

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Комсомольский-на-Амуре государственный
технический университет»

На правах рукописи

Шталь Яков Александрович

**Проектирование и разработка технологии изготовления
экспериментальных моделей судов для опытового бассейна**

Направление подготовки

26.04.02 «Кораблестроение, океанотехника и системотехника объектов морской
инфраструктуры»

**АВТОРЕФЕРАТ
МАГИСТЕРСКОЙ ДИССЕРТАЦИИ**



2016

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Комсомольский-на-Амуре
государственный технический университет»

Научный руководитель доктор технических наук, профессор
Тарануха Николай Алексеевич

Рецензент доктор технических наук, профессор
Виктор Михайлович Козин

Защита состоится «25» июня 2016 года в 15 часов 00 мин на заседании государственной экзаменационной комиссии по направлению подготовки 26.04.02 «Кораблестроение, океанотехника и системотехника объектов морской инфраструктуры» в Комсомольском-на-Амуре государственном техническом университете по адресу: 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина 27, ауд. 222

Автореферат разослан __ июня 2016 г.

Секретарь ГЭК

М. П. Шадрин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Создание новых транспортных систем которыми являются транзитные перевозки через Северный морской путь (характеризуется двухрежимностью эксплуатации судов: чистая вода и лед), а также возросшим требованием к энерговооруженности судов со стороны международной морской организации требуют проведения исследований в области ходкости судов.

Одним из главных методов исследования ходкости судов является проведение буксировочных испытаний их моделей в опытовых бассейнах. При этом возникает необходимость в большом количестве подобных испытаний с различными вариантами форм корпуса, что требует изготовления большого количества экспериментальных моделей. Одной из научных лабораторий кафедры «Кораблестроения» Комсомольского на Амуре государственного технического университета (КнАГТУ) является, малый опытовый бассейн который предназначен для проведения данных исследований.

Для проведения буксировочных испытаний в малых опытовых бассейнах по сравнению с большими опытовыми бассейнами необходимо соблюдать жесткие требования, одним из которых является точность изготовления моделей.

Внедрение современных CAD/CAM технологий изготовления экспериментальных моделей позволяет повысить технологичность и точность изготовления, а следовательно расширить эксплуатационные возможности опытового бассейна КнАГТУ

Целью магистерской диссертации повышение экспериментальных возможностей и качества проведения экспериментов за счет внедрения в практику опытового бассейна КнАГТУ CAD/CAM технологий изготовления экспериментальных моделей

Основными задачами диссертационной работы являются:

- провести анализ специальной литературы и другие научно-технической информации о современных достижениях отечественной и зарубежной науки и техники в области проведения исследований в опытовых бассейнах и их техническое обеспечение;
- провести анализ особенностей проведения экспериментальных исследований в малых опытовых бассейнах;
- провести анализ методов моделирования поверхности судов. Дать рекомендации по выбору CAD систем;
- разработать методику моделирования судовой поверхности в предложенной CAD системе;
- разработать технологию и методологию изготовления экспериментальных моделей, ориентированную на изготовлении на фрезерных станках с ЧПУ.

Объектом исследования в данной диссертации является техническое и технологическое обеспечение гидродинамических экспериментов в опытовых бассейнах.

Предметом исследований является методология проектирования поверхности корпуса судна и технология изготовления моделей для проведения гидродинамических испытаний.

Методы исследования. Для решения поставленных задач и достижения намеченной цели использовались современные методы компьютерного моделирования поверхности сложных форм, классические методы проектирования и перестроения теоретического чертежа.

Научную новизну результатов исследования состоит в разработке технологии и методологии проектирования и изготовления опытовых моделей с применением CAD/CAM технологий

Практическая значимость и ценность работы заключается во внедрении методологии и технологии изготовления экспериментальных моделей для малого опытового бассейна КнАГТУ. Результаты исследований внедрены в госбюджетный НИР №9.356.2014/К

Личный вклад автора заключается в выполнении теоретического и практического исследования, включая: сбор информации, разработка методологии построения экспериментальной модели с применением CAD систем, технологии изготовления экспериментальных моделей на станке с ЧПУ, оформления результатов в виде научных докладов и публикаций.

На защиту выносятся:

- результаты анализа особенностей проведения буксировочных испытаний в малых опытовых бассейнах;

- результаты анализа применения методов компьютерного моделирования поверхности судов

- методология проектирования экспериментальных моделей судов в CAD системах;

- технология изготовления экспериментальных моделей судов ориентированная на изготовление на фрезерном станке с ЧПУ.

Апробация работы. Результаты и положения, изложенные в диссертации, докладывались и обсуждались на международном симпозиуме. Наука. Инновации. Техника и технологии: проблемы, достижения и перспективы (г. Комсомольск на Амуре, май 2015 г.)

Результаты и положения, изложенные в диссертации, докладывались и обсуждались на ежегодной научно-технической конференции студентов и аспирантов КнАГТУ (г. Комсомольск-на-Амуре, апрель 2016 г.),

Структура и объем магистерской диссертации. Диссертация состоит из введения, шести разделов и заключения. Она содержит 102 страницу основного текста (включая 45 рисунков и 2 таблиц) и 2 страницы оглавления. Список использованных источников включает 19 наименований и занимает 2 страниц. Приложение А имеет объем 10 страницы.

По теме диссертации автором опубликовано 3 печатные работы (3 в соавторстве)

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, сформулированы общая цель, задачи исследования и результаты выносимые на защиту.

В первом разделе дано краткое описание опытовых бассейнов. Методы пересчета результатов буксировочных испытаний. Особенно уделено внимание проведение буксировочных испытаний в малых опытовых бассейнах.

Опытовые бассейны для проведения гидродинамических испытаний моделей судов подразделяются на большие (длиной от 250 метров), средние (длиной от 75 до 250 метро) и малые (длиной до 75 метров) и по типу используемой буксировочной системы: буксировочная тележка и гравитационная буксировочная система. При проведении буксировочных испытаний добиться полного гидродинамического подобия невозможно, моделирование по числу Рейнольдса технически сложно по этому производится частичное моделирование по числу Фруда подобие выполняется тем самым выполняется подобие весовых сил на модели и натуре, а число Рейнольдса выгоняется в зону автомодельности где силы вязкостной природы меняются слабо.

В качестве методик пересчёта применяются два метода: метод Фруда и метод МКОБ. Метод Фруда основан на разделении общего сопротивления на две независимые составляющие сопротивления трения и остаточного сопротивления, сопротивление трения считается по аналитической формуле (применяются экстраполяторы трения Прандтля-Шлихтинга, Пустошного-Котловича, МКОБ и др.) для модели и натуре, остаточное сопротивление пересчитывается с модели на натуре. По методике МКОБ остаточное сопротивление разделяют на сопротивление волновое и сопротивление формы. Сопротивления формы принимают как надбавку к сопротивлению трения так называемый форм фактор. При малых числах Фруда волновым сопротивлением пренебрегают и коэффициент формфактора

При проведении буксировочных испытаний в малых опытовых бассейнах необходимо учитывать ряд факторов которое влияют картину обтекания модели, сюда относится влияние стенок канала и турбулизация пограничного слоя модели. В качестве учета влияния стенок канала на полное сопротивление модели вводится поправочный коэффициент ε_k .

Турбулизация пограничного слоя модели добиваются установкой специальных турбулизаторов в носу, они могут быть дискретными или проволочными, чаще всего применяются проволочные турбулизаторы.

Отдельного внимания заслуживает метод Л. А. Эпштейна поведения буксировочных испытаний с малыми моделями, картина обтекание которых ламинарная.

Во втором разделе описывается бассейна КНАГТУ его экспериментальный участок и модельная мастерская. Излагается метод определения предельных размерений экспериментальных моделей для

опытового бассейна КнАГТУ. Приводятся принципиальные этапы изготовления экспериментальных моделей для опытового бассейна КнАГТУ.

Дальневосточный опытовый бассейн КнАГТУ является единственным подобным научно-экспериментальным и производственно-учебным комплексом в регионе Восточной Сибири и Дальнего Востока. Функционально Опытный бассейн состоит из следующих основных элементов: чаши, буксировочного комплекса, волнопродуктора с волнографами, пульта управления с АСОРИ,

Чаша является базисным устройством Опытного бассейна и состоит из собственно конструкции чаши, рельсовых путей, подвешенного дна, осушительно-зачистной системы и устройства для экстренного торможения буксировочной тележки. Полная длина, ширина и высота борта чаши опытового бассейна, соответственно, составляют 45 x 4,1 x 3,25 м. Доковая часть чаши имеет одинаковую высоту с рабочей, а размеры в плане – 4,8 x 1,42 м.

Модельная мастерская включает несколько технологических участков: столярный участок, стапельный участок, грузовой (перегрузочный) участок, конструкторский участок, монтажно-сборочный участок, слесарный участок, инструментальный участок.

Для изготовления моделей с габаритной длиной до 1900 мм или составных моделей в лаборатории опытового бассейна кафедры кораблестроения КнАГТУ используется станок SAHOS SPRINT FC 1900 CNC.



а
а – опытовый бассейн КнАГТУ; *б* – станок с ЧПУ

Рисунок 1

Для изготовления «мелких» деталей моделей и устройств на кафедре кораблестроения КнАГТУ эксплуатируется фрезерно-гравировальный станок с ЧПУ Roland MDX-540, установленный в отдельном помещении опытового бассейна.

Во время проведения экспериментов в опытовом бассейне следует выделить три режима движения модели: разгон модели; режим устоявшегося движения и торможение модели. Длины этих участков зависят от размеров модели и скорости их буксировки.

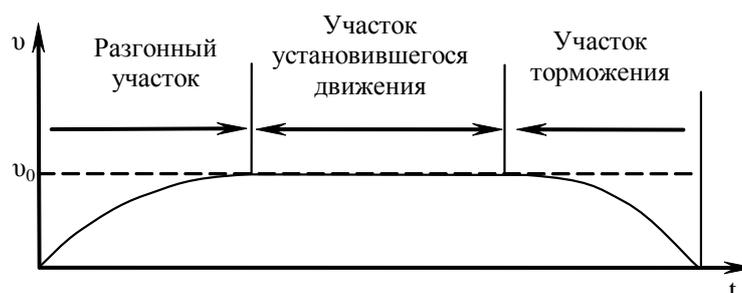


Рисунок 2 - Режимов движения модели

От размера разгонного участка зависит длина участка равномерного движения, на которой и определяется скорость движения модели v под действием буксировочного усилия P . Поэтому процедура выбора размеров экспериментальных моделей является очень важной.

Рассмотрим пример выбор размеров экспериментальных моделей для исследования мореходных качеств транспортных судов средней грузместимости для опытового бассейна КНАГТУ. Данный тип судов имеет длину $L \approx 150 \div 200$ м. Принимаем длину минимального участка установившегося движения модели 15 м. Минимальное время для надежной фиксации скорости 10 с. Ограничиваясь максимальным числом Фруда $Fr_{\max} = 0.28$, получим максимальную длину модели $L_M = 2.9$ м. Общепринято обеспечивать минимальные числа Фруда при проведении буксировочных испытаний до $Fr_{\min} < 0.1$. В этом случае волновое сопротивление (коэффициент сопротивления) $C_{вол} \rightarrow 0$. Тогда режим обтекания модели будет характеризоваться числом Рейнольдса $Re_{\min} \approx 1.2 \cdot 10^6$ при температуре воды $t = 15^\circ\text{C}$ и соответствующей вязкости.

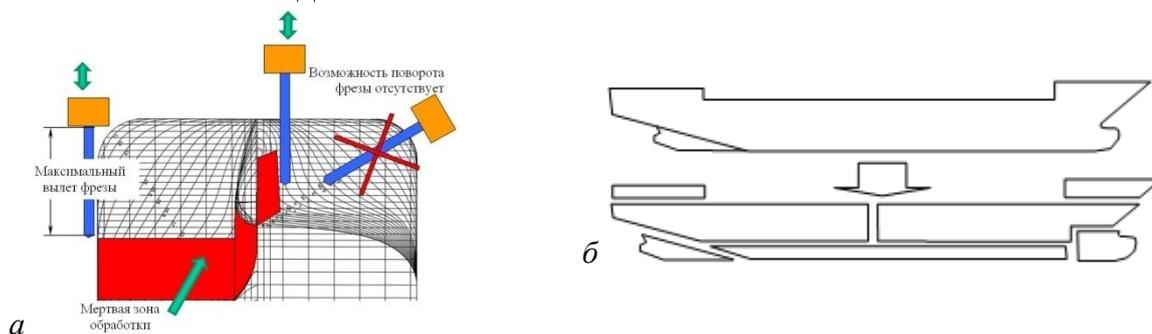
Размеры экспериментальной модели контейнеровоза вместимостью 1500 TEU с габаритными размерами $L_{o.a} \times B \times H = 180.37 \times 25 \times 14.2$ м будут составлять $L_M \times B_M \times H_M = 2.9 \times 0.4 \times 0.22$ м.

Изготовление экспериментальных моделей для опытового бассейна КНАГТУ можно разделить на следующие этапы:

- выбор масштаба изготавливаемой модели, подготовка теоретического чертежа;
- построения 3D поверхности корпуса судна на основе теоретического чертежа в специализированной CAD системе;
- создание на основе поверхностей твердотельной 3D модели;
- доработка твердотельной 3D модели;
- написание управляющей программы для станка с ЧПУ в САМ системе;
- сборка (подготовка) заготовки;
- изготовление экспериментальной модели на станке с ЧПУ (подготовка оснастки, перемещение модели на станке и т.п.);
- склеивание и окраска модели.

При изготовлении крупномасштабных моделей сложной формы выполняются все пункты технологии изготовления экспериментальных моделей.

При изготовлении модели необходимо учитывать технические ограничения станка модельного станка с ЧПУ «SPRINTFC1900CNC»



a – зоны недоступные для обработки; *б* – разбиение модели на блоки

Рисунок 3

В третьем разделе актуализируются методы построения теоретического чертежа. Представлены числовые методы создания судовой поверхности. Приведен анализ специализированных программных комплексов для разработки судовой поверхности. Описана принципиальная методика моделирования поверхности корпуса экспериментальной модели в CAD системе Free!Ship.

Создание теоретического чертежа базируется на двух положениях:

- необходимо, чтобы при фиксированных главных размерениях судна были выдержаны значения водоизмещения и коэффициенты полнот;
- построение согласованных и сглаженных обводов форм шпангоутов, ватерлиний и батоксов положение и протяженность цилиндрической вставки, форма носовой и кормовой оконечности.

Реализация этих принципов сводится к следующему:

- перестроение чертежа судна прототипа с помощью имеющихся методов;
- использование аналитического способа построения теоретического чертежа;
- использование числовых методов построения теоретического чертежа.

Методы перестроения теоретического чертежа

Аффинное перестроение. Наиболее простым перестроением теоретического чертежа является аффинное его преобразование. Такое преобразование возможно только в том случае, когда изменяются L , B , T . При этом основные элементы теоретического чертежа проектируемого судна вычисляются по довольно простым формулам

Интерполяционный способ. Он применяется тогда, когда имеются два чертежа близких судов прототипов у одного коэффициент общей полноты δ_1 больше чем δ проекта, а у другого δ_2 меньше. После приведения обоих чертежей к размерениям проекта путем аффинного преобразования получаем два теоретических чертежа с одинаковыми главными размерениями, но с разными δ .

Аналитический способ построения теоретического чертежа. Идея построения всего теоретического чертежа на основе одного аналитического

выражения выглядит заманчиво, но сложно осуществимой. Впервые для описания судовых обводов использовались параболы вида:

Первые попытки выразить обводы теоретического чертежа теоретически были предприняты Ф.Г. Чапман в 18 веке он предложил строить ватерлинии параболы определяемой по формуле:

$$y = y_{max} \left(1 - \frac{x^{\frac{\alpha}{1-\alpha}}}{L_{H(K)}} \right) \quad 1)$$

где y_{max} – наибольшая ордината ватерлинии, от которой зависят ординаты (полушироты) ватерлиний; x – абсцисса шпангоута, измеренная от шпангоута наибольшего сечения; $L_{H(K)}$ – длина носового (кормового) заострения, α – коэффициент полноты данной ватерлинии.

Далее идею представления судовых обводов в аналитическом виде развивали Г.П. Вайнблум, И. А. Яковлев и др.

Попытку представить судовую поверхность в виде рациональных многочленов была предпринята Д.Тейлором и Л.М. Ногид.

Численные методы представления судовой поверхности. В начале 60-х годов Пьер Безье – сотрудник французской автомобильной компании "Рено" предложил форму уравнения кривой и использовал ее в системах поверхностного моделирования кривая в последствии получила его имя. Она строится по вершинам многоугольника, заключающего ее в себе. Вершины сопрягаются соответствующими функциями. Безье выбрал функции сопряжения таким образом, чтобы получающаяся кривая удовлетворяла следующим требованиям.

- кривая проходит через первую и последующие вершины многоугольника

- направление вектора касательной в первой точке кривой совпадает с направлением первого отрезка многоугольника. Аналогичным образом, последний отрезок многоугольника определяет направление касательной в конечной точке кривой.

- производная степени n в начальной (или конечной) точке кривой определяется положением первых (или последних) $n+1$ вершин многоугольника. Это свойство очень удобно при соединении двух кривых Безье, если требуется удовлетворить требования непрерывности высших производных в точке соединения.

- при изменении порядка вершин многоугольника на противоположный получается та же самая кривая.

Задавшись этими требованиями, Безье выбрал в качестве функций сопряжения полином Бернштейна:

Поверхность NURBS позволяют точно описывать квадратичные поверхности, такие как цилиндр, конус, сфера, параболоид, гиперболоид.

Граничная кривая поверхности NURBS представляет собой NURBS-кривую с соответствующими задающими точками, которые являются крайними вершинами задающего многогранника поверхности. Порядок и узловое значения граничной кривой совпадает с теми же характеристиками

поверхности в соответствующем направлении. Следовательно, задающие точки, порядок и узловые значения поверхности в одном из направлений, совпадающем с направлением изменения параметра кривой, получаются из характеристики транслируемой кривой, поскольку она является одной из граничных кривых.

Построение начинается с задания стандартной модели с размерениями проектируемого судна. Далее оцифрованный теоретический чертеж в формате jpg или bmp устанавливается на три проекции судна. Чертежа необходимо отмасштабировать и совместить центры отсчета

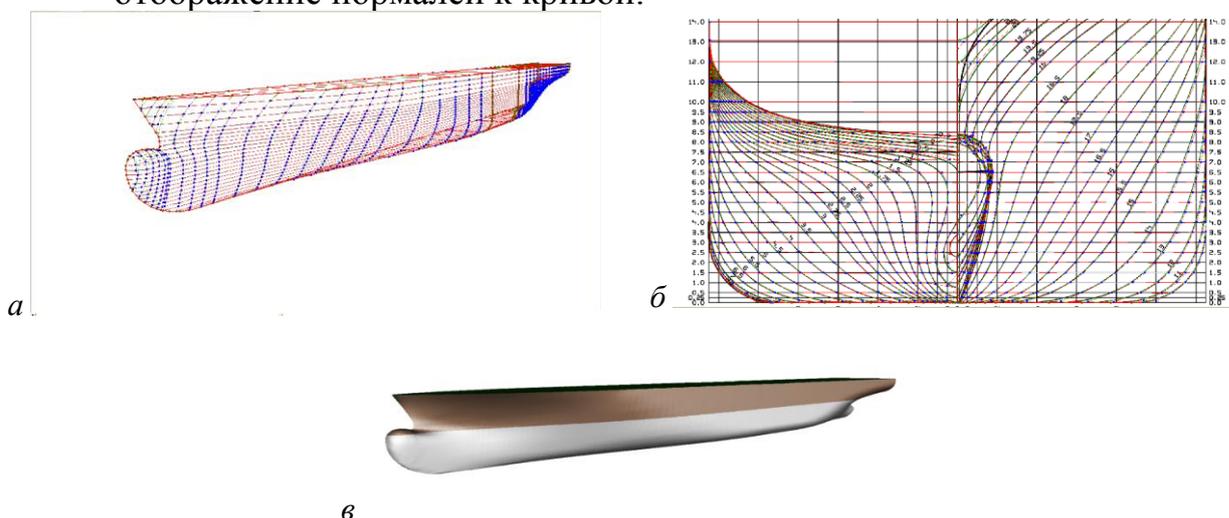
После чего идет расстановка сечений шпангоутов, ватерлиний и батоксов на модели судна, эта процедура необходима, чтобы на проекциях отображались соответствующие линии.

Далее идет расстановка управляющих кривых во взаимно перпендикулярных плоскостях. Кривые рекомендуется устанавливать в том же количестве что и количество сечений и их положение должно совпадать. Таким образом, проектант управляет именно теми сечениями, которые отображаются на проекциях.

Управляющие линии на проекциях выстраиваются таким образом, чтобы линии сечений на модели судна точно совпадали с линиями на теоретическом чертеже.

Необходимо убедиться в плавности построенной поверхности, для этого имеется ряд инструментов

- так называемая «зевровая» закраска;
- искривление по Гауссу;
- отображение нормалей к кривой.



а – проволочная модель корпуса; б – проекция корпус; в – закрасенная модель корпуса

Рисунок 5 - Корпус модели судна созданный в программе Free!Ship

В четвёртом разделе описывается создание и последующая доработка твердотельной модели корпуса судна.

Экспорт файла с моделью судна осуществляется в формате IGESon позволяет импортировать поверхности с которыми ведется работа дальше.

По построенной из поверхностей модели корпуса судна после ее

импортирования в систему гибридного моделирования PowerSHAPE необходимо создать тело модели. Главной особенностью твердотельных моделей является возможность использования булевых операций над ними. Так же могут строиться тела с заданной толщиной, скругляются ребра и другие операции.

После создания твердотельной модели производится расчет массы модели и объема который необходимо извлечь из модели для посадки по заданную осадку. После этого создаются колодцы. Колодцы необходимы для размещения балласта, оснастки, измерительной аппаратуры.

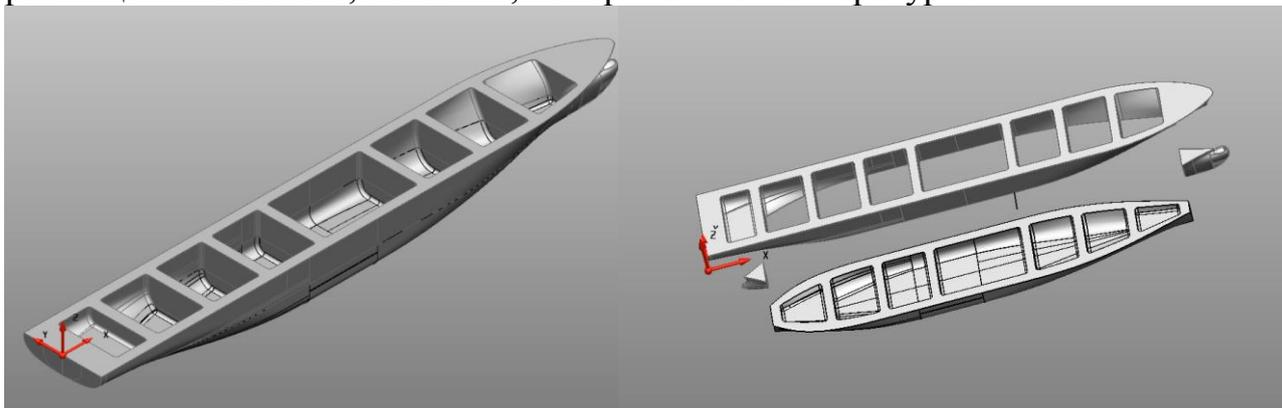


Рисунок 6 Твердотельная модель судна с колодцами

Рисунок 7 Твердотельная модель разбитая на блоки

Из за технических ограничений станка модель не может быть изготовлена цельной ее необходимо разбить на блоки.

В пятом разделе изложена принципиальная технология написания управляющей программы для станка с ЧПУ. Для разработки управляющих программ обработки корпусных блоков на станках с ЧПУ используется САМ - система PowerMILL. Эта программа позволяет разрабатывать управляющие программы для эффективной обработки поверхностей сложных форм. Моделирование обработки деталей в PowerMILL имеет следующую последовательность: импорт модели в PowerMill; расчет заготовки; создание инструмента; задание безопасных высот обработки; выбор стратегии обработки, расчет траекторий, задание подводов, отводов и переходов инструмента; компоновка NCфайла; симуляция обработки.

8) Вывод управляющих программ (постпроцессирование)

В шестом разделе описан процесс изготовления экспериментальной модели на станке с ЧПУ, из каких материалов была изготовлена модель, технология изготовления модели на станке с ЧПУ.

Заготовка для модели судна набирается из листов березовой фанеры и склеивается эпоксидной смолой ЭД-20.

Модель будет изготавливается не цельной а состоять из блоков: днищевая часть, палуба, бульб и корма. В целях экономичности и уменьшение машинного времени в заготовке были предусмотрены полости под расположение балластных трюмов.

После этого заготовка укладывалась на стол и на ней намечались контрольные точки, по которым позиционировался станок. После позиционирования в заготовке просверливались отверстия для надежной

фиксации к стапелю. Отверстия располагаются симметрично относительно ДП и миделя. Под отверстия вытачивались шпильки и устанавливались в подготовленные отверстия на стапеле, после чего сверху укладывалась заготовка, таким образом, обеспечивалось ее неподвижное состояние.

После того как заготовка была зафиксирована на стапеле, на станке запускался первый цикл обработки. Вначале верхний слой заготовки срезался широкой фрезой, для вывода поверхности в горизонт. Ограничений станка не позволяют обработать всю поверхность модели за одну операцию, отдельно обрабатываются носовая и кормовая части.

Далее запускалась программа для выборки материала под балластные отсеки. По завершению цикла заготовка снималась со стапеля, разворачивалась и запускается операция для обработки кормовой части модели.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ.

- проанализированы особенности проведения буксировочных испытаний в малых опытовых бассейнах
- проанализированы современные CAD системы применимые для проектирования судовых поверхностей
- на основе анализа даны рекомендации по выбору CAD системы для проектирования экспериментальных буксировочных моделей
- разработана методология построения моделей судов в рекомендуемой CAD системе
- разработана технология изготовления экспериментальных моделей на станках с ЧПУ

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

- Shtal, Y. A. Features of producing techniques of ship models and analyzing the results of hydrodynamic experiments in the testing tank KnASTU / A.D. Burmenskiy, S. V. Koshkin, Y. A. Shtal // Proceedings of the 7th Asia-Pacific Workshop on Marine Hydrodynamics in Naval Architecture, Ocean Technology and Subsea Technology . –Vladivostok : FEFU, 2014- P. 22-25.

- Шталь Я.А. Развитие модельной базы Опытного бассейна КНАГТУ / А.Д. Бурменский, А.А. Козлов, Я.А. Шталь // Фундаментальные исследования океанотехники и морской инфраструктуры: Теория Эксперимент. Практика: материалы Междунар. науч.-техн. конф., Комсомольск-на-Амуре, 12-16 мая 2015 г. – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВПО «КНАГТУ»

Шталь, Я.А. Особенность проведения буксировочных испытаний в малых опытовых бассейнах / Я.А. Шталь, А.А. Козлов // Научно-техническое творчество аспирантов и студентов: материалы 46-й научно-технической конференции студентов и аспирантов, Комсомольск-на-Амуре, 01-15 апреля 2016 г. / редкол.: Э.А. Дмитриев (отв. ред.) [и др.]. – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВО «КНАГТУ», 2016.– С. 676-677.