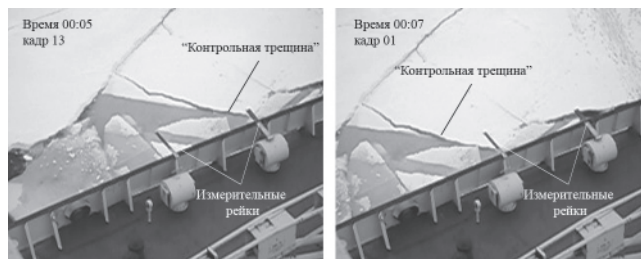


Рис. 7. Иллюстрация определения скорости движения ледокола с помощью бортовых реек и видеосъемки

ный момент записи, когда с контрольной линией на экране совпадает первая метка на льду, а на рис. 6 б с контрольной линией совпадает вторая метка. Учитывая, что видеосъемка производилась с частотой 25 кадров в секунду, временной промежуток между этими кадрами составил 7,4 с. По данным геодезической привязки расстояние между 1-й и 2-й метками – 9,8 м, соответственно, скорость ледокола на этом участке – 1,32 м/с. Такой способ надежно работает в случае, если судно движется строго параллельно разметке на льду. При отклонении от заданного курса погрешность измерения скорости значительно возрастает.

Третий способ – это определение скорости путем цифровой обработки видеосъемки измерительных реек, закрепленных на фальшборте перпендикулярно борту судна, – хорошо зарекомендовавший себя метод «планширного лага». Как и во втором способе, видеосъемка разбивалась на отдельные кадры, и фиксировалось время, за которое между рейками проходил какой-нибудь неподвижный ориентир на льду: трещина, след, кусок льдины и т.д. На рис. 7 показаны два кадра, временной промежуток между которыми составил 1,6 с (для этой видеокамеры частота кадров в секунду равна 30). За это время «контрольная трещина» проходит вдоль борта судна от одной рейки до другой. Учитывая, что расстояние на льду, которое видно с места установки видеокамеры, составляло 4,2 м, рассчитанная скорость движения ледокола – 2,6 м/с. Этот способ можно применять в случае, если контрольные метки на льду остаются неподвижными во время движения судна вдоль них. А также только в случае движения судна в ровном льду, так как при наличии торосов под бортом изменяется расстояние от измерительных реек до поверхности льда, что в свою очередь изменяет расстояние, которое видно на льду между рейками, и, следовательно, ведет к ошибкам в расчете скорости.

Как правило, в ходе экспериментов, для повышения надежности полученных данных, скорость измерялась двумя способами: с помощью GPS и с помощью одного из видеометодов. Однако стоит отметить, что скорости, рассчитанные с помощью описанных выше методов, использовались, в первую очередь, для определения скорости движения судна непосредственно перед началом взаимо-

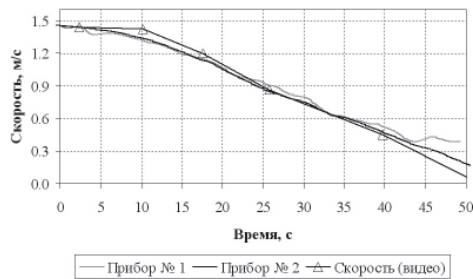


Рис. 8. Сопоставление скоростей движения ледокола, измеренных разными способами

действия с ледяным образованием, а далее скорости рассчитывались по измеренным ускорениям в горизонтальной плоскости. Дело в том, что в процессе взаимодействия судно отклонялось от первоначального курса и переставало двигаться параллельно разметке на льду, что существенно влияло на точность определения скорости по способу № 2. Однако в некоторых случаях было возможно сопоставление скоростей, измеренных разными способами. В качестве примера на рис.8 представлено изменение скорости ледокола в одном из экспериментов. Наблюдается достаточно хорошее совпадение скорости, определенной по видеосъемке, и скоростей, рассчитанных по измеренным ускорениям судна.

#### *Определение параметров работы винто-рулевого комплекса и ЭУ*

Измерения параметров работы винто-рулевого комплекса и ЭУ ледокола включали измерения оборотов гребных винтов и угла перекладки руля.

К сожалению, для измерений параметров, характеризующих работу пропульсивного комплекса, не было возможности установить специализированное оборудование. Поэтому для получения информации о его работе был использован метод видеосъемки показаний соответствующих приборов на рулевом мостике ледокола во время проведения экспериментов.

Для решения уравнений движения судна необходимо значение суммарного упора винтов. Эти значения вычислялись с помощью зависимостей упора винтов от оборотов и скорости движения судна, которые входят в комплект технической документации, имеющейся на судне. Вся необходимая информация была любезно представлена капитаном ледокола.

#### **Размещение оборудования на борту ледокола**

Инерциальные датчики были установлены на баковой палубе в лабораторном помещении вблизи центра тяжести судна на расстоянии 6,4 м в нос от мидель-шпангоута и 10 м от диаметральной плоскости по правому борту. Приборы были жестко скреплены между собой. Это было сделано для проверки достоверности полученных данных: в идеальном случае показания обоих приборов должны были совпасть.

Тензодатчики были установлены вдоль правого борта на баковой палубе. Только один был установлен в районе миделя на левом борту. Длина района расположения датчиков составляла около 50 м.

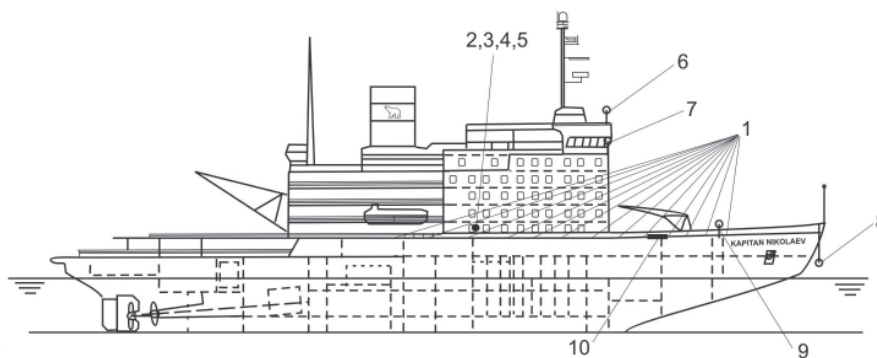


Рис. 9. Схема размещения измерительного оборудования на ледоколе «Капитан Николаев» во время экспериментального рейса:

1 – тензодатчики на баковой палубе для определения общего продольного изгиба судна (13 измерительных схем типа «мост» были установлены вдоль правого борта, а один – на левом борту в районе мидель-шпангоута); 2 – тензостанция; 3 – прибор ДКВ-21; 4 – прибор БИМ-003.02; 5 – GPS-антенна; 6 – видеокамера на пеленгаторной палубе; 7 – видеокамеры на ходовом мостике для фиксации измерения угла перекладки руля и оборотов винтов по судовым приборам; 8 – видеокамера, установленная под форштевнем; 9 – бортовая видеокамера; 10 – рейки, установленные на фальшборте, для измерения скорости судна в процессе взаимодействия с ледяным образованием

Видеокамеры, с помощью которых фиксировались изменения скорости движения судна в процессе взаимодействия с ледяным образованием и контролировались параметры работы винторулевого комплекса судна, располагались на ходовом мостике.

На рис. 9 показано размещение измерительного оборудования.

## ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ

### Тензометрическая измерительная система

Использование данных тензометрии во время экспедиции планировалось только для определения вертикальной компоненты глобальной ледовой нагрузки. Основной принцип работы этого направления может быть сформулирован следующим образом: восстановление глобальной нагрузки по глобальным реакциям. Для этой работы на открытой баковой палубе ледокола была размещена группа тензорезисторов, разнесенных по длине судна. Всего было задействовано 8 каналов, их положение показано на рис.10.

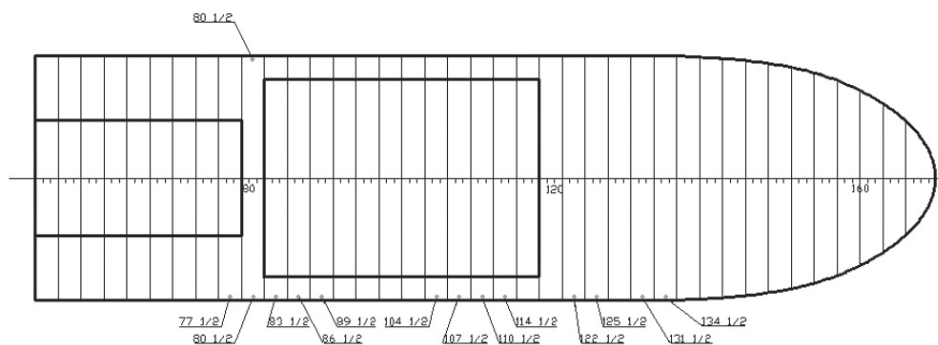


Рис. 10. Схема размещения тензодатчиков на баковой палубе ледокола «Капитан Николаев»

Процедура восстановления глобальной ледовой нагрузки по данным тензометрии сводится к последовательности:

- приведение показаний тензодатчиков к значениям напряжений;
- определение зависимости напряжений в точках размещения тензодатчиков от вертикальной компоненты глобальной ледовой нагрузки;
- пересчет напряжений в точках в значение вертикальной компоненты.

Особенностью работы использованной тензометрической станции является регистрация показаний тензодатчиков в виде условной деформации, равной отно-

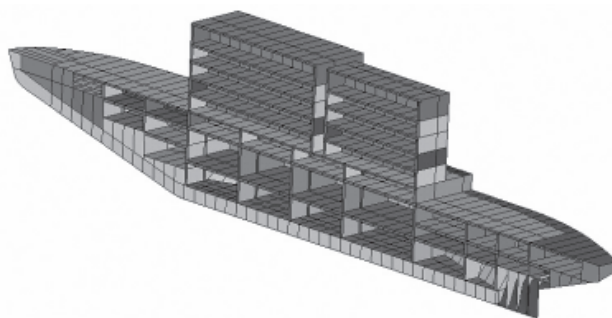


Рис. 11. Трехмерная конечно-элементная модель ледокола «Капитан Николаев»

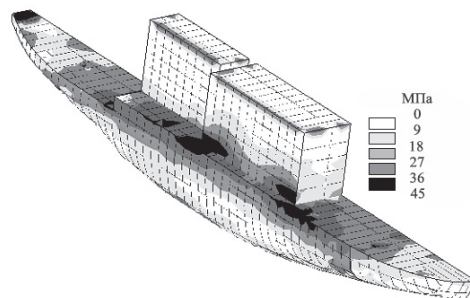


Рис. 12. Эквивалентные напряжения по Мизесу при приложении на носовом перпендикуляре силы, направленной вертикально вверх

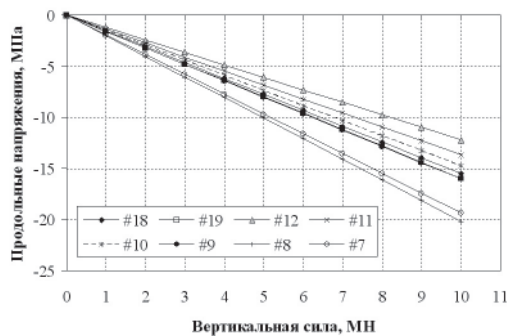


Рис. 13. Зависимость продольных напряжений от вертикального усилия на носовом перпендикуляре для точек установки тензодатчиков (в легенде указан номер датчика)

шению  $U/V$ , где  $V$  – падение напряжения,  $U$  – опорное напряжение. Для получения истинного значения деформации это значение необходимо домножить на коэффициент, зависящий от вида напряженно-деформированного состояния. Таким образом, значение напряжений в точках размещения тензодатчиков были получены по формуле:

$$\sigma_x = -E \frac{2}{GF} \cdot \frac{V}{U}.$$

Определение зависимости напряжений в точках размещения тензодатчиков было проведено с использованием конечно-элементного анализа. Была разработана 3D конечно-элементная модель ледокола «Капитан Николаев», учитывающая форму корпуса, характерные особенности конструкции, распределение сил веса и поддержания. Ее вид представлен на рис. 11. Взаимодействие с ледяным образованием моделировалось приложением вертикальной силы в районе носового перпендикуляра. В результате анализа была получена картина напряженно-деформированного состояния корпуса судна, показанная на рис. 12, а итогом анализа стало получение зависимостей вида для каждой точки размещения тензодатчиков. Эти зависимости носят линейный характер, показанный на рис. 13.

#### Инерциальная измерительная система

Как уже говорилось выше, в экспериментах использовались два функционально одинаковых, но различных по исполнению прибора для измерения линейных ускорений и угловых скоростей судна в процессе удара о лед. Так как приборы были жестко соединены, при нормальной работе приборов показания их должны быть очень близки. В качестве примера на рис. 14 приведены значения вер-

тикальных ускорений, зафиксированные двумя приборами во время одного из экспериментов. Можно видеть, что показания практически совпадают. Аналогичная картина наблюдалась и в других экспериментах и по другим измерительным каналам. Совпадение показаний двух приборов свидетельствует о корректной работе измерительного комплекса.

Упрощенная для решения данной задачи система уравнений движения судна имеет следующий вид [4, 5]:

$$\begin{aligned} -\rho D(1+k_{11})\frac{dV}{dt} - C_T \frac{\rho}{2} V^2 S_w + T_E &= F_x, \\ -\rho D(1+k_{11})V\omega - C_{YR}^\alpha \left( \delta_R + c_2 \frac{\tilde{I}_{RM}L}{V} \omega \right) \frac{\rho}{2} V^2 A_{L\sigma} &= F_y, \\ (D + \lambda_{33})\frac{d^2z}{dt^2} + \mu_{33} \frac{dz}{dt} + \rho g A_w z &= F_z, \\ -I_{zz}(1+k_{66})\frac{d\omega}{dt} - C_{M\omega}^\omega \frac{\rho}{2} V A_{L\sigma} L^2 \omega - C_{YR}^\alpha I_{RM} \left( \delta_R + c_2 \frac{\tilde{I}_{RM}L}{V} \omega \right) \frac{\rho}{2} V^2 A_{L\sigma} &= M_z, \\ (I_{xx} + \lambda_{44})\frac{d^2\phi}{dt^2} + \mu_{44} \frac{d\phi}{dt} + \overline{DGM}\phi &= M_x, \\ (I_{yy} + \lambda_{55})\frac{d^2\theta}{dt^2} + \mu_{55} \frac{d\theta}{dt} + \overline{DGM}_L\theta &= M_y. \end{aligned}$$

В этих уравнениях искомыми величинами являются  $F_x, F_y, F_z$  – компоненты глобальной силы, действующей на судно со стороны льда;  $M_x, M_y, M_z$  – моменты силы, действующей на судно со стороны льда, относительно соответствующих осей.

Напрямую в ходе эксперимента измерялись:  $\frac{dV}{dt}$  – горизонтальное ускорение судна;  $\frac{d^2z}{dt^2}$  – вертикальное ускорение судна;  $\omega$  – угловая скорость вращения судна относительно вертикальной оси;  $\frac{d\phi}{dt}$  – угловая скорость вращения судна вокруг продольной оси;  $\frac{d\theta}{dt}$  – угловая скорость вращения судна вокруг поперечной оси.

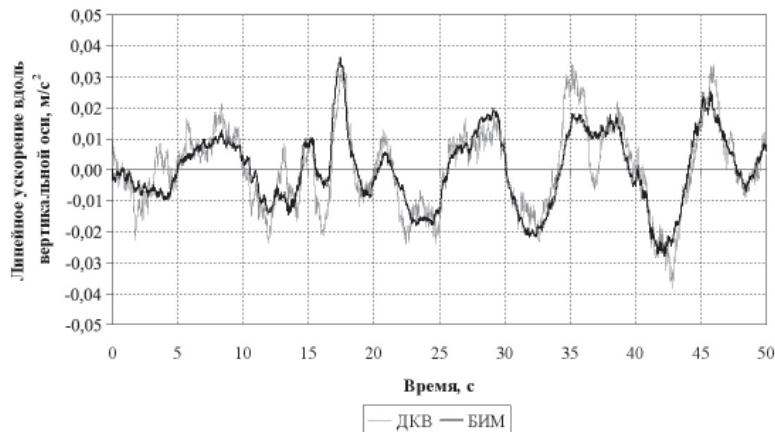


Рис. 14. Сопоставление исходных записей ускорений, полученных по двум приборам

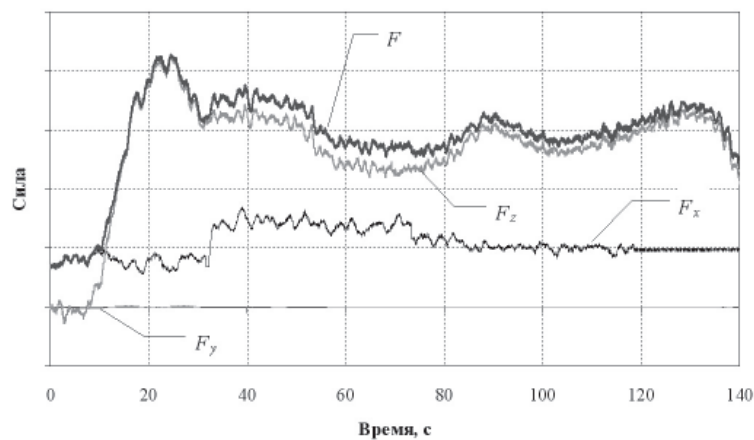


Рис. 15. Рассчитанные силы, действующие на судно при взаимодействии с торосистым образованием

С помощью операций численного интегрирования и дифференцирования измеренных угловых скоростей и линейных ускорений были получены:  $V$  – скорость судна в горизонтальной плоскости;  $\frac{dz}{dt}$ ,  $z$  – вертикальные скорость и перемещение судна;  $\frac{d^2\phi}{dt^2}$  – угловое ускорение вращения судна вокруг продольной оси;  $\phi$  – угол крена;  $\frac{d^2\theta}{dt^2}$  – угловое ускорение вращения судна вокруг поперечной оси;  $\theta$  – угол дифферента. Тяга винта  $T_E$  рассчитывалась с помощью измеренных в эксперименте оборотов винтов и скорости судна. Остальные компоненты уравнений являются характеристиками судна, которые содержатся в нормативно-технической документации по судну либо рассчитываются по известным зависимостям [5].

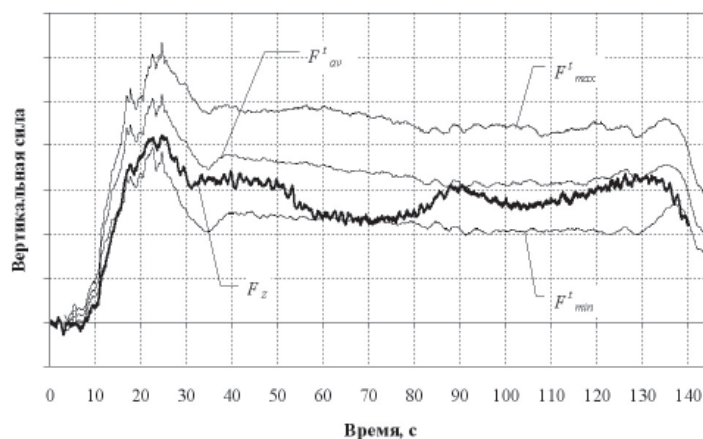


Рис.16. Сопоставление результатов расчета вертикальной компоненты силы по данным тензометрии ( $F_{\min}^1$  – оценка снизу,  $F_{\max}^1$  – оценка сверху,  $F_{\text{ав}}^1$  – среднее значение) и по данным инерциальных измерительных систем ( $F_z$ )



С помощью системы уравнений для каждого эксперимента были рассчитаны  $F_x$ ,  $F_y$ ,  $F_z$ ,  $M_x$ ,  $M_y$ ,  $M_z$  в зависимости от времени. Суммарная нагрузка со стороны льда определялась как  $F = \sqrt{(F_x)^2 + (F_y)^2 + (F_z)^2}$ . В качестве примера на рис. 15 приведены результаты расчета сил для одного из экспериментов. В начале этого эксперимента на протяжении 10 секунд судно двигалось в ровном льду. На этом участке определяющей составляющей полной силы являлась продольная компонента. Далее произошел контакт с торосистым образованием, в результате которого ледокол начал «наползать» на торос, соответственно появилась дополнительная вертикальная сила, действующая на форштевень судна. Именно вертикальная компонента силы давала наибольший вклад в значение общей силы. Продольная компонента составляла от 30 до 50 % вертикальной компоненты. Такое соотношение между составляющими вектора полной силы объясняется особенностями геометрии носовой оконечности судна, а именно углом наклона форштевня. Поперечная же компонента силы была несоизмеримо мала по сравнению с двумя другими. Это связано с тем, что при взаимодействии с торосом ледокол двигался практически прямолинейно, соответственно вектор суммарной силы фактически лежал в диаметральной плоскости судна.

В качестве обоснования достоверности полученных результатов было проведено сопоставление значений вертикальной компоненты силы, действующей на носовую часть судна, рассчитанных по данным инерциальной измерительной системы и по данным тензометрии. В большинстве экспериментов наблюдалась хорошая корреляция между этими величинами на протяжении всего времени взаимодействия судна со льдом. Пример приведен на рис. 16.

#### ВЫВОДЫ

По мнению авторов, метод оценки глобальных ледовых нагрузок, разработанный в ААНИИ и реализованный в экспедиции «Штокман-2008», полностью оправдал себя и может быть использован в дальнейшем при совершенствовании методов расчета ледовых нагрузок на суда и шельфовые сооружения. По результатам работы можно сделать следующие выводы.

Разработан и внедрен многофункциональный измерительный комплекс.

Разработана и апробирована методика проведения натуральных экспериментов по оценке глобальной ледовой нагрузки при взаимодействии судна с различными типами ледяных образований.

Разработана и апробирована методика обработки полученных данных измерений.

Получены оценки глобальной нагрузки при взаимодействии судна с ледяными образованиями различных типов.

Надежность результатов подтверждается совпадением расчетных значений одних и тех же величин, оцененных по данным различных измерений. Поэтому авторы считают необходимым условием получения достоверных оценок при проведении аналогичных экспериментов использование как минимум двух физически независимых измерительных систем – кинематической и тензометрической, как это было сделано в экспедиции «Штокман-2008».

Весьма важным положительным отличием описываемых натуральных испытаний от экспериментов, проведенных канадскими учеными [7, 8], является то, что исследования глобальных ледовых нагрузок в экспедиции «Штокман-2008» проводились в комплексе с широким фронтом ледоисследовательских работ по программе, разработанной лабораторией «Арктик-шельф». Основным их результатом является определение массогабаритных характеристик ледяных образований, их внутреннего строения и прочностных свойств, необходимых для уточнения характеристик внешних сил, входящих в уравнения движения судна.

Авторы выражают благодарность д-ру геогр. наук Зубакину, организатору и научному руководителю экспедиции, канд. геогр. наук Гудошникову Ю.П., возглавившему проведение натурных испытаний, а также канд. техн. наук Степанову И.В. и д-ру техн. наук Тимофееву О.Я. за помощь в разработке методик проведения экспериментов и обработки результатов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гудошников Ю.П., Тимофеев О.Я., Чернов А.В., Крупина Н.А. Экспериментальные исследования по оценке глобальных ледовых нагрузок в районе ШГКМ // Труды конференции РАО-07. СПб. 2007. Электрон. опт. диск (CD-ROM).
2. Мирохин Б.В., Жинкин В.Б., Зильман Г.И. Теория корабля. Л.: Судостроение, 1989. 352 с.
3. Правила классификации и постройки морских судов. Российский морской регистр судоходства. Т. 1. СПб., 2008. 500 с.
4. Справочник по строительной механике корабля / Бойцов Г.В., Палий О.М., Постнов В.А., Чувиковский В.С. В 3 т. Т. 2. Пластины. Теория упругости, пластичности и получести. Численные методы. Л.: Судостроение, 1982. 464 с.
5. Справочник по теории корабля / Под редакцией Я.И.Войткунского. Л.: Судостроение, 1985. Т. 1. Гидромеханика. Сопротивление движению судов. 768 с. Т. 2. Статика судов. Качка судов. 440 с. Т. 3. Управляемость водоизмещающих судов. Гидродинамика судов с динамическими принципами поддержания. 544 с.
6. Johnston M., Ritch R., Gagnon R. Comparison of impact forces measured by different instrumentation system on the CCGS Terry Fox during the Bergy Bit Trials // Cold Regions Science and Technology. Special issue: Bergy Bit Impact Trials. 52 (2008). P. 83–97.
7. Johnston M., Timco G.W., Frederking R., Miles M. Measuring global impact forces on the CCGS Terry Fox with an internal measurement system called MOTAN // Cold Regions Science and Technology. Special issue: Bergy Bit Impact Trials. 52 (2008). P. 67–82.
8. Timco G.W., Croasdale K.R. How well can we predict ice loads? Proceedings 18th International Symposium on Ice, IAHR06 (2006). Vol. 1. P. 167–174.

V.A.LIKHOMANOV, A.V.CHERNOV, N.A.KRUPINA

#### EXPERIMENTAL IMPLEMENTATION OF THE METHOD OF GLOBAL ICE LOADS' ESTIMATION DURING THE EXPEDITION «SHTOKMAN-2008»

*The article contains detailed description of methods and the used equipment for full-scale experiments for estimation of global ice loads on ship. According to the commission of Shtokman Development AG AARI together with representatives of Oceanology Research Institute conducted the expedition «Shtokman-2008» in May-June, 2008 on board of the icebreaker «Kapitan Nikolaev» in the North-East part of the Barents Sea. The target was to define global ice load applied to the ship by ice formations, namely, level ice, hummocks, ridges and bergy bits. To define forces applied to the ship it was equipped with 2 measuring systems based on various physical principles. The first system allowed to fix changes of kinematic parameters of the ship movement during interaction. The second system allows to measure general bending of the ship in the vertical surface with a help of tensometry. Because of confidential policy, qualitative results of the research only are presented in the article, without any quantitative parameters.*

*Key words:* global ice load, tensometry measurement system, inertial measurement system, equations of ship motion, bergy bit, ridge