

На правах рукописи



ТАРОВИК ОЛЕГ ВЛАДИМИРОВИЧ

**МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ МАСС КОНСТРУКЦИЙ
ЛЕДОВЫХ УСИЛЕНИЙ ТРАНСПОРТНЫХ СУДОВ НА
РАННИХ СТАДИЯХ ПРОЕКТИРОВАНИЯ**

Специальность 05.08.03 – «Проектирование и конструкция судов»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени

кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2015

Работа выполнена в ФГУП «Крыловский государственный научный центр»

Научный руководитель: **Апполонов Евгений Михайлович**, доктор технических наук, и.о. ректора ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский Государственный Морской Технический Университет»,

Официальные оппоненты: **Зуев Валерий Андреевич**, профессор, д.т.н, заслуженный деятель науки РФ, заведующий кафедрой кораблестроения и авиационной техники Нижегородского государственного технического университета имени Р. Е. Алексеева
Бойко Максим Сергеевич, к.т.н, начальник научно-исследовательского отдела Главного управления Российского морского регистра судоходства

Ведущая организация: Акционерное общество "ЦМКБ "Алмаз"

Защита состоится " 18 " декабря 2015 года в 10 часов 00 минут на заседании диссертационного совета Д 411.004.01 при ФГУП «Крыловский государственный научный центр» по адресу: г. Санкт-Петербург, Московское ш., д. 44.

С диссертацией можно ознакомиться в научно технической библиотеке и на сайте ФГУП «Крыловский государственный научный центр» krylov-center.ru в разделе «Учёный и диссертационные советы»

Автореферат разослан " ____ " _____ 20__ года

Отзывы просим направлять в 2-х экземплярах по адресу:
по почте – 196158, г. Санкт-Петербург, Московское шоссе, 44, ФГУП «Крыловский государственный научный центр».

Ученый секретарь,
диссертационного совета,
д.т.н.



Л.И. Вишневский

1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В соответствии с рядом государственных программ Российской Федерации одной из наиболее важных задач отечественного судостроения является проектирование и строительство судов ледового плавания (СЛП) в обеспечение широкомасштабного освоения природных ресурсов Арктики и интенсификации судоходства в акватории Северного морского пути.

В России накоплен значительный опыт создания СЛП, имеющий многовековую историю. В последние годы вопросами общего проектирования судов ледового плавания занимались А.В. Бронников, Н.В. Барабанов, В.И. Каштелян, Г.М. Коваль, Д.Д. Максutow, И.П. Мирошниченко, Ф.А. Морейнис, Ю.А. Симонов, А.И. Титов, С.Н. Климашевский, Л.Г. Цой, В.М. Воробьев, В.А. Мацкевич, В.А. Беляшов и др. Над развитием методов определения ледовых нагрузок, регламентации ледовой прочности и определением размеров связей корпусных конструкций работали Г.В. Бойцов, А.Я. Рывлин, В.А. Курдюмов, Д.Е. Хейсин, Е.М. Апполонов, А.Б. Нестеров, О.Я. Тимофеев, В.Н. Тряскин и др. Этими исследователями был заложен фундамент отечественной методологии проектирования СЛП, определивший архитектурно-конструктивный тип традиционных судов ледового плавания конца XX века. Применительно к СЛП традиционного типа Л.М. Ногидом (1964), В.В. Ашиком (1970), Л.Г. Цоем и О.В. Фаддеевым (1978), А.А. Дубовым и О.В. Фаддеевым (1981), С.Б. Каравановым (1983), М.Г. Ковалем (1987) и другими исследователями были выполнены оценки металлоемкости конструкций ледовых усилений (КЛУ), которые успешно использовались в практике проектирования арктических судов. Однако в современных условиях эти оценки неприменимы по следующим причинам:

- В Ледовые правила Российского морского регистра судоходства (РС) 1999 г. издания была введена новая методология обеспечения ледовой прочности, которая в части определения размеров КЛУ основывается на критерии предельной прочности, а не на используемом ранее критерии фибровой текучести.
- Востребованными стали ледокольно-транспортные суда таких типов, которые ранее не эксплуатировались в Арктике и не имеют аналогов (газовозы LNG и LPG, суда технологического и добычного флотов). Широкое распространение получили СЛП двойного действия (*DAS* – Double Acting Ship), имеющие возможность эксплуатироваться во льдах, регулярно двигаясь кормой вперед. Многократно увеличились размеры

СЛП с высокими ледовыми классами, дедвейт которых в настоящее время достигает 80 тыс.т.

В то же время, интенсивность проектирования и строительства СЛП достаточно мала, что не позволяет получить статистическую информацию о весовой нагрузке современных СЛП в объеме, достаточном для выполнения обобщенных оценок.

Таким образом, в настоящее время отсутствуют обоснованные расчетные оценки масс КЛУ, применимые для судов в широком диапазоне главных размерений, предоставляющие возможность учета концепции *DAS* и других современных технических решений. Отсутствие такой методики существенно затрудняет как проектирование СЛП новых типов, так и решение задач технико-экономической оптимизации судов при выполнении вариантных проработок. Поэтому задача создания соответствующей методики является актуальной.

Целью работы является создание практической расчетной методики прогнозирования масс КЛУ транспортных судов перспективных типов во всем диапазоне ледовых классов (от Ice1 до Arc9 по классификации РС), а также установление закономерностей изменения масс КЛУ в зависимости от различных параметров: размерений и формы корпуса судна, топологии конструкций, предела текучести стали.

Для достижения поставленной цели должны быть решены следующие **основные задачи**:

1. Разработка общего подхода к оценке влияния ледовой категории на весовые характеристики корпуса судна с учетом особенностей формы обводов и конструкции корпуса.
2. Создание научно-методических принципов и компьютерных программ для автоматизированного параметрического проектирования и оптимизации КЛУ на основе регламентационных зависимостей Правил РС и установление закономерностей изменения масс КЛУ в зависимости от параметров топологии конструкций.
3. Разработка специализированной аналитической модели описания поверхности корпуса СЛП, позволяющей формировать расчетные сетки судов с систематически изменяющимися «ледовыми» параметрами формы корпуса.
4. Исследование факторов, оказывающих влияние на массы КЛУ, и создание практической расчетной методики определения масс КЛУ транспортных судов на ранних стадиях проектирования.

5. Получение оценок влияния главных размерений судна, параметров формы корпуса, топологии конструкции и свойств материала на массы КЛЮ.

Объектом исследования настоящей диссертационной работы являются конструкции корпуса морских транспортных судов, включая арктические транспортные суда новых типов и размерений.

Предметом исследования являются зависимости масс конструкций корпуса судна от различных факторов – параметров топологии конструкций, главных размерений и параметров формы корпуса, прочностных свойств материала.

Методы исследований. Для решения поставленных задач в работе используются методы исследования функций, математической статистики, регрессионного анализа и математического программирования, методы описания судовых поверхностей, а также методы теории проектирования судов, статики корабля и проектирования судовых конструкций. Компьютерные программы разработаны на языке Visual Basic с использованием вычислительной среды MS Excel.

Основные научные результаты и их новизна:

1. Разработан общий подход к оценке влияния ледовой категории на весовые характеристики корпусов судов в широком диапазоне изменения главных размерений и ледовых классов, включающий моделирование судовой поверхности и прямые расчеты масс конструкций.
2. Выявлены закономерности изменения масс КЛЮ в рамках регламентационных зависимостей Правил РС при изменении параметров конфигурации сварных тавровых профилей и параметров топологии перекрытий.
3. Создана оригинальная аналитическая модель поверхности корпуса СЛП, обеспечивающая возможность управления параметрами формы корпуса, важными для СЛП. Модель имеет самостоятельное значение и может использоваться в различных исследовательских задачах на ранних стадиях проектирования СЛП.
4. Разработана расчетная методика оценки влияния ледовой категории на массу корпуса судна, позволяющая учитывать параметры формы, главные размерения, прочностные свойства стали и другие характерные особенности судна.
5. Впервые для судов в широком диапазоне ледовых классов выявлены закономерности влияния различных параметров (главные размерения и их соотношения, применение концепции *DAS* и др.) на массы КЛЮ.

Практическая ценность работы связана с решением важной проблемы прогнозирования масс КЛЮ судов с ледовыми классами РС в широком диапазоне главных размерений. Результаты исследований позволяют повысить качество проектирования современных крупнотоннажных СЛП на ранних стадиях за счет повышения точности оценок массы корпуса и сокращения сроков выполнения проектов.

На защиту выносятся следующие положения:

1. Общий подход к оценке влияния ледовой категории на весовые характеристики корпусов судов в широком диапазоне главных размерений и ледовых классов.
2. Закономерности изменения масс КЛЮ в зависимости от параметров конфигурации сварных тавровых профилей и параметров топологии перекрытий в рамках регламентационных требований Правил РС.
3. Новая аналитическая модель поверхности корпуса судна ледового плавания, учитывающая особенности формы СЛП и обеспечивающая возможность управления параметрами формы проектируемого судна.
4. Методика определения масс КЛЮ судов, спроектированных по требованиям Правил РС, в рамках которой получены регрессионные зависимости для определения масс КЛЮ, учитывающие: главные размерения судна, применение на судне концепции *DAS*, прочностные свойства стали.
5. Закономерности влияния на массы КЛЮ основных параметров судна: главных размерений, соотношений главных размерений, наличия/отсутствия концепции *DAS*, предела текучести стали.

Внедрение результатов работы. Результаты работы использованы при определении характеристик вариантных рядов нефтеналивных танкеров, газозовов LNG и LPG и судов других типов с различными ледовыми классами в задачах технико-экономической оптимизации характеристик судов, выполненных в ФГУП «Крыловский государственный научный центр» для ООО «СН-Инвест» (вывоз углеводородов с месторождения в Печорском море), ДОО ЦКБН ОАО «Газпром» (месторождения Ямала), ООО «Газпром Нефть Новый Порт» (месторождения Обской губы), ООО «РН-КрасноярскНИПИнефть» (месторождения Енисейского залива). С использованием полученных оценок масс КЛЮ построены расчетные модели определения характеристик судов различных типов в рамках НИР «МТС-Модель» (ФЦП «Развитие гражданской морской техники» на 2009-2016 годы).

Достоверность полученных результатов подтверждена совпадением расчетных и натурных значений параметров топологии конструкций, нагрузок со стороны воды и льда, размеров связей и форм обводов корпуса.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертации обсуждались на 9-ой, 10-ой и 11-ой Международных конференциях и выставках по освоению ресурсов нефти и газа Российской Арктики и континентального шельфа стран СНГ (RAO / CIS Offshore) в г. Санкт-Петербурге в сентябре 2009, 2011 и 2013 годов, а также на конференции «23rd International Offshore And Polar Engineering Conference (ISOPE-2013), Anchorage, Alaska, USA. July 2013».

Публикации. По теме диссертации опубликовано 8 научно-технических статей, из которых в изданиях, рекомендуемых перечнем ВАК РФ, опубликовано 6 работ, в числе которых 3 работы имеют 100% участия автора. Издано учебное пособие «Предельные нагрузки и упругопластическое деформирование судовых балочных конструкций» (доля автора - 50%). Всего автором опубликовано 23 научно-технические статьи.

Личный вклад. Все исследования и разработки, описанные в настоящей диссертационной работе, выполнены автором лично.

Структура и объем работы. Работа состоит из введения, 5-ти глав и заключения, содержит 171 страницу основного текста, включая 25 таблиц, 38 рисунков, 3 страницы оглавления и список литературы из 120 названий. Приложения 1 – 3 имеют объем 15 страниц.

2. ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационного исследования, описана постановка задачи, сформулированы результаты, выносимые на защиту, а также научная новизна и практическая значимость работы. Приведено краткое содержание работы по главам.

В первой главе сформулированы требования к создаваемой методике прогнозирования масс КЛУ и предложен общий подход для ее реализации.

В начале главы проанализировано современное состояние отечественного флота СЛП: типы судов, возрастной состав, распределение по ледовым классам. Проанализированы данные по судам с ледовым классом РС выше Arc4, построенным в период 1970-2014 гг. (всего 299 судов). Показаны перспективы развития и обновления флота СЛП. Далее выполнен анализ существующих формул оценки влияния ледового класса на массу металлического корпуса, разработанных в период до 1999 г. Выявлены ограниченные возможности применения таких формул к современным судам как вследствие новых

тенденций развития СЛП, так и из-за изменения нормативной базы проектирования КЛУ. Разработанные после 1999 г. формулы оценки масс КЛУ характеризуются недостаточной обоснованностью расчетных оценок.

Общий подход к определению нагрузки масс судна в рамках разрабатываемой методики прогнозирования масс КЛУ состоит в том, что масса конструкций ледовых усилений $G_{лу}$ представляется как отдельная статья весовой нагрузки наряду с массой основного металлического корпуса $G_{мк0}$, не имеющего ледовых усилений. Тогда уравнение масс СЛП примет вид:

$$\Delta = \sum_{i=1}^n G_i + \sum_{j=1}^k C_j + G_{мк0} + G_{лу}, \quad (1)$$

где Δ – водоизмещение судна, $G_i = G_i(L, B, d, N \dots)$ – массы, зависящие от размерений судна, C_j – независимые от размерений судна массы (константы), n, k – число зависимых и независимых масс соответственно.

Масса $G_{лу}$ вычисляется как $G_{лу} = (G_{мк_лу} - G_{мк0})$, где $G_{мк_лу}$ – масса металлического корпуса судна с ледовыми усилениями, размеры и форма корпуса которого соответствуют судну, для которого определена масса $G_{мк0}$.

Принятый подход обеспечивает независимость оценок масс КЛУ от типа судна и массы основного металлического корпуса, т.е. является более универсальным, чем использование традиционного измерителя массы ледовых усилений в виде $\rho_{лу} = G_{мк_лу}/G_{мк0}$. Значения G_i и C_j и $G_{мк0}$ вычисляются на основании традиционных подходов, а $G_{лу}$ – с помощью новых расчетных зависимостей, которые должны удовлетворять следующим требованиям:

- возможность учета всех категорий ледовых усилений по Правилам РС,
- применимость для транспортных судов всех типов, имеющих различные главные размерения, а также – различные соотношения размерений;
- возможность учета современных технических решений: применение концепции *DAS*, использование высокопрочных сталей;
- зависимости для определения $G_{лу}$ должны включать только те параметры судна, которые известны на ранних стадиях проектирования.

Для удовлетворения указанных требований необходимо получение расчетной статистики значений $G_{лу}$ с помощью прямого проектирования конструкций множества судов. Предложена следующая программа работ:

1. *Создание программного обеспечения (ПО)*, позволяющего автоматически выполнять следующие расчетные процедуры: моделирование поверхности корпуса судна ледового плавания; выделение конструктивных районов борта и днища судна; выбор систем набора конструкций; генерация конструктивных схем; расчет площадей конструктивных районов

наружного борта и днища; определение суммарных длин балок и их расчетных пролетов в конструктивных районах; определение площадей листовых конструкций двойного борта и двойного дна, а также их расчетных пролетов; определение гидростатических нагрузок, нагрузок от перевозимого груза и ледовых нагрузок; определение толщин обшивки, профилей балок и толщин листовых конструкций с учетом и без учета требований ледовой категории; получение итогового значения $G_{\text{ЛУ}}$.

2. *Выявление факторов*, оказывающих наибольшее влияние на массы КЛУ и поэтому требующих учета в регрессионных зависимостях.
3. *Формирование расчетной сетки* судов, в рамках которой варьируются выбранные факторы, и выполнение массовых расчетов.
4. *Построение регрессионной модели* определения $G_{\text{ЛУ}}$ и анализ ее точности.

Выполнение первого пункта представленной программы требует предварительного решения двух научных задач:

- *Исследование оптимальности КЛУ* по критерию массы. Работы в направлении математических методов оптимизации конфигурации балочных профилей КЛУ выполнялись и ранее, однако нигде не исследовалось влияние топологии КЛУ (шпация основного набора, положение стрингеров и рамных шпангоутов и т.п.) на массу перекрытий. Однако этот аспект важен при автоматической генерации конструктивных схем и выполнении массовых расчетов КЛУ для серий корпусов судов.
- *Разработка аналитической модели описания поверхности* корпуса, позволяющей систематически изменять характерные «ледовые» параметры формы СЛП и выполнять необходимые расчеты по конструкции корпуса.

Две отмеченные задачи решены главах 2 и 3 диссертации, а в главе 4 получены регрессионные зависимости определения масс КЛУ.

Вторая глава посвящена исследованию вопросов оптимальности КЛУ. В качестве варьируемых при оптимизации параметров КЛУ выступают:

- параметры конфигурации сварного таврового профиля: s – толщина стенки профиля, h – высота стенки, t – толщина свободного пояска, c – ширина свободного пояска;
- параметры топологии КЛУ: a – шпация основного набора, m – количество несущих стрингеров в перекрытии, n – количество основных шпангоутов между соседними рамными;
- предел текучести материала КЛУ R_{eH} .

Критериями для оптимизации КЛУ являются традиционные критерии металлоемкости и стоимости. В роли исходных данных выступают: ледовые

нагрузки, размеры опорного контура перекрытия, условия закрепления балок и технологические ограничения на размеры КЛЮ.

Анализ поставленной задачи показывает, что ее необходимо разделить на задачи двух уровней: внутренняя и общая задачи.

Внутренняя задача соответствует условиям: $a, m, n, R_{eH} = const$, т.е. случаю, когда все принципиальные решения по топологии, составу и материалу конструкции приняты и необходимо оптимальным образом определить размеры конструктивных элементов. Поскольку размеры всех КЛЮ, кроме сварных тавров, в данном случае определяются однозначно, внутренняя задача сводится к определению оптимальных s, h, t и c . Это удобно осуществлять в ходе решения задачи математического программирования, когда функцией цели является площадь поперечного сечения профиля F :

$$F(s, h, t, c) = (s \cdot h + t \cdot c) \rightarrow \min, \quad (2)$$

Ограничения, налагаемые на s, h, t и c , включают граничные условия и функциональные ограничения. Граничные условия налагаются непосредственно на варьируемые параметры сверху (максимальное значение параметра) и снизу (минимальное) и обусловлены явными требованиями РС и требованиями технологичности. Функциональные ограничения представляют собой требования Правил РС к геометрическим характеристикам балочного профиля: площади стенки A , предельному моменту сопротивления W , ширине свободного пояска c и толщине стенки профиля s . Например, функциональные ограничения для обыкновенного шпангоута имеют вид:

$$\begin{aligned} A_u(h) \leq A_{u\phi}(h, t, s), \quad W_u \left(\frac{A_u(h)}{A_{u\phi}(h, t, s)}, s, c \right) \leq W_{u\phi}(s, h, t, c), \\ s_u(s, h, t, c, \gamma) \leq s, \quad c_u \left(\frac{W_u(s, \gamma)}{W_{u\phi}(s, h, t, c)}, s, h, t \right) \leq c, \end{aligned} \quad (3)$$

где индекс “ ϕ ” обозначает фактические значения геометрических характеристик, индекс “ u ” показывает, что характеристики относятся к шпангоуту, а прочие обозначения соответствуют Правилам РС.

При решении задачи (2) был подтвержден известный вывод о том, что вследствие высокой интенсивности и локализованности ледовых нагрузок типичный ледовый профиль имеет конфигурацию, отличную от типичного неледового профиля: стенка утолщена и высота ее снижена, а свободный поясок, наоборот, имеет бóльшую ширину при меньшей толщине. Такая конфигурация обусловлена преобладанием сдвиговых составляющих в работе балки над изгибными.

В рамках *общей задачи* оптимизации КЛЮ варьируются все обозначенные параметры КЛЮ, в том числе относящиеся к внутренней задаче. Решение общей задачи предлагается выполнять методом прямого перебора a , m , n при заданном $R_{ен}$, т.к. параметры a , m , n имеют дискретные значения и образуют ограниченное количество допустимых сочетаний. При этом в качестве критерия необходимо учитывать не только массу конструкций, но и стоимостные составляющие – трудоемкость изготовления и затраты на материалы. Однако, поскольку непосредственное отношение к теме исследования имеет только критерий массы, стоимостные составляющие далее не рассматриваются.

Для обеспечения практического решения внутренней и общей задач оптимизации КЛЮ в среде MS Excel с использованием VBA была разработана программа параметрического проектирования КЛЮ, охватывающая все регламентируемые Правилами РС конструкции. Внутренняя задача оптимизации решается с помощью встроенной в пакет MS Excel функции Solver. Пример изменения удельной массы M_T бортового перекрытия в средней части арктического танкера при варьировании a , m , n приведен на рис.1 («нетехнологические размеры» – теоретические размеры, не округленные до толщин сортамента). В результате выполнения массовых оптимизационных расчетов были выявлены следующие новые закономерности:

- Установлено, что существуют как локальные минимумы массы конструкции, получаемые при варьировании одного из параметров a , m , n и фиксации прочих, так и глобальный минимум массы конструкции, достигаемый при оптимальном сочетании всех параметров. Функция изменения массы КЛЮ вблизи экстремума является достаточно полой.
- Значение минимума массы КЛЮ при варьировании шпации основного набора находится, как правило, в области технологически-неприемлемых значений (20-25 см), однако, с увеличением ледовых нагрузок оптимальное значение шпации имеет тенденцию к увеличению (до 35-45 см для крупнотоннажных СЛП высоких классов).
- Относительное увеличение массы профилей по сравнению с теоретически оптимальным профилем составляет: для полосового профиля (в области применимости) – 30%, для полособульба – 18%, для полособульба при несимметричной разрезке заготовки – 12%, для таврового профиля – 2%.

Также были получены результаты в обеспечение решения задачи автоматического проектирования КЛЮ судов расчетных сеток. Во-первых, было установлено, что ввиду значительной нелинейности задачи (2) при ограничениях (3), работа оптимизационных алгоритмов оказывается

вычислительно нестабильной. В этих условиях для получения стабильного и быстро работающего алгоритма проектирования таврового профиля предлагается использовать условный расчетный сортамент, сгенерированный с учетом особенностей оптимальной конфигурации профиля КЛЮ. Условный сортамент включает около 3300 тавровых профилей с высотой стенки от 20 до 150 см, а увеличение массы подбираемых таким образом профилей по отношению к оптимальному составляет 2 – 4%.

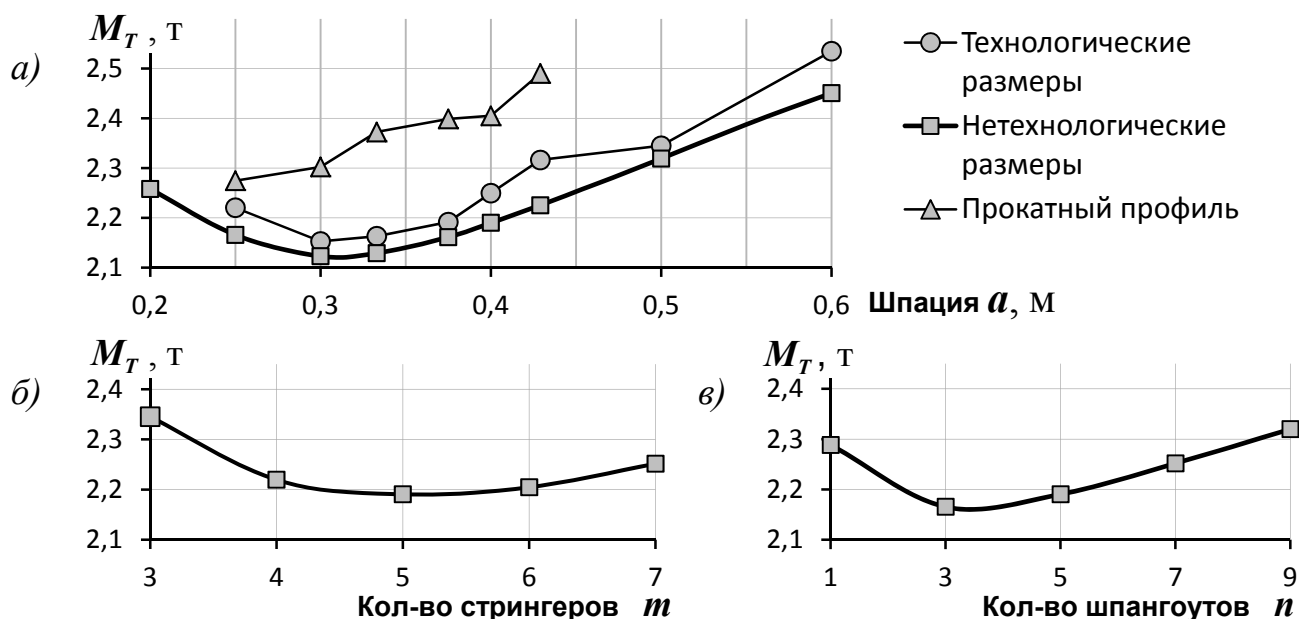


Рис. 1 Изменение удельной массы бортового перекрытия M_T при вариациях параметрами: а) шпацией a (при $m = 5$, $n = 5$); б) количеством стрингеров m (при $n = 5$, $a = 0,4m$); в) количеством шпангоутов n (при $m = 5$, $a = 0,4m$).

Во-вторых, многочисленные численные эксперименты показали, что значения a , m и n в случае автоматических расчетов можно принимать на основании рекомендаций Правил РС и традиционных подходов, без решения общей задачи оптимизации КЛЮ. Это обусловлено тем, что при варьировании a , m и n функция массы КУЛ вблизи экстремума является достаточно полой (изменение на $\pm 5-7\%$), поэтому общую задачу оптимизации КЛЮ имеет смысл решать в условиях детального проектирования конкретного судна. Применение данных упрощений, приводящих к ошибкам при определении $G_{\text{дл}}$ в безопасную сторону, можно признать адекватным точности создаваемой методики.

В третьей главе диссертации разработана новая аналитическая модель поверхности корпуса СЛП.

В начале главы выполнено обоснование принятого подхода к моделированию поверхности, в рамках которого рассмотрены параметрически-управляемые NURBS-модели и аналитические методы. Показано, что типичные обводы СЛП могут быть описаны аналитически, причем аналитический подход,

несмотря на свою неуниверсальность в отношении типов описываемых обводов, удобен в рамках настоящей работы, т.к. отличается простотой реализации, отсутствием численных процедур вычисления ординат поверхности, интерпретируемостью управляющих параметров. Существующие аналитические модели не позволяют напрямую управлять формой проектируемого судна, поэтому необходимо создание новой модели.

Разработанная модель описывает однокорпусное судно, поверхность разбита на основной корпус и выступающие части (ледовый зуб, кормовой скел и выкружки гребных валов). Форма носовой оконечности – с наклонным форштевнем, форма кормы – традиционная, санеобразная или ледокольная. Все параметры модели разделены на оригинальные (должны быть заданы пользователем) и управляющие (могут быть приняты «по умолчанию»). Такой подход позволяет обеспечить решение двух задач: 1 – автоматическая генерация обводов под заданные значения оригинальных параметров, 2 – детализированное управление формой обводов с помощью управляющих параметров. Для каждого параметра получены аналитические выражения, позволяющие определить его максимальное и минимальное значения.

Уравнение ординаты поверхности носовой части U_f задается как произведение безразмерной ординаты ватерлинии $w(x,z)$ и ординаты шпангоута наибольшей ширины $sh(z)$, образование обводов носовой оконечности происходит путем плавного изменения параметров ватерлиний $w(x,z)$ по высоте. Форму носовой оконечности определяют следующие каркасные кривые (см. рис.2): $fsf(z)$ – кривая плоского борта, $stf(z)$ – кривая форштевня, $cur(z)$ – кривая скругления ватерлиний. Описание кормовых обводов производится по шпангоутным сечениям, что позволяет моделировать различные конфигурации кормовой оконечности. В модели кормы широко используются элементы из практики моделирования поверхностей произвольной формы (сплайны, кривые Безье), однако использование численных процедур определения ординаты поверхности исключено за счет депараметризации. В число каркасных кривых кормовой оконечности корпуса входят (рис.2): $fsa(x)$ – кривая плоского борта; $sta(x)$ – кривая ахтерштевня; $fa(x)$ – кривая плоского днища; $wla(x)$ – кривая, в точках которой происходит стык линейной надводной части шпангоутов и их криволинейной части; $uda(x)$ – кривая верхней палубы.

В тексте диссертации приведены все расчетные соотношения разработанной аналитической модели корпуса.

Для сопоставления обводов, получаемых в рамках предлагаемой модели, с обводами реальных судов был выбран ряд проектов, имеющих различную

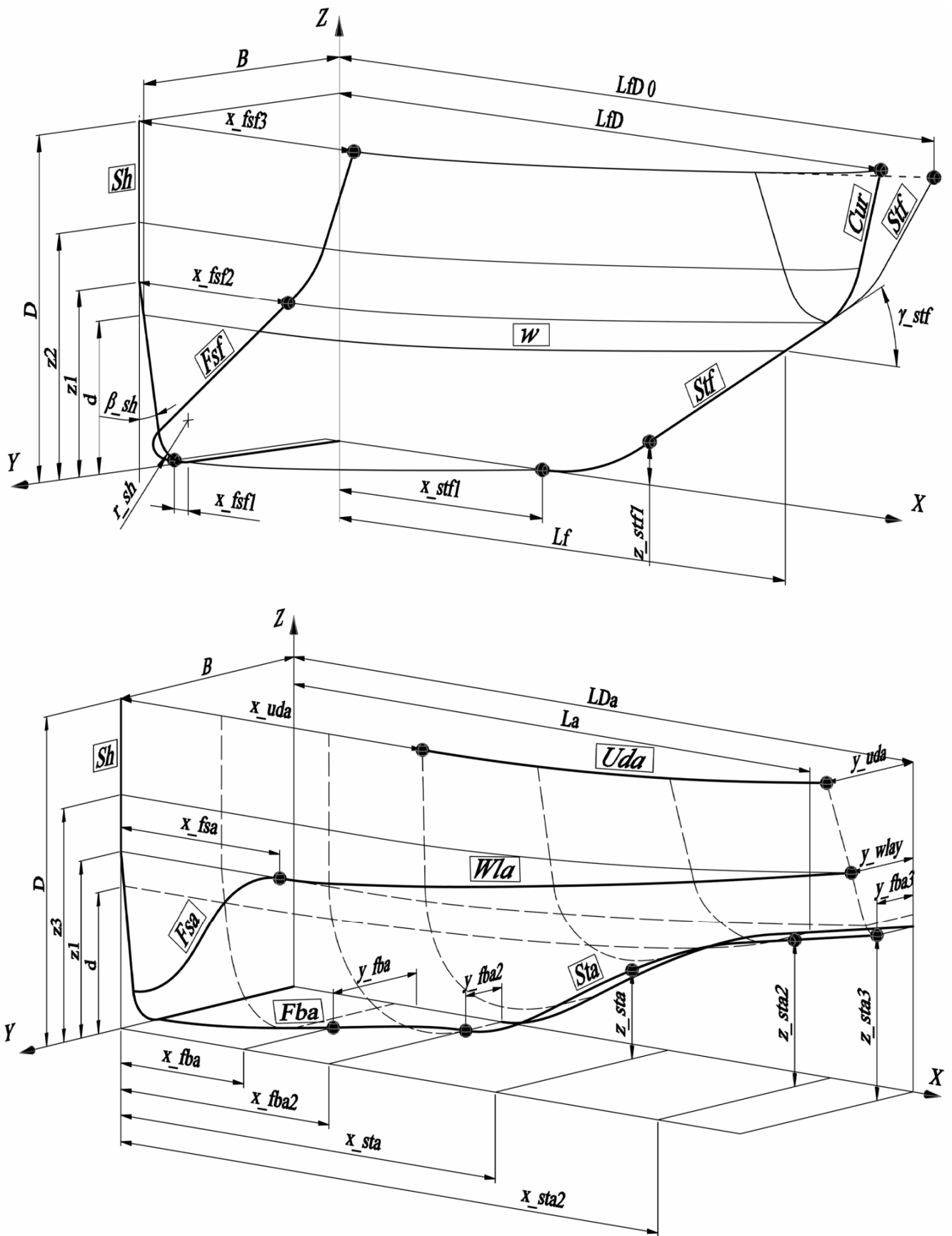


Рис. 2 Эскиз каркасных кривых (названия выделены прямоугольником) и основных управляющих параметров носовой (сверху) и кормовой (снизу) оконечностей.

форму корпуса: двухосадочный ледокол с мощностью на валах 60 МВт (рис.3а); арктическое научно-экспедиционное судно (НЭС); проект арктического танкера с традиционными обводами носовой оконечности и кормой, адаптированной под две поворотные винто-рулевые колонки; проект арктического танкера с ложкообразными носовыми обводами и традиционными обводами кормы (рис.3б). Для обеспечения максимального сближения натуральных и аналитических обводов решалась задача математического программирования, в которой в качестве неизвестных параметров выступали величины, управляющие формой аналитического корпуса, а минимизируемая функция цели представляла собой сумму квадратов разностей ординат натурального и аналитического теоретических чертежей (ТЧ). Для рассмотренных обводов стандартное отклонение составляет 0,2 – 0,7% от ширины судна (закон распределения – нормальный), а максимальное достигает 2-5%. Результаты сопоставления показали, что аналитическая модель позволяет достаточно хорошо описывать традиционные носовые и кормовые обводы, причем как в части углов, так и в части ординат ТЧ. В случае ложкообразного носа или двухвальной кормы, адаптированной под винто-рулевые колонки, аналитическая модель обеспечивает лишь принципиальное описание обводов, хотя и в этом случае характерные углы *Alfa* и *Beta* согласуются хорошо.

Разработанная модель может использоваться не только для решения задач настоящей работы, но также и для оптимизации обводов СЛП, т.к. модель является параметрически-управляемой. В диссертационной работе приведен пример оптимизации обводов НЭС по комплексному критерию, учитывающему сопротивление в сплошном льду, битом льду и ледяной каше. В качестве ограничений приняты условия постоянства водоизмещения, абсциссы центра величины и др. В результате оптимизации значение критерия удалось снизить на 12%, что подтверждает возможность выполнения такого рода оптимизации.

В четвертой главе впервые получены регрессионные зависимости определения масс КЛУ ($G_{\text{лду}}$) судов, спроектированных по требованиям действующей редакции Правил РС.

В начале главы описаны допущения по конструкции и форме корпуса, заложенные в разработанное программное обеспечение (ПО), которое объединяет в себе: аналитическую модель поверхности корпуса; блоки автоматического районирования конструкций (с учетом границ районов ледовых усилений, бортового и днищевоего слеминга, применения концепции DAS, и дополнительных требований Правил РС в средней части корпуса и в оконечностях); блоки определения площадей обшивки, длин балок и расчетных

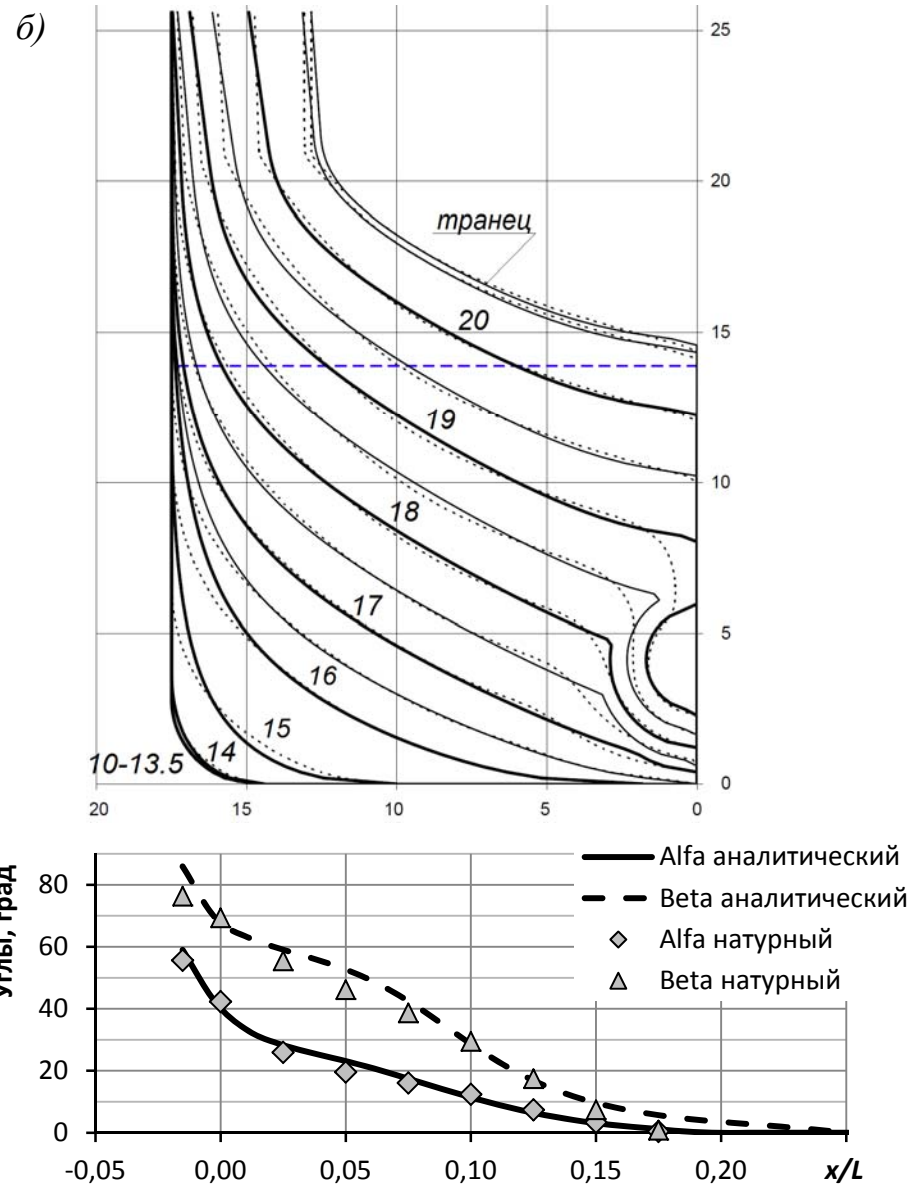
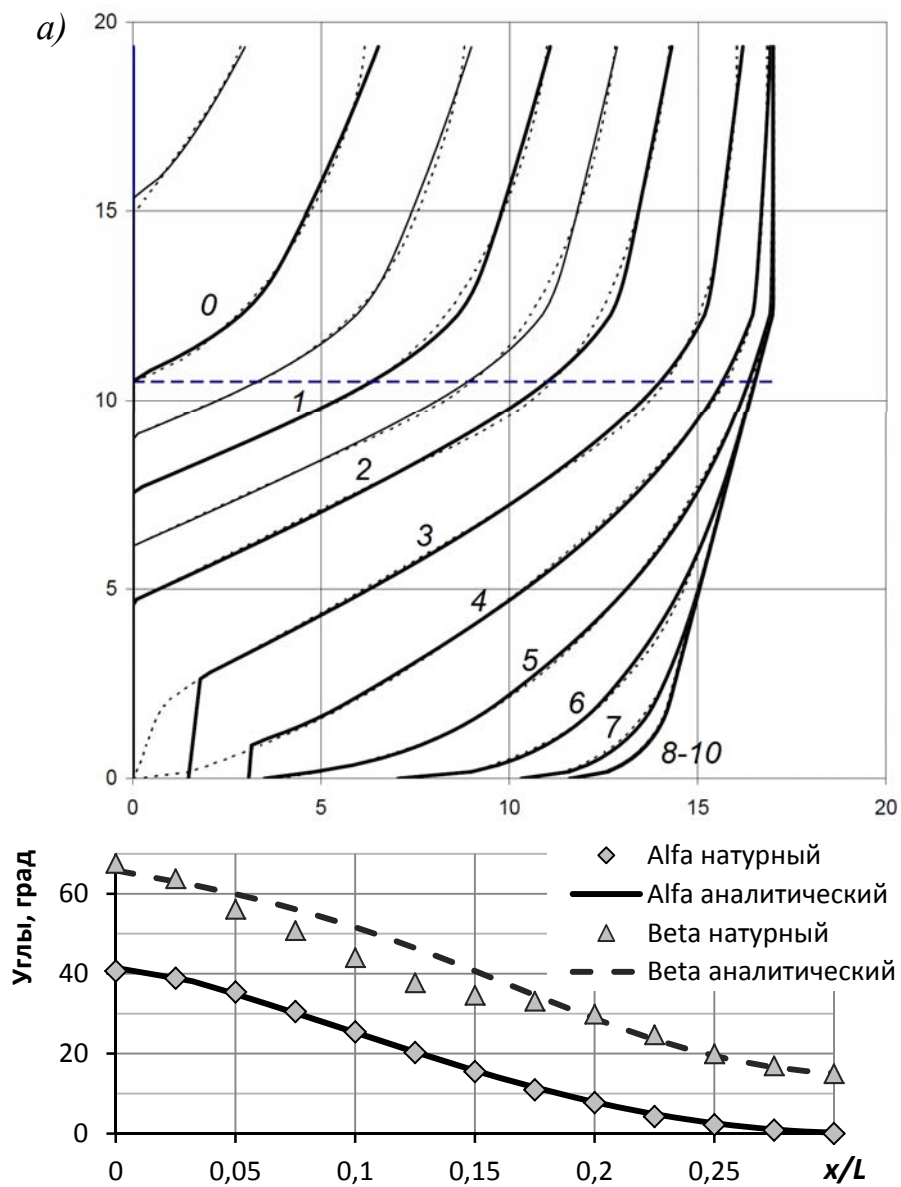


Рис. 3 Сопоставление проекций «Корпус» углов *Alfa* и *Beta* натурального и аналитического теоретических чертежей носовой части ледокола (а) и кормовой части танкера (б). Натурный обвод – пунктир, аналитический – линия.

пролетов; блоки расчета нагрузок и определения размеров связей. Разработанное ПО позволяет получать значение $G_{\text{ЛУ}}$ для конкретного судна, поверхность которого задана аналитической моделью.

Массовые численные эксперименты с помощью созданного ПО позволили проанализировать ряд параметров формы корпуса судна на предмет их влияния на $G_{\text{ЛУ}}$. К числу параметров, оказывающих минимальное, не превышающее 3 – 4 %, влияние на прирост массы КЛЮ можно отнести: угол развала борта на миделе (в диапазоне 0 – 15°); углы наклона форштевня и входа ватерлинии (в рамках диапазонов значений, характерных для судов каждой ледовой категории); число гребных валов (за исключением судов типа *DAS*); балластную осадку судна (при ледовых категориях выше Arc5 – Arc6 и балластных осадках в диапазоне 50 – 80% от осадки в грузу).

Наибольшее влияние на массу КЛЮ оказывают факторы, определяющие величину ледовых нагрузок, положение границ районов ледовых усилений и запасы на коррозию, а именно:

- ледовая категория;
- главные линейные размерения судна: длина (L), ширина (B) и осадка на миделе (d) судна по ватерлинии в грузу;
- осадка на миделе судна в балласте d_6 (при категориях ниже Arc4 – Arc5);
- коэффициент общей полноты C_b при осадке d (при категориях выше Arc5);
- длина носового заострения ватерлинии L_H ;
- применение на судне концепции *DAS*;
- предел текучести материала конструкций R_{eH} ;
- принятые значения надбавок на коррозию.

На основании выделенных факторов были созданы расчетные сетки судов (всего 1632 судна) в диапазонах размерений: $L = 100 – 350$ м; $B = 14 – 57$ м; $d = 6 – 20$ м; $L/B = 5 – 9$; $B/d = 1,7 – 4,4$. Далее посредством анализа и статистической обработки результатов массовых расчетов были построены регрессионные зависимости для определения приращения масс $G_{\text{ЛУ}}$ для судов с категориями усилений Ice1 – Arc4 (G_{1-4}) и Arc5 – Arc9 (G_{5-9}).

$$G_{1-4} = \left[a_1 \cdot L_H^{a_2} \cdot d^{a_3} + a_4 \cdot (a_5 \cdot L + a_6 \cdot L_H)^{a_7} \cdot B^{a_8} \cdot (d - d_6)^{a_9} \right] \cdot k_{ReH}, \quad (4)$$

где $a_1 \dots a_{11}$ – коэффициенты регрессии (табл.1),

k_{ReH} - коэффициент влияния R_{eH} на массу КЛЮ,

$$k_{ReH} = \left(\frac{R_{eH}}{235} \right)^{a_{10} \cdot \ln(L) + a_{11}}, \text{ где } R_{eH} = 235 – 390 \text{ МПа.}$$

$$G_{5-9} = [a_1 \cdot (L + a_2 \cdot L_H)^{a_3} \cdot B^{a_4} \cdot d^{a_5} \cdot C_b^{a_6}] \cdot k_{ReH} \cdot k_{DAS}, \quad (5)$$

где $a_1 \dots a_{11}$ – коэффициенты регрессии (табл. 1),

k_{DAS} – коэффициент влияния концепции DAS на массу КЛЮ,

$$k_{DAS} = \begin{cases} 1, & \text{– если DAS не применяется} \\ 1 + a_9 \cdot L^{a_{10}} \cdot \exp\left(a_{11} \cdot \frac{L}{B}\right), & \text{– если DAS применяется} \end{cases}$$

$k_{ReH} = 1 + \left(\frac{390}{R_{eH}} - 1\right) (a_7 \cdot \ln(L) + a_8)$, – для судов категорий Arc8 и Arc9 принимается $R_{eH} = 315 - 390$ МПа.

Все линейные размерения в (4) и (5) задаются в метрах. Закон распределения погрешностей регрессионных формул близок к нормальному, значения среднеквадратических отклонений (СКВО) регрессионных значений от расчетной статистики приведены в табл.2.

Табл.1 Значения регрессионных коэффициентов в зависимостях (4) и (5)

	Категория ледовых усилений								
	Ice 1	Ice 2	Ice 3	Arc 4	Arc 5	Arc 6	Arc 7	Arc 8	Arc 9
a_1	0			0,0196	1,4519	1,1447	0,9972	0,9896	0,8056
a_2	0			0,8698	2,6096	2,5431	2,4767	2,4103	2,3439
a_3	0			2,1668	0,5561	0,5702	0,5843	0,5984	0,6125
a_4	2,5406				0,3719	0,5276	0,6832	0,8389	0,9946
a_5	0	0,5718	1,2859	2,0012	0,8646	0,8893	0,9139	0,9386	0,9632
a_6	0,4676	0			1,0000	1,1869	1,3738	1,5607	1,7476
a_7	0,5653				0,2754	0,3663	0,4571	0,5479	0,6388
a_8	0	0,0528	0,124	0,1952	-1,2122	-1,5290	-1,8459	-2,1627	-2,4796
a_9	0,6862				0,0565	0,0646	0,0728	0,0809	0,089
a_{10}	-0,4730				0,4992	0,4258	0,3524	0,279	0,2056
a_{11}	2,0473				-0,1859	-0,1562	-0,1265	-0,0969	-0,0672

Табл. 2 Погрешности формул (4) и (5)

	Ice1	Ice2	Ice3	Arc4	Arc5	Arc6	Arc7	Arc8	Arc9
СКВО, %	20,9	22,4	13,1	9,7	7,1	5,8	5,6	7,1	7,1

С помощью расчетной модели были получены оценки вклада различных конструкций в $G_{ЛЮ}$, которые приведены в табл.3 в процентах от $G_{ЛЮ}$. Эти данные позволяют оценить $G_{ЛЮ}$ судна при отличии его конструкции от конструкции судов расчетной сетки (например, при отсутствии двойного борта в машинном отделении или при снижении запасов на коррозию).

На основании зависимостей (4) и (5) можно сделать выводы относительно характера влияния характеристик судна на массы КЛЮ. На рис. 4 приведено изменение отношения $G_{ЛЮ}/\Delta$ (где Δ – водоизмещение судна) для судов различных типов и ледовых классов.

Табл.3 Изменение масс конструкций в районах ледовых усилений

Категория ледовых усиений	Приращение масс конструкций различного типа, расположенных в районах ледовых усиений (в % от $G_{\text{ДУ}}$)										
	Обшивка борта	Обшивка днища	БОН борта	БОН днища	Бортовые рамные балки Т-профиля	Рамные листовые конструкции борта	Стрингеры днища и вертик. киль	Флоры	Платформы (форпик, ахтерпик)	Форштевень	Дополнительный двойной борт (машинное отделение)
Ice1	19	0	56	0	6	5	0	0	7	7	0
Ice2	25	0	53	0	6	6	0	0	5	5	0
Ice3	33	0	47	0	7	7	0	0	3	3	0
Arc4	35	0	31 ^a	0	24 ^a	5	0	0	3	2	0
Arc5	30	1	17 ^b	0	-10 ^c	34 ^c	0	0	2	2	24
Arc6	30	1	23	1	-4	28	0	1	2	2	16
Arc7	30	1	28	1	-4	27	1	2	2	2	10
Arc8	27	3	30	2	-2	24	1	7	2	1	5
Arc9	23	3	32	2	0	23	2	8	2	1	4

Комментарии к табл.3:

- Расстояние между рамными шпангоутами Т-профиля уменьшено вдвое, доля рамных балок Т-профиля в $G_{\text{ДУ}}$ существенно выросла, доля продольных балок основного набора (БОН) борта, наоборот, снизилась из-за уменьшения их расчетного пролета.
- Система набора внешнего борта ледового судна заменена на поперечную, поэтому доля БОН борта в $G_{\text{ДУ}}$ снизилась.
- Начиная с класса Arc5 рамные шпангоуты Т-профиля заменяются на листовые конструкции, поэтому доля рамных балок Т-профиля в $G_{\text{ДУ}}$ резко снижается и становится меньше чем на неледовом судне, а доля рамных листовых конструкций скачкообразно возрастает.

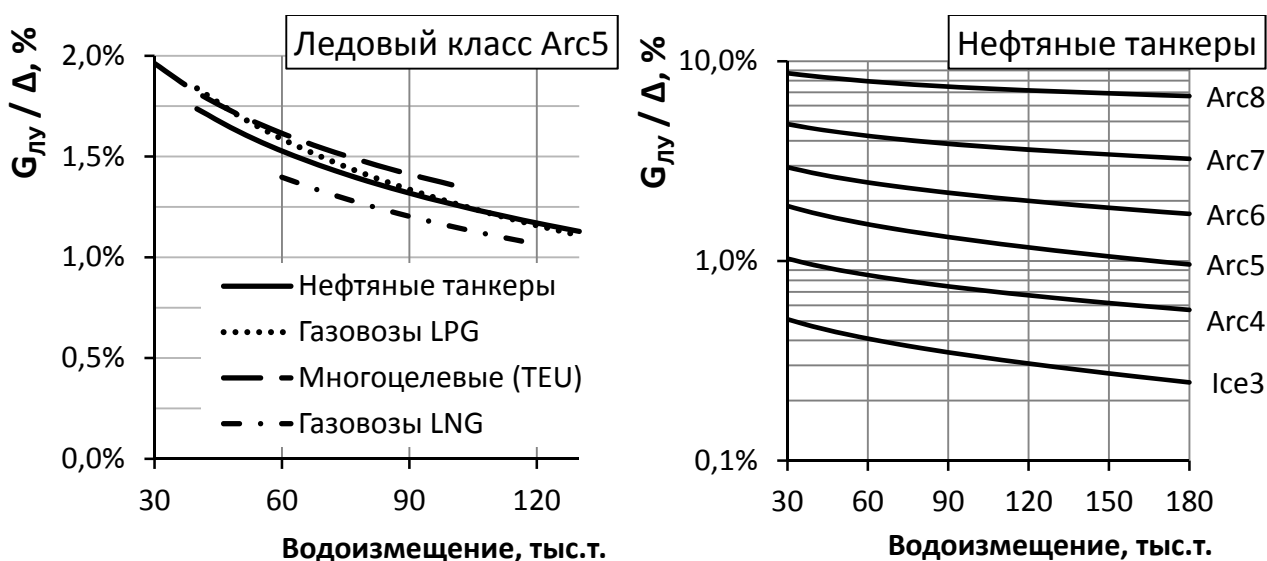


Рис. 4 Изменение относительных значений $G_{\text{ДУ}}/\Delta$ для судов различных типов с ледовым классом Arc5, и танкеров с категорией ледовых усиений Ice3 – Arc8

Видно, что суда разных типов вследствие отличий их главных размерений при одинаковом Δ имеют различные $G_{\text{ЛУ}}/\Delta$, при этом для всех ледовых классов значение $G_{\text{ЛУ}}/\Delta$ снижается по мере роста Δ , а кривая $G_{\text{ЛУ}}/\Delta = f(\Delta)$ достаточно хорошо описывается логарифмической функцией.

В ходе анализа равнообъемных трансформаций корпуса судна ($\Delta = \text{const}$) установлено, что влияние параметров L/B , B/d и C_b на $G_{\text{ЛУ}}$ различно для судов различных размерений и ледовых классов. При этом:

- увеличение L/B при сохранении постоянными B/d и C_b в разных случаях может приводить как к снижению, так и к увеличению $G_{\text{ЛУ}}$, что обусловлено влиянием двух факторов: во-первых, при увеличении L/B увеличиваются и площади районов ледовых усилений корпуса, что приводит к росту $G_{\text{ЛУ}}$; во-вторых, за счет снижения B и увеличения L_H/L , сопровождающих рост L/B при условии постоянного водоизмещения, форма носового заострения становится более благоприятной с точки зрения ледовых нагрузок, что уменьшает $G_{\text{ЛУ}}$.
- увеличение соотношения B/d при постоянстве L/B и C_b приводит, как правило, к снижению $G_{\text{ЛУ}}$, что обусловлено двумя аналогичными «противодействующими» факторами: увеличение площади КЛЮ и снижение ледовых нагрузок за счет увеличения угла развала борта в носу.
- изменение $G_{\text{ЛУ}}$ при увеличении C_b и постоянстве B/d и L/B также имеет противоречивый характер, поскольку, с одной стороны, при увеличении C_b ледовые нагрузки возрастают, а с другой – длина носового заострения ватерлинии L_H/L , определяющая положение границ районов ледовых усилений, существенно снижается, что приводит к уменьшению $G_{\text{ЛУ}}$.
- равнообъемные трансформации корпуса в широких диапазонах изменения L/B , B/d и C_b позволяют добиться снижения $G_{\text{ЛУ}}$ на 7-10%.

Предел текучести материала является одним из наиболее влияющих на массы КЛЮ факторов (изменение массы на 15-35%), что иллюстрируется данными рис.5а, где показано отношение масс КЛЮ с произвольным R_{eH} (G_{ReH}) к массам КЛЮ при $R_{eH} = 235$ МПа (G_{235}). Эффективность применения высокопрочных сталей растет по мере увеличения ледовой категории и длины судна. За счет изменения R_{eH} можно оценить диапазон наиболее вероятных значений $G_{\text{ЛУ}}$: поскольку в реальных КЛЮ все конструкции выполняются из различных сталей, величина R_{eH} может трактоваться как своеобразная условная «функция обеспеченности» значения $G_{\text{ЛУ}}$.

Относительное увеличение массы КЛЮ за счет применения на судне концепции DAS, составляет 15-45% (рис.5б). Это значение растет по мере

уменьшения L/B (т.к. при этом увеличивается вклад кормовых районов ледовых усилений в общую массу КЛЮ), а также при увеличении длины судна, но снижается с ростом ледовой категории. Последнее обусловлено тем, что с ростом ледовой категории к ледовой прочности кормовой оконечности судов традиционного типа предъявляются все более жесткие требования и применение концепции DAS меньше сказывается на массах КЛЮ.

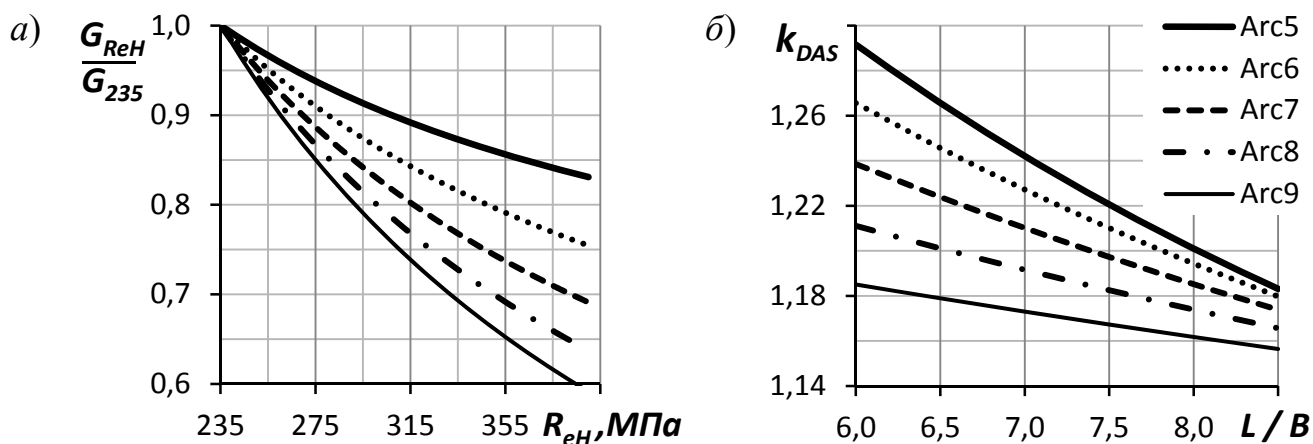


Рис.5 Влияние различных факторов на G_{LU} судна длиной 250 м: а) влияние R_{eH} , б) влияние концепции двойного действия DAS .

В конце 4-ой главы описана верификация расчетных формул. Поскольку прямая верификация зависимостей (4) и (5) крайне затруднительна (отсутствуют пары близких по размерениям натуральных судов с ледовым классом и без него), выполнялась частичная верификация, которая заключается в подтверждении правильности выполнения отдельных технических расчетов. Для этого на основании проектных материалов по ряду современных СЛП выполнялось сравнение расчетных (получаемых на основании расчетного ПО) и натуральных обводов корпуса, значений действующих нагрузок, размеров связей, длин балок, площадей районов и других технических параметров. На основании выполненных сравнений можно приблизительно оценить погрешность зависимости (5) относительно натуральных судов как $\pm 10-15\%$.

Пятая глава посвящена рассмотрению примеров расчета масс КЛЮ с помощью полученных регрессионных зависимостей. Выполнены предпроектные оценки характеристик крупнотоннажного контейнеровоза класса Arc8, вариантных рядов газозовов LNG и LPG классов Arc5-Arc8. В качестве примера решения нетипичных задач приведен пример расчета изменения массы металлического корпуса перспективного бурового судна БС034 при присвоении ему различных ледовых классов, в т.ч. – по требованиям иностранных классификационных обществ. Также выполнено сопоставление результатов расчета масс КЛЮ судна ледового плавания традиционного типа

водоизмещением около 20 тыс. т. с помощью различных формул отечественных авторов и установлен характер изменения масс КЛЮ судов класса Arc7 (УЛА), спроектированных на основании действующей и двух предыдущих редакций Правил РС. Показано, что использование в современных условиях методик оценки масс КЛЮ, разработанных применительно к предыдущим редакциям ледовых Правил РС, приводит к существенным ошибкам (5-7% массы всего металлического корпуса, 25-40% от массы КЛЮ) и, кроме того, не позволяет учитывать ледовые классы Arc6, Arc8, Arc9.

3. ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Разработан общий подход к оценке влияния ледовой категории на весовые характеристики корпуса судна, позволяющий учитывать особенности формы обводов и конструкции корпуса за счет моделирования судовой поверхности и прямых расчетов масс конструкций.
2. Разработан алгоритм двухуровневой оптимизации КЛЮ, включающий внутреннюю (оптимизационное проектирование таврового профиля) и общую (оптимизация параметров топологии перекрытия) задачи, реализация которого позволила получить ряд новых результатов, касающихся закономерностей изменения масс КЛЮ при изменении параметров топологии перекрытий.
3. Предложен вычислительно-устойчивый алгоритм оптимизационного проектирования поперечных сечений балок ледовых усилений в рамках системы нелинейных требований на основании условного расчетного сортамента тавровых профилей.
4. Создана аналитическая модель описания поверхности корпуса СЛП, ориентированная на управление формой проектируемого судна, включая типичные для СЛП углы и линейные размеры. Модель верифицирована посредством сопоставления аналитических и натуральных обводов 4-х судов. Продемонстрирована возможность выполнения оптимизации обводов СЛП на основании разработанной модели.
5. Разработана методика расчетного определения приращения масс КЛЮ, с помощью которой получены новые результаты, в том числе:
 - впервые получены регрессионные зависимости для определения масс КЛЮ, позволяющие учитывать все категорий ледовых усилений корпуса (Ice1-Arc9), наличие концепции двойного действия и прочностные свойства сталей. Формулы применимы для транспортных судов в широком диапазоне размерений, в т. ч. – для судов, не имеющих прототипов.

- установлена степень влияния отношений L/B , B/d , относительной длины носового заострения, коэффициента общей полноты, наличия концепции двойного действия и величины передела текучести материала на массы КЛУ судов различных ледовых классов.

СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Работы, опубликованные в научных рецензируемых изданиях, рекомендуемых ВАК:

1. Таровик О.В. Аналитическое описание обводов носовой оконечности судов ледового плавания // Труды ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова, № 63(347), 2011. С. 93-104.

2. Апполонов Е.М., Таровик О.В. Расчетная методика оценки влияния ледовой категории формы корпуса и конструктивных особенностей на весовые характеристики судов ледового плавания // Труды Крыловского государственного научного центра, № 70 (354), 2012. С. 99-116.

3. Апполонов Е.М., Таровик О.В. Регрессионно-аналитическая модель определения характеристик газозовов СПГ мембранного типа с различными ледовыми категориями // Судостроение, № 1 (806), 2013. С. 12-17.

4. Апполонов Е.М., Таровик О.В. Определение масс конструкций ледовых усилений транспортных судов на ранних стадиях проектирования // Судостроение, № 4 (815), 2014. С. 14-20

5. Таровик О.В. Аналитическая модель поверхности корпуса судна ледового плавания // Труды Крыловского государственного научного центра, № 86 (370), 2015. С. 173-188

6. Таровик О.В. Регрессионная модель определения масс конструкций ледовых усилений транспортных судов на ранних стадиях проектирования // Труды Крыловского государственного научного центра, № 86 (370), 2015. С. 151-172

Публикации в других изданиях:

7. Таровик О.В., Апполонов Е.М. Оптимизационное проектирование конструкций ледовых усилений судов и ледоколов // RAO/CIS Offshore-2009. СПб.: ХИМИЗДАТ. 2009. Т. 2. С. 228-234.

8. Крестьянцев А.Б., Луцкевич А.М., Таровик О.В. Суда-газовозы на трассах СМП // Морской флот, № 06/1504, 2012. С. 14-19.

9. Апполонов Е.М., Таровик О.В. Предельные нагрузки и упругопластическое деформирование судовых балочных конструкций. Учебное пособие. СПб.: Изд-во СПбГМТУ, 2013. 158 с.