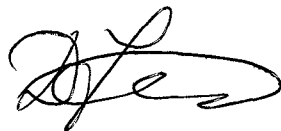


На правах рукописи

Федотов Дмитрий Геннадьевич



**МЕТОДИКА ПРОЕКТИРОВАНИЯ ГИБКОГО
ОГРАЖДЕНИЯ АМФИБИЙНЫХ СУДОВ НА
ВОЗДУШНОЙ ПОДУШКЕ**

05.08.03 – проектирование и конструкция судов .

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



003 17486 1

**Санкт-Петербург
2007**

Работа выполнена на кафедре проектирования судов ГОУВПО “Санкт-Петербургского государственного морского технического университета”

Научный руководитель Доктор технических наук, профессор
Демешко Геннадий Федорович

Официальные оппоненты. Доктор технических наук,
Дьяченко Владимир Кузьмич

Кандидат технических наук,
Симонов Юрий Андреевич

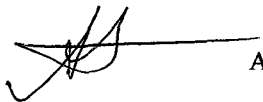
Ведущая организация: ФГУП ЦМКБ “АЛМАЗ”

Защита состоится «20» ноября 2007 г в 14-00 на заседании диссертационного совета Д 212 228 01 при Санкт-Петербургском государственном морском техническом университете по адресу 190008, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, д 3, актовый зал

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Санкт-Петербургского государственного морского технического университета

Автореферат разослан «15» октября 2007 г.

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



А И Гайкович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Амфибийные суда и корабли на воздушной подушке (АСВП) давно и успешно зарекомендовали себя как уникальное высокоскоростное транспортное средство. В оборонной сфере ими обеспечиваются десантные и патрульные операции, используются они также в качестве кораблей охраны в ближней морской зоне, в пограничных и таможенных службах. Не менее успешны они и при использовании в гражданских целях как амфибийные транспортные средства в условиях труднодоступных районов Крайнего Севера, Сибири и Дальнего Востока. Аналогичный опыт за рубежом получен в США, Великобритании, Франции, Финляндии, Канаде. Реальный опыт эксплуатации в военной и гражданской областях насчитывает уже более 40 лет. Здесь Россия уверенно занимает лидирующее положение. В целом можно говорить о значительных успехах в разработке методологии проектирования АСВП. В то же время наиболее уязвимой подсистемой этих аппаратов остается гибкое ограждение (ГО) области воздушной подушки, крепящееся по ее периметру к нижней части жесткого корпуса и обеспечивающее судну проходимость, амфибийность, остойчивость, минимизирующее затраты энергии на поддержание ВП. ГО приобретает форму только в надутом состоянии. Постоянно контактируя с подстилающей поверхностью и будучи изготовленным из прорезиненных синтетических материалов, ГО подвержено вибрации, флагеляции, истиранию, разрыву и имеет ресурс, многократно меньший, чем АСВП в целом и даже такие проблемные его подсистемы, как энергетическая установка, воздушные винты, воздухонагнетатели.

Объектом исследования в рассматриваемой диссертационной работе является ГО АСВП.

Предмет исследования – физическая, математическая, параметрическая и трехмерная модели ГО, и способы использования этих моделей для расчета формы, массы, прочности, выполнения раскроя материала ГО для его изготовления.

Цель работы – разработка методики проектирования формы ГО и создание с этой целью его параметрической модели, которая необходима для использования в прикладных расчетах остойчивости, ходкости, прочности, массы конструкций ГО, а также раскроя материала ГО, идущего на его изготовление.

Для достижения поставленной цели требуется рассмотреть совокупность проблем, которые могут быть сформулированы как *задачи исследования*.

1 Создать обобщенную методику расчета формы и построения бортовой, носовой, кормовой, угловой секций, секций внутреннего контура ГО и ГО в целом,

2 На основе разработанной методики проектирования формы ГО создать его трехмерную параметрическую модель, как основу электронного представления ГО с условием использования ее во всех автоматизированных расчетах свойств и характеристик ГО в CAD/CAM/CAE системах при проектировании АСВП,

3 Разработать методику применения МКЭ для расчета характеристик напряженно-деформированного состояния конструкций ограждения в статической постановке с использованием созданной здесь трехмерной модели ГО, как пример возможности применения 3D модели в CAE системах,

4 Разработать методику расчета массы “устройства механического ограждения ВП” в зависимости от имеющихся в распоряжении проектанта геометрических, конструктивных и проектных характеристик как непосредственно ГО, так всего судна в целом. С этой целью выполнить статистический анализ масс элементов натуральных ГО и массы крепежа ГО к корпусу всех разработанных в ЦМКБ “Алмаз” АСВП,

5 Отработать возможность использования созданной здесь трехмерной модели ГО для получения автоматизированного раскроя материала ГО на секции, узлы, элементы для последующего выполнения рабочих чертежей,

Методы исследования и решений Для решения задач, поставленных в работе, потребовалось привлечение аппарата и методов регрессионного анализа, последовательных приближений, конечных элементов, теории сложных систем, параметрического и трехмерного моделирования объекта, аппарата и программных продуктов систем Inventor, ANSYS, Foran, средств Microsoft Office и Mathcad

Информационная база исследования В числе информационных источников использовались результаты профильных исследований, анализа, систематизации большого количества отечественных и зарубежных авторов и творческих коллективов в виде данных и сведений из перечисленных в списке использованной литературы, книг, журнальных статей, научных докладов, материалов научных конференций и семинаров, технических отчетов ЦНИИ им. ака. Крылова, технических отчетов и документация по реальным проектам, созданным в ЦМКБ Алмаз, проектной документации ОАО «Ярославрезинотехника»

Научная новизна

1 Разработана оригинальная обобщенная методика проектирования формы гибкого ограждения, содержащая способы расчета и построения формы как всего гибкого ограждения, так и каждой из его секций,

2 Впервые создана трехмерная параметрическая модель ГО, позволяющая рассчитать геометрические параметры сразу всего гибкого ограждения, получить традиционный теоретический чертеж ГО, параметры и характеристики любого из элементов ГО, и служащая основой для автоматизированных расчетов свойств и характеристик как самого ГО, так и судна в целом в CAD/CAM/CAE системах,

3 С использованием МКЭ (программный комплекс ANSYS) выполнен статический расчет прочности всего ГО, получены натяжения и деформации в любых точках ограждения, произведена проверка сходимости результатов расчета по этой методике с данными замеров на существующих КВП,

4 Разработана методика автоматизированного расчета массы ГО в зависимости от имеющихся в распоряжении проектанта геометрических, конструктивных и проектных характеристик как непосредственно ГО, и судна в целом,

5 Разработана методика автоматизированного раскроя материала с использованием созданной здесь 3D модели

Практическая ценность работы определяется повышением эффективности (сокращением сроков, улучшением качества) проектирования ГО в результате применения разработанных методов. Это приводит к увеличению надежности и повышению ресурса, т.е. к снижению стоимости эксплуатации ГО. Результаты могут использоваться в проектных организациях. Работа насыщена большим количеством проектных рекомендаций для конструктора

На защиту выносятся следующие результаты работы

1 Оригинальная обобщенная методика проектирования формы гибкого ограждения,

2 Трехмерная параметрическая модель ГО, созданная в CAD/CAM системе Autodesk Inventor,

3 Алгоритм расчета прочности ГО методом конечных элементов с использованием системы ANSYS,

4 Методика автоматизированного расчета массы ГО,

5 Методика автоматизированного раскроя материала ГО

Степень достоверности результатов проведения исследований.

Адекватность созданной методики проектирования формы и созданной трехмерной параметрической модели подтверждена сравнением результатов расчета формы ГО по данной методике с данными теоретического чертежа ГО реально существующего КВП, получена приемлемая погрешность (от 2 до 6% в зависимости от стадии проектирования)

Произведено сравнение результатов расчета натяжений в ГО, полученных в системе ANSYS с замеренными на КВП “Зубр”, погрешность составляет 5 – 9 %

Результаты получаемые при расчете массы устройства механического ограждения (ГО) по предложенной в работе методике сравнены с массами, полученными по рабочим чертежам ГО. Сходимость столь же благоприятна.

Расчетные модели и алгоритмы содержат аппроксимирующие расчетные зависимости, базирующиеся на данных по реально существующим судам, разработанным коллективом ЦМКБ “Алмаз”

Внедрение результатов работы. Разработанные на основании результатов диссертации методики, применяются для проектирования ГО АСВП (ЦМКБ «АЛМАЗ»)

Апробация работы и публикации. Основные положения и результаты диссертации обсуждались на III съезде Российского научно-технического общества судостроителей им акад А Н Крылова I Российской научно-практической конференции судостроителей «Единение науки и практики 2007г», на Девятой международной конференции «Российское судостроение и судоходство, деятельность портов, освоение океана и шельфа» Нева-2007, на XXII Международной конференции «Математическое моделирование в механике деформируемых тел и конструкций. Методы граничных и конечных элементов»

По теме диссертации опубликованы 5 работ (3 статьи и 2 доклада) Из них 2 в личном авторстве, доля автора в остальных публикациях от 60% до 90% В изданиях рекомендованных Перечнем ВАК опубликовано 3 работы Одна из них в личном авторстве, доля автора в 2 остальных 60% и 90%

Структура и объем работы. Работа состоит из введения, 5-ти глав и заключения, содержит 177 страниц основного текста (включая 55 таблиц и 149 рисунков), 4 страницы содержания, списка принятых сокращений и обозначений и списка литературы из 151 названия

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении формулируется цель диссертации, указаны задачи исследования, обосновывается актуальность выполняемых исследований, дается краткое описание и характеристика работы, формируется информационная модель ГО АСВП как подсистемы судна (см рис 1)

Первая глава диссертации посвящена созданию физических и математических моделей геометрических поверхностей гибкого ограждения (ГО) и соответствующей методики расчета формы

Исходные данные для проектирования ГО Абсолютные размеры области ВП длина воздушной подушки (L_n), ширина воздушной подушки (B_n), высота ГО ($h_{го}$) Физические характеристики области ВП давление в воздушной подушке (P_n), коэффициент перепада в носовой и бортовой секциях (K_p) Геометрические характеристики корпуса СВП вертикальная база ГО (отстояние внешней точки крепления ГО от ОП) в носовых, бортовых и кормовых секциях (z_g), ширина корпуса СВП (B_c)

Рассматриваемое ГО состоит из наружного и внутреннего контуров Наружный контур ограждает воздушную подушку (ВП), создаваемую под днищем судна. Он представляет собой тороидальную надувную оболочку – гибкий надувной ресивер закрепленный по двум замкнутым огибающим периметр судна линиям

В нижней части надувного гибкого ресивера по его наружному контуру имеются отверстия для выхода воздуха, под которыми по всему периметру ГО закреплены НЭ, образующие нижний ярус ГО носовые и бортовые, угловые и кормовые конусные элементы

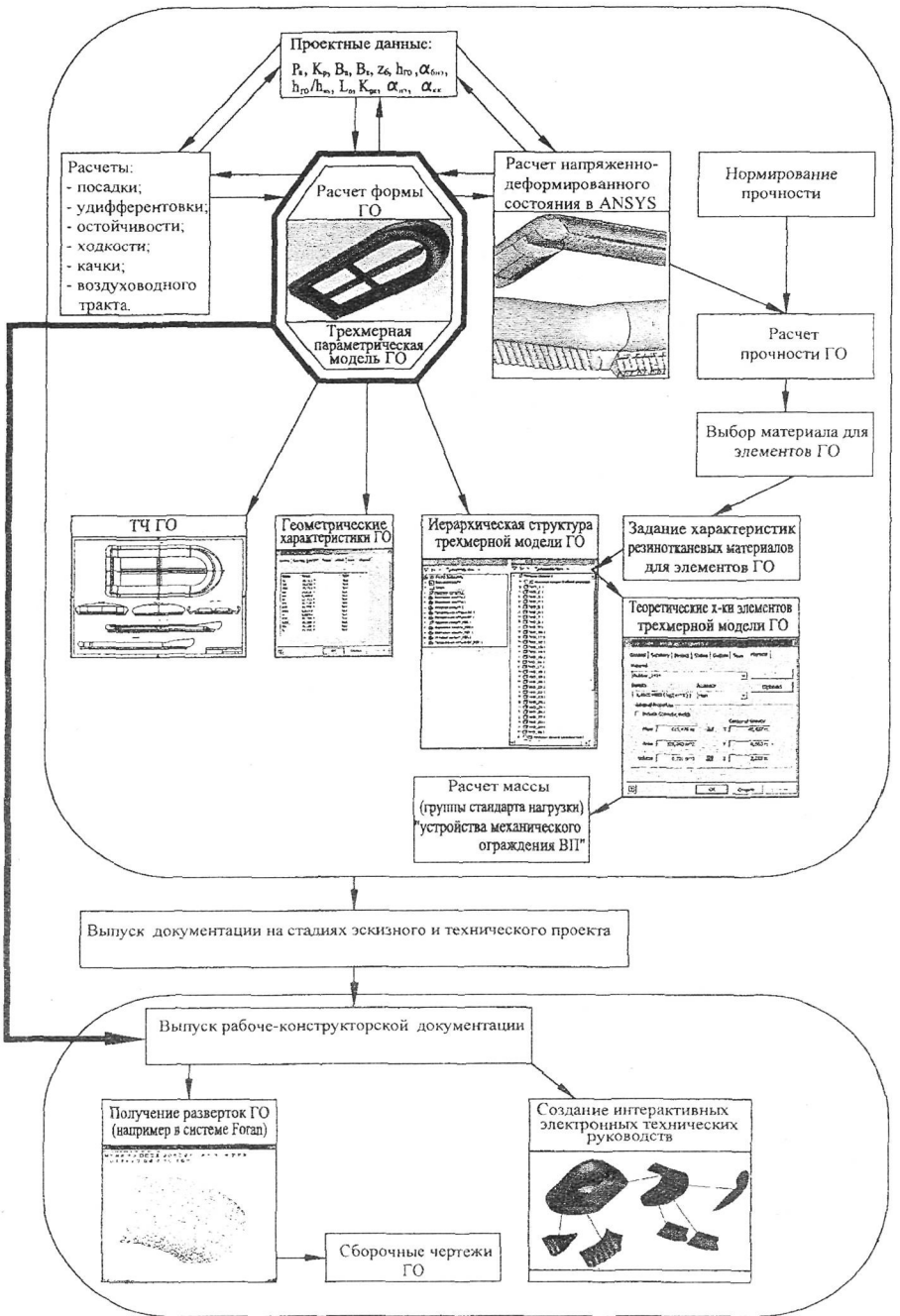


Рисунок 1 – Информационная модель ГО АСВП как подсистемы судна.

Под днищем судна вместе с этим расположен внутренний контур, секционирующий область ВП и предназначенный для обеспечения поперечной и продольной остойчивости СВП. Внутренний контур состоит из продольного секционирующего киля, расположенного в районе диаметральной плоскости и поперечных килей. Этот контур представляет собой надувные оболочки цилиндрической формы, в нижней части которых закреплены НЭ.

НЭ наружного и внутреннего контуров, образующие нижний ярус ограждения, расположены в районе контакта с экраном. В отличие от гибкого надувного ресивера они изолированы друг от друга и потому обеспечивают большую гибкость и податливость нижней части ограждения, чем достигается уменьшение площади контакта с препятствиями и величины сопротивления движению судна от ГО и увеличивается срок службы гибкого надувного ресивера и упрощается технология ремонта.

Кроме того, эта схема ГО предусматривает плавное изменение угла наклона носовых НЭ к экрану $\alpha_{но}$ от минимального значения в ДП в носу до максимального - по борту $\alpha_{бор}$, применение конусных НЭ с внутренними оболочками в угловой секции ГО.

Расчет параметров формы бортовой секции ГО обычно сводится к определению положения статического равновесия гибкого контура, образуемого плоским сечением ограждения вертикальной плоскостью на различных участках периметра воздушной подушки. Основные допущения при таких расчетах:

- материал ограждения считается абсолютно гибким, невесомым и нерастяжимым,
- продольные напряжения при расчете поперечных сечений ГО не учитываются,
- избыточное давление в надувной секции гибкого ресивера верхнего яруса ограждения принимается равным P_p , и распределено это давление равномерно по внутренней поверхности надувного гибкого ресивера,
- избыточное давление в открытых со стороны ВП НЭ нижнего яруса, принимается также распределенным равномерно и равным давлению в воздушной подушке P_n ,
- навесной элемент считается абсолютно твердым телом ограниченным прямыми линиями.

Расчетом параметров формы бортовой секции ГО в разное время занимались В В Кличко, К В Бондарец, Е В Петин, В К Дьяченко, И Т Егоров, В Т Соколов, Э А Паравян, Б Г Фрейдин, А Г Хакимов, Н Ю Цвилиева, Ю В Падуков, Е И Сухов, В Г Лободин, В А Лукашевский, Г И Чемакина, К Г Галимханов, Ю С Литвиненко, Б Н Мартынец, и другие.

Работы по расчету параметров формы носовой секции ГО базируются на тех же допущениях, что и для бортовой секции. Для расчета параметров формы носовой секции в основном используется метод совмещенных сечений разработанный В В Кличко.

Кормовые секции ГО могут выполняться как одноярусными, так и многоярусными, состоящими соответственно из одноярусной или двухъярусной надувной секции гибкого ресивера в верхней части и навесных элементов нижнего яруса, по конструкции существенно отличающихся от НЭ бортовых и носовых секций ГО. Как правило, эти НЭ являются закрытыми со стороны ВП и поэтому допущения принимаемые о распределении избыточного давления в них, отличается от допущения принимаемого для бортовой и носовой секции ГО. Расчету параметров формы кормовой секции ГО посвящены работы Т А Дьяковой, В В Кличко и Е В Петина.

По расчету параметров формы угловой секции ГО удалось обнаружить только работу Е В Петина.

В работе приведено подробное описание элементов и формы бортовой, носовой, кормовой, угловой и секций внутреннего контура ГО.

Для расчета и построения формы ГО в работе предлагается комплексный графо-аналитический метод, использующий некоторые положения проанализированных работ

Построение **бортовой секции** производится в следующей последовательности

- строится контур НЭ открытого типа,
- находятся параметры формы внешней и внутренней частей гибкого ресивера бортовой секции,
- находится форма гибкого ресивера над НЭ,
- определяется высота, ширина НЭ и длина его нижней части,
- строится линия противовибрационной диафрагмы

На рис 2 представлена расчетная схема поперечного сечения бортовой секции

Основные расчетные уравнения для бортовой секции ГО

$$P_p = K_p P_n \quad (1) \quad l_{ю} = 2,04l_{\infty} - 0,18 \quad (2)$$

$$k_6 = \frac{(P_p - P_n)l_{ю}^2 - P_n f_6^2 - P_n P_6}{2l_{ю} P_p} \quad (3)$$

$$d_6 = \frac{(P_p - P_n)l_{ю}^2 + P_n f_6^2 + P_n P_6 - 2l_{ю} P_n f_6^2}{2l_{ю} (P_p - P_n)} \quad (4)$$

$$R_x = \sqrt{\left(\frac{P_p \sqrt{r_x^2 - k_6^2} + P_6 P_n}{P_p - P_n} \right)^2 + d_6^2} \quad (5)$$

$$x_{x_{-1}} = r_x \left(\sqrt{(K_p - \sin^2 \alpha_1) / (K_p - \sin^2 \alpha_2)} \sin \alpha_2 - \sin \alpha_1 \right) \quad (6)$$

$$y_{x_{-1}} = r_x \left[\cos \alpha_1 - \sqrt{(K_p - \sin^2 \alpha_1) / (K_p - \sin^2 \alpha_2)} \cos \alpha_2 \right] K_p / (K_p - 1) \quad (7)$$

$$s_{ю} = 0,6051h_{ю} - 0,0076 \quad (8) \quad l_{д1} \approx 0,05h_{ГО} \quad (9)$$

$$l_{6,x} = 1,6947Ln(h_{ГО}) + 2,0488 \quad (10)$$

Расчет параметров формы и построение **носовой секции ГО** производится в следующей последовательности

- определяется форма внешней и внутренней частей гибкого ресивера сечения I-I (в ДП),
- строится контрольная линия, внешняя и внутренняя линии крепления ГО, см рис 5,
- определяются границы носовой секции и задаются секущие плоскости, см рис 3,5,
- находятся формы сечений II-II IX-IX см рис 4

Основные расчетные уравнения для носовой секции ГО

$$m_k = 0,0138L_n + 0,0841 \quad (11) \quad L_n = L_n - m_k \quad (12)$$

$$h_{ГР} = h_{ГО} - h_{ю} \quad (13) \quad \Delta L_{ю} = 2,57h_{ГР} - 0,12 \quad (14)$$

$$z_n = 2,76z_6 - 0,067 \quad (15) \quad L_k = L_n + \Delta L_{ю} \quad (16)$$

$$L_s = 0,7563L_n + 0,0146 \quad (17) \quad R_{H2} = B_x / 2 - l_{6,x} \quad (18)$$

$$L_{сн} = L_n - B_n / 2 \quad (19)$$

Расчет параметров формы и построение **кормовой секции ГО** производится в следующей последовательности

- определяются границы кормовой секции, см рис 7,
- определяются характерные вертикальные размеры элементов кормовой секции,
- строится форма кормового навесного конусного элемента и гибкого ресивера второго яруса,
- рассчитывается и строится форма гибкого ресивера первого (верхнего) яруса,
- производится дополнительные построения элементов кормовой секции

Основные расчетные уравнения для кормовой секции ГО

$$m_k = 0,0138L_n + 0,0841 \quad (11) \quad L_n = L_n - m_k \quad (12)$$

$$h_{ГП} = h_{Г0} - h_{к0} \quad (13) \quad \Delta L_{к0} = 2,57h_{ГП} - 0,12 \quad (14)$$

$$z_n = 2,76z_0 - 0,067 \quad (15) \quad L_k = L_n + \Delta L_{к0} \quad (16)$$

$$L_2 = 0,7563L_n + 0,0146 \quad (17) \quad R_{H2} = B_k / 2 - l_{0-x} \quad (18)$$

$$L_{0H} = L_n - B_n / 2 \quad (19)$$

$$L_{к0} = B_k / 2 - l_{0-x} \quad (20)$$

$$h_{к2} = (0,35 \quad 0,4)h_k \quad (22)$$

$$r_{к2} = \frac{h_{к2}}{2} \quad (24)$$

$$h_k = \frac{h_{Г0}}{2} \quad (21)$$

$$\beta_k \geq \arcsin \sqrt{1/K_{pk}} \quad (23)$$

$$e_k = (0,2 \quad 0,4)h_{к2} \quad (25)$$

На рис 5 представлена расчетная схема поперечного сечения кормовой секции ГО

$$L_{к0} = B_k / 2 - l_{0-y} \quad (20)$$

$$h_{к2} = (0,35 \quad 0,4)h_k \quad (22)$$

$$r_{к2} = \frac{h_{к2}}{2} \quad (24)$$

$$l_k = \frac{\sqrt{K_{pk}(f_k^2 + p_k^2) - p_k^2} - f_k}{K_{pk} - 1} \quad (26)$$

$$R_k = \sqrt{\left(\frac{K_{pk}r_{к2} + p_k}{K_{pk} - 1}\right)^2 + d_k^2} \quad (29)$$

$$h_k = \frac{h_{Г0}}{2} \quad (21)$$

$$\beta_k \geq \arcsin \sqrt{1/K_{pk}} \quad (23)$$

$$e_k = (0,2 \quad 0,4)h_{к2} \quad (25)$$

$$s_{к0} = 0,14h_{Г0} + 0,05 \quad (27)$$

$$l_x = 0,079h_{Г0} + 0,0142 \quad (30)$$

$$l_{x-xII} = 3,2984h_{Г0} - 0,4459 \quad (31)$$

Расчет параметров формы и построение **угловой секции ГО** производится в следующей последовательности

- определяются границы угловой секции и необходимые сечения, см рис 8,
- рассчитывается и строится краене кормовое бортовое сечение угловой секции (сечение XV-XV), см рис 10,
- рассчитываются и строятся сечения XII-XII и XIII-XIII, см рис 10,
- определяется положение крайнего навесного элемента открытого типа,
- определяется положение бортовой кромки кормового участка секции,
- строится диафрагма конусного НЭ,
- рассчитывается и строится угловой участок угловой секции, см рис 9,
- строится форма конусообразной оболочки (сечения XIX-XIX-XXI-XXI), см рис 10,
- определяется положение кормовой кромки бортового участка секции,
- строится линия крепления НЭ

Основные расчетные уравнения для угловой секции ГО

$$r_y = 0,2379h_{Г0} - 0,0388 \quad (32) \quad L_{0y} = l_{x-xII} - L_y \quad (33)$$

$$L_{0y} = B_k / 2 - r_y - L_{к0} \quad (34)$$

$$d_y = \frac{K_p h_y^2 + f_y^2 + p_y^2 - 2h_y f_y}{2h_y(K_p - 1)} \quad (36)$$

$$k_y = \frac{K_p h_y^2 - f_y^2 - p_y^2}{2h_y K_p} \quad (35)$$

$$R_{yXV} = \sqrt{\frac{K_p \sqrt{r_{yXV}^2 - k_y^2} + p_y}{K_p - 1} + d_y^2} \quad (37)$$

Расчет параметров формы и построение **внутреннего контура ГО** производится в следующей последовательности

- строится носовая часть продольного киля, см. рис. 12;
- строится центральная часть продольного киля, см. рис. 12;
- строится кормовая часть продольного киля, см. рис. 12;
- строится поперечный киль внутреннего контура, см рис. 11.

Основные расчетные уравнения для внутреннего контура ГО:

$$L_{XXIII} = L_k - l_1 - f_1 - r_n \quad (38)$$

$$l_n = 0,0278h_{ГО} + 0,0078 \quad (39)$$

$$h_n = 0,3939h_{ГО} + 0,0104 \quad (40)$$

$$L_{XXIV} = l_{k_XXIII} + f_2 \quad (41)$$

$$L_{nk} = (0,01...0,03)L_n \quad (42)$$



Рисунок 8- Границы и сечения угловой секции.



Рисунок 9- Аксонометрическое изображение углового участка угловой секции.

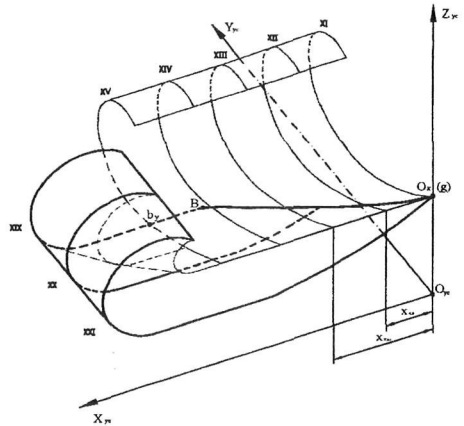


Рисунок 10- Аксонометрическое изображение сечений бортовой, кормовой и конусообразной частей оболочки угловой секции.

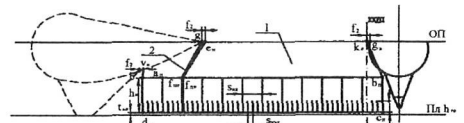


Рисунок 11- Продольное сечение поперечного киля.

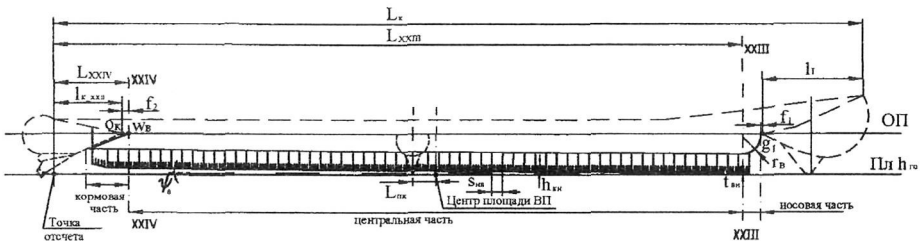


Рисунок 12- Продольный разрез внутреннего контура ГО.

Вторая глава диссертации посвящена созданию трехмерной параметрической модели ГО. Первые CAD (computer-aided design) системы являлись лишь специализированными графическими редакторами, их возможности были ограничены производительностью компьютеров. Такие системы автоматизировали создание чертежа с помощью плоских геометрических примитивов - отрезков прямых, дуг окружностей, текстовых надписей и т.д. Одним из важных изменений при развитии CAD систем стало то, что первичной стала модель объекта, по которой уже в дальнейшем строился чертеж. Конструктор стал работать с трехмерной твердотельной моделью объекта и в любой момент мог ее видеть и модифицировать. Одним из методов проектирования, позволивших совершить качественный прорыв в развитии CAD-систем стала так называемая параметризация. Термин "параметризация" получил довольно большое распространение. Он может означать и процесс создания модели и результат проектирования, который характеризует параметрические свойства модели. Параметрическое моделирование это процесс создания параметрической модели объекта, состоящий из набора геометрических примитивов и параметрических связей.

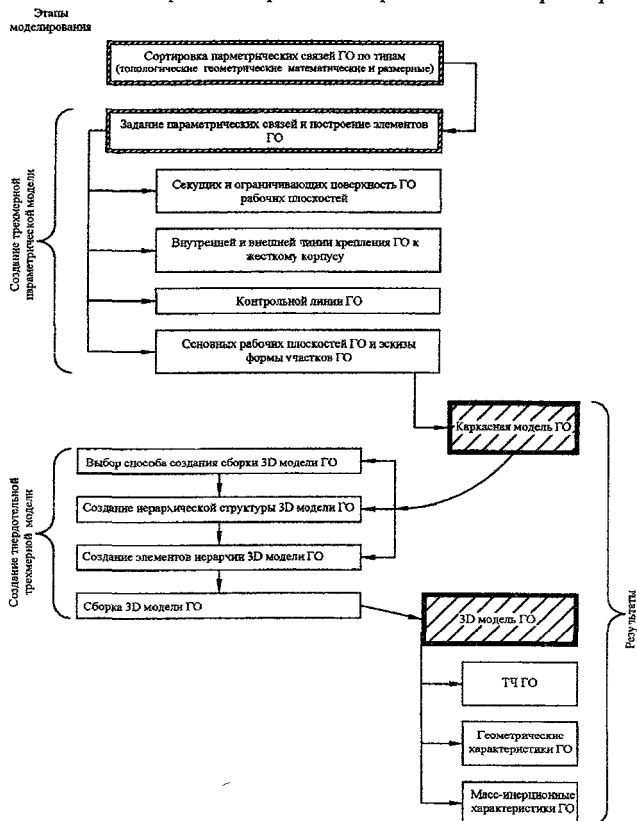


Рисунок 13 – Этапы создания трехмерной параметрической модели ГО в системе Inventor

Процесс параметрического моделирования можно описать следующим образом: в ходе построения система накапливает конструктивные параметры и соотношения между ними, а также формирует протокол (историю) создания геометрии, позволяя простым изменением параметров легко модифицировать и регенерировать модель. Важно, что параметрическая модель создается интерактивно, без какого-либо программирования (за ис-

ключением задания расчетных зависимостей) Хотя способ создания параметрической модели прост, задача расчета геометрии для новых значений параметров - сложная, главным образом из-за того, что могут быть определены произвольные зависимости переменных. Для расчета применяются два типа решателей - вариационные и аналитические, однако ни в одной системе нет гарантии, что нужная геометрия будет найдена, хотя отказы происходят в достаточно сложных случаях. Параметрическое моделирование обладает рядом практических преимуществ: интуитивный процесс создания, возможность легкой модификации и повторного использования объекта. Параметризация позволяет существенно сократить сроки проектирования объектов, особенно сложных, так как большую часть времени занимает не само проектирование, а корректировка объекта. Связь - это некое ограничение, накладываемое на проектируемую модель объекта, которое может быть описано математическими уравнениями. На любом этапе проектирования должны соблюдаться все ограничения (связи), наложенные на модель.

Для автоматизации процесса проектирования гибкого ограждения на основании полученных расчетных зависимостей и предложенной методики проектирования формы ГО в CAD/CAM системе Autodesk Inventor, создана трехмерная параметрическая модель ГО. Созданию трехмерной параметрической модели это составная часть параметрического проектирования ГО. Параметрическое проектирование конструкций - это процесс определения размеров конструктивных элементов, удовлетворяющих требованиям нормативных документов. Этапы создания трехмерной параметрической модели ГО в системе Inventor представлены на рисунке 13.

Созданная 3D модель ГО, позволяет рассчитывать геометрические параметры сразу всего гибкого ограждения, а также получать традиционный теоретический чертеж ГО.

Проверена адекватность созданной трехмерной параметрической модели ГО. На стадии эскизного проектирования при задании в качестве исходных данных двенадцати величин, получаемая осредненная погрешность составляет 5,81 %. На стадии технического проектирования к исходным данным, вводимым на стадии эскизного проектирования добавляются еще девять величин. Получаемая погрешность не превышает 5%, осредненная погрешность составляет 2,35 %.

В третьей главе диссертации рассмотрено современное состояние исследований по материалам, проблеме внешних сил, статическому расчету ГО, описаны свойства и характеристики применяемых конструкционных материалов, использован современный метод расчета прочности (МКЭ), для расчета напряженно-деформированного состояния ГО в статической постановке.

Все описанные виды ГО изготовлены из первоначально плоских резинотканевых листов, наиболее часто для изготовления ГО используется резинотканевый материал, состоящий из одного слоя ткани и двух слоев резины ГО отечественных серийных АСВП в зависимости от размеров и назначения судна изготавливалось из специальных резинотканевых материалов толщиной от 0,9 до 5,3 мм производства ОАО "Ярославрезинотехника" и других фирм. В работе приведены физико-механические характеристики резинотканевых материалов, показано влияние на них воздействия воды, ультрафиолетового облучения, температуры.

Для материалов, применяющихся в конструкции ГО, кривая деформации как правило нелинейна и при растяжении соответствует мягкой характеристике, которая приблизительно описывается зависимостями предложенными в работах В.А. Лепетова, Н.П. Стрекозова, Л.А. Гогешвили, Ю.Н. Корбанова и др.

Нелинейность характеристики резинотканевых материалов является следствием того, что в них применяется капроновый текстиль. В реальных условиях работы ГО наибольшие значения относительной деформации ГО АСВП составляют

- при парении над экраном без хода продольные (по основе) 0,5 – 2 %, поперечные (по утку) 2 – 5,5 %,
 - при движении на тихой воде поперечные (по основе) 2 – 4 %, продольные (по утку) 4 – 8 %,
 - при движении на волнении поперечные (по основе) 2,5 – 5 %, продольные (по утку) 4 – 9 %

Как следует из графиков, растяжения сжатия, до растяжения порядка 2 – 3 % (по основе) и 4 – 6 % (по утку) резинотканевые материалы практически следует линейной зависимости

Получены зависимости удельной массы и разрывной нагрузки резинотканевого материала от его толщины, а также зависимость разрывной нагрузки от давления в гибком ресивере

Резинотканевые материалы ГО отличаются, в основном, покрытием, изготавливаемым из различных комбинаций смесей на основе искусственной (синтетический каучук) и натуральной (естественный каучук) резины. Резиновые обкладки выполняют ряд важных функций, например, обеспечивают упругость и износостойкость ткани, а также ее воздухо-непроницаемость. Кроме этого, важно, чтобы ткань в процессе работы ГО в любых сезонных условиях, в установленном диапазоне внешних температур, сохраняла свою мягкость. Механические свойства прорезиненных тканей определяют такой важный технико-экономический показатель качества ГО, как эксплуатационный ресурс. Условия работы гибкого ресивера и НЭ ГО существенно различаются. По этой причине при изготовлении гибкого ресивера и НЭ ГО, для отечественных серийных АСВП, обычно применяются две марки прорезиненной ткани, с близкими, но не одинаковыми механическими характеристиками.

Основные сведения о свойствах резины и методах ее расчета можно найти в работах В.Л. Бидермана, Э.Э. Лавендела, Р.С. Ривлина, Л. Трелоара, D. A. Meyer'a и I Sommer'a откуда следует, что резина является практически несжимаемым материалом, имеющим при растяжении в пределах умеренных деформаций мягкую, а при сжатии - жесткую характеристику. Для описания деформации резиновых изделий используют функцию удельной потенциальной энергии. Предложены различные способы задания такой функции, обзоры и анализ которых сделаны в работах Б.Х. Аврущенко с соавторами, А.В. Вовериса, Н.Ф. Емельянова, В.Э. Магулы, К.Ф. Черных и И.Н. Шубиной, H. Alexander'a, K.C. Valanis'a и R. F. Landel'a и др.

Ткань с ПВХ покрытием - один из материалов, очень хорошо зарекомендовавших себя для производства надувных лодок и оболочек катамаранов, байдарок, рафтов, ГО в США. Данных об использовании тканей с ПВХ покрытием для изготовления ГО в нашей стране не удалось найти. В работе приводятся физико-механические характеристики тканей с ПВХ покрытием, также произведено сравнение зависимости разрывной нагрузки от веса материала для резинотканевых материалов и тканей с ПВХ покрытием. Показано, что ткани с ПВХ покрытием позволяют достичь лучшего соотношения вес-прочность, чем резинотканевые материалы, для малых АСВП.

Проблема определения внешних сил, действующих на ГО в процессе эксплуатации, является в настоящее время мало исследованной. По своему происхождению эти силы можно разделить на две группы: "статические", то есть действующие на ограждение при неподвижном висении СВП над поверхностью, и "динамические", то есть вызванные движением судна.

Под действием давления воздуха снаружи и изнутри ГО и других внешних сил стенки ограждения получают значительные перемещения и поэтому задачи статического расчета ГО являются принципиально нелинейными. Для статического расчета ГО обычно приме-

яется теория мягких оболочек, основы которой были разработаны С А Алексеевым, а сама теория была развита Б И Друзем, В Э Магулой, Б И Усюкиным и их учениками

В работе дано краткое описание применяемых в работе метода конечных элементов и программного комплекса ANSYS, выбранного для расчета напряженно-деформированного состояния ГО в статической постановке

На основе данных о растяжении-сжатии резинотканевых образцов до 2% удлинения, были получены упругие характеристики материалов, которые были заданы в ANSYS В расчет ГО применялась линейно-упругая изотропная модель материала для всех оболочек ГО

Статический расчет ГО был выполнен для ГО проекта “Зубр” В расчете были учтены вес материала, деформируемость материала (что позволило учесть неравномерное распределение напряжений по ГО), изменение значений и направлений компонентов вектора нагрузки вследствие увеличения площади, на которую действует давление и нормалей в различных точках всей поверхности ГО

Произведена верификация расчета и экспериментальных данных При сравнении результатов расчета напряжений в ГО, полученных в системе ANSYS с данными, замеренными на КВП “Зубр” погрешность составляет 5 – 9 %

В результате выполнения расчета характеристик напряженно-деформированного состояния ГО методом конечных элементов в системе ANSYS

- выполнен статический расчет всего ГО, получены напряжения и деформации в любых точках ограждения (последние расчетным методом получены впервые),

- выявлены наиболее нагруженные узлы конструкции, что позволяет рационально выбрать марки резинотканевых материалов, с учетом их реальных физико-механических характеристик для изготовления узлов и элементов ограждения и снизить его массу

Четвертая глава диссертации посвящена рассмотрению состава механического устройства ограждения ВП и созданию методики автоматизированного расчета массы ГО на основе полученной здесь трехмерной модели геометрической поверхности и регрессионных исследований по существующим АСВП

Механическое ограждение ВП включает в себя надувное эластичное ГО и элементы крепления (крепеж) ГО к жесткому корпусу АСВП

Основными компонентами надувного эластичного ГО являются полотнища, из которых изготавливаются элементы ГО Отмечены следующие конструктивные особенности рассматриваемого типа ГО

- секции ГО, соединяются между собой с помощью болтовых соединений (монтажные стыки),

- полотнища ГО соединяются между собой с помощью клея, капроновых нитей и резиновых полос,

- продольные и поперечные комингсы из прорезиненных тканей и диафрагмы присоединяются к гибкому ресиверу с помощью клея, капроновых нитей и резиновых полос,

- узлы крепления различных типов НЭ и гибких ресиверов второго яруса к продольным и поперечным комингсам,

- резинотканевые усиления в районе НЭ и краев полотнищ присоединяются к гибкому ресиверу с помощью клеевого материала и капроновых нитей,

- в состав ГО входят также заделочные ленты, “ушки” для подъема ГО, нитки для сшивания отдельных элементов ГО, клеевые материалы, крепеж в виде металлических планок и шайб, шнуровые и в виде полос оттяжки, необходимые для соединения отдельных элементов, уплотнительная полоса, устанавливаемая по периметру внешней линии крепления наружного контура гибкого надувного ресивера к жесткому корпусу судна

Крепится ГО к жесткому корпусу АСВП с помощью металлических рояльных петель, включающих стержневые оси, прижимных полос, болтов, гаек, шайб, специальных прокладок

Видно, что на ранних стадиях проектирования АСВП точное определение массы всех элементов устройства механического ограждения ВП затруднительно. Здесь предложена методика определения массы устройства механического ограждения ВП на стадиях эскизного и технического проектирования.

Масса устройства механического ограждения ВП (M_{0211} , 0211 – код элемента действующего стандарта нагрузки) на стадии эскизного и технического проектирования может быть определена как сумма двух слагаемых

$$M_{0211} = M_{021101(Г\text{О})} + M_{021102(сп)} \quad (38)$$

где $M_{021101(Г\text{О})}$ – масса ГО, $M_{021102(сп)}$ – масса крепежа ГО к корпусу АСВП

На стадии эскизного проектирования АСВП можно говорить лишь пока о массе полотнищ основных элементов ГО: гибкого ресивера, НЭ, диафрагм, оттяжек, торцевых стенок кормовых секций и внутреннего контура ГО. Исходя из сказанного, массу ГО ($M_{021101(Г\text{О})}$) можно определить по формуле

$$M_{Г\text{О}(Э)} = \sum_{i=1}^n (m_{сп} + m_{нэ} + m_{д} + m_{от} + m_{с}) \kappa_{н} \quad (39)$$

где $m_{сп}$ – масса полотнищ гибкого ресивера, $m_{нэ}$ – масса полотнищ НЭ, $m_{д}$ – масса полотнищ диафрагм, $m_{от}$ – масса полотнищ оттяжек, $m_{с}$ – масса полотнищ торцевых стенок кормовых секций и внутреннего контура ГО, $\kappa_{н}$ – коэффициент, учитывающий массу остальных конструктивных элементов ГО, на стадии эскизного проекта.

Таким образом, для использования формулы (39) должен быть определен коэффициент $\kappa_{н}$ для типовых секций ГО.

На стадии технического проекта, кроме массы полотнищ основных элементов ГО, известно также следующее количество и размеры монтажных стыков, размеры комингсов, размеры конструктивных усилений на основных элементах секций.

Исходя из этого, масса ГО ($M_{021101(Г\text{О})}$) определяется зависимостью

$$M_{Г\text{О}(Т)} = \sum_{i=1}^n (M_{р} + M_{нэ} + M_{д} + M_{к} + M_{от} + M_{с}) \kappa_{Т} \quad (40)$$

где $M_{р}$ – масса полотнищ и усилений гибкого ресивера, $M_{нэ}$ – масса полотнищ и усилений НЭ, $M_{д}$ – масса полотнищ и усилений диафрагмы, $M_{к}$ – масса комингсов, $M_{от}$ – масса полотнищ и усилений оттяжек, $M_{с}$ – масса полотнищ и усилений стенок, $\kappa_{Т}$ – коэффициент, учитывающий массу вспомогательных материалов и крепежных деталей по монтажным стыкам.

Таким образом, для использования формулы (40) необходимо определить коэффициент $\kappa_{Т}$ для типовых секций ГО.

Сборочный чертеж крепления ГО к корпусу АСВП разрабатывается только на стадии рабочего проектирования. Массу крепления ГО к корпусу АСВП ($M_{021102(сп)}$) на стадиях

эскизного и технического проектирования предлагается определять в зависимости от массы ГО $M_{021101(ГО)}$ согласно статистическим данным обработанным в работе

$$M_{021102(ФР)} = 0,1064M_{021101(ГО)} + 65,78, \text{ кг} \quad (41)$$

Для определения коэффициентов $\kappa_Э$ и $\kappa_Т$ были использованы комплекты рабочих чертежей ГО проектов “Чилим”, “Омар”, “Мурина”, “Джейран” “Зубр”, разработанные ОАО “Ярославрезинотехника”

Расчет коэффициентов по комплектам рабочих чертежей выполнен в табличной форме для каждой секции гибкого ограждения. Были получены средние значения коэффициентов $\kappa_Э$ и $\kappa_Т$ для каждой секции всех указанных выше ГО. Выявлено, что независимо от размеров и конструкции ГО значения коэффициентов $\kappa_Э$ и $\kappa_Т$ для типовых секций довольно близки, что позволяет рекомендовать их для расчета массы гибкого ограждения по формулам (39) и (40). В табл. 1 приведены рекомендуемые значения коэффициентов $\kappa_Э$ и $\kappa_Т$ для типовых секций ГО.

Таблица 1- Рекомендуемые значения коэффициентов $\kappa_Э$ и $\kappa_Т$ для типовых секций ГО

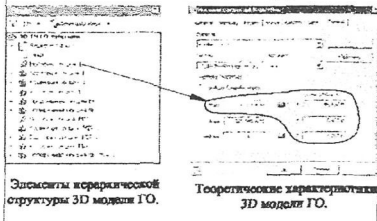
Наименование секции	Среднее значение коэффициентов $\kappa_Э$ и $\kappa_Т$	
	$\kappa_Э$	$\kappa_Т$
Носовая	1,68	1,26
Бортовая	1,73	1,24
Угловая	1,77	1,31
Кормовая	1,68	1,28
Продольная ВК	1,86	1,28
Поперечная ВК	1,85	1,30

В случае необходимости для более точного определения массы ГО целесообразно пользоваться значениями коэффициентов, определенных для комплектов ГО, выбрав в качестве прототипа наиболее близкое по конструкции и характеристикам АСВП ГО.

Таким образом разработан алгоритм расчета массы устройства механического ограждения ВП на стадии эскизного и технического проектов (см. рис. 14) с использованием 3D модели ГО, позволяющей автоматизировано получить площадь поверхности использующего материала ГО, толщины которого для каждого элемента были получены по результатам использования методики расчета прочности (см. главу 3). Одновременно определяются и координаты центра масс как элементов, так и всего ГО в целом. Произведен проверочный расчет массы ГО ($M_{021101(ГО)}$) на примере созданной трехмерной параметрической модели ГО для КВП “Зубр”, соответствующей стадии эскизного проектирования. В результате погрешность при расчете массы ГО ($M_{021101(ГО)}$) с использованием средних значений коэффициентов $\kappa_Э$ составляет 1,03%, при расчете по коэффициентам $\kappa_Э$ полученных для близкого прототипа она составляет 0,35%. Погрешность по координате $x_{ГО}$ составляет 2,71%, по координате $z_{ГО}$ составляет 1%. При расчете массы крепления ГО к корпусу КВП ($M_{021102(ФР)}$) погрешность составляет 4,71%, погрешность по координате $x_{ФР}$ – 7,29%, по координате $z_{ФР}$ – 4,74%.

ИСХОДНАЯ ИНФОРМАЦИЯ (Эскизный проект)
3D модель ГО, обладающая информацией о физических характеристиках элементов ГО:
-масса элементов ГО;
-координаты ЦТ элементов ГО.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МАССЫ И КООРДИНАТ ЦТ ЭЛЕМЕНТОВ ГО ПО 3D МОДЕЛИ



ОПРЕДЕЛЕНИЕ МАССЫ И КООРДИНАТ ЦТ ГО

$$M_{ГОЗ} = \sum_{i=1}^n m_i + m_1 + m_2 + m_3 \text{ кг} \text{ и } x_{ГОЗ}, y_{ГОЗ}, z_{ГО}$$

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МАССЫ И КООРДИНАТ ЦТ КРЕПЛЕНИЯ ГО К ЖЕСТКОМУ КОРПУСУ АСВП

- определение массы крепления ГО к жесткому корпусу АСВП:

$$M_{0210(к)} = 0,1054 M_{0210(ГО)} + 65,78 \text{ (кг)}$$

- определение абсциссы ЦТ массы крепления ГО к жесткому корпусу АСВП:

$$x_{кп} = 1,0494 x_{ГО} + 0,0078$$

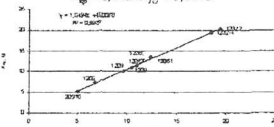


Рисунок - Зависимость абсциссы ЦТ массы крепления ГО ($x_{кп}$) от абсциссы ЦТ массы ГО

- определение аппликат ЦТ массы крепления ГО к жесткому корпусу АСВП;

$$z_{кп} = 0,5593 z_{ГО} - 0,0982$$

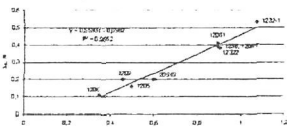


Рисунок - Зависимость аппликат ЦТ массы крепления ГО ($z_{кп}$) от аппликат вертикальной базы ГО ($z_{ГО}$).

$$M_{0211}, x_{0211}, y_{0211}, z_{0211}$$

(на этапе эскизного проектирования)

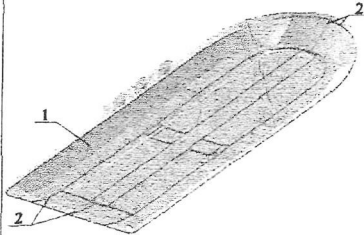
ИСХОДНАЯ ИНФОРМАЦИЯ (Технический проект)

1) 3D модель ГО, обладающая информацией о физических характеристиках элементов ГО:

-масса элементов ГО;

-координаты ЦТ элементов ГО.

2) 3D модель корпуса АСВП с указанием размеров и координат мест расположения на жестком корпусе планки подкрепления под ГО.



3D модель корпуса АСВП с планкой подкрепления под ГО.

1- жесткий корпус АСВП; 2- планка подкрепления под ГО.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МАССЫ И КООРДИНАТ ЦТ ЭЛЕМЕНТОВ ГО ПО 3D МОДЕЛИ

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МАССЫ И КООРДИНАТ ЦТ ГО

$$M_{ГОТ} = \sum_{i=1}^n (M_i^к + M_i^1 + M_i^2 + M_i^3 + M_i^4) \text{ кг} \text{ и } x_{ГОТ}, y_{ГОТ}, z_{ГО}$$

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МАССЫ И КООРДИНАТ ЦТ КРЕПЛЕНИЯ ГО К ЖЕСТКОМУ КОРПУСУ АСВП

- определение массы крепления ГО к жесткому корпусу АСВП:

$$M_{0210(к)} = 0,1054 M_{0210(ГО)} + 65,78 \text{ (кг)}$$

- определение ЦТ массы крепления ГО к жесткому корпусу АСВП:

а) с использованием 3D модели корпуса АСВП определяем ЦТ массы планки подкрепления под ГО ($x_{кп}, y_{кп}, z_{кп}$);
б) $x_{кп} = x_{кп}$; $y_{кп} = y_{кп}$; $z_{кп} = z_{кп} - h_{кп}$.

$$M_{0211}, x_{0211}, y_{0211}, z_{0211}$$

(на этапе технического проектирования)

Рисунок 14– Алгоритм расчета “массы устройства механического ограждения ВП” с использованием 3D модели ГО.

В пятой главе диссертации реализована возможность использования созданной трехмерной модели ГО для получения автоматизированного раскроя. Дается краткое описание гибкого ограждения как поверхности, показано, что наибольшую сложность для развертывания представляют носовая и угловая части ГО, так как такие поверхности не относятся к классу развертывающихся, их полная кривизна не равна нулю. Развертывание прочих поверхностей ГО тривиально. Выполнен краткий обзор работ по построению разверток ГО.

До настоящего времени, когда ТЧ ГО строился вручную, построение разверток приходилось выполнять на стадии эскизного проектирования, для определения площадей поверхности объемной фигуры, которую представляет надувной гибкий ресивер, а по ним и массы ГО. Применение CAD/CAM систем для построения электронной трехмерной модели ГО позволяет обойтись без построения разверток для определения массы. Построение разверток необходимо только на стадии рабочего проектирования, как источника информации для изготовления элементов ГО из резинотканевых материалов.

Перечислены CAD/CAM системы, которые можно использовать для получения разверток поверхностей ГО. Разработан алгоритм экспорта созданной трехмерной параметрической модели ГО в CAD/CAM систему FORAN для получения раскроя элементов ГО на примере носовой секции ГО КВП “Зубр”. Полученный раскрой полотнищ секций ГО может быть использован для выполнения рабочих чертежей (например, в AutoCAD’e).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В представленной диссертации решена задача, имеющая практическое значение для повышения эффективности и ускорения процесса проектирования ГО АСВП и повышения качества проектных работ по таким судам.

Основные результаты диссертационной работы состоят в следующем:

1 Предложена оригинальная комплексная методика проектирования формы гибкого ограждения, содержащая способы расчёта и построения формы всего гибкого ограждения,

2 Для автоматизации процесса проектирования гибкого ограждения на основании полученных расчетных зависимостей и предложенной методики проектирования формы ГО в CAD/CAM системе Autodesk Inventor, создана трехмерная параметрическая модель ГО, позволяющая рассчитывать геометрические параметры сразу всего гибкого ограждения, а также получать традиционный теоретический чертеж ГО,

3 С использованием системы ANSYS выполнен статический расчет прочности всего ГО, получены натяжения и деформации в любых точках ограждения. Выявлены наиболее нагруженные узлы конструкции, что позволяет для изготовления узлов и элементов ограждения рационально выбирать марки резинотканевых материалов с учетом их реальных физико-механических характеристик и снижать массу ГО,

4 Разработана методика расчета массы ГО в зависимости от имеющихся в распоряжении проектанта геометрических, конструктивных и проектных характеристик как самого ГО, так всего судна в целом. С этой целью выполнен обстоятельный статистический анализ масс элементов нагурных ГО и массы крепежа ГО к корпусу существующих АСВП.

Получены зависимости для определения массы ГО на различных стадиях проектирования с использованием созданной здесь трехмерной параметрической модели ГО

5. Показана возможность экспорта созданной трехмерной параметрической модели ГО в тяжелые CAD/CAM системы, например в FORAN Произведена развертка поверхности ГО Полученный раскрой элементов ГО может быть использован для выполнения рабочих чертежей (например, в AutoCAD'e)

6. Методика автоматизированного проектирования ГО АСВП представлена как его информационная модель, рассматривающая ГО как подсистему судна в целом

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

а) в изданиях, рекомендуемых Перечнем ВАК:

1 Автоматизированное проектирование гибкого ограждения (ГО) амфибийных судов на воздушной подушке (статья) Федотов Д Г // журнал «Морской вестник» – СПб · июнь 2007 – №2 (22) – с 86-88 (автор - 100%)

2 Теория, проектирование и изготовление гибких ограждений области воздушной подушки для современных амфибийных СВП (тезисы доклада) Демешко Г.Ф., Федотов Д Г // журнал «Морской вестник» – СПб сентябрь 2007 – №3 (6) специальный выпуск – с 56-58 (автор - 60%)

3 Методика расчета массы в системе автоматизированного проектирования гибких ограждений амфибий судов на воздушной подушке (статья) Федотов Д Г, Цыпляков Д Е // журнал «Морской вестник» – СПб сентябрь 2007 – №3 (23). – с 88-91 (автор - 90%)

б) в других изданиях:

4 Параметрическое проектирование гибких ограждений области воздушной подушки как подсистемы амфибийных судов на воздушной подушке (тезисы доклада), Демешко Г Ф, Федотов Д Г // Девятая международная конференция «Российское судостроение и судоходство, деятельность портов, освоение океана и шельфа» Нева-2007 – СПб сентябрь 2007 Программа и тезисы докладов с 41-43 (автор - 60%).

5 Статический Расчет прочности гибкого ограждения амфибийных СВП с использованием программного комплекса ANSYS XXII Международная конференция Математическое моделирование в механике деформируемых тел и конструкций Методы граничных и конечных элементов – СПб. октябрь 2007 (автор - 100%)

ИЦ СПбГМТУ, Лоцманская, 10
Подписано в печать 10.10.2007 Зак 3487. Тир.100 1,0 печ л.