

*На правах рукописи*



**ПЕТРОВ**  
**Алексей Анатольевич**

**РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ РАСЧЕТА ПРЕДЕЛЬНОЙ И УСТАЛОСТНОЙ  
ПРОЧНОСТИ СТАЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ МОРСКОЙ ТЕХНИКИ,  
ЭКСПЛУАТИРУЕМОЙ ПРИ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ**

Специальность:  
05.08.01 – Теория корабля и строительная механика

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Санкт-Петербург  
2019

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский государственный морской технический университет» (СПбГМТУ) на кафедре конструкции и технической эксплуатации судов

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор  
**Крыжевич Геннадий Брониславович**  
 начальник сектора прочности и конструкции высокоскоростных судов и технических средств освоения шельфа ФГУП «Крыловский государственный научный центр»

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук, профессор  
**Волков Александр Евгеньевич**  
 профессор кафедры теории упругости математико-механического факультета ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет»

кандидат технических наук  
**Шишулин Денис Николаевич**  
 начальник отдела экспериментальной прочности и систем диагностики АО «Опытное Конструкторское Бюро Машиностроения имени И.И. Африкантова»

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт машиноведения им. А. А. Благонравова Российской академии наук»

Защита состоится «29» мая 2020 г. в 10-00 на заседании диссертационного совета Д 411.004.02 при ФГУП «Крыловский государственный научный центр» по адресу: 196158, г. Санкт-Петербург, Московское шоссе, д. 44.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на официальном сайте ФГУП «Крыловский государственный научный центр» (<http://krylov-centre.ru/about/councils/obyavleniya-ob-otkrytykh-zashchitakh/>).

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ г.

Учёный секретарь диссертационного совета  
 кандидат технических наук, доцент



О. В. Малышев

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

### **Актуальность темы исследования**

Анализ ряда документов стратегического планирования Российской Федерации (РФ) показывает, что в период 2020-2030 гг. будет наблюдаться стабильный рост разведки и освоения нефтегазовых месторождений на арктическом шельфе с достаточно надежным долгосрочным прогнозом. Проектирование объектов морской инфраструктуры, предназначенных для работы в арктических условиях, сопряжено с решением множества научно-изыскательских и инженерных задач, среди которых немаловажной является проблема компромисса между снижением материалоемкости таких объектов и сохранением установленного уровня эксплуатационной надежности. Одним из характерных свойств стальных конструкций является снижение резервов пластического деформирования при понижении температуры эксплуатации объекта, что вызывает необходимость предотвращения вероятности возникновения хрупких разрушений таких конструкций на ранних этапах проектирования. Существующие подходы к обеспечению низкотемпературной прочности стальных конструкций имеют ряд недостатков, приводящих либо к необоснованному завышению запасов прочности, и, как следствие, материалоемкости, либо к необходимости использовать дорогостоящие материалы и технологии. В этой связи, разработка надежных научно-обоснованных методов расчета низкотемпературной прочности конструкций, учитывающих конструктивно-технологические особенности морских объектов, работающих на арктическом шельфе РФ, является достаточно актуальной задачей, решение которой предоставит ряд конкурентных преимуществ отечественным судостроительным и металлургическим предприятиям.

### **Степень разработанности темы**

При подготовке работы использовались результаты исследований низкотемпературной прочности стальных и, в том числе, сварных конструкций, выполненные ведущими отечественными и зарубежными учеными: В. В. Новожиловым, Н. А. Махутовым, Г. В. Бойцовым, Г. А. Николаевым, Л. А. Копельманом, Kim Wallin, Mons Hauge и др. Существенные научные достижения в этой области были сделаны специалистами ЦНИИ КМ «Прометей», прежде всего И. В. Горыниным и А. В. Ильиным, занимавшимся вопросами создания и внедрения в судостроение новых сталей для конструирования арктических объектов, с соответствующим обоснованием их технологических и эксплуатационных особенностей.

### **Цели и задачи диссертационной работы**

Целью настоящей работы является разработка методов прямого расчета низкотемпературной предельной и усталостной прочности конструкций морской техники, основанных на таких критериях прочности, которые обеспечивают достоверность расчетов для создания рациональных

конструкций, эксплуатирующихся при низких температурах. Поставленная цель достигнута за счет решения следующих задач:

- анализа недостатков традиционных методов обеспечения прочности судов и морских нефтегазодобывающих платформ, традиционных формулировок критериев разрушения;
- формулировки новых критериальных зависимостей для оценки предельного состояния конструкций с концентраторами напряжений и эксплуатируемых при низких температурах;
- разработки новых эффективных методов расчета низкотемпературной предельной и усталостной прочности конструкций, обеспечивающих высокий уровень достоверности расчетных оценок с возможностью их использования для создания более экономичных и надежных сооружений;
- сопоставления традиционных и новых критериев и методов расчета с учетом экспериментальных данных по разрушению образцов с концентраторами напряжений.

### **Научная новизна**

В диссертационной работе получены следующие научные результаты, обладающие существенной новизной:

1. Математические модели вязкого и хрупкого разрушения узлов конструкций, отличающиеся использованием новых критериев статической прочности, позволяющих учитывать:

- формирование условий для нарушения в сплошности материала не в точке, а в его конечном объеме;
- влияние совместного действия низкой температуры и трехмерности напряженно-деформированного состояния узлов на снижение резервов пластического деформирования и предельной нагрузки конструкции;
- влияние конструктивно-технологических факторов на процесс разрушения.

2. Численный метод расчета предельной прочности, позволяющий дать количественную оценку запаса прочности конструкции и определить какой тип разрушения (хрупкое или вязкое) будет являться критическим для исследуемого объекта при заданной температуре эксплуатации и принятом конструктивном оформлении отдельных узлов.

3. Новые математические модели усталостного разрушения, учитывающие зависимость усталостной прочности сварных конструкций от температуры. По результатам испытаний на циклическое нагружение сварных образцов со стыковыми швами и с приваренными планками установлено, что в условиях низких температур усталостная прочность конструкции в малоциклового области ниже, а в многоциклового области – выше по сравнению с прочностью при комнатной температуре.

4. Метод расчета низкотемпературной усталостной прочности, отличающийся от используемых в судостроении учётом:

- совместного влияния низкой температуры и трехмерности напряженно-деформированного состояния узлов на снижение резервов пластического деформирования и ускоренного развития усталостных повреждений в малоцикловой области;
- увеличения пределов прочности и текучести материала при понижении температуры и замедленного развития усталостных повреждений при циклах нагружения  $N > 10^4 - 10^5$ .

### **Теоретическая и практическая значимость работы**

Предложенные в работе интегральные критерии статического разрушения конструкций, учитывающие влияние температурного фактора и концентраторов напряжений, могут быть использованы при математическом моделировании сложного нагружения сварных конструкций и в междисциплинарных расчетах их прочности. Практическая значимость новых методов расчёта низкотемпературной предельной и усталостной прочности конструкций заключается в:

- снижении риска возникновения низкотемпературных хрупких и вязких разрушений конструкций морской техники при действии статических нагрузок;
- повышении достоверности прогнозирования эксплуатационного ресурса конструкций морской техники, эксплуатирующейся в условиях низких температур;
- повышении надежности и эксплуатационной безопасности судов и нефтегазодобывающих платформ, эксплуатирующихся в условиях низких температур;
- обеспечении их рационального конструирования и снижении материалоемкости;
- появлении новых возможностей для принятия решений по использованию материалов и технологий при проектировании и строительстве таких объектов;
- обеспечении принятия обоснованных решений при оценке уровня безопасной эксплуатации уже построенной морской техники в условиях более низких температур (по сравнению с заложенными в проектной документации).

### **Методы исследований**

Для решения задач, поставленных в диссертационной работе, использовались методы и положения механики сплошных сред, в частности теория упругости, теория пластичности и механика разрушения, а также методы вычислительной механики для верификации полученных результатов.

### **Положения, выносимые на защиту**

На защиту выносятся следующие положения диссертационной работы:

1. Интегральные критерии хрупкого и вязкого разрушения конструкций при обычной и низкой температуре, обеспечивающие повышенный уровень точности прогнозирования нарушения целостности конструктивных элементов.

2. Численный метод расчета низкотемпературной статической прочности конструкций.

3. Способы расчета параметров деформационных и силовых критериев усталостного разрушения с учетом температурного фактора, адаптированные для расчета усталостной прочности стальных конструкций при низких температурах.

4. Метод расчета усталостной прочности стальных конструкций, эксплуатирующихся в низкотемпературных условиях.

### **Степень достоверности и апробация результатов**

Достоверность разработанных методов и математических моделей обеспечивается корректным использованием положений строительной механики, механики сплошной среды, а также сравнением расчетных данных, полученных с использованием предлагаемых критериев, с результатами экспериментов и численного моделирования в специализированном программном обеспечении, верифицированном ведущими классификационными обществами.

Результаты исследования докладывались и обсуждались на следующих научно-технических конференциях и заседаниях экспертных сообществ:

1. Международная конференция по судостроению и океанотехнике НАОЕ-2016, 6-8 июля 2016 г., Санкт-Петербург, ФГБОУ ВО «СПбГМТУ».

2. Научно-техническая конференция по строительной механике корабля памяти Ю. А. Шиманского, 14-15 декабря 2016 г., Санкт-Петербург, ФГУП «Крыловский государственный научный центр».

3. Девятая международная конференция «Военно-морской флот и судостроение в современных условиях», 29-30 июня 2017 г. Санкт-Петербург, ФГУП «Крыловский государственный научный центр».

4. Четырнадцатая конференция пользователей CADFEM / ANSYS, 31 октября – 2 ноября 2017 г., Санкт-Петербург.

5. Всероссийская научно-техническая конференция молодых ученых и специалистов «Научно-технологическое развитие судостроения (НТРС-2017)», 16-17 ноября 2017 г., Санкт-Петербург, ФГУП «Крыловский государственный научный центр».

6. Всероссийская научно-техническая конференция по строительной механике корабля, посвященная памяти профессора В. А. Постнова, 13-14 декабря 2017 г., Санкт-Петербург, ФГБОУ ВО «СПбГМТУ».

### **Внедрение результатов работы**

В ходе работы над диссертацией была определена и обоснована возможность использования сварных форштевней на судах ледовых классов Arc5, Arc6 и Arc7 Российского морского регистра судоходства (РМРС), в то

время как действующие на тот момент Правила РМРС допускали использование на таких судах только литых или кованных форштевней. В результате предложений, сформулированных при творческом участии автора, в часть II «Корпус» и часть XIV «Сварка» Правил классификации и постройки морских судов РМРС, 2017 г. были внесены соответствующие корректировки (циркулярное письмо РМРС № 314-26-985ц от 22.02.2017 г.)

### **Публикации и патенты по теме диссертации**

По результатам исследований, представленных в диссертационной работе, опубликовано 11 научных работ, из которых 7 опубликованы в научных изданиях, рекомендованных Перечнем рецензируемых научных изданий ВАК РФ, в том числе 2 работы – в издании, включенном в международную реферативную базу данных Web of Science. Доля авторства: 100% - в 3 работах, 50% - в 6 работах, 33% - в 2 работах.

В соавторстве (50%) получены 1 Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ и 1 Свидетельство о государственной регистрации базы данных.

### **Структура и объем диссертации**

Диссертация содержит титульный лист, содержание, введение, 4 главы основного текста, заключение, список литературы; изложена на 166 листах машинописного текста, содержит 48 рисунков, 8 таблиц, список литературы из 206 наименований литературных источников.

## **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** приводится краткое описание существующей проблемы нормирования и расчетной оценки низкотемпературной прочности объектов морской инфраструктуры, обосновывается актуальность диссертационной работы, формулируются основная цель и задачи исследования.

**Первая глава** содержит описание конструктивно-технологических особенностей нефтегазодобывающих платформ, ледоколов и судов ледового плавания, характеристики и свойства сталей, используемых при их конструировании и всесторонний обзор существующих подходов к обеспечению низкотемпературной прочности и усталостной долговечности конструкций таких объектов.

Российская практика сертификации материалов предусматривает следующие виды испытаний для проверки хладостойкости сталей:

- общепринятое построение зависимостей работы, затрачиваемой на ударное разрушение образцов Шарпи, от температуры;
- оценка характеристики трещиностойкости материала CTOD – Crack-Tip Opening Displacement;

- определение температуры нулевой пластичности (NDT – Nil Ductility Transition) по стандарту ASTM E208, то есть максимальной температуры, при которой стандартные образцы хрупко разрушаются при ударном трехточечном изгибе;
- определение температуры вязко-хрупкого перехода  $T_{КБ}$ , которая соответствует 70 %-ной вязкой составляющей в изломе образцов.

Требования к температуре нулевой пластичности и температуре вязко-хрупкого перехода, как правило, выполняются для сталей серийного производства, однако основным нормативным значением трещиностойкости сварных соединений является CTOD, при определении которого зачастую возникает ряд проблем. Во-первых, сама процедура его определения согласно Правил РМРС является весьма сложной и имеет ряд взаимосвязанных условий, что снижает вероятность получения положительного результата. Во-вторых, на практике при испытании при пониженных температурах для крупнозернистой составляющей сварного шва имеет место большой разброс значений CTOD, а результаты испытаний для ЗТВ трудноотделимы от результатов испытаний металла шва. Аналогичные явления имеют место и при выполнении испытаний согласно зарубежным стандартам Norsok M 101, ISO 19902, ISO 19904-1.

Анализ способов обеспечения низкотемпературной прочности и усталостной долговечности конструкций морской техники показал, что они обладают рядом существенных недостатков:

- отсутствием способов и алгоритмов определения реальных запасов низкотемпературной прочности конструкций и усталостного ресурса конструкций;
- несовершенством способов экспериментального определения характеристик трещиностойкости применительно к толстолистовым элементам конструкций и их сварных соединений, в результате чего возможно получение неоднозначных результатов;
- затруднением оптимизации проектирования морской техники из-за отсутствия способов оценки влияния на запасы прочности и показатели усталостного ресурса большого числа конструктивных и эксплуатационных факторов.

В заключительной части первой главы приводится обзор требований ведущих классификационных обществ к контролю технического состояния конструкций объектов морской техники, эксплуатируемой при низких температурах, показавший отсутствие учета особенностей их низкотемпературной эксплуатации в явном виде.

**Вторая глава** посвящена обоснованию новых интегральных критериев статического разрушения конструкций при низкой температуре, необходимых для учета реальной трещиностойкости и пластичности материала сварных соединений.

В соответствии с традиционными представлениями, хрупкое разрушение в материале конструкции происходит при одновременном выполнении двух условий:

$$\sigma_i \geq \sigma_m ; \quad (1)$$

$$\sigma_1 \geq S_{omp} . , \quad (2)$$

где  $\sigma_i$  – интенсивность напряжений или эквивалентное напряжение по Мизесу;  $\sigma_m$  – предел текучести материала,  $\sigma_1$  – максимальное главное напряжение;  $S_{omp}$  – напряжение нормального отрыва, являющееся характеристикой материала, не зависящей от температуры его испытаний. При этом  $S_{omp}$  зависит от диаметра зерна феррита в стали  $d_3$ , мм

$$S_{omp} = 20 + 11,5 / \sqrt{d_3} , \quad (3)$$

что в некоторой степени противоречит одному из основных постулатов механики твердого деформируемого тела: с одной стороны, из критерия (2) следует, что характеристики прочности материала зависят от его микронеоднородности, а с другой стороны, в соответствии с гипотезой сплошности и однородности, в расчетах прочности не учитываются особенности кристаллической структуры металла. Кроме того, при развитии повреждений материала, происходящем перед хрупким разрушением, в нём образуются субмикротрещины (не исключено и появление пор), в результате чего уравнения сплошности также не могут быть справедливыми. В этом случае представляется целесообразным рассмотреть условия образования и продвижения субмикротрещин не в отдельной точке, а в некотором конечном объеме материала конструкции. Этот объем ассоциируется с понятием структурного элемента  $d$ , размер которого является характеристикой материала, т.е. параметром его микронеоднородности:

$$d = 2K_{Ic}^2 / (\pi S_{omp}^2) , \quad (4)$$

В известном интегральном критерии хрупкой прочности Нейбера – Новожилова с пределом прочности сравнивается не максимальное положительное значение первого главного напряжения  $\sigma_1$  (как это следует из соотношения (2)), а среднее нормальное напряжение

$$\bar{\sigma}_n = \iint_F \sigma_n dF / F , \quad (5)$$

на площадке  $F$  с площадью порядка  $d^2$ , включающей бесконечно малую площадку с нормалью  $\vec{n}$  (рисунок 1), на которой действует максимальное

главное напряжение  $\sigma_1$  в рассматриваемом концентраторе напряжений. В этом равенстве  $\sigma_n$  – нормальное напряжение на площадке  $F$ .

Таким образом, вместо критерия максимальных напряжений (2) при установлении момента начала хрупкого разрушения на основании подхода Нейбера-Новожилова в работе представлен новый интегральный критерий, имеющий следующий вид

$$\bar{\sigma}_n \geq S_{omp}, \quad (6)$$

где  $\bar{\sigma}_n$  – осреднённое по площадке  $F$  нормальное напряжение в зоне концентрации (см. формулу (5)).

Следуя принятому подходу можно взамен локального критерия текучести (1) использовать интегральный критерий

$$\bar{\sigma}_i \geq \sigma_m, \quad (7)$$

где  $\bar{\sigma}_i = \iint_F \sigma_i dF / F$  – среднее значение интенсивности напряжений на площадке  $F$ .

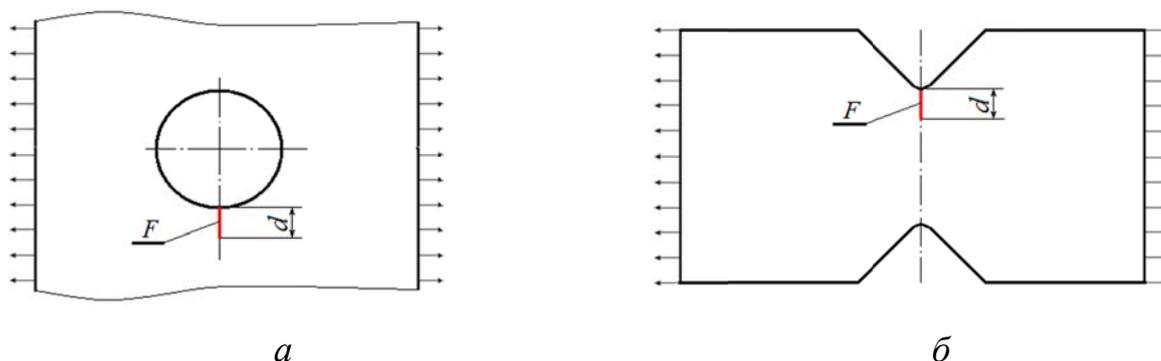


Рисунок 1 – Площадка  $F$  структурного элемента, включающая бесконечно малую площадку, на которой действует максимальное главное напряжение  $\sigma_1$  в концентраторах напряжений у круглого отверстия (а) и у краевого выреза (б), расположенных в растягиваемых полосах

Если условие (6) не выполняется, а в зоне концентратора напряжений удовлетворено только условие (7), то перед разрушением наблюдается пластическое деформирование. При его наличии в качестве критерия разрушения принято рассматривать соотношение между достигнутым уровнем интенсивности пластических деформаций  $e_{pi}$  и предельным значением интенсивности  $e_p^{nped}$ :

$$e_{pi} \geq e_p^{nped}, \quad (8)$$

при этом  $e_p^{nped}$  может быть определена как

$$e_p^{пред.} = D_e e_{p1}^{пред.}, \quad (9)$$

где  $e_{p1}^{пред.}$  – предельная пластическая деформация, найденная по результатам испытаний стандартных образцов цилиндрической формы при одноосном растяжении;  $D_e$  – коэффициент снижения предельных пластических деформаций, определяемый по формуле

$$D_e = K_e \sigma_i / |3\sigma_0|, \quad (10)$$

где  $K_e$  – коэффициент, учитывающий свойства материала (для малоуглеродистой стали  $K_e = 1,0-1,2$ );

$\sigma_0 = (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)/3$  – среднее напряжение.

Учитывая, что вязкое разрушение наступает после исчерпания пластического ресурса материала (после образования пор и субмикротрещин) и поэтому имеет некоторое сходство с хрупким разрушением, оно начинается с малой области, содержащей точку с максимальным значением отношения интенсивности пластических деформаций  $e_{pi}$  к коэффициенту снижения предельной пластической деформации  $e_{pi}/D_e$  в данном концентраторе напряжений и бесконечно малую площадку с нормалью  $\vec{n}$ , на которой действует главное напряжение  $\sigma_1$ . Для перехода материала в этой точке из вязкого состояния в хрупкое необходимо выполнение условия (8), которое можно записать в виде

$$e_{pi} / (D_e e_{p1}^{пред.}) \geq 1. \quad (11)$$

Основываясь на предположении, что при вязком разрушении как и в случае хрупкого повреждения, для перехода материала из вязкого состояния в хрупкое и начала процесса разрушения необходимо создание соответствующих условий не в точке, а в некоторой области с линейным размером  $d$  (или на площадке  $F$ ), в которой развиваются наибольшие деформации, можно утверждать, что величины  $e_{pi}$  и  $D_e$ , входящие в зависимости (8) и (9), а также другие параметры напряжённо-деформированного состояния необходимо усреднять. С учетом отмеченного выше, интегральный деформационный критерий вязкого разрушения может иметь следующий вид:

$$\bar{e}_{p1} \geq 1, \quad (12)$$

где  $\bar{e}_{p1} = \frac{1}{e_{p1}^{пред}} \int_F \frac{e_{pi}(x, y, z)}{D_e(x, y, z)} dF$  – характеристика вязкого повреждения материала на конечной площадке  $F$ , содержащей точку с наибольшим значением отношения интенсивности пластической деформации к коэффициенту снижения предельной пластической деформации  $e_{pi}/D_e$  в данном концентраторе напряжений и расположенную в этой точке бесконечно малую главную площадку, на которой действует главное напряжение  $\sigma_1$ .

Важным вопросом является практическая оценка коэффициента снижения пластической деформации  $D_e$  с учетом влияния низкой температуры на снижение пластических свойств металла, способ которой приведен диссертационной работе:

$$D_e = K_e \left[ \eta \left( 1 + \bar{\sigma}_2 + \bar{\sigma}_3 \right) \right]^{-\alpha(T)}, \quad (13)$$

где  $\eta = \sigma_1/\sigma_i$  – коэффициент жесткости напряженного состояния;

$\bar{\sigma}_2 = \sigma_2/\sigma_1$  и  $\bar{\sigma}_3 = \sigma_3/\sigma_1$  – соотношения между главными напряжениями;

$\alpha(T)$  – показатель степени, отражающий влияние низкой температуры на снижение пластических свойств, определяемый следующим образом:

$$\alpha(T) = 1 + 8,68 \cdot 10^{-5} T_p^2 (1 - 0,01 T_p), \quad (14)$$

$$T_p = T - T_{KB} - 20,$$

где  $T_p$  – расчетная температура, °С,

$T$  – температура эксплуатации объекта, °С.

В заключительной части второй главы приводятся результаты экспериментальной проверки критерия вязкого разрушения, выполненной на базе Крыловского государственного научного центра. Испытаниям были подвергнуты 12 гладких цилиндрических образцов и 8 цилиндрических образцов с концентратором (с надрезом в виде канавки с глубиной 1 мм и углом между ее берегами 60°). Материал образцов – сталь марки 750W. В таблице 1 приведены примеры результатов испытаний, на рисунке 2 – сопоставление экспериментальных данных и результатов численного моделирования эксперимента. Определение напряжений при разрыве в соответствии с интегральным (12) и локальным (8) критериями вязкого разрушения производилось с применением программного комплекса ANSYS.

Результаты испытаний показали, что при понижении температуры на 60°С наблюдалось увеличение пределов прочности (~ на 3%) и текучести (~ на 4%). При испытаниях образцов с концентраторами напряжений были выявлены следующие закономерности: понижение температуры почти не влияло на нагрузки, разрушающие образцы, и существенно снижало величины остаточных деформаций (в среднем на 14% у образцов из тонких листов и на

74% у образцов из толстых листов). Таким образом, главное влияние на снижение величин остаточных деформаций образцов, т.е. пластических свойств материала при низких температурах, оказывают факторы концентрации напряжений и толщины листов, из которых изготавливались объекты испытаний.

Таблица 1 – Результаты испытаний на растяжение образцов с концентраторами

Температура испытаний	Толщина листа 25 мм		Толщина листа 40 мм	
	Удлинение при разрушении, мм	Максимальная нагрузка, кН	Удлинение при разрушении, мм	Максимальная нагрузка, кН
+20 <sup>0</sup> С	1,29	60,02	1,27	61,11
	1,32	60,06	1,68	61,00
-40 <sup>0</sup> С	1,26	60,43	0,45	61,08
	0,99	60,15	0,33	60,94

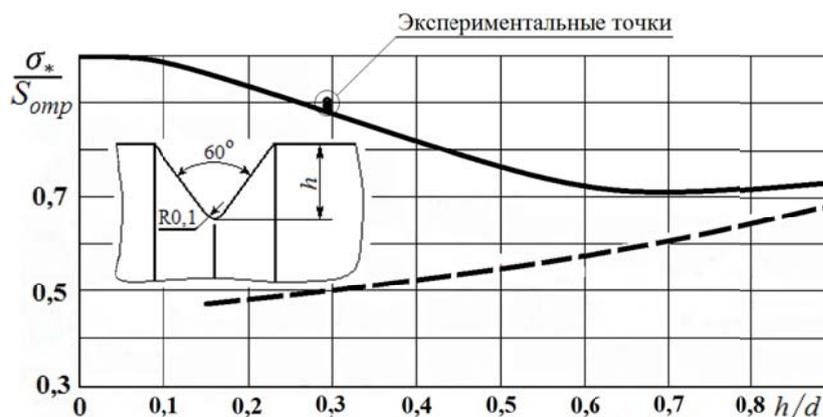


Рисунок 2 – Сопоставление результатов конечно-элементного расчета напряжений при разрыве образцов с надрезом  $\sigma_*$ , найденных при использовании интегрального критерия (12) (сплошная линия) и локального критерия (8) (штриховая линия), с экспериментальными данными.

**В третьей главе** приводятся рекомендации по выполнению расчетов низкотемпературной статической прочности сварных конструкций с учетом положений и критериев прочности, разработанных и обоснованных в главе 2.

Достаточно сложным вопросом, возникающим при использовании интегральных критериев хрупкого разрушения (6) и (7) для оценки запасов прочности сварных конструкций морской техники является определение средних значений нормальных и эквивалентных (по Мизесу) напряжений по сравнительно малой площадке  $F$  (по площади структурного элемента). Аналогичные затруднения возникают и при использовании критерия вязкого разрушения (12). При этом необходимо выполнить численным методом оценку интеграла по площадке  $F$ , содержащей точку с наибольшим значением отношения интенсивности пластической деформации к коэффициенту снижения предельной пластической деформации  $e_{pi}/D_e$  в данном концентраторе напряжений и расположенную в этой точке бесконечно малую главную

площадку, на которой действует главное напряжение  $\sigma_1$ . Этот интеграл имеет вид

$$I = \int_F \frac{e_{pi}(x, y, z)}{D_e(x, y, z)} dF. \quad (15)$$

При использовании конечно-элементного анализа для оценки  $I$  на погрешность вычислений влияют размеры (они должны быть в зоне концентратора меньше размеров площадки  $F$ ) и типы конечных элементов (в зоне концентратора они должны быть типа SOLID).

Для уменьшения трудоемкости подобные расчеты рекомендуется выполнять с использованием субмоделирования, когда на первом этапе внешняя нагрузка прикладывается к математической модели конструкции, выполненной из пластинчатых (SHELL) или стержневых (BEAM) элементов, а на втором в зонах концентрации напряжений выделяются подструктуры, моделируемые элементами типа SOLID. В таком случае из общей конструкции на достаточном удалении от зоны действия максимальных напряжений выделяется часть геометрии (субмодель), переносимая в отдельный расчетный модуль. Такая геометрия моделируется с более мелкой сеткой и в качестве граничных условий к ней прикладываются значения перемещений на границе субмодели. При этом размеры конечных элементов в детализированной модели следует принимать не более:

- $0,1k$ , где  $k$  – размер катета сварного шва;
- $0,5d$ , где  $d$  – согласно (4), со значением  $K_{lc} = \min$ , соответствующим зоне сплавления или зоне термического влияния.

При построении конечно-элементных моделей в качестве модели материала для нелинейного статического анализа может быть принят материал с билинейной диаграммой деформирования и следующими характеристиками: модуль упругости  $E = 210$  ГПа; коэффициент Пуассона – 0,3. Модуль пластичности  $H$  принимается с учетом результатов построения диаграммы деформирования материала в соответствии с действующими стандартами. При оценке характеристик материала, входящих в критерии разрушения (6) и (12), принимаются во внимание характеристики материала  $S_{omp}$  и  $e_p^{nped}$ , соответствующие результатам испытаний образцов со стыковыми сварными соединениями на разрыв. При этом замеры величины  $e_p^{nped}$  рекомендуется производить в зоне термического влияния.

Приведенные рекомендации по оценке напряженно-формированного состояния (НДС) можно использовать не только при расчете прочности сварных конструкций в процессе их проектирования, но и при подготовке к проведению экспериментальных работ по оценке предельных нагрузок. В главе приводятся результаты численного моделирования испытаний полномасштабной сварной секции форштевня арктического судна (рисунок 3),

позволившие точно спрогнозировать поведение конструкции и рационально расположить тензодатчики при проведении эксперимента.

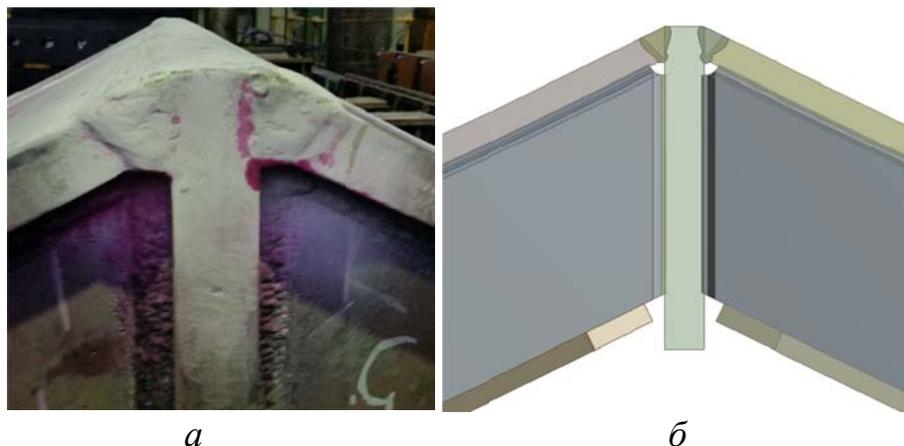


Рисунок 3 – Сварные швы опытного образца (а) и компьютерной модели (б)

После проведения испытания было выполнено сравнение экспериментальных результатов с результатами численного моделирования. Коэффициент корреляции составил 0,91, что позволило сделать вывод о высокой достоверности полученных результатов, а также об обоснованности предложенной на первом этапе схемы размещения тензодатчиков.

Предлагаемый подход к расчетам прочности конструкций позволяет отказаться от принятой в настоящее время жесткой регламентации минимально допустимого значения критического параметра раскрытия в вершине трещины, находящейся в сварном соединении. В таком случае начальный этап расчета прочности по способу, изложенному в главах 2 и 3, состоит в проверке критериев хрупкого разрушения в материале конструкции, т.е. в оценке выполнения условий (6) и (7). Если условие (6) не выполняется, то разрушение будет сопровождаться остаточными деформациями в зоне концентратора напряжений. При анализе такого разрушения целесообразно использовать деформационный критерий (12). В любом случае критерии (6) и (12) и изложенный способ расчета низкотемпературной прочности позволяют установить минимальный уровень нагрузок, приводящих к разрушению слабого узла конструкции. Установленные таким образом разрушающие (предельные) нагрузки  $Q_p$  могут быть сопоставлены с максимальными нагрузками  $Q_{max}$ , с использованием необходимого коэффициента запаса прочности.

**В четвертой главе** приводится обоснование метода расчета низкотемпературной усталостной прочности стальных конструкций, с учетом особенностей вязкого разрушения, описанных в главе 2.

Применительно к малоцикловой усталости отмечено, что в соответствующих расчетах необходимо принимать во внимание:

- снижение предельного (приводящего к разрушению) значения интенсивности пластической деформации в результате совместного

влияния двух факторов – стеснения деформирования в зонах концентрации напряжений и низкой температуры;

- увеличение пределов текучести  $\sigma_m$  и прочности  $\sigma_e$  материала при понижении температуры;
- существенное изменение других механических свойств сталей (в частности, трещиностойкости) при пониженных температурах, соответствующих вязко-хрупкому переходу.

Поскольку испытания серии охлажденных до низкой температуры образцов выполнить очень сложно, для выполнения приближенных расчетов кривую малоциклового усталости можно выразить аналитически в виде зависимостей Коффина-Менсона (16) или Басквина-Коффина-Менсона (17)

$$\varepsilon_p = \bar{C}N^{-\mu} \quad , \quad (16)$$

$$\varepsilon = \varepsilon_e + \varepsilon_p = \bar{B}N^b + \bar{\varepsilon}_f N^c \quad . \quad (17)$$

Здесь  $\varepsilon$ ,  $\varepsilon_e$ , и  $\varepsilon_p$  – амплитуды полной, упругой и пластической деформаций соответственно;  $N$  – число циклов до разрушения;  $\bar{C}$ ,  $\mu$ ,  $\bar{B}$ ,  $b$ ,  $\bar{\varepsilon}_f$  и  $c$  – постоянные, зависящие от механических свойств материала.

В соответствии со ГОСТ25.504-82 параметры, входящие в зависимости (16) и (17), выражаются следующим образом

$$\bar{C} = \frac{\varepsilon_f}{2}; \quad \mu = 0,5 - 0,6; \quad \bar{\varepsilon}_f = \varepsilon_f = D_e \ln \frac{1}{1-\psi}, \quad (18)$$

где  $\psi$  – относительное уменьшение площади поперечного сечения стандартного образца при его разрыве, определяемое по ГОСТ 1497-84. Отличие приведенного здесь выражения для оценки характеристики пластичности  $\varepsilon_f$  от рекомендаций стандарта состоит в наличии понижающего множителя  $D_e$ , учитывающего влияние пониженной температуры и трехмерности напряженного состояния на предельную пластичность и определяемого в соответствии с (13).

При больших циклах нагружения принято использовать силовой критерий, описываемый обычно с помощью усталостной кривой ( $S-N$  кривой). Усталостные кривые обычно строятся по результатам испытаний гладких образцов и образцов с типовыми сварными соединениями. Аналитические кривые усталости представляются в отдельных диапазонах чисел циклов в виде

$$N(\Delta\sigma) = C\Delta\sigma^{-m} \quad \text{или} \quad \lg N = \lg C - m \lg \Delta\sigma, \quad (19)$$

где  $N(\sigma)$  – число циклов нагружения до разрушения при размахе напряжений  $\Delta\sigma$ ;  $C$  и  $m$  – эмпирические параметры (характеризующие соответственно смещение

прямой, построенной в двойных логарифмических координатах и угол наклона к оси абсцисс) и зависящие от материала и типа сварного соединения.

Аналитическое описание расчётной кривой усталости достигается корректировкой зависимости (19) путём замены величины  $\lg C$  на пониженное значение логарифма

$$\lg \bar{C} = \lg C - 2S_{\lg N}, \quad (20)$$

где  $S_{\lg N}$  – среднеквадратическое отклонение  $\lg N$ .

Таким образом, расчётная кривая усталости имеет следующий аналитический вид:

$$\lg N = \lg \bar{C} - m \lg \Delta \sigma. \quad (21)$$

Нормативный документ DNV-GL по расчетам усталостной прочности оффшорных стальных конструкций «Recommended Practice RP-C203 Fatigue Strength Analysis of Offshore Steel Structures» предписывает для расчетных температур  $T_c$  выше плюс 100°C корректировать параметр  $C$  усталостной кривой за счет введения температурного фактора  $R_T$ :

$$\lg N = (\lg \bar{C} + m \lg R_T) - m \lg \Delta \sigma, \quad (22)$$

где  $R_T = 1,0376 - 0,239 \cdot 10^{-3} \cdot T_c - 1,372 \cdot 10^{-6} \cdot T_c^2$ .

Аналогичный подход принят в работе для учета пониженной (ниже 0°C) температуры:

$$\lg N = (\lg \bar{C} + m \lg r_t^y) - m \lg \Delta \sigma, \quad (23)$$

где  $r_t^y = 0,434(\beta_6 + 0,4\beta_m)(1/t - 1/t_*) \left[ \eta(1 + \bar{\sigma}_2 + \bar{\sigma}_3) \right]^{2,3}$ ,

$t$  и  $t_*$  – расчетная и комнатная температуры соответственно, °К.

Для более детального изучения особенностей усталостных разрушений в Крыловском государственном научном центре были выполнены усталостные испытания стальных образцов двух типов (гладкие со стыковыми сварными соединениями и с приваренными к листовому элементу планками) при комнатной температуре (плюс 20°C) и при низких температурах (минус 25°C и минус 45°C), с последующим построением соответствующих усталостных кривых (рисунок 4).

Полученные при усталостных испытаниях данные позволяют считать, что появившиеся трещины усталости подрастают достаточно медленно. При пониженных температурах (по сравнению с комнатной) уровень усталостной прочности при числах циклов нагружения порядка  $10^4$ , разграничивающих малоцикловую и многоцикловую области, не зависит от температурного

фактора. Вместе с тем, при увеличении числа циклов нагружения (по сравнению с  $10^4$ ) наблюдается заметное увеличение усталостной прочности. Большой прирост прочности при снижении температуры наблюдается при числах циклов порядка  $10^6$  и более.

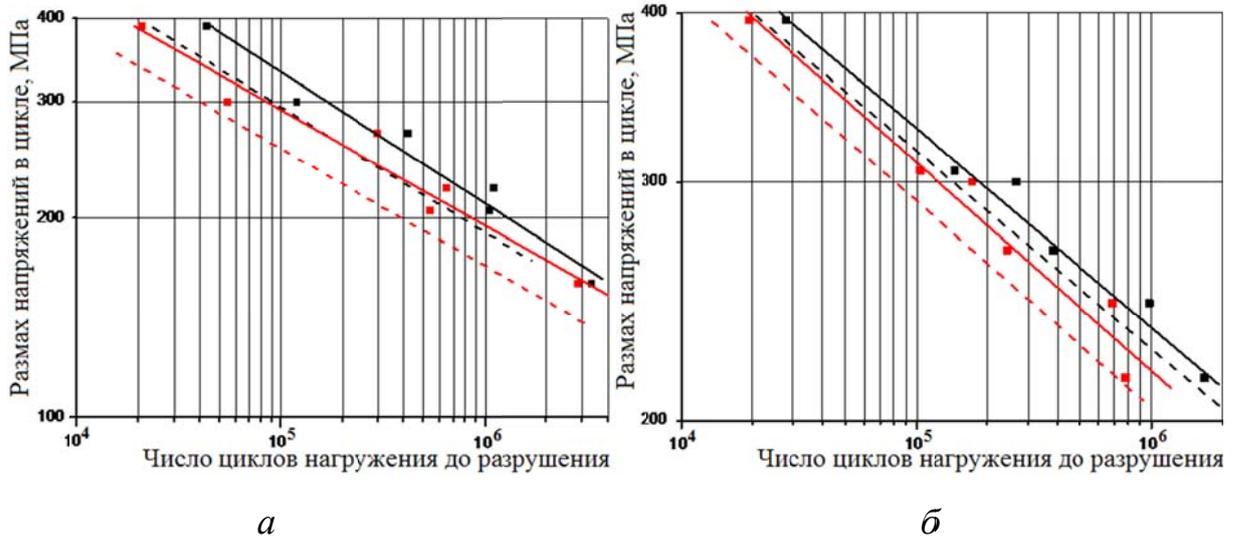


Рисунок 4 – Пример результатов построения базовых (сплошные линии) и расчётных (штриховые линии) усталостных кривых для стыковых сварных соединений при температурах плюс  $20^{\circ}\text{C}$  (а) и минус  $45^{\circ}\text{C}$  (б): красные линии – испытания до обнаружения трещины по показаниям тензодатчиков, расположенных рядом с местом ее инициирования; черные линии – испытания до разрушения образца. Материал образцов – сталь DS40.

Регрессионный анализ параметров полученных усталостных кривых позволил описать ее эволюцию при изменении температуры (рисунок 5). На рисунке 5 точками *A*, *B* и *C* обозначены числа циклов нагружения, при которых наблюдались характерные изменения, описанные выше.

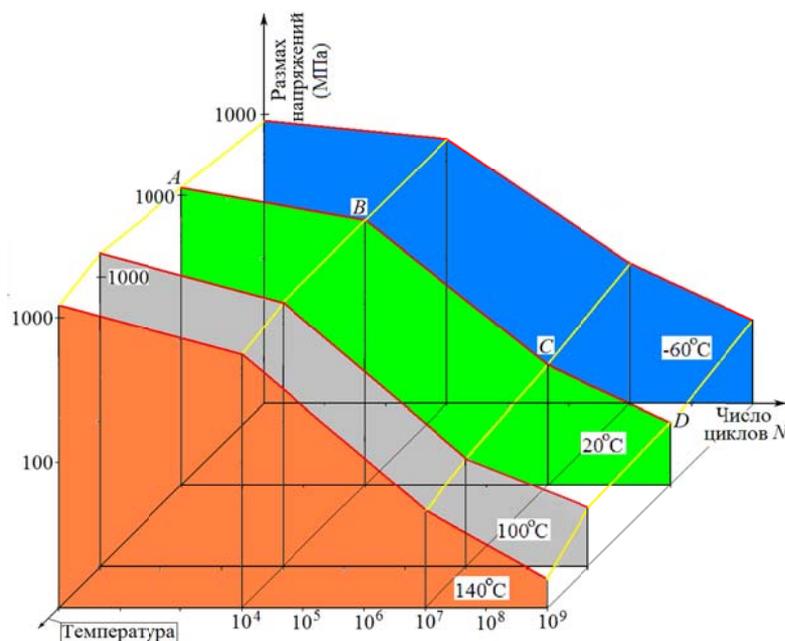


Рисунок 5 – Эволюция усталостной кривой при варьировании температуры

Выполненные исследования указывают на то, что в условиях низких температур усталостная прочность конструкции в малоцикловой области ниже, а в многоцикловой области – выше по сравнению с прочностью при комнатной температуре. Вследствие этого современные методы расчета усталости сварных конструкций, включенные в известные нормативные документы (правила классификационных обществ, государственные стандарты, и другие материалы) не являются удовлетворительной основой для оценки усталостной прочности конструкций, эксплуатирующихся в условиях низких температур. При этом, если для конструкций, работающих при больших числах циклов нагружения ( $N > 10^4$ - $10^5$ ), эта проблема не стоит особенно остро, ввиду увеличения усталостной прочности с ростом  $N$ , то для конструкций, испытывающих циклические нагрузки в малоцикловой области ( $N \leq 10^4$ ), игнорирование влияния температурного фактора может привести к неблагоприятным последствиям.

Расчеты, выполненные на основе предложенных методов оценки низкотемпературной усталостной долговечности конструкций, показали хорошее соответствие экспериментальным данным, полученным при усталостных испытаниях двух типов сварных образцов.

**В заключении** сформулированы основные результаты диссертационной работы:

1. Выполнен анализ существующих подходов к обеспечению низкотемпературной прочности конструкций морской техники и выявлены основные факторы, влияющие на нее.

2. Разработаны математические модели хрупкого и вязкого разрушения конструкций при низкой температуре и интегральные критерии предельной прочности, основанные на представлении о формировании в окрестностях концентраторов напряжений зон предразрушения (структурных элементов).

3. Разработан численный метод расчета предельных нагрузок, вызывающих хрупкое или вязкое разрушение конструкций морской техники при обычных и низких температурах. Даны рекомендации по назначению запасов низкотемпературной прочности по предельным нагрузкам.

4. В результате испытаний на разрыв стальных образцов с надрезом, выполненных из стали, предназначенной для создания арктических объектов установлены особенности низкотемпературного разрушения конструкций в зонах концентрации напряжений. Путем сравнения расчетных данных с результатами экспериментов показано, что предложенные интегральные критерии низкотемпературной прочности обеспечивают существенное увеличение точности расчетного определения предельных нагрузок, вызывающих разрушение конструкций при низких температурах.

5. Анализ результатов испытаний на циклическое нагружение сварных образцов со стыковыми швами и с приваренными планками показал, что в

условиях низких температур усталостная прочность конструкции в малоцикловой области ниже, а в многоцикловой области – выше по сравнению с прочностью при комнатной температуре.

6. Разработан метод расчета усталостной прочности стальных сварных конструкций, эксплуатирующихся в низкотемпературных условиях, базирующийся на:

- новой математической модели малоциклового усталостного разрушения узлов конструкции, позволяющая с помощью деформационного критерия учитывать совместное влияние низкой температуры и трехмерности напряженно-деформированного состояния узлов на снижение резервов пластического деформирования и ускоренное развитие усталостных повреждений;
- новой математической модели многоциклового усталостного разрушения узлов конструкции, позволяющей с помощью силового критерия учитывать влияние низкой температуры на замедленное развитие усталостных повреждений.

7. Результаты расчетов, выполненных на основе разработанных методов расчета низкотемпературной усталостной долговечности конструкций, сопоставлены с экспериментальными данными. Результаты сопоставления подтвердили достоверность предложенных методов расчета усталости.

Дальнейшее развитие диссертационных исследований связано с применением полученных результатов в создании способов / методов оптимизации узлов конструкций морской техники для арктического шельфа РФ, а также поиска рациональных конструктивных решений на ранних этапах проектирования.

### **Список работ, опубликованных автором по теме диссертации**

#### *1. В изданиях, рекомендованных Перечнем ВАК РФ:*

1. Крыжевич Г. Б., Петров А. А. Исследование применимости сварных штевней взамен литых на ледоколах и судах ледового плавания // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. 2017. Т. 9. № 1. С. 132-142.

2. Петров А. А. Техническое обоснование возможности применения сварных штевней на ледоколах и судах ледового плавания // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. 2017. № 46/47. С. 45-51.

3. Петров А. А., Лебехов И. А. Программный комплекс автоматизации расчетов по полярным правилам и выбора рациональных конструктивных решений // Труды Крыловского государственного научного центра. 2018. Спец. вып. 1. С. 137-141.

4. Петров А. А., Лебехов И. А. Идрисова С. А. Создание программного обеспечения для разработки судовой эксплуатационной документации на суда ледового плавания // Труды Крыловского государственного научного центра. 2018. Спец. вып. 2. С. 25-32.

5. Петров А. А., Черейский И. З., Идрисова С. А. Технические аспекты разработки «Наставления по эксплуатации судна в полярных водах» и анализ необходимости контроля его содержания // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. 2018. № 50/51. С. 6-13.

*II. В изданиях, включенных в международную реферативную базу данных Web of Science или Scopus:*

6. Крыжевич Г. Б., Петров А. А. Критерий вязкого разрушения конструкций морской техники // Морские интеллектуальные технологии. 2018. Т. 1. № 1(39). С. 30-37.

7. Крыжевич Г. Б., Петров А. А. Учет температурного фактора в расчетах усталостной долговечности конструкций морской техники // Морские интеллектуальные технологии. 2018. Т. 1. № 2(40). С. 11-19.

*III. Прочие публикации:*

8. Кудрин М. А., Петров А. А. Использование численного моделирования при подготовке к проведению испытаний на прочность сварных конструкций // Сборник научных трудов Центрального научно-исследовательского института морского флота. 2017. Вып. 1. С. 113-119.

9. Петров А. А. Оценка технического состояния конструкций ледового пояса ПБУ и МСП // Proceedings of International Conference on Naval Architecture and Ocean Engineering, NAOE2016.

10. Петров А. А. Проблемы проектирования и эксплуатации морских нефтегазовых платформ, предназначенных для работы на арктическом шельфе // Сборник научных трудов Центрального научно-исследовательского института морского флота. 2016. Вып. 1. С. 75-79.

11. Kryzhevich G.B., Petrov A.A. Strength calculation method for welded stern/stem posts of icebreakers and ice-going ships. Proceedings of the 9th International conference "Navy and Shipbuilding Nowadays", Saint-Petersburg, 2017, pp. 103-112.

### **Свидетельства о государственной регистрации объектов интеллектуальной собственности**

1. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2018616419. MARSOLS-ST (выполнение автоматизированных расчетов прочности корпуса судна). 01 июня 2018 г.

2. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2018620899. MARSOLS-DB. 21 июня 2018 г.