#### Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского Национальный исследовательский университет

Программа повышение конкурентоспособности ННГУ им. Н.И. Лобачевского

Стратегическая инициатива 7 «Достижение лидирующих позиций в области суперкомпьютерных технологий и высокопроизводительных вычислений»

#### Основная образовательная программа

01.03.03 – Механика и математическое моделирование

Учебное пособие по дисциплине Численное моделирование и вычислительный эксперимент

Игумнов Л.А., Кальясов П.С., Шабаров В.В., Шабарова Л.В., Шапошников В.А.

# СУПЕРКОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИЖИТЕЛЬНО-РУЛЕВОГО КОМПЛЕКСА АМФИБИЙНОГО СУДНА НА ВОЗДУШНОЙ ПОДУШКЕ

Нижний Новгород 2014 год УДК 539.3 ББК 30.2

# И26 Игумнов Л.А., Кальясов П.С., Шабаров В.В., Шабарова Л.В., Шапошников В.А. СУПЕРКОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИЖИТЕЛЬНО-РУЛЕВОГО КОМПЛЕКСА АМФИБИЙНОГО СУДНА НА ВОЗДУШНОЙ ПОДУШКЕ. – Н. Новгород, Нижегородский госуниверситет, 2014. – 141 с.

ISBN

В работе подробно рассмотрена физическая и математическая постановки задач аэродинамики движительно-рулевого комплекса АСВП, ее поэтапное решение с использованием программных комплексов Ansys Meshing/Ansys Extended Meshing, Ansys CFX. Подробно разобран пример применения методики с построением геометрической и сеточной моделей корпуса АСВП и ДРК, подготовкой сеточных моделей к решению в программном модуле Ansys CFX – Рге и анализом результатов решения в модуле Ansys CFX-Post.

Учебное пособие предназначено для аспирантов и студентов, специализирующихся по теории и методам расчета гидроаэродинамических задач с использованием высокопроизводительной вычислительной техники.

Ответственный редактор Л.А. Игумнов

ISBN

ББК 30.2 © Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, 2014

# СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ
1 Вычислительный эксперимент в проектных задачах
аэрогидродинамики АСВП с ГО баллонетного типа 5
1.1 Основные элементы АГДК АСВП с ГО баллонетного типа.
Проблема проектирования движительно-рулевого комплекса 5
1.2 Применение методик вычислительного эксперимента для
проектных задач аэрогидродинамики АСВП 6
1.3 Подготовка к вычислительному эксперименту: первый этап
2 Методика моделирования на основе суперкомпьютерных технологий
аэродинамики ДРК АСВП
2.1 Физическая постановка задачи о работе ДРК АСВП
2.2 Математическая постановка задачи о работе ДРК АСВП 21
2.3 Описание пакета Ansys Meshing/Ansys Extended Meshing 23
2.4 Построение сеточной модели судна на воздушной подушке с
использованием сеточного генератора Ansys Meshing/Ansys Extended
Meshing
2.5 Постановка задачи в программном модуле Ansys CFX – Pre 125
2.6 Представление результатов численного решения в Ansys CFX-Post . 133
КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ
ЗАКЛЮЧЕНИЕ
СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ 140

#### введение

Принципиальным моментом развития амфибийных судов на воздушной подушке (АСВП) является формирование методической базы, позволяющей принимать обоснованные конструктивные решения при проектировании специфических элементов АСВП (гибкое ограждение (ГО), движительно-рулевой и несущие комплексы). Разработка методической базы связана с необходимостью решения ряда наукоемких задач по моделированию процессов, реализующихся при движении АСВП. Конечной целью решения этих задач является повышение степени совершенства аэрогидродинамической компоновки АСВП, которая напрямую связана с экономической эффективностью.

Существующие подходы к отработке аэрогидродинамического комплекса АСВП ориентированы на проведение модельных физических экспериментов и не используют возможностей современного вычислительного эксперимента, базирующегося на прямом решении уравнений турбулентных течений вязкой жидкости.

Создание и освоение ряда численных методов по решению общих уравнений движения жидкости, комплексов вычислительной механики, внедрение многопроцессорных технологий расчетов делают возможным применение методов вычислительного эксперимента при проектировании АГДК АСВП и элементов АГДК.

В работе подробно рассмотрена физическая и математическая постановки задач аэродинамики движительно-рулевого комплекса ACBП, ее поэтапное решение с использованием программных комплексов Ansys Meshing/Ansys Extended Meshing, Ansys CFX. Подробно разобран пример применения методики с построением геометрической и сеточной моделей корпуса ACBП и ДРК, подготовкой сеточных моделей к решению в программном модуле Ansys CFX – Pre и анализом результатов решения в модуле Ansys CFX-Post.

# 1 Вычислительный эксперимент в проектных задачах аэрогидродинамики АСВП с ГО баллонетного типа

## 1.1 Основные элементы АГДК АСВП с ГО баллонетного типа. Проблема проектирования движительно-рулевого комплекса

Основные элементы аэрогидродинамической компоновки (АГДК) амфибийного судна на воздушной подушке (АСВП) показаны на рисунке 1.1. В состав АГДК входят:

 а) движительно-рулевой
 комплекс (ДРК), включающий в себя маршевые винты в профилированных кольцевых насадках,
 направляющие и спрямляющие аппараты, силовые пилоны и систему рулей;

б) нагнетательный комплекс, представляющий собой вентиляторы со спрямляющими и направляющими аппаратами и систему воздуховодов, обеспечивающих подачу воздуха в воздушную подушку (ВП);



Рисунок 1.1 - Основные элементы аэрогидродинамической компоновки АСВП

в) несущий комплекс, включающий в себя область ВП и систему гибких ограждений.

В силу требований безопасности и обитаемости ДРК располагается кормовее грузопассажирской кабины АСВП. При этом по общекомпоновочным соображениям кабина АСВП может оказаться в зоне аэродинамического взаимодействия с ДРК. Это взаимодействие ведет как к изменению тяги движителей, так и к изменению сопротивления на кабине и ее элементах в сравнении с сопротивлением без учета работающих движителей. В зоне взаимодействия с маршевыми винтами находится не только кабина, но и другие элементы АГДК, например силовые пилоны ДРК. Отметим, что к настоящему моменту при проектировании АСВП отсутствуют как конкретные численные рекомендации по аэродинамическим потерям и коэффициентам нагрузки винтов вследствие ин-

терференции ДРК и элементов компоновки для их различных расположений, так и расчетные алгоритмы. Экспериментальное решение этих проектных вопросов технологией аэротрубного модельного эксперимента с имитацией работы винтов, во-первых, оказывается весьма затратным, во-вторых, не вполне надежным в связи с отсутствием надежных методов пересчета на натуру при больших коэффициентах нагрузки винтов.

Вообще, при разработке АГДК АСВП с ГО баллонетного типа, проектанты испытывают серьезные затруднения ввиду слабой методической базы, ориентированной на решение основных задач аэрогидродинамики этих АСВП. Существующие расчетные подходы носят общий оценочный характер, причем зачастую невозможно определить направление оценки (сверху или снизу), не отличаются точностью и надежностью. В отличие от АСВП с классическим ГО систематических материалов испытаний моделей АСВП с баллонетным ГО в аэродинамических трубах и опытных бассейнах недостаточно. Проектирование АГДК ведется по прототипу, которым является более или менее удачный предшествующий вариант АСВП

# 1.2 Применение методик вычислительного эксперимента для проектных задач аэрогидродинамики АСВП

Вычислительный эксперимент может проводиться на разных стадиях проработки проекта как в дополнение к физическому модельному эксперименту, так и независимо от него. На стадии предпроектной проработки, при формировании технического задания и технического предложения вычислительный эксперимент (при наличии отработанных схем решения, верифицированных по результатам физических модельных и натурных экспериментов) используется для анализа скоростных характеристик и потребных мощностей энергетической установки, создания схемы аэрогидродинамической компоновки АСВП. При создании эскизного и технического проектов вместе с физическим экспериментом проводится численный анализ аэрогидродинамических нагрузок, исследуется аэрогидродинамика отдельных элементов компоновки применительно к конкретной конструктивной схеме.

Предлагаемый подход к решению проектных задач с использованием методик вычислительного эксперимента включает в себя следующие этапы:

а) создание методики решения задачи заключается в определении раз-

меров и геометрии расчетной области, подборе моделей исследуемых сред, граничных и начальных условий, алгоритмов численного решения, моделей турбулентности, шагов дискретизации по времени и по пространству и т.д. Исследования проводятся на ряде упрощенных моделей (плоские постановки задачи, модели с более простой геометрией, модели, в которых влияние ряда элементов заменено искусственными граничными условиями и т.д.). По результатам этих исследований с учетом имеющихся вычислительных мощностей строится наиболее полная модель (или ряд моделей) объекта;

б) верификация результатов моделирования с результатами модельных или натурных испытаний;

в) систематические вычислительные эксперименты с отдельными элементами исследуемого объекта, поиск рациональных конструктивных решений. В модель вносятся геометрические и структурные изменения. Просчитывается ряд вариантов, строятся кривые отклика на изменение отдельных параметров исследуемого объекта. По результатам вычислительного эксперимента принимается решение об изменении элементов объекта;

г) верификация результатов моделирования с результатами модельных или натурных испытаний после реализации конструктивных изменений объекта.

Таким образом, проведение вычислительного эксперимента позволяет расширить проектное поле решений, сократить количество физических модельных экспериментов. В ряде случаев вычислительный эксперимент является единственным достоверным способом исследования и: дает возможность получить нагрузки на отдельные элементы конструкции с учетом аэрогидродинамической интерференции, подробно исследовать поля скоростей, давлений и т.д.

Собственно вычислительный эксперимент включает в себя два основных этапа:

 импорт или построение геометрии исследуемого объекта и расчетной области, отладку и адаптацию геометрии к построению расчетной сетки, построение расчетной сетки, импорт ее в вычислительный пакет;

– математическую постановку задачи в вычислительном пакете: определение численных методов решения уравнений, граничных и начальных условий, модели турбулентности, шагов интегрирования, значений параметров релаксации и т.д. с дальнейшим решением системы уравнений и анализом полу-

ченных результатов.

#### 1.3 Подготовка к вычислительному эксперименту: первый этап

Построение геометрии и создание расчетной сетки – одни из наиболее трудоемких этапов решения задач гидродинамики путем вычислительного эксперимента.

При создании модели с использованием вычислительных пакетов можно выделить три основных шага:

построение геометрической модели;

- создание сеточной модели;
- импорт в вычислительный пакет.

Каждый шаг может реализовываться в различных системах. Построение геометрии осуществляется в CAD системах, после чего файл импортируется в CAE систему.

В настоящей работе первый шаг реализуется в пакетах Ansys Mesing/Ansys Extended Meshing и Pro Engineer, второй в Ansys Mesing/Ansys Extended Meshing.

#### 1.3.1 Построение геометрии

Геометрия может быть импортирована из ряда CAD систем (AutoCAD, Pro Engineer, Компас и т.д.). Ansys Mesing/Ansys Extended Meshing содержит средства по автоматическому изменению геометрии для ее адаптации к построению сетки. Например, существует возможность автоматически «сгладить» выступы или затянуть щели, которые нет необходимости учитывать при расчетах. Кроме того, существует возможность построения геометрии непосредственно в самом пакете. Модель строится по следующей иерархии: точки, линии, поверхности. Эти геометрические объекты могут быть описаны в виде текстовых файлов, или созданы с помощью графического интерфейса программы. Роль объемного тела играет область, ограниченная со всех сторон поверхностями. Необходимо лишь указать нужную область, разместив в любой ее точке специальную метку (BODY).

Все геометрические объекты объединены в различные части (Parts). Такой подход позволяет заранее объединить группы элементов, описывающие материалы с разными свойствами или границы с разными граничными условиями.

Части может создавать сам пользователь.

#### 1.3.2 Создание сеточной модели

Создание расчетной сетки – самый трудоемкий этап при подготовке расчетной модели. В пакете Ansys Extended Meshing можно выделить два метода построения сетки: автоматический и полуавтоматический.

В автоматическом режиме при создании модели необходимо указывать замкнутую область, которая будет разбиваться на элементы (ставить метку BODY). Типы элементов представлены в таблице 1.1.

При таком разбиении на поверхности ложатся двумерные элементы, на кривые и точки – одномерные.

Каждый элемент автоматически относится к той или иной части. Объемные элементы будут относиться к той же части, что и метка BODY, двумерные и одномерные – к частям, в которые включены соответствующие поверхности.

Одномерный		Двумерный		Трехмерный	
•	POINT_1	$\bigtriangleup$	TRI_3	$\bigcirc$	TETRA_4
••	LINE_2	$\Box$	QUAD_4	$\bigwedge$	PYRA_5
-	-	-	-		PENTA_6
-	-	-	-		HEXA_8

Таблица 1.1 - Типы элементов

На поверхностях и линиях можно задавать количество элементов или максимальный размер элемента, количество слоев, содержащих элементы такого размера, коэффициент, с которым будет увеличиваться или уменьшаться размер элемента при подходе к поверхности. Также можно выделить область в разбиваемом объеме (так называемую плотность – Density), для которой аналогично задаются перечисленные выше параметры.

Пользователь самостоятельно выбирает тип или сочетание типов элементов в той или иной части расчетной области. Например, для описания пограничного слоя при построении сетки эффективным является разбиение области на тетраэдры, в сочетании с призматическими слоями на поверхности исследуемого объекта.

Существует возможность разбивать указанный объем исходя из уже построенной двумерной сетки на его поверхностях.

Полуавтоматический метод заключается в создании блочной структуры. Блок представляет собой прямоугольник (трехмерный блок – параллелепипед), который разбит ортогональной сеткой, образованной системой координатных линий, параллельных сторонам прямоугольника. Такой прямоугольник можно «натянуть» на любую геометрическую область, определив соответствие углов и сторон прямоугольника с четырьмя точками и линиями в этой области (рисунок 1.2). Такая сетка называется структурированной.



Рисунок 1.2 - Принцип создания структурированной сетки

Для каждого блока пользователь задает количество элементов и сгущение вдоль ребра к той или иной вершине по определенному закону.

Геометрию любой сложности можно описать с помощью системы блоков (блочной структуры). Существует различные способы преобразования блоков: несколько шаблонов «распиливания» и «склейки» блоков, их граней или ребер; экструзия грани; создание блока по уже существующим вершинам и т.д.

Полученная структура представляет собой прообраз сетки, который можно отображать на экране. Сама сетка генерируется отдельной командой.

На рисунке 1.3 представлены фрагменты структурированной сетки и неструктурированной сеток для расчета обтекания корпуса АСВП.



Рисунок 1.3 – Структурированная (слева) и неструктурированная (справа) сетки

Структурированные сетки имеют ряд преимуществ по сравнению с неструктурированными:

– для построения неструктурированных сеток нужно иметь качественную геометрическую модель – без дыр и трещин. Каждый объем (BODY) должен быть четко ограничен поверхностями, поверхности – линиями, линии – точками. В противном случае сетка может «вылезти» за границы рассматриваемой области, и процесс ее построения будет не результативен. С другой стороны, для сложных моделей оказывается не просто отследить качество геометрии, особенно если эта геометрия импортирована из другой системы или несколько раз перестраивалась и в результате перестроений накопился ряд ошибок. Что касается блочной структуры, то здесь для генерации сетки объект BODY не нужен. Если размер трещины в геометрии меньше размера элемента, то при генерации сетки никаких проблем не возникает. В противном случае ситуацию можно исправить, поместив на место трещины еще одну поверхность (относящуюся к той же части – Part). Размеры и положение такой «заплатки» определяются приближенно. Такой подход весьма эффективен;

– блочную структуру легко модернизировать. Для увеличения мелкости разбиения в случае неструктурированной сетки необходимо повторять весь процесс генерации сетки, в то время как для структурированной сетки достаточно увеличить разбиение по всем ребрам блоков или по какому-либо направлению и сгенерировать файл с сеткой. При относительно небольшом изменении геометрии старую блочную структуру легко перестроить. Двигая элементы геометрии, пользователь автоматически перемещает проассоциированные с ними вершины, грани и ребра блоков.

Следует отметить, что для расчетной области сложной геометрии создание хорошей блочной структуры может занять несколько недель, в то время

как построение неструктурированной сетки займет один – два часа.

В рассмотренных ниже задачах, в основном, использовались структурированные сетки.

Пакет Ansys Mesing/Ansys Extended Meshing содержит ряд функций по сглаживанию построенных сеток. Процедура заключается в автоматическом исправлении искаженных элементов. Например, при «натягивании» прямоугольного блока на область произвольной геометрии, он может настолько сильно исказиться, и координатные линии одного семейства будут пересекаться. В результате получаются элементы отрицательного объема (вывернутые наизнанку). Сглаживание сетки исправляет подобные ошибки, как на уровне прообраза сетки, так и при уже сгенерированной сетке. Еще один способ избежать подобных проблем – незначительное, порядка размера одного элемента, изменение геометрии.

После генерации неструктурированной сетки перед ее доработкой (имеется в виду построение призматических слоев после создания тетраэдрической сетки и т.п.) или импортом в решатель, необходимо производить процедуру сглаживания, для выравнивания критических (с острыми углами) элементов.

#### 1.3.3 Импорт в вычислительный пакет

После генерации сетки в пакете Ansys Mesing/Ansys Extended Meshing необходимо создать файл для импорта в вычислительный пакет. Ansys Mesing/Ansys Extended Meshing поддерживает множество вычислительных пакетов: ANSYS, ANSYS CFX, NASTRAN, STAR-CD и др.

#### 1.3.4 Подготовка к вычислительному эксперименту: второй этап

В общем случае нестационарное течение вязкой жидкости описывается системой уравнений [1] по формуле (1.1 - 1.4):

$$\rho \left( \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) =$$

$$= \rho f_x - \frac{\partial p}{\partial x} + 2 \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu_e \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu_e \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \mu_e \left( \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \right)$$

$$(1.1)$$

$$\rho \left( \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) =$$

$$= \rho f_{y} - \frac{\partial p}{\partial y} + 2 \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu_{e} \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu_{e} \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \mu_{e} \left( \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) \right)$$

$$\rho \left( \frac{\partial w}{\partial t} + \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) =$$

$$= \rho f_{z} - \frac{\partial p}{\partial z} + 2 \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu_{e} \frac{\partial w}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu_{e} \left( \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu_{e} \left( \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) \right)$$

$$(1.3)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial (\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial (\rho w)}{\partial z} = 0$$
(1.4)

где u, v, w – компоненты вектора скорости, по формуле (1.5):

$$\overline{V} = u\overline{i} + v\overline{j} + w\overline{k}, \qquad (1.5)$$

p – давление,  $\Pi a$ ;  $\rho$  – плотность жидкости,  $\kappa z/M^3$ ;  $\mu_{s\phi} = \mu + \mu_{myp}$  - эффективная вязкость, складывающаяся из ламинарной (физической) вязкости  $\mu$  и турбулентной (вихревой) вязкости  $\mu_{myp}$ ,  $\Pi a \cdot c$ ;  $f_x, f_y, f_z$  – проекции массовой силы,  $M/c^2$ .

Для замыкания системы (1.1), (1.2) должна быть привлечена одна из моделей турбулентности, базирующаяся на гипотезе вихревой вязкости. Простейший вариант модели – алгебраическая модель турбулентности.

В численном моделировании для замыкания системы используется одна из наиболее продвинутых и применяемых моделей турбулентности – составная модель Ментера (SST) [2].

Составная модель Ментера является комбинацией  $k \cdot \omega$  и  $k \cdot \varepsilon$  моделей, причем  $k \cdot \omega$  (k - кинетическая энергия турбулентности,  $\omega$  - завихренность) активизируется вблизи твердых границ потока, а вдали от них используется  $k \cdot \varepsilon$  модель (k - кинетическая энергия турбулентности,  $\varepsilon$  - скорость ее диссипации).

Модель переноса сдвиговых напряжений Ментера имеет следующие характерные черты:

– стандартная k- $\omega$  и преобразованная k- $\varepsilon$  модели, в последней их которых  $\varepsilon$  заменяется на  $\omega$ , накладываются с помощью функции смешения и объединяются в одну. Функция смешения конструируется таким образом, что принимает единичное значение в пристеночной области, в которой активируется

стандартная k- $\omega$  модель, и равняется нулю вдали от стенки, в которой используется преобразованная k- $\varepsilon$  модель;

– модель Ментера включает демпфирующий член с перекрестными производными в уравнении для *ω*;

 при определении турбулентной вязкости принимается во внимание перенос турбулентных сдвиговых напряжений в рамках подхода Джонса-Кинга;

 модельные константы несколько отличаются от аналогичных значений в исходных моделях.

Модель Ментера прошла длительную апробацию. В формулах (1.6) - (1.19) приводится ее краткое изложение в исходном и модернизированном вариантах. Отметим, что в модернизированном варианте она используется в пакете ANSYS CFX.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j}(\Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j}) + G_k - Y_k$$
(1.6)

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\omega) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho\omega u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j}(\Gamma_{\omega}\frac{\partial\omega}{\partial x_j}) + G_{\omega} - Y_{\omega} + D_{\omega}$$
(1.7)

$$\Gamma_{k} = \mu + \frac{\mu_{t}}{\sigma_{k}}; \quad \Gamma_{\omega} = \mu + \frac{\mu_{t}}{\sigma_{\omega}}; \quad \mu_{t} = \frac{\rho k}{\omega} \frac{1}{\max(1/\alpha^{*}, \Omega F_{2}/(a_{1}\omega))}$$
(1.8)

$$\Omega \equiv \sqrt{2\Omega_{ij}\Omega_{ij}} \tag{1.9}$$

$$\sigma_{k} = \frac{1}{F_{1} / \sigma_{k,1} + (1 - F_{1}) / \sigma_{k,2}}; \quad \sigma_{\omega} = \frac{1}{F_{1} / \sigma_{\omega,1} + (1 - F_{1}) / \sigma_{\omega,2}}$$
(1.10)

$$F_{1} = \tanh(\Phi_{1}^{4}); \quad \Phi_{1} = \min\left[\max(\frac{\sqrt{k}}{0.09\omega y}, \frac{500\mu}{\rho y^{2}\omega}), \frac{4\rho k}{\sigma_{\omega,2}D_{\omega}^{+} + y^{2}}\right]$$
(1.11)

$$D_{\omega}^{+} = \max\left[2\rho \frac{1}{\sigma_{\omega,2}} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_{j}} \frac{\partial \omega}{\partial x_{j}}, 10^{-20}\right]$$
(1.12)

$$F_2 = \tanh(\Phi_2^2); \quad \Phi_2 = \max\left[2\frac{\sqrt{k}}{0.09\omega y}, \frac{500\mu}{\rho y^2 \omega}\right]; \quad G_k = \mu_t S^2; \quad G_\omega = \frac{\alpha}{v_t} G_k$$
(1.13)

$$Y_{k} = \rho \beta^{*} k \omega; \quad Y_{\omega} = \rho \beta \omega^{2}; \quad D_{\omega} = 2(1 - F_{1}) \rho \sigma_{\omega,2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_{j}} \frac{\partial \omega}{\partial x_{j}}$$
(1.14)

$$\alpha = \frac{\alpha_{\infty}}{\alpha^*} \left(\frac{\alpha_o + \operatorname{Re}_t / R\omega}{1 + \operatorname{Re}_t / R\omega}\right); \quad \alpha^* = \alpha_{\infty}^* \left(\frac{\alpha_o^* + \operatorname{Re}_t / R_k}{1 + \operatorname{Re}_t / R_k}\right); \quad \operatorname{Re}_t = \rho k / (\mu \omega)$$
(1.15)

$$\alpha_{\infty} = F_1 \alpha_{\infty,1} + (1 - F_1) \alpha_{\infty,2}; \quad \alpha_o^* = \frac{\beta_i}{3}; \quad \beta_i = F_1 \beta_{i,1} + (1 - F_1) \beta_{i,2}$$
(1.16)

$$\alpha_{\infty,1} = \frac{\beta_{i,1}}{\beta_{\infty}^*} - \frac{\kappa^2}{\sigma_{\omega,1}\sqrt{\beta_{\infty}^*}}; \quad \alpha_{\infty,2} = \frac{\beta_{i,2}}{\beta_{\infty}^*} - \frac{\kappa^2}{\sigma_{\omega,2}\sqrt{\beta_{\infty}^*}}$$
(1.17)

$$R_{\omega} = 2.95; \quad R_k = 6; \quad \sigma_{k,1} = 1.176; \quad \sigma_{\omega,1} = 2.0; \quad \sigma_{k,2} = 1.0; \sigma_{\omega,2} = 1.168$$
(1.18)

$$a_1 = 0.31; \quad \beta_{i,1} = 0.075; \quad \beta_{i,2} = 0.0828; \quad \beta_{\infty}^* = 0.09; \quad \alpha_o = \frac{1}{9}; \quad \alpha_{\infty}^* = 1$$
(1.19)

Сравнительно недавно Ментером внесены коррекции в модель SST *k-* $\omega$ , сделанные на основе десятилетнего опыта ее эксплуатации. Вместо модуля завихренности  $\Omega$  в выражении для вихревой вязкости вводится инвариантная величина модуля тензора скоростей деформации  $S \equiv |S_{ij}| = \sqrt{2S_{ij}S_{ij}}$ . В ограничителе при определении члена, содержащего перекрестные производные, вместо значения степени 20 берется 10.

Окончательно модель Ментера реализуется в следующем виде (1.20) - (1.21):

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \tilde{u}_j k) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ (\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k}) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + \tilde{P}_k + G_b - \beta^* \rho \omega k , \qquad (1.20)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\omega) + \frac{\partial}{\partial x_{j}}(\rho\tilde{u}_{j}\omega) =$$

$$= \frac{\partial}{\partial x_{j}} \left[ (\mu + \frac{\mu_{t}}{\sigma_{\omega}}) \frac{\partial\omega}{\partial x_{j}} \right] + \frac{\alpha}{v_{t}} P_{k} - \beta^{*}\rho\omega^{2} + (1 - F_{1})2\rho\sigma_{\omega^{2}} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_{j}} \frac{\partial\omega}{\partial x_{j}}.$$
(1.21)

где  $\tilde{P}_k$  - член генерации энергии турбулентности, определен как (1.22) - (1.23):

$$\tilde{P}_{k} = \min(P_{k}, 10\beta^{*}\rho\omega k), \qquad (1.22)$$

$$P_{k} = \left[ \mu_{i} \left( \frac{\partial u_{i}}{\partial x_{j}} + \frac{\partial u_{j}}{\partial x_{i}} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_{k}}{\partial x_{k}} \right]$$
(1.23)

*G*<sub>b</sub> - величина поправки на плавучесть, определена выражениями (1.24):

$$G_{b} = \beta g_{i} \frac{\mu_{t}}{\Pr_{t}} \frac{\partial T}{\partial x_{i}}, \quad \beta = -\frac{1}{\rho} (\frac{\partial \rho}{\partial T})_{p}.$$
(1.24)

 $F_1$  - функция смешения, вычисляется как (1.25) - (1.26):

$$F_{1} = \tanh(\arg_{1}^{4}); \quad \arg_{1} = \min\left[\max(\frac{\sqrt{k}}{\beta^{*}\omega y}, \frac{500v}{y^{2}\omega}), \frac{4\rho\sigma_{\omega 2}k}{CD_{k\omega}y^{2}}\right], \quad (1.25)$$

$$CD_{k\omega} = \max\left[2\rho\sigma_{\omega^2}\frac{1}{\omega}\frac{\partial k}{\partial x_j}\frac{\partial \omega}{\partial x_j}, 10^{-10}\right].$$
(1.26)

 $\mu_t$  - турбулентная вязкость,  $\Pi a \cdot c$ , вычисляется как (1.27):

$$\mu_{i} = \min(\frac{\rho k}{\omega}, \frac{a_{1}\rho k}{\left|S_{ij}\right|F_{2}}, \qquad (1.27)$$

где  $S = \sqrt{2s_{ij}s_{ij}}$  - модуль тензора скоростей деформации, определяется как (1.28):

$$S = \sqrt{2s_{ij}s_{ij}} \tag{1.28}$$

 $a_1$  – константа,  $a_1$ =0.31;

 $F_2$  - а вторая функция смещения, определяется как (1.29):

$$F_2 = \tanh(\arg_2^2); \quad \arg_2 = \max\left[2\frac{\sqrt{k}}{\beta^*\omega y}, \frac{500\nu}{y^2\omega}\right]; \tag{1.29}$$

 $\phi$  - коэффициенты модели, определяются как (1.30):

$$\varphi = F_1 \varphi_1 + (1 - F_1) \varphi_2, \qquad (1.30)$$

где  $\phi_1$  и  $\phi_2$  являются константами k- $\omega$  и k- $\varepsilon$  моделей соответственно:

$$\sigma_{k1} = 1.176, \quad \sigma_{\omega 1} = 2.0, \quad \alpha_1 = 0.5532, \quad \beta_1 = 0.0750,$$
  
 $\sigma_{k2} = 1.0; \quad \sigma_{\omega 2} = 1.168, \quad \kappa = 0.41, \quad \alpha_2 = 0.4403, \quad \beta_2 = 0.0828, \quad \beta^* = 0.09.$ 

В уравнениях (1.1) - (1.4), (1.20), (1.21) неизвестными являются функции *u*, *v*, *w*, *p*, *к*, *w*. Граничные и начальные условия приводятся ниже.

Подготовка к решению и решение системы уравнений (1.1) - (1.4), (1.20), (1.21) проводится с использованием программного комплекса ANSYS CFX. Этот программный комплекс относятся к классу «тяжелых», способных решать сложные задачи с учетом большого количества эффектов. Пользователю предоставлено выбирать алгоритмы дискретизации, схемы аппроксимации производных в различных членах уравнений (локальных, конвективных, диффузионных, источниковых) и алгоритмы решения линеаризованной уравнений, виды и варианты граничных условий из широкого ассортимента, предлагаемого программными комплексами. В связи с этим, кратко опишем основные подходы к численному решению системы уравнений движения жидкости, применяемые в настоящей работе.

Численное решение системы уравнений аэрогидродинамики осуществляется с помощью метода контрольных объемов (МКО) [1, 3, 4]. Расчетная аэрогидродинамическая область задачи разбивается на некоторое число непересекающихся контрольных объемов. Используется структурированная сетка и МКО применяется в варианте центрирования по узлу [4] (см. рисунок Рисунок 1.4). Законы изменения количества движения и массы записываются в интегральном виде для каждого контрольного объема. Для вычисления интегралов внутри контрольного объема используют функции формы, которые описывают изменение некоторой интересующей переменной ф между расчетными узловыми точками. Внутри контрольного объема принимается трилинейная аппроксимация зависимых переменных. В интегральных соотношениях объемные интегралы характеризуют собой количественный уровень переменных внутри контрольного объема, а поверхностные представляют собой потоки переменных через грани контрольного объема. Определение потоков реализуется с помощью так называемых точек интегрирования, расположенных в центре каждого сектора контрольного объема (см. рисунок Рисунок 1.4).

Для определения конвективных производных используется схема «против потока» повышенного порядка точности [1 - 4]. Производные в диффузионных членах уравнений вычисляются в интегральных соотношениях для контрольного объема с помощью определения производных через функции формы, как это принято в методе конечных элементов. Интегрирование по времени проводится по неявной схеме Эйлера второго порядка точности.

При дискретизации, формирование системы алгебраических уравнений проводится для компонент скоростей и давлений на общей расчетной сетке, что более физично, наглядно и экономично в численном решении. При этом возникающие на совмещенной сетке известные проблемы [1, 3, 4] грубой аппроксимации компонент градиента давления в уравнениях количества движения и наведенные высокочастотные осцилляции в полях компонент скорости и давления, успешно решаются применением модификации МКО, предложенной в работах [5, 6] и усовершенствованной в [7]. Связь между компонентами скоростей и давлений в точках интегрирования осуществляется через разностные формулы, не противоречащие уравнениям количества движения, в которые наряду с компонентами скоростей и градиента давления в точке интегрирования входят осредненные по смежным вершинам сетки значения компонент скоростей и градиента давления, а также, для весомых многофазных жидкостей, и массовых сил.



Рисунок 1.4 - Иллюстрация применения МКО в варианте центрирования по узлу

Мгновенное положение границы раздела сред «воздух-вода» определяется с помощью метода маркеров и ячеек Харлоу [8] (по другой терминологии метода объемного слежения VOF), согласно которому в каждом контрольном объеме в начальный момент времени размещаются маркеры, указывающие вид жидкости в данном объеме и перемещающиеся вместе с соответствующей жидкостью в соответствии с величиной и направлением мгновенной местной скорости центра контрольного объема.

Решение полученной дискретизацией системы линеаризованных алгебраических уравнений проводится связанным линейным решателем (Coupled Solver) программного комплекса ANSYS CFX. Решатель использует полный алгебраический многосеточный метод с суммирующей коррекцией (Coupled Algebraic Multigrid Method AMG Additive Correction) и неполную ILUфакторизацию (Incomplete Low Upper Factorization - ILU) для ускорения решения. По сравнению с прочими итерационными алгоритмами (методы Якоби, Гаусса-Зейделя, сопряженных градиентов) многосеточные методы обладают следующими преимуществами [9]:

 при использовании подобных методов реализуется общая стратегия построения универсального решателя для различных типов задач, в том числе нелинейных;

- многосеточные методы обладают естественным параллелизмом, что

крайне важно при использовании решателя на кластерных системах и супер-компьютерах.

Многосеточные методы обладают высокой вычислительной эффективностью за счет последовательного использования нескольких уровней дискретизации (виртуальных сеток), при этом уравнения для контрольных объемов на грубой сетке формируются путем суммирования уравнений для контрольных объемов на подробной сетке с последующей интерполяцией и сглаживанием решения на подробную сетку и использования полученного результата в итеративной процедуре решения на этой сетке.

# 2 Методика моделирования на основе суперкомпьютерных технологий аэродинамики ДРК АСВП

### 2.1 Физическая постановка задачи о работе ДРК АСВП

Воздушный винт OB121 [10] *1* (см. рисунок 2.1) вращается с заданной угловой скоростью. Винт расположен в профилированном кольцевом насадке 2. Втулка винта зафиксирована горизонтальным пилоном 3. За винтом расположены вертикальные рули 4. ДРК расположен в кормовой части судна 5. Модель АСВП размещена у экрана и обтекается



Рисунок 2.1 - Винт в кольцевом насадке в составе компоновки

воздухом с заданной скоростью потока, равной скорости движения АСВП. Воздух рассматривается как вязкая несжимаемая жидкость. Режим течения турбулентный.

#### 2.2 Математическая постановка задачи о работе ДРК АСВП

В общем случае нестационарное течение вязкой жидкости описывается системой уравнений (1.1) - (1.4), (1.20), (1.21) пп. 1.3.4.

По результатам серии отладочных расчетов была разработана следующая схема. В качестве расчетной области взят параллелепипед (см. рисунок 2.2).

На рисунке 2.2: 1 – вход, 2 – выход, 3 – профилированный кольцевой насадок, 4 – пилоны. 5 – общие границы областей A и B, 6 – боковая поверхность цилиндра, 7 – втулка, 8 – лопасти, 9 – корпус судна, 10 – экран, 11 - рули.

При решении в области A используется принцип обращения движения: лопасти неподвижны, воздух закручен вокруг винта с угловой скоростью  $\omega$ . На общих границах областей A и B выполняется непрерывность скоростей прямого и обращенного движения. При переходе через границы сохраняется средняя по концентрическим окружностям границы величина давления. В уравнения количества движения добавляются центробежные силы. Значения узловых переменных определяются в локальной (вращающейся) системе координат. Таким образом, влияние винта на элементы компоновки эквивалентно полю давлений,

переменному по радиусу диска винта и осредненному по окружности. В такой постановке не учитываются особенности картины течения, связанные с неравномерностью полей давлений и скоростей из-за работы отдельно взятой лопасти, однако моделируются интегральные характеристики – тяга, момент сопротивления вращению винта, сопротивление элементов компоновки.



Рисунок 2.2 - Расчетная область

В наиболее полной нестационарной постановке блок с сеткой, включающей в себя винт, вращается с заданной угловой скоростью относительно глобальной системы координат. На общих границах областей (вращающейся и неподвижной) на каждом временном шаге обеспечивается непрерывность неизвестных величин (давления, скоростей и т.д.). В численной реализации используются скользящие сетки [11]. В такой постановке учитывается нестационарное взаимодействие лопастей винта с элементами компоновки. Решение задачи требует в 1,5 раза больше оперативной памяти вычислительного узла. Время счета увеличивается в три – пять раз.

Гидродинамическими граничными условиями для системы уравнений (1.1) - (1.4), (1.20), (1.21) являются:

– на входе задается скорость набегающего потока u (скорость движения ACBП), v = 0 м/с, w = 0 м/с, или давление p = 0 Па (работа винта на стопе);

– условия прилипания и непротекания u = 0 м/с, v = 0 м/с, w = 0 м/с на поверхности винта;

– условия прилипания и непротекания на поверхности кольцевого насадка и пилонов, корпуса и рулей u = 0 м/с, v = 0 м/с, w = 0 м/с в области *B*; кольцевой насадок вращается при этом вместе с воздухом в области *A*;

- условия на выходной границе: среднее давление p = 0 Па;

– условие подвижного экрана *и* (обращенная скорость движения ACBП), v = 0 м/с, w = 0 м/с;

— на боковой поверхности избыточные давления p = 0 Па (возмущения на поверхности цилиндра отсутствуют). Задание скоростей при малых скоростях обдувки (до 15 м/с) ведет к нефизичным результатам: картина течения искажается — часть струи, отброшенная винтом, разворачивается и снова засасывается в диск винта.

В качестве начальных условий в нестационарной постановке использовалось решение, полученное в стационарной постановке задачи.

#### 2.3 Описание пакета Ansys Meshing/Ansys Extended Meshing

Ansys Mesing/Ansys Extended Meshing — это пакет, предоставляющий современные методы построения геометрической модели, создания и оптимизации сетки, а также средства постпроцессинга.

Ansys Mesing/Ansys Extended Meshing представляет наиболее полный на сегодняшнее время набор инструментов построения геометрической модели и создание расчетной сетки. В пакете обеспечены передовые инструментальные средства для импорта и создания геометрии, генерации и оптимизации сетки, а также экспорта сеточной модели. Ansys Mesing/Ansys Extended Meshing позволяет строить геометрию модели любой сложности, делить ее для удобства на части, а также получать информацию по построенной модели. С его помощью можно создать расчетную сетку любого типа, от структурированной многоблочной сетки до неструктурированной гексаэдрической, тетраэдрической или гибридной сетки. Помимо этого Ansys Mesing/Ansys Extended Meshing имеет средства анализа качества построенной сетки, а также позволяет корректировать подобласти сетки при необходимости.

Созданная с помощью данного пакета сетка может быть использована при решении различных классов задач: механика жидкостей и газов, механика деформируемого твердого тела, расчет электромагнитных полей, распределение теплового потока и др. где используются методы конечных элементов или же методы контрольных объемов.

После построения сеточную модель можно импортировать в другие инженерные пакеты для решения поставленной задачи. Ansys Mesing/Ansys Extended Meshing поддерживает множество инженерных пакетов, в которых

можно производить решение. Среди них: ANSYS, ANSYS CFX, NASTRAN, PA-TRAN, STAR-CD и другие. Процесс создания сеточной модели в модуле HEXA представлен в виде Блок схемы на рисунке Рисунок 2.3.



Рисунок 2.3 - Блок-схема создания сеточной модели

Зелёной штриховкой в блок-схеме отмечены обязательные этапы, а голубой – дополнительные (обусловленные неудовлетворительным качеством сетки).

#### 2.3.1 Построение геометрической модели

Геометрическая модель может быть построена с помощью встроенного инструментария Ansys Extended Meshing или передана из внешнего CAD пакета. Ansys Extended Meshing поддерживает экспорт геометрических данных в самых различных форматах Pro/E, CATIA, ParaSolid, Unigraphics, I-DEAS, ICEM Surf, Solid Works, ACIS, Capri, DWG, DXF, IDI, IGES, STEP, STL, VRML. Следует отметить, что большинство из этих форматов успешно читается, однако, желательно использовать CAD форматы, поддерживающие корректное описание поверхностей.

Рассмотрим более подробно средства, предоставляемые пакетом Ansys Extended Meshing для построения в нем геометрической модели «с нуля».

Построение геометрии происходит в модуле Geometry (см. рисунок 2.4).



Рисунок 2.4 - Модуль Geometry

Задание точек может разными способами:

– *Screen Select* . Позволяет строить точки с помощью мыши, непосредственно щелкая левой кнопкой мыши в нужном месте рабочего экрана. Затем для построения точек нажимается средняя клавиша мыши (*Apply*) или *OK*;

– *Explicit Coordinates* xiz. При применении данного метода точка строится в двух режимах: при задании координаты каждой точки или при вводе уравнения построения точек;

– *Base Point and Delta* . Точка может быть построена смещением относительно иходной;

– *Center of 3 Points* . Создание точки в центре окружности, построенной на 3-х задаваемых точках;

– Base Point and Delta . Позволяет строить точку смещением другой точки;

 также при создании точки могут быть выбраны Based on 2 Locations
 (построение по двум точкам и параметру расположения новой точки относительно двух исходных), Curve Ends (на концах линии), Curve-Curve Intersection (в точке пересечения двух линий), Parameter along a Curve
 (на линии с заданным параметром), Project Point on Curve (проекция точки на линию), Project Point on Surface (проекция точки на плоскость).

Возможны следующие основные варианты построения линий X:

- From Points . Построение сплайна по указанным точкам и точности;

- Arc from 3 Points 2. Создание дуги окружности по трем точкам;

– Circle from Center and 2 Points . Построение окружности (части

окружности) по 3-м точкам, первая точка — центр окружности, вторая — лежит на окружности, третья — в направлении которой ведется отсчет угла при построении окружности или ее части;

– Surface Parameters . Линия может быть построена по области с помощью параметра. Возможны три варианта: By Paramert — выбирается одно из двух направлений U или V и вводится параметр от нуля до единицы; Direction on Surface — выбираются 2 точки и плоскость, линия строится по плоскости от точки к точке; Point on Edges — выбирается плоскость, точка на кромке плоскости и линия строится, проходя через эту точку;

– Surface-Surface Intersection . Эта опция позволяет строить линии в месте пересечения двух поверхностей. Задаваются две поверхности, также выбирается, какого типа линия получится при пересечении этих поверхностей — сплайн или неструктурированная линия;

кроме представленных опций для построения линий предназначены следующие средства: Project Curve on Surface (проектирование линии на поверхность), Segment Curve (делит линию на составные части при помощи точек, линий, поверхностей), Concatenate/Reapproximate Curves (объединение и реаппроксимация линий, а также объединение линий и дополнение их до замкнутой области), Extract Curves from Surfaces (построение по поверхности линий, на которые она опирается), Modify curves (изменение уже существующей линии), Create Midline (построение средней между двумя существующими линиями).

После построения линий создаются поверхности. Возможны следующие основные варианты задания поверхностей 🗭:

– *From Curves* . Построение поверхностей происходит заданием граничных линий поверхности, при этом необходимо указать точность;

– *Curve Driven П*. Создание цилиндрической поверхности с помощью задания направляющей и образующей;

– *Sweep Surface При* применении данного метода цилиндрическая поверхность может строиться двумя способами. Способ 1: построение с помо-

щью вектора, при этом указывается образующая цилиндрической поверхности и точки начала и конца вектора. Способ 2: аналогичен предыдущему методу *Curve Driven*;

– Surface of Revolution . Построение поверхности вращения. Указывается начальный и конечный угол поворота, две точки, определяющие ось вращения и линия, образующая поверхность;

– *Loft Surface over Several Curves* 4. Создание поверхности, включа-ющей в себя ряд кривых. При этом задается точность и сами кривые;

– *Offset Surface* . Построение подобной поверхности: указывается сама поверхность и расстояние, на которое должна отстоять новая поверхность. Расстояние откладывается по нормали к исходной поверхности;

*Сreate Curtain Surface* . Построение поверхности - «шторки». Параметрами для построения является линия и поверхность, к которой по нормали проецируется начальная линия;

– *Standard Shapes* . Создание стандартных поверхностей, таких как поверхность куба, сфера, цилиндр и т.п. Построение происходит путем задания начальной точки (точек) и характерных размеров;

− также для работы с поверхностями существуют следующие возможности: *Midsurface* (построение срединной поверхности относительно двух существующих), *Segment/Trim Surface* (удаление части поверхности путем задания на ней сплайна), *Merge/Reapproximate Surfaces* (соединение/реаппроксимация двух поверхностей), *Untrim Surface* (создание из поверхности с вырезами «целой» поверхности), *Extend Surface* (удлинение поверхности), *Geometry Simplification* (преобразование начальной поверхности).

В некоторых задачах требуется построение объемов (тел) 🊺. Тела создаются двумя способами:

– *By Topology* 3 Здесь тела строятся двумя методами: *Entire Model* – построение полной модели (используются все замкнутые поверхности, образующие поверхности тел), *Selected surfaces* (построение происходит по выбран-

ным поверхностям);

– By Material Point . Построение происходит по одному из двух методов: Centroid of two points (по двум точкам – внутренней и внешней), A specified point (по специфической точке – внутренней).

Это основные методы создания геометрии. Также в разделе *Geometry* представлены возможности построения многогранников, коррекции и трансформации геометрии, инструменты удаления точек, линий, поверхностей тел, и всей геометрии в целом.

#### 2.3.2 Построение сетки. Работа с блоками

Ansys Extended Meshing позволяет создавать сеточные элементы различных типов: узловые элементы, линии, оболочки, тетраэдры, призмы и гексаэдры. Сетка может быть построена как автоматически с использованием опций меню Mesh, так и с помощью блочной структуры (модуль HEXA).

Автоматические методы не всегда применимы при построении сетки на сложной геометрии, поэтому в данной работе рассматривается способ построения сетки с помощью блоков.

Сеточные объекты присутствуют в проекте только после генерации сетки и в случае с блочным методом построения их число жёстко связано с разбивкой блоков. Следует заметить, что при создании объёмной сетки, сначала происходит автоматическая генерация поверхностной сетки, которая и отображается в графическом окне. Фактически происходит только оценка размера объёмной сетки, её создание начинается только после вызова процедуры записи сетки (формирование файлов \*.uns или \*.domain). Данная техника позволяет существенно снизить временные затраты на моделирование (поверхностная сетка, в отличие, от трёхмерной, легко поворачивается и перестраивается).

Принцип работы с блоками заключается в следующем. Создается блок: прямоугольник (в двумерном случае) или параллелепипед (в трехмерном случае), вершины, ребра и грани которого ассоциируются с точками, линиями и поверхностями той области геометрии, которую необходимо замешировать. Далее строится структурированная сетка для блока, которая автоматически переносится на ассоциированную с блоком сложную фигуру.

Работа с блоками осуществляется в модуле *Blocking* (см. рисунок 2.5). В начале, необходимо построить блок. Блок строится по созданной геометрии.

Если геометрия не создана, то *Ansys Extended Meshing* не предоставит возможности построения блока.



Рисунок 2.5 - Модуль работы с блоками – Bloking

Построение блока производится каждый раз заново при выборе *Create Block* . Этот модуль позволяет строить двумерные (2d) и трехмерные (3d) блоки, которые опираются на существующую геометрию (при этом необходимо учесть, что геометрическая модель должна содержать линии или поверхности):

*a) Initialize Block* Этот метод является методам инициализации блоков и при повторной процедуре инициализации все ранее созданные блоки удаляются.

Существует три способа создания блоков:

1) построение при помощи 3D Bounding Box. Выбрав данную опцию можно построить как 3d блок, так и 2d блоки, которые как бы ограничивают трехмерный объем (ставиться галочка напротив 2D Blocking). Геометрию, по которой задается 3d-блок/2d-блоки, указывается в окне Entities. Здесь, как и во всех подобных окнах ввода Ansys Extended Meshing задание может производиться двумя способами: явно – когда открывается окно ввода и пользователь сам указывает (прописывает) имена необходимых частей; и неявно – когда части указываются непосредственно на рабочей области. Также можно задать построение блока, опираясь на вершины геометрии (Project vertices). Еще одной опцией является Orient with geometry – сохранение ориентации из геометрии;

2) при помощи 2D Surface Blocking ведется построение двумерных блоков, которые опираются на заданные области (Surfaces). При этом можно выбрать метод создания блоков: All free – неструктурированный, All mapped – структурированный, Some mapped/Some free - смешанный. Структурированный блок отличается от неструктурированного единообразными размерами и формой элементов при дальнейшем сеточном разбиении (мешировании) блоков. Если блок является неструктурированным, то это свойство блока подписывается в скобках после его имени. Также при инициализации блоков указанным методом необходимо задать минимальную длину грани блока *Minimum Edge* 

Length (по умолчанию она равна нулю);

3) построение блока при помощи 2D Planar. Этот метод наиболее продуктивен для создания блоков на плоской геометрии, но также может использоваться и на трехмерной геометрии. Здесь Ansys Extended Meshing строит один блок прямоугольной формы, который вмещает в себя всю геометрию (в случае двумерной геометрии), и всю спроектированную часть (в трехмерном случае).

*б) From Vertices/Faces* . Этот метод строит 2d/3d блоки, опираясь на вершины или на стороны. При этом задаются свойство блока: для трехмерного – *Hexa*, или *Swept*, или *Quarter-O-Grid*, или *Degenerate*; для двумерного – *Quad* или *Unstructured*;

*в) Extrude Face* . Метод построения блока путем экструкдирования (выдавливания) через грань другого уже созданного блока, что применимо только для трехмерных блоков. При этом эксрукзия может осуществляться тремя способами:

1) Interactive. В данном случае указывается лишь грань блока. К этой грани будет автоматически достроен еще один блок. Таким образом, может проводиться построение смежных 3d блоков;

2) Fixed distance. При этом способе указывается грань смежного блока, а также «глубина выдавливания» нового блока;

*3) Extrude Along Curve*. С использованием этого метода строятся смежные блоки по смежной грани, направляющей, конечной точке (отвечающей за «глубину выдавливания»), а так же числу новых блоков, выстраиваемых вдоль заданной направляющей.

*г) 2D to 3D Blocks \**. Используется при построении трехмерных бло-ков с использованием двумерных. Содержит три метода построения:

1) Fill. Это метод «наполнения». Строится трехмерный блок, который опирается на двумерные, являющееся его гранями (см. рисунок 2.6).

2) *Translate*. В этом методе перевод двумерного блока в трехмерный осуществляется путем задания дистанции по осям *X*, *Y* и *Z*. Следует учесть, что в данном случае оси являются локальными, привязанными к блоку;



Рисунок 2.6 - Построение блока методом «наполнения»

3) Rotate. Этот способ используется при изменении двумерного блока в трехмерный путем поворота. В нем указывается центр поворота (центр координат, или выбранная пользователем точка), ось вращения (оси координат или выбранный пользователем вектор), угол поворота, число копий блока, число точек по углу (характеризует число блоков по выбранному углу). Можно выбрать опцию разрушения узлов, находящихся на оси вращения (Collapse Axis Nodes), эктерукзию геометрических точек/линий в линии/области(Extrude points/Extrude curves), установить периодичность узлов(Set Periodic Nodes).

*д) 3D to 2D w*. Создание двумерных блоков из трехмерного блока, при этом двумерные блоки являются гранями начального.

Следующим этапом является ассоциация блока с геометрией 🚳 (см. рисунок 2.7).

Можно ассоциировать вершины, стороны, грани блока с геометрией, на которой он построен. Среди всех представленных способов ассоциации наиболее востребованными являются:

– Associate Vertex 📿

способ позволяет ассоциировать вер-

шину блока с точкой;

Blocking Associations Edit Associations Conversion Entity Conversion Point Courve Courtace Vetex Point OK Dismiss

Рисунок 2.7 - К ассоциации блоков

– Associate *Edge to Curve*  $\swarrow$ . Ассоциация ребра с линией. В этом случае необходимо ввести ребро (*Edge*), задать линию (*Curve*), с которой планируется провести ассоциацию, а также можно задать проецирование вершин (*Project vertices*), пересечение областей (*Project to surface intersection*), и пересечение линий (*Project ends to curve intersection*);

Этот

– Associate Face to Surface . При помощи этого способа можно произвести ассоциацию грани с поверхностью. Ассоциирование грани требуется в том случае, когда необходимо создать поверхностные элементы сетки внутри трехмерной расчетной области. Только при выполнении указанной ассоциации на поверхности возможно будет задание граничных условий;

– Reset Association  $\Im$ . Данная опция необходима для снятия наложенных ассоциаций. В ней можно установить объекты снятия ассоциаций – вершины (*Vertices*), ребра (*Edges*) и грани (*Faces*). Необходимо отметить, что если, например, на вершину наложена ассоциация, то она становится непрерывно связана с точкой, с которой она ассоциирована. Свободное перемещение этой вершины уже не допускается. Неассоциированная вершина имеет возможность перемещаться;

– помимо этих основных способов ассоциации существует и ряд других: Auto Association 🖗 – производит автоматическую ассоциацию, Disassociation from Geometry 🍋 отмена ассоциаций отдельных вершин, ребер и граней, Associate Edge from Surface 🖗 –проецирование ребра на поверхность,

Group Curves 🖓 – группировка линий и др.

После того, как установлены ассоциации блоковой структуры с геометрией, можно приступать к установке параметров разбиения сетки (меширования): числа узлов и законов их расположения вдоль ребер блоков . Установка мешируемых параметров возможна также и при нереализованных ассоциациях (их можно реализовать впоследствии, или вовсе не накладывать).

а) Edge Params  $\bigwedge$  (см. рисунок 2.8). Эта опция позволяет устанавливать разбиение ребер блоков. В пункте ребро (Edge) выбирается нужное ребро блока. В графе длина (Lenght) указывается длина данного ребра, что удобно при расчете числа необходимых узлов на ребре. В пункте узлы (Nodes) указывается число необходимых узлов на ребре (по умолчанию их число равно двум). Далее выбирается закон разбиения ребра (Mesh law). Наиболее часто встречаются: BiGeometric – равномерное разбиение, Linear – разбиение по линейному закону, Spline – разбиения, используя сплайновый закон, Exponential – экспоненциальный закон разбиения, Hiperbolic – гиперболический закон. При Exponential и Hiperbolic за разбиение отвечают такие факторы, как расстояние между ближайшими узлами у выбранной вершины (*Spacing*) и передаточное число (*Ratio*). Среди остальных параметров, отвечающих за разбиение, стоит отметить такие, как блокирование числа узлов на ребре (*Nodes Locked*), блокирование параметра разбиения ребра (*Parameters Locked*), а также копирование свойств данного разбиения ребра на другие ребра, параллельные данному ребру (*Copy Parameters*);

Mashing Parameters	
	<b>*</b>
Edge 🔽 📩	
Length	
Nodes 0	2
Mesh law BiGeometric	
Spacing 1	
F Sp1 Linked Select Rev	erse
Ratio 1	
Spacing 2	_
T Sp2 Linked Select Rev	erse
Ratio 2	
Max Space	
C Spacing Relative	
Nodes Locked	
Parameters locked	
Copy Parameters	
Com	

Рисунок 2.8 - Установка разбиений на ребре – Edge Params

*б) Scale Sizes* Saganue множителя разбиения (*Factor*). Множитель является положительным числом и определяет, во сколько раз изменится число узлов сетки в каждом направлении после проведения операции разбиения;

в) Refinement . С помощью данной опции можно увеличить число разбиений выбранных блоков (*Blocks*) по выбранным или по всем сторонам (*Refinement Dimension: Select* или *All*). Множитель изменения разбиений данного блока записывается в *Level*. При помощи данного способа можно легко сопрягать смежные блоки с разным числом разбиения по общей стороне.

После того, как все *Pre-Mesh* параметры разбиения установлены, можно отобразить предварительную сетку на рабочую плоскость, устанавив галочку *Model-> Blocking-> Pre-Mesh* во вкладке Дерево вида. Таким образом, отображается прообраз сетки по построенной блочной структуре. В дальнейшем, предварительную сетку можно конвертировать в сеточную область (*Mesh*). Для

этого необходимо кликнуть правой кнопкой мыши на Model-> Blocking-> Pre-Mesh и выбрать Convert to Unstructured Mesh. Причем конвертировать можно как структурированные, так и неструктурированные прообразы сетки. После этой операции будет создана обычная сеточная область в Ansys Extended Meshing.

Это далеко не все возможности, которые предоставляет Ansys Extended Meshing при работе с блоками. Очень важной опцией является возможность разбиения блоков на составляющие 🔅:

*a) O-grid Block* . При помощи этого способа блок расщепляется на так называемую «нулевую решетку» (это название пришло из вида расщепления). При этом можно задавать центр этого расщепления, причем центром может быть не только центр тяжести блока, но и его элементы, а именно вершины, ребра, грани (рисунок 2.9);

*б) Split Block* 2. Данный метод расщепления более универсальный и позволяет расщеплять блоки (все видимые – All Visible и задаваемые пользователем - Select) по выбираемому ребру при помощи различных способов:

1) графически, определяя место разбиения, указывая его на ребре – Screen select;

2) Указывая точку (*Point*), которая будет определять место разбиения – *Prescribed point*. Точка не обязательно должна лежать на ребре. Место разбиения будет определяться путем проецирования точки на ребро;

*3)* Задавая параметр от нуля до единицы – *Relative*. При этом место на ребре выбирается из пропорции, где под единицей понимается вся длина ребра;

4) Задавая расстояние от конца ребра – Absolute;

5) Указывая линию, и параметр (от нуля до единицы), которые будут определять длину от конца ребра, где и будет место разбиения.



Рисунок 2.9 - Расщепление блока при помощи опции «O-grid Block»

Этот способ удобен тем, что пользователь может сам построить сеть блоков различной конфигурации.

*в) Split Vertices* Данная опция позволяет расщеплять вершины (рисунок 2.10), при этом необходимо указать вершину, которую следует расщепить;



Рисунок 2.10 - Расщепление вершин – Split Vertices

*г)* Существуют также и другие способы расщепления блоков, такие как *Split Face*, *Split Free Face* и др.

При построении нужной блочной структуры необходимо иногда производить объединение вершин. Для этого существует свойство *Merge Vertices* 

*a) Merge Vertices* Этот метод позволяет объединять вершины двух блоков. В строке 2Vertices указываются две вершины, которые необходимо объединить. Далее можно задать другие свойства объединения:

1) Propagate merge – продолжить объединение других вершин. При использовании этого свойства объединяются не только две соседние вершины, находящиеся по разные концы одного блока, но и все вершины, грани которых параллельны искомой;

2) Merge to average – производит объединение двух вершин, а получившуюся единую вершину ставит посередине между начальными.

 $\delta$ ) Merge Vertices by Tolerance  $\bullet$  . Объединение двух вершин с учетом точности. При этом объединении задается только пара вершин и точность. При правильно установленной точности вершины объединяются в одну, которая располагается посередине, между исходными;

*в) Collapse Blocks* Данный метод позволят объединить две вершины при уничтожении блока. Входными параметрами являются ребро блока, границами которого служат объединяемые вершины, и сам блок (см. рисунок 2.11);



Рисунок 2.11 - Объединение вершин блоков

*с)* Merge Vertex to  $Edge^{44}$ . Способ объединения двух вершин одного ребра, при этом задается только одна из вершин, а вместо другой выбирается сопряженное ребро. В качестве входных параметров выступают вершина (Vertex) и ребро (Edge). Схема данного метода приведена на рисунке 2.12.



Рисунок 2.12 - Объединение вершин ребра

Трансформации блоков производятся с помощью опции\_*Transform* Blocks 🔄. Эта опция позволяет перемещать (*Translate Blocks*), поворачивать (Rotate Blocks), зеркально отображать (*Mirror Blocks*), и масштабировать (*Scale Blocks*) блоки.

Изменение основных составляющих и настроек блоков осуществляется с помощью опции *Edit Block* <sup>×</sup> :
*a) Merge Blocks* Select Данный метод позволяет объединять блоки в единое целое. Объединение проводится двумя способами: Select – указываются блоки на расчетной области которые нужно объединить; Automatic – объединение блоков производится автоматически (происходит объединение всех блоков);

*б) Change Block IJK* **2** Эта опция позволяет изменить локальную систему координат каждого блока несколькими способами:

*1) IJK->KIJ*. Изменение левой тройки базисных векторов на правую, и наоборот. Входным параметром является блок (Block);

2) Set Origin. Перемещение в другую вершину блока начала локальных координат. Входными параметрами являются блок (*Block*) и вершина (*Vertex*), в которую необходимо перенести начало координат;

3) Align Blocks. Выставление координат всех блоков подобно выбранному;

4) Set IJK. Задание направления базисных векторов:

*в) Renumber Blocks* <sup>1</sup> Данный компонент позволяет перенумеровывать блоки;

*с) Convert Block Туре* 2. При помощи этой опции можно поменять тип блока. В графе *Туре* приводимый тип блока, а также задается блок, тип которого необходимо изменить;

*d) Modify 0Grid*  $\blacksquare$ . При помощи *Modify 0Grid* можно изменять масштаб блока/ов. Блоки можно задавать самостоятельно (*Select*), процедуру можно также осуществить для всех видимых блоков (*All Visible*). При этом указывается ребро (*Edge*), относительно которого производится масштабирование, а также устанавливается коэффициент масштабирования (*Offset*). При желании вместо коэффициента можно задавать абсолютную длину ребра (*Absolute distance*).

При работе с блоком до его ассоциации часто бывает удобно перемещать его вершины к месту их будущей ассоциации с точками, при этом самой ассоциации не проводить. Для этого служит метод *Move Vertices*, позволяющий двигать свободные вершины.

– обычное перемещение вершины. *Move Vertex* . Данный способ позволяет переместить вершину вручную. Для этого необходимо выбрать и переместить необходимую вершину при помощи мыши;

– Align Vertices In-line<sup>2</sup>. Выстраивание в линию указанных вершин. При помощи Reference Direction выбирается прямая линия. В Vertices задаются вершины, которые будут проециироваться на эту прямую;

- Set Edge Length . При помощи этого способа можно осуществлять перемещение вершин, указывая ребро, которое их соединяет, и задавая длину этого ребра. При этом можно включить функцию свободной вершины (*Freeze Vertex*), которая позволяет перемещать только выбранную вершину. В противном случае вершины сместятся на одинаковое расстояние относительно центра;

– *Move Face Vertices* Перемещение вершин, которые ограничивают грань, путем задания грани, а также вектора, который и будет отвечать за перемещение. Этот способ содержит и другой метод–*Rotate Vertices*, который перемещает выбранные вершины на задаваемый угол, где центр и ось вращения пользователь задает сам.

#### 2.3.3 Дерево вида модели. Деление модели на части

Вкладка *Geometry*: позволяет включать-отключать отображение точек, кривых, поверхностей и тел. Нажав правой кнопкой на пункт *Points*, можно настроить изображение точек:

- Show Large - позволяет сделать их в два-три раза толще;

 Show Point Names - отображение на экране названий всех построенных точек;

– Show Point Info - получение информации о названии выбранной точки, части (*Part*) которой она принадлежит и ее координатах;

– нажав Blank Points и выбрав нужные точки можно временно отменить их отображение;

– при помощи Show Only Points можно оставить отображёнными только нужные точки; опция Unblank All Points восстанавливает отображение всех точек.

Аналогичные свойства и у кривых с поверхностями. Помимо этого, у поверхностей есть опции:

– Solid, при использовании которой, поверхность отображается как непрозрачная стенка;

– опции Show Full, Show Simple позволяют увеличить или уменьшить число образующих поверхности;

- пункт <sup>Тгалярагент</sup> - прорисовка поверхностей полупрозрачными;

– активирование опции <sup>Show Surface Normals</sup> ведет к отображению вектора нормали к поверхности. Для того чтобы увидеть созданное тело (*Bodies*), необходимо нажать на <sup>Show Bounding Surfaces</sup>.

Аналогично настраивается вид сеток (*Mesh*) и блоков (*Blocking*), где *Vertices* - вершины блока, *Edges* - рёбра, *Fases* - грани. Полезными для блоков являются описанные ниже опции.

У рёбер:

– опция <sup>Show association</sup> - позволяет наглядно увидеть ассоциировано ли ребро с кривой;

 если да, то будет отображена стрелка, указывающая на эту кривую (без этой опции ассоциированные рёбра подсвечиваются зелёным цветом);

 Bunching - после активирования над каждым ребром появится количество узлов, на которое разбито данное ребро, более того, отображается разбиение ребра;

– Projected Edge Shape - после применения данной опции каждое ассоциированное ребро примет форму той кривой, с которой оно проассоциировано.

Аналогичные опции существуют для граней:

– Face Projection - стрелками показывается, с какой поверхностью проассоциированы грани (более того, рядом будет подписано имя части (*Part*) с которой данная грань проассоциирована);

– Show Face Info - после выбора нужной грани выведет в текстовом окне (в log-файле) тип связи грани с геометрией (например, FAMILY, если грань связывалась с частью и имя этой части).

У блока можно настроить отображение его как жёсткого целого, а также аналогичные настройки связи блока с геометрией, иногда полезной является вкладка *IIK*, позволяющая отобразить направление базисных векторов локальной системы координат блока (при желании, локальную систему координат у блока можно изменить).

Пункт прообраз сетки (Pre-Mesh) даёт возможность осуществить предварительный просмотр сетки. В этом пункте также можно проводить полную настройку вида предварительной сетки:

No projection - отображает сетку без учета связи блоков с геометрией;

- Project vertices - учитывает связь только вершин блока с геометрией;

Project edges - связаны только рёбра;

 – Project faces - связаны только грани (последовательное изменение этих трёх параметров даст уверенность, что блок правильно ассоциирован с геометрией);

– Recompute - вызывает обновление сетки; Show Size Info - выводит характерные размеры сетки (число узлов, число элементов);

– очень важной является опция <sup>Convert to Unstruct Mesh</sup>, которая позволяет конвертировать прообраз сетки, построенный с помощью блоков в сетку, ее же в свою очередь уже можно экспортировать в решатель.

Также на дереве вида отображаются все созданные части (*Parts*). Изображение частей устанавливается аналогично: щёлкнув правой кнопкой по *Parts* можно увидеть меню, где будет предложено создать часть, показать все части или скрыть все части. Смысл деления модели на части заключается в следующем:

– части – прообразы границ расчетной области. Если часть включает в себя ряд поверхностей, то после создания сетки ей будет принадлежать набор поверхностных узлов, которыми мешированы эти поверхности. Впоследствии, после экспорта в решатель, на этом наборе задается одно и только одно граничное условие, либо же происходит склейка между разнородными зонами расчетной области (например, граница жидкости и твердого тела). По умолчанию все геометрические объекты записываются в часть GEOM;

– в части, содержащие блоки, после создания сетки включаются все объемные элементы, которые будут входить в эти блоки. В вычислительном пакете в различных объемных частях появляется возможность задавать разнородные среды (например, жидкость в одной части и твердое тело в другой). Таким образом, части могут служить прообразами физически разнородных зон расчетной области. По умолчанию все блочные элементы записываются в часть SOLID;

– части служат для упрощения работы в пакете, особенно для задач со сложной и нестандартной геометрией: их удобно использовать для ассоциации граней блоков с поверхностями, для этого достаточно указать имя части, в которой находится поверхность.

При нажатии правой кнопкой по уже созданным частям можно путём

выбора Add to Part открыть меню добавления геометрии в часть (см. рисунок 2.13).



Рисунок 2.13 - Меню добавления геометрии в часть

Выделение или снятие выделения *переводит мышь либо в режим* выделения геометрии, либо в режим перемещение-вращение (зажатие колёсика в режиме перемещения позволяет двигать геометрию, а в режиме выбора геометрии добавляет выделенные элементы во введённую часть). Для выбора точек, кривых, плоскостей, тел надо соответственно снять или поставить выделение над кнопками: *Переводи*, если же надо выбрать уже существующую часть, то следует нажать на кнопку *и* и в появившемся меню поставить галочки напротив нужных частей и нажать <u>Accept</u>. Помимо этого, можно выделять все элементы, попадающие в квадратную область; для этого надо зажать левую кнопку мыши и обвести все необходимые объекты, при этом, если выделена кнопка *против*, то выбраны будут только объекты, целиком вошедшие в область, в противном случае выделено будет всё то, что попало в эту область, хотя бы частично.

Для того чтобы добавить объекты в часть необязательно пользоваться пунктом Add to Part, можно нажать кнопку Create Part (т.е. создать часть) предварительно щёлкнув правой кнопкой на слове *Part* и ввести имя уже существующей части.

Отметим, что один объект (точка, плоскость, блок), может быть отнесён лишь к одной части, при добавлении элемента в одну часть происходит автоматическое исключение его из всех остальных.

# 2.4 Построение сеточной модели судна на воздушной подушке с использованием сеточного генератора Ansys Meshing/Ansys Extended Meshing

#### 2.4.1 Построение геометрической модели корпуса судна

В Ansys Mesing/Ansys Extended Meshing создается проект с названием

*Korp*. На рисунке 2.14 показана результирующая геометрическая модель корпуса судна.

Показанная на рисунке 2.14 геометрическая модель разделена на 9 частей, каждая часть обозначена своим цветом. Деление на части необходимо для выставления граничных условий. Ниже рассмотрено построение геометрической модели для каждой части в отдельности.



Рисунок 2.14 - Геометрическая модель судна на воздушной подушке

2.4.1.1 С помощью инструмента *Geometry* →*Create Point* → *Explicit Coordinates* создаются точки (в скобках указаны их координаты в миллиметрах в глобальной системе координат):

point_2 (-3735 ; -200 ; 1040),	point_3 (-3735 ; -400 ; 10 40),
point_5 (-3735 ; -293 ; 1466),	point_6 (-3735 ; -959 ; 1504),
point_8 (-1350; 0; 1040),	point_9 (-1350 ; -200 ; 1040),
point_11 (-1350 ; -200 ; 1240),	point_12 (-1350 ; -293 ; 1466),
point_14 (-1350 ; -959 ; 1504),	point_15 (-650; 0; 1040),
point_17 (-720 ; -266 ; 1164),	point_18 (-824 ; -365 ; 1348),
point_20 (-955 ; -959 ; 1134),	point_21 (-220;0;0),
point_23 (-292 ; -466; 0),	point_24 (-423 ; -959 ; 0),
point_26 (-650, 0, -1040),	point_27 (-650, -200, -1040),
point_29 (-824, -365, -1348),	point_30 (-930, -466, -1536),
	point_2 (-3735 ; -200 ; 1040), point_5 (-3735 ; -293 ; 1466), point_8 (-1350 ; 0 ; 1040), point_11 (-1350 ; -200 ; 1240), point_14 (-1350 ; -959 ; 1504), point_17 (-720 ; -266 ; 1164), point_20 (-955 ; -959 ; 1134), point_23 (-292 ; -466; 0), point_26 (-650 , 0 , -1040), point_29 (-824 , -365 , -1348),

Для создания линий используется Geometry →Create/Modify Curve →

Название линии	Название точ-	Название ли-	Название точки
	ки	нии	
curve_1	point_1, point_2	curve_20	point_19, point_18
curve_2	<pre>point_2, point_3</pre>	curve_21	point_13, point_19
curve_3	point_2,point_4	curve_22	point_12, point_18
curve_4	point_4, point_5	curve_23	point_17, point_18
curve_5	point_5, point_6	curve_24	point_11, point_17
curve_6	point_6, point 7	curve_25	point_16, point_17
curve_7	point_1, point_8	curve_26	point_9, point_16
curve_8	point_2, point_9	curve_27	point_8, point_15
curve_9	point_3, point_10	curve_28	point_15, point_16
curve_10	point_4, point_11	curve_29	point_10, point_16
curve_11	point_5, point_12	curve_30	point_9, point_10
curve 12	point 6 point 13	curve 31	point_14,point_20,
	point_0, point 15	curve_51	point_24, point_31,point_25
curve_13	point_7, point_14	curve_32	point_19, point_23,point_30
curve_14	point_8, point_9	curve_33	<pre>point_16, point_22, point_27</pre>
curve_15	point_9, point_11	curve_34	<pre>point_15, point_21, point_26</pre>
curve_16	point_11, point_12	curve_35	point_26, point_27
curve_17	point_12, point_13	curve_36	point_27, point_30
curve_18	point_13, point_14	curve_37	point_25, point_30
curve_19	point_14, point_19		

Таблица 2.1 – Таблица создаваемых линий

Для создания поверхностей выберается Geometry →Create/Modify Surface → Simple Surface (см. таблицу 2.2).

Названия поверхно-	Названия линий
стей	
srf_1	curve_1, curve_7, curve_8, curve_14
srf_2	curve_2, curve_8, curve_9, curve_30
srf_3	curve_3, curve_8, curve_10, curve_15
srf_4	curve_4, curve_10, curve_11, curve_16
srf_5	curve_5, curve_11, curve_12, curve_17

Таблица 2.2 – Таблица создаваемых поверхностей.

srf_6	curve_6, curve_12, curve_13, curve_18
srf_7	curve_14, curve_26, curve_27, curve_28
srf_8	curve_26, curve_29, curve_30
srf_9	curve_15, curve_24, curve_25, curve_26
srf_10	curve_16, curve_22, curve_23, curve_24
srf_11	curve_17, curve_20, curve_21, curve_22
srf_12	curve_18, curve_19, curve_21
srf_13	curve_19, curve_31, curve_32, curve_37
srf_14	curve_28, curve_33, curve_34, curve_35
srf_15	curve_20, curve_23, curve_25, curve_32, curve_33, curve_36

Далее построенная геометрическая модель зеркально отображается относительно оси Z. Для этого используется *Geometry* → *Transform Geomery*.

Строится поверхность по кривым: *curve\_13*, *curve\_31*, *curve\_13.0*.

Создается геометрическая часть с именем *FRONT\_BASE*, левой кнопкой мыши помещаются все построенные точки, линии и поверхности (необходимо

включить иконки: 🌠 🔞 🕼). Результат показан на рисунке 2.15.



Рисунок 2.15 - Первая часть геометрической модели судна на воздушной подушке

2.4.1.2 В разделе Parts выключается отображение части FRONT\_BASE и для формирования второй части геометрической модели строится следующий набор точек:

point_32 (-1390 ; 0 ; 1040),	point_33 (-1390 ; 0 ; 950),	point_34 (-1415 ; 43 ; 950),
point_35 (-1620 ; 400 ; 950),	point_36 (-1855 ; 900 ; 818),	point_37 (-1885 ; 100 ; 640),
point_38 (-1794 ; 1000 ; 385),	point_39 (-1702 ; 900 ;385),	point_40 (-1190 ; 0 ; 385),
point_41 (-3735;0;1040),	point_42 (-3735 ; 0 ; 950),	point_43 (-3735 ; 43 ; 950),
point_44 (-3735 ; 400 ; 950),	point_45 (-3735 ; 900 ; 818),	point_46 (-3735 ; 1000 ; 640),

point_47 (-650; 0; 1040),	point_48 (-220 ; 0 ; 0).	
---------------------------	--------------------------	--

В соответствии с таблицей 2.3 создаются линии.

Название линии	Название точки	Название линии	Название точки
curve_38	point_32,point_33	curve_50	point_44,point_45
curve_39	point_32,point_34	curve_51	point_43,point_44
curve_40	point_34,point_33	curve_52	point_42,point_43
curve_41	point_34,point_35	curve_53	point_41,point_43
curve_42	point_35,point_36	curve_54	point_41,point_42
curve_43	point_36,point_37	curve_55	point_32,point_41
curve_44	point_37,point_38	curve_56	point_34,point_43
curve_45	point_38,point_39	curve_57	point_35,point_44
curve_46	point_36,point_39	curve_58	point_36,point_45
curve_47	point_39,point_40	curve_59	point_37,point_46
curve_48	point_40,point_33	curve_60	point_47,point_32
curve_49	point_45,point_46		

Таблица 2.3 – Таблица создаваемых линий

С использованием созданных линий создаются поверхности (см. таблицу 2.4).

Название поверхно-	Название линии
сти	
srf_17	curve_55,curve_56,curve_53,curve_39
srf_18	curve_56,curve_57,curve_41,curve_51
srf_19	curve_57,curve_58,curve_42,curve_50
srf_20	curve_58,curve_59,curve_43,curve_49
srf_21	curve_43,curve_44,curve_45,curve_46
srf_22	curve_38,curve_39,curve_40
srf_23	curve_40,curve_41,curve_42,curve_46,
	curve_47,curve_48

Таблица 2.4 – Таблица создаваемых поверхностей

Используя инструмент *Transform Geomery*, копируются точки, линии и поверхности, построенные для второй части.

Проводятся дополнительные линии: *curve\_61* через точки *point\_47*, *point\_48*, *point\_47.0*, curve\_62 через точки point\_47, point\_47.0.

Далее, создаются дополнительные поверхности согласно таблице 2.5.

Таблица 2.5 – Таблица дополнительных поверхностей.

Название поверхности	Название линии
srf_24	curve_59,curve_44
srf_25	curve_45,curve_45.0
srf_26	curve_47,curve_47.0
srf_27	curve_60,curve_60.0
srf_28	curve_61,curve_62

Создается Part с именем *CAB*, в него заносятся все созданные точки, результат показан на рисунке 2.16.



Рисунок 2.16 - Вторая часть геометрической модели судна на воздушной подушке

2.4.1.3 В разделе Parts выключается отображение части САВ и строится следующий набор точек для построения следующей, третьей части: point\_49 (-3735 ; -959 ; 1505), point\_50 (-3735 ; -467 ; 1537), point\_51 (-3735 ; -293 ; 1467), point\_52 (-3735 ; -200 ; 1240), point\_53 (-3735 ; -200 ; 1040), point\_54 (-3735 ; 0 ; 1040), point\_55 (-3735 ; 43 ; 950), point\_56 (-3735 ; 400 ; 950), point\_57 (-3735 ; 900 ; 818), point\_58 (-3735 ; 1000 ; 640), point\_59 (-4790 ; 0 ; 1040), point\_60 (-4790 ; 0 ; 950), point\_61 (-4790 ; 43 ; 950), point\_62 (-4790 ; 400 ; 950), point\_63 (-4790 ; 900 ; 818), point\_64 (-4790 ; 1000 ; 640), point\_65 (-6250 ; -340 ; 1040), point\_66 (-6250 ; -200 ; 1040), point\_65 (-6250 ; -340 ; 1040), point\_66 (-6250 ; -200 ; 1040), point\_65 (-6250 ; -340 ; 1040), point\_66 (-6250 ; -200 ; 1040), point\_67 (-6250 ; -144 ; 1040), point\_68 (-5990 ; 0 ; 1040), point\_69 (-5990 ; 0 ; 420), point\_70 (-5990 ; 560 ; 420), point\_71 (-5990 ;

640 ; 300), point\_72 (-7250 ; -959 ; 1505), point\_73 (-7250 ; 467 ; 1537), point\_74 (-7250 ; -293 ; 1467), point\_75 (-7250 ; -200 ; 1040), point\_76 (-7250 ; -340 ; 1040), point\_77 (-7250 ; -340 ; 1040), point\_78 (-4790 ; 0 ; 420), point\_79 (-4790 ; 560 ; 420), point\_80 (-4790 ; 640 ; 300).

В соответствии с таблицей 2.6 строятся линии.

		, ,	
Название линии	Название точки	Название ли-	Название точки
		нии	
curve_63	point_49, point_50	curve_80	point_74, point_75
curve_64	point_50, point_51	curve_81	point_75, point_76
curve_65	point_51, point_52	curve_82	point_76, point_77
curve_66	point_52, point_53	curve_83	point_77, point_65
curve_67	point_53, point_54	curve_84	point_65, point_66
curve_68	point_54, point_55	curve_85	point_66, point_67
curve_69	point_55, point_56	curve_86	point_67, point_68
curve_70	point_56, point_57	curve_87	point_68, point_69
curve_71	point_57, point_58	curve_88	point_69, point_70
curve_72	point_59, point_60	curve_89	point_70,point_71
curve_73	point_60, point_61	curve_90	point_71,point_80
curve_74	point_59, point_61	curve_91	point_78,point_79
curve_75	point_61, point_62	curve_92	point_79, point_80
curve_76	point_62, point_63	curve_93	point_80, point_64
curve_77	point_63, point_64	curve_94	point_64, point_58
curve_78	point_72, point_73	curve_95	point_72, point_77
curve_79	point_73, point_74	curve_96	point_60, point_78

Таблица 2.6 – Таблица создаваемых линий

Далее, создаются поверхности согласно таблице 2.7.

	Таблица 2.7 –	Таблица	создаваемых	поверхносте	й
--	---------------	---------	-------------	-------------	---

Название поверхности	Название линии
srf_29	curve_78,curve_63
srf_30	curve_79,curve_64
srf_31	curve_80,curve_65
srf_32	curve_81,curve_66
srf_33	curve_82,curve_84
srf_34	curve_85,curve_86,curve_67

srf_35	curve_72,curve_73,curve_74
srf_36	curve_74,curve_68
srf_37	curve_75,curve_69
srf_38	curve_76,curve_70
srf_39	curve_77,curve_71
srf_40	curve_87,curve_96,curve_72
srf_41	curve_88,curve_91
srf_42	curve_89,curve_90,curve_92
srf_43	curve_73,curve_75,curve_76,curve_91
srf_44	curve_77,curve_92
srf_45	curve_78,curve_79,curve_80,curve_81,curve_82,curve_95

Используя инструмент *Transform Geomery*, копируются точки, линии и поверхности.

Строятся дополнительные поверхности по линиям; схема построения показана в таблице 2.8.

Название поверхности	Название линии
srf_46	curve_95,curve_95.0
srf_47	curve_83,curve_83.0
srf_48	curve_84,curve_84.0,curve_85,curve_85.0
srf_49	curve_86,curve_86.0
srf_50	curve_88,curve_88.0,curve_89,curve_89.0
srf_51	curve_90,curve_90.0
srf_52	curve_94,curve_94.0

Таблица 2.8 – Таблица создаваемых поверхностей

Строится поверхность по 4 точкам, в поле SurfSimpleMethod изменяется From Curves на From 4 points. В поле Locations вводятся названия точек: point\_64 point\_80 point\_80.0 point\_64.0 (ввод точек осуществляется через пробел).

Построенная геометрическая модель объединяется в Part с именем *BACK\_BASE*; результат представлен на рисунке 2.17.



Рисунок 2.17 - Третья часть геометрической модели судна на воздушной подушке

2.4.1.4 В разделе Parts выключается отображение части BACK\_BASE и строится следующий набор точек:

point\_81 (- 6950; 776; 165), point\_82 (-6950; 790; -151), point\_83 (-6950; 474; - 165), point\_84 (- 6950; 460; 151).

Выбирается (Geometry  $\rightarrow$ Create Point  $\rightarrow$  Explicit Coordinates). В поле Name вводится название точки, в поле Base point выбирается базовая точка, в полях DX,DY,DZ вводятся значения координат новой точки относительно базовой (см. рисунок 2.18).

Create Point
Part GEOM
Name
🗖 Inherit Part
$ \begin{array}{c} & & \\ & & $
<u> </u>
Base Point and Delta
Base point 🛛 🗞
DX
DY
DZ

Рисунок 2.18 - Создание новой точки по отношению к базовой

Создаются точки point\_85, point\_86, point87, point\_88 соответственно базовым точкам point\_81, point\_82, point\_83, point\_84 на расстоянии DX = 330, DY = 0, DZ = 0.

Выбирается (Geometry  $\rightarrow$  Create/Modify Curve  $\rightarrow$  Arc). В поле Name вводится название линии, устанавливается метод From 3 Points, в поле

Locations вводятся необходимые точки (см. рисунок 2.19). Проводятся линии согласно таблице 2.9.

Create/Modify Curve
Part GEOM
Name
🔽 Inherit Part
A A A A A
r# 🔘
Create Arc
Method From 3 Points
Locations 🛛 😵

Рисунок 2.19 - Построение полуокружности по трем точкам

Таблица 2.9 – Таблица создаваемых линий

Название линии	Название точки
curve_97	point_81,point_82,point83
curve_98	point_83,point_84,point_81
curve_99	point_85,point_86,point_87
curve_100	point_87,point_88,point_85

Строятся поверхности между линий: curve\_97, curve\_98 и curve\_99, curve\_100 с названиями srf\_54 и srf\_55.

Геометрическая модель, объединяется в Part с именем *HUB*, результат показан на рисунке 2.20.



Рисунок 2.20- Четвертая часть геометрической модели судна на воздушной подушке

2.4.1.5 В разделе Parts выключается отображение части HUB и строится набор точек:

point\_89 (-6620 ; 1170 ; 597), point\_90 (-6620 ; 1222 ; -546), point\_91 (-6620 ; 79 ; -597), point\_92 (-6620 ; 29 ; 546), point\_93 (-6620 ; 776 ; 165), point\_94 (-6620 ; 790 ; -151), point\_95 (-6620 ; 474 ; -165), point\_96 (-6620 ; 460 ; 151).

Строятся линии (*Geometry*  $\rightarrow$  *Create/Modify Curve*  $\rightarrow$  *Arc*), номера линий и исходных точек представлены в **таблице 2.10** (необходимо соблюдать порядок введения точек согласно таблице 2.10).

Таблица 2.10 – Таблица создаваемых линий

Название линии	Название точки
curve_101	point_89,point_90,point_91
curve_102	point_91,point_92,point_89
curve_103	point_93,point_94,point_95
curve_104	point_95,point_96,point_93

Создается поверхность между линиями: *curve\_101 и curve\_102*, с названием *srf\_56* при использовании инструмента *Simple Surface* и метода by *Curve*.

Выбирается инструмент Geometry  $\rightarrow$  Create/Modify Surface  $\rightarrow$  Segment/Trim Surface, задается метод By Curve. В поле Surface выделяется поверхность srf\_56, в поле Curves выделяются линии curve\_103, curve\_104 (см. рисунок 2.21).

Create/Modify Surface
Part GEOM
Name
🔲 Inherit Part
<b>I I I I I</b>
A. (1) (1) (1) (1) (1) (1) (1) (1) (1) (1)
Segment Surface
Method By Curve
Surface 🚺 🚺
Curves 🔀

Рисунок 2.21 - Сегментирование поверхности

Удаляется вновь созданная поверхность srf\_56.cut.0, для этого выбирается инструмент Delete Surface.

Созданная геометрия объединяется в Part с именем *INTERFACE1*. Результат представлен на рисунке 2.22.



Рисунок 2.22 - Пятая часть геометрической модели судна на воздушной подушке

2.4.1.6 Выбирается инструмент Geometry  $\rightarrow$  Transform Geometry  $\rightarrow$ Translate Geometry, ставится галочка рядом с Сору, в поле Number of copies ставится 1, выбирается метод Explicit, X offset = -330, Y offset = 0, Z offset = 0 (см. рисунок 2.23).

Transformation Tools
Select 🚺
Translate/Rotate/Mirror/Scale
🔽 Сору
Number of copies
IncrementParts 📃 🔊
Translation
Method
<ul> <li>Explicit</li> </ul>
C Vector
× Offset
Y Offset
Z Offset

Рисунок 2.23 - Копирование геометрической модели

Точки: point\_89.0, poin\_90.0, point\_91.0, point\_92.0, point\_93.0,

point\_94.0, point\_95.0, point\_96.0, линии: curve\_101.0, curve\_102.0, curve\_103.0, curve\_104.0, поверхность: srf\_56.0 обединяются в Part с названием INTER-FACE2. Отключается отображение геометрии INTERFACE1. Результат представлен на рисунке 2.24.



Рисунок 2.24 - Шестая часть геометрической модели судна на воздушной подушке

2.4.1.7 В разделе Parts выключается отображение части INTERFACE2 и строится набор точек:

point\_97 (-6444 ; 1266 ; 640), point\_98 (-6444 ; 1266 ; -641), point\_99 (-6444 ; -15 ; -641), point\_100 (-6444 ; -15 ; 640), point\_101 (-6444 ; 1531 ; 0), point\_102 (-6444 ; 1545 ; 0), point\_103 (-6453 ; 1281 ; 656), point\_104 (-6453 ; 1281 ; -656), point\_105 (-6453 ; -31 ; -656), point\_106 (-6453 ; -31 ; 656), point\_107 (-6453 ; 1553 ; 0), point\_108 (-6950 ; 1465 ; 0), point\_109 (-6950 ; 1219 ; -594), point\_110 (-6950 ; 31 ; -594), point\_111 (-6950 ; 31 ; 594), point\_112 (-6950 ; 1219 ; 594), point\_113 (-6950 ; 1435 ; 0), point\_114 (-6950 ; 1198 ; -573), point\_115 (-6950 ; 52 ; -573), point\_116 (-6950 ; 52 ; 573), point\_117 (-6950 ; 1198 ; 573), point\_118 (-6610 ; 1435 ; 0), point\_119 (-6610 ; 1198 ; -573), point\_120 (-6610 ; 52 ; -573), point\_121 (-6610 ; 52 ; 573), point\_122 (-6610 ; 1198 ; 573), point\_123 (-6444 ; 625 ; 0), point\_124 (-6950 ; 625 ; 0).

Используя инструмент построения линий Arc, проводится линия с названием curve\_105 через точки point\_101, point\_102, point\_107.

Согласно таблице 2.11 строятся прямые линии (*Geometry*  $\rightarrow$  *Create/Modify Curve*  $\rightarrow$  *From Points*).

тс	0.11	T C		v
Гаолина	211-	Гаолина	созлаваемых	пинии
таозница	<b>-</b> •• <b>- -</b>	гаозпіца	обядаваетын	211111111

Название линии	Название точки
curve_106	point_107,point_108
curve_107	point_108,point_113
curve_108	point_113,point_118
curve_109	point_118,point_101

Выбирается инструмент построения поверхностей Geometry  $\rightarrow$ Create/Modify Surface  $\rightarrow$  Surface of Revolution. В поле Start angle вводится 0, в поле End angle вводится 360, в поле Axis points выбираются точки point\_123, point\_124, в поле Curves выбираются линии curve\_105, curve\_106, curve\_107, curve\_108, curve\_109 (см. рисунок 2.25).

Create/Modify Surface
Part GEOM
Name
🔲 Inherit Part
je 1)
Surface of Revolution
Start angle 0
End angle 360
Axis points 🛛 🚷
Curves 🦉

Рисунок 2.25 - Построение поверхности вращения

Созданные точки, линии и поверхности объединяются в Part с именем *RING*. Результат представлен на рисунке 2.26.



Рисунок 2.26 - Седьмая часть геометрической модели судна на воздушной подушке

2.4.1.8 В разделе Parts выключается отображение части RING и строится набор точек:

point\_125 (-6444 ; -279 ; 48), point\_126 (-6444 ; -279 ; -48), point\_127 (-6575 ; -203 ; 48), point\_128 (-6575 ; -203 ; -48), point\_129 (-6444 ; 1529 ; 48), point\_130 (-6444 ; 1529 ; -48), point\_131 (-6575 ; 1453 ; 48), point\_132 (-6575 ; 1453 ; 48).

Проводятся прямые с использованием таблицы 2.12.

Таблица 2.12 -	Таблица	создаваемых	линий

Название линии	Название точки
curve_110	point_127,point_131
curve_111	point_125,point_129
curve_112	point_126,point_130
curve_113	point_128,point_132

Создаются поверхности с использованием инструмента *Geometry*  $\rightarrow$  *Create/Modify Surface*  $\rightarrow$  *Simple Surface* по двум прямым (см. таблицу 2.13).

Таблица 2.13 – Таблица создаваемых поверхностей

Название поверх-	Название линии	Название поверх-	Название линии
ности		ности	
srf_62	curve_110,curve_111	srf_64	curve_112,curve_113
srf_63	curve_111,curve_112	srf_65	curve_113,curve_110

Созданные точки, линии и поверхности объединяются в Part с именем *PILON*. Результат представлен на рисунке 2.27.



Рисунок 2.27 - Восьмая часть геометрической модели судна на воздушной подушке

2.4.1.9 В разделе Parts выключается отображение части PILON и строится набор точек:

point\_133 (-7510 ; 1240 ; 501), point\_134 (-7510 ; 1239 ; 498), point\_135 (-7490 ; 1240 ; 501), point\_136 (-7490 ; 1240 ; 498), point\_137 (-7200 ; 1260 ; 516), point\_138 (-7200 ; 1260 ; 483), point\_139 (-7020 ; 1260 ; 510), point\_140 (-7014 ; 1260 ; 508), point\_141 (-7010 ; 1260 ; 500), point\_142 (-7013 ; 1260 ; 493), point\_143 (-7020 ; 1260 ; 490), point\_144 (-7510 ; 1404 ; 1), point\_145 (-7510 ; 1404 ; -2), point\_146 (-7490 ; 1404 ; 1), point\_147 (-7490 ; 1404 ; -2), point\_148 (-7200 ; 1425 ; 16), point\_149 (-7200 ; 1425 ; -17), point\_150 (-7020 ; 1425 ; 10), point\_151 (-7014 ; 1425 ; 7), point\_152 (-7010 ; 1425 ; 0), point\_153 (-7013 ; 1425 ; -7), point\_154 (-7020 ; 1425 ; -10).

Создаются линии по точкам, представленным в таблице 2.14.

Название линии	Название точки
curve_114	point_133,point_135
curve_115	point_133,point_134
curve_116	point_134,point_136
curve_117	point_135,point_137
curve_118	point_136,point_138
curve_119	point_137,point_139
curve_120	point_138,point_143
curve_121	point_139,point_140,point_141,point_142,point_143
curve_122	point_144,point_146
curve_123	point_144,point_145
curve_124	point_145,point_147
curve_125	point_146,point_148
curve_126	point_147,point_149
curve_127	point_148,point_150
curve_128	point_149,point_154
curve_129	point_150,point_151,point_152,point_153,point_154

Таблица 2.14 – Таблица создаваемых линий.

С использованием инструмента *Simple Surface* строятся поверхности по линиям, представленным в таблице 2.15 (метод построения поверхностей – *From 2-4 Curves*).

I аолица 2.15 – I аолица создаваемых поверхност
---

Название поверхности	Название линии
srf_66	curve_114,curve_115,curve_116
srf_67	curve_117,curve_118
srf_68	curve_119,curve_120,curve_121
srf_69	curve_122,curve_123,curve_124
srf_70	curve_125,curve_126
srf_71	curve_127,curve_128,curve_129

Используется инструмент *Translate Geometry*, копируются точки: *point\_133 - point\_143*, линии: *curve\_114 – curve\_121*, поверхности: *srf\_66*, *srf\_67*, *srf\_68*. Параметры копирования представлены на рисунке 2.28.

Transformation Tools				
Select 🚺				
Translate/Rotate/Mirror/Scale				
🔽 Сору				
Number of copies 1				
IncrementParts 🚺 🔼				
Translation				
Method				
<ul> <li>Explicit</li> </ul>				
C Vector				
X Offset 0				
Y Offset -1270				
Z Offset 0				

Рисунок 2.28 - Параметры копирования

Точки:  $point_144 - point_154$ , линии:  $curve_122 - curve_129$ , поверхности:  $srf_69$ ,  $srf_70$ ,  $srf_71$  копируются с параметрами, представленными на рисунке 2.24, с изменением поля *Y Offset* = -1600.

Строятся поверхности с использованием инструмента *Simple Surface*, комбинация линий записана в таблице 2.16.

Название по-	Название линии	Название по-	Название линии
верхности		верхности	
srf_72	curve_114,curve_114.0	srf_80	curve_122,curve_122.0
srf_73	curve_115,curve_115.0	srf_81	curve_123,curve_123.0
srf_74	curve_116,curve_116.0	srf_82	curve_124,curve_124.0
srf_75	curve_117,curve_117.0	srf_83	curve_125,curve_125.0
srf_76	curve_118,curve_118.0	srf_84	curve_126,curve_126.0
srf_77	curve_119,curve_119.0	srf_85	curve_127,curve_127.0
srf_78	curve_120,curve_120.0	srf_86	curve_128,curve_128.0
srf_79	curve_121,curve_121.0	srf_87	curve_129,curve_129.0

Таблица 2.16 – Таблица поверхностей

Используется инструмент Mirror Geometry, в поле Select выделяются точки: point\_133 - point\_143, point\_133.0 - point\_143.0, линии: curve\_114 - curve\_121, curve\_114.0 - curve\_121.0, поверхности: srf\_66, srf\_67, srf\_68, srf\_66.0, srf\_67.0, srf\_68.0, srf\_72 - srf\_79, ставится галочка рядом с Сору, осью

отражения является ось Z.

Созданные точки, линии и поверхности объединяются в Part с именем *RULI*. Результат представлен на рисунке 2.29.



Рисунок 2.29 - Девятая часть геометрической модели судна на воздушной подушке

2.4.1.10 Обтекаемая часть геометрической модели судна на воздушной подушке завершена, строятся границы расчетной области. В разделе Parts выключается отображение части RULI, создается набор точек: point\_155 (30000;-959;20000), point\_156 (30000;18900; 0), point\_157 (30000; -

959 ; -20000), point\_158 (-6250;-959;20000), point\_159 (-6250 ; 18900 ; 0),

point\_160 (-6250 ; -959 ; -20000), point\_161 (-6980;-959;20000), point\_162 (-6950 ; 18900 ; 0), point\_163 (-6980 ; -959 ; -20000), point\_164 (-70000;-959;20000), point\_165 (-70000;18900;0), point\_166 (-70000;-959 ; -20000).

Выбирается инструмент создания линий *Arc*, проводятся линии согласно таблице 2.17.

Название линии	Название точки
curve_130	point_155,point_156,point_157
curve_131	point_158,point_159,point_160
curve_132	point_161,point_162,point_163
curve_133	point_164,point_165,point_166

Таблица 2.17 – Таблица создаваемых линий

Выбирается инструмент *From Points*, проводятся дополнительные линии согласно таблице 2.18.

T C	$\mathbf{a}$	1	0	T C		v
Гаолина	1		X —		лополнительных	пинии
таолица	~	• •	U	таолица	дополнитольных	JITTITT

Название линии	Название точки
curve_134	point_155,point_157
curve_135	point_157,point_166
curve_136	point_166,point_164
curve_137	point_164,point_155
curve_138	point_158,point_160
curve_139	point_161,point_163

С использованием инструмента *Simple Surface* и метода *From 2-4 Curves* создаются поверхности по кривым, указанным в таблице 2.19.

Название поверхности	Название линии
srf_88	curve_130,curve_134
srf_89	curve_130,curve_131
srf_90	curve_132,curve_133
srf_91	curve_131,curve_132
srf_92	curve_131,curve_138
srf_93	curve_132,curve_139
srf_94	curve_133,curve_136
srf_95	curve_134,curve_136

Границы расчетной области разделены на части, содержание частей представлено в таблице 2.20.

Название части	Название поверхности
IN	srf_88
UP	srf_89,srf_90
UP_TMP	srf_91
TMP	srf_92,srf_93
OUT	srf_94

Таблица 2.20 – Таблица геометрических частей

DOWN	srf_95



Результат построения представлен на рисунке 2.30.

Рисунок 2.30 - Границы расчетной области

#### 2.4.2 Геометрическая модель винта

Геометрическая модель корпуса копируется с новым названием Vint, что позволит создавать геометрическую модель винта с сохранением системы координат, принятой в проекте **Korp**. Геометрическая модель винта состоит из 10 геометрических частей. Построение геометрической модели винта осуществляется в 2 этапа. На первом этапе строятся границы расчетной области, на втором – геометрия лопастей.

2.4.2.1 Этап 1

Удаляются части с названиями: *BACK\_BASE*, *CAB*, *DOWN*, *FRONT\_BASE*, *IN*, *OUT*, *PILON*, *RULI*, *TMP*, *UP*, *UP\_TMP*.

Части ITERFACE1, INTERFACE2 остаются без изменения.

Из части НИВ удаляются поверхности.

По линиям curve\_97, curve\_99 и curve\_98, curve\_100 соответственно создаются поверхности с именами  $srf_54$  и  $srf_55$ , которые включаются в часть HUB.

Из части RING удаляются все поверхности.

Выбирается инструмент создания поверхностей *Surface of Revolution*, в поле *Axis points* вводятся точки *point\_123, point\_124*, в поле *Curves* выбирается *curve\_108. Apply.* Созданная поверхность пвключается в часть *RING*. Результат представлен на рисунке 2.31.



Рисунок 2.31 - Границы расчетной области в проекте Vint

2.4.2.2 Этап 2

В разделе *Parts* выключается отображение частей: *HUB*, *RING*, *INTERFACE1*, *INTERFACE2*.

Выбирается инструмент построения точек *Screen Select*, нажимается кнопка *More* (см. рисунок 2.32).

Create Point
Part GEOM
Name
🔽 Inherit Part
S >> **
Screen Select
Location 🛛 🚷 🦲

Рисунок 2.32 - Построение точек из файла

В появившемся окне *List Editor* открывается файл DER2RN1.txt (*File*  $\rightarrow$  *Open*). *Close. Apply*.

Созданные точки объединяются в Part с названием PART.1.

Аналогично открывается файл DER2RV1.txt. Точки из файла DER2RV1.txt объединяются в Part с названием *PART.2*.

Выбирается Geometry  $\rightarrow$  Transform Geometry  $\rightarrow$  Translate and Rotate. В поле Select вводятся точки из части PART.1, выбирается метод 3 points $\rightarrow$ 3

*points*. Расположение точек устанавливается так, чтобы точка с координатами {0;0;0} занимала левый верхний угол экрана (см. рисунок 2.33).



Рисунок 2.33 - Области нахождения точек, по которым производится совмещение геометрических частей PART.1 и PART.2

В поле *3 points*→*3 points* вводятся 6 точек - это крайние точки в зонах 1,2,3, сначала из части *PART.1*, затем из *PART.2*.

Выключается отображение *PART.2* и удаляются крайние точки из *PART.1* (см. рисунок 2.34).



Рисунок 2.34 - Крайние точки геометрической части PART.2

Включается отображение PART.2, крайние точки в зонах 1,2,3 и точка с

координатами {0;0;0} переобозначаются соответственно *blade1\_point\_1*, *blade1\_point\_2*, *blade1\_point\_3*, *blade1\_point\_4* и проводятся линии, как показано на рисунке 2.35.



Рисунок 2.35 - Вспомогательные линии для описания геометрии лопасти винта

С использованием метода *From 2-4 Curves* по таблице 2.21 создаются поверхности (*Geometry*  $\rightarrow$  *Create/Modify Surface*  $\rightarrow$  *Simple Surface*).

Название поверхности	Название линии
blade1_srf_1	blade1_curve_1, blade1_curve_2,
	blade1_curve_4, blade1_curve_5
blade1_srf_2	blade1_curve_1, blade1_curve_3,
	blade1_curve_4, blade1_curve_6
blade1_srf_3	blade1_curve_2, blade1_curve_3
blade1_srf_4	blade1_curve_5, blade1_curve_6

Таблица 2.21 – Таблица создаваемых поверхностей

Все точки, линии и поверхности, построенные на этапе 2, объединяются в Part с названием *BLADE1*.

Выбирается инструмент Geometry  $\rightarrow$  Transform Geometry  $\rightarrow$  Scale Geometry, в поле Select выделяется вся геометрия в части BLADE1 (установка дополнительных параметров представлена на рисунке 2.36).

Transformation Tools
Select 🚺
Translate/Rotate/Mirror/Scale
🗖 Сору
IncrementParts 📃 🏠
Scale Geometry
× factor 0.01
Y factor 0.01
Z factor 0.01
Center of Transformation
Center Point Origin

Рисунок 2.36 - Параметры изменения геометрии

Создается набор точек:

blade1.point.4 (- 6689 ; 476 ; -204), blade1.point.1 (-6876 ; 456 ; -182), blade1.point.3 (-6717 ; 180 ; -638).

Выбирается инструмент Geometry  $\rightarrow$  Transform Geometry  $\rightarrow$  Translate and Rotate, в поле Select выделяются точки, линии и поверхности, объединенные в часть BLADE1, в поле 3 points  $\rightarrow$ 3 points вводятся точки blade1\_point\_4, blade1\_point\_1, blade1\_point\_3, blade1.point.4, blade1.point.1, blade1.point.3.

Включается отображение части НИВ.

Выбирается инструмент Geometry  $\rightarrow$  Create/Modify Curve $\rightarrow$  Project Curve on Surface; с помощью метода Normal to Surface в поле Curves выделяются линии blade1\_curve\_5, blade1\_curve\_6, в поле Surfaces выделяются поверхности srf\_54, srf\_55 (см. рисунок 2.37).

Create/Modify Curve		
Part GEOM		T
Name		
🔽 Inherit Part		
من الله المعالي المراجعة المسمع الم		
Ko & A Ch		
r# 🔘		
Method		
Normal to Surface		•
Curves	200	
Surfaces	K.	

Рисунок 2.37 - К построению проекции линии на поверхность

Между созданными проекциями линий *blade1\_curve\_5* и *blade1\_curve\_6* создаются поверхности, кторые относятся к части *BLADE1* (см. рисунок 2.38).



Рисунок 2.38 - Объединение поверхностей в геометрическую часть *BLADE1* 

Аналогичным образом создаются остальные пять лопастей.

Необходимый набор точек для создания лопастей 2-6 представлен в таблице 2.22.

Название части	Координаты точек
BLADE2	blade2.point.4 (-6689 ; 716 ; -236)
	blade2.point.1 (-6876 ; 687 ; -243)
	blade2.point.3 (-6717 ; 944 ; -710)
BLADE3	blade3.point.4 (-6689 ; 876 ; -41)
	blade3.point.1 (-6876 ; 867 ; -70)
	blade3.point.3 (-6717 ; 1400 ; -81)
BLADE4	blade4.point.4 (-6689 ; 776 ; 202)
	blade4.point.1 (-6876 ; 796 ; 180)
	blade4.point.3 (-6717 ; 1073 ; 636)
BLADE5	blade5.point.4 (-6689 ; 525 ; 234)
	blade5.point.1 (-6876 ; 554 ; 240)
	blade5.point.3 (-6717 ; 297 ; 708)
BLADE6	blade6.point.4 (-6689 ; 374 ; 34)
	blade6.point.1 (-6876 ; 383 ; 62)
	blade6.point.3 (-6717 ; -150 ; 73)

Таблица 2.22 – Таблица геометрических частей для лопастей винта

Результат построения показан на рисунке 2.39.



Рисунок 2.39 - Геометрическая модель винта в проекте Vint

## 2.4.3 Построение блочной структуры расчетной области для модели корпуса судна на воздушной подушке

Вследствие особенностей геометрии блочная структура расчетной области для модели корпуса судна на воздушной подушке делится на три части (см. рисунок 2.40).



Рисунок 2.40 - Распределения частей блочной структуры корпуса судна на воздушной подушке

### 2.4.3.1 Часть 1

Открывается файл геометрической модели корпуса *Korp.tin*. Выбирается инструмент *Blocking*  $\rightarrow$ *Create Block*  $\rightarrow$  *Initialize Blocks*, выбирается тип *3D Bounding Box. Apply* (см. рисунок 2.41).

Create Block
Part SOLID
Create Block
- Initialize Blocks
Type 3D Bounding Box
Entities 🚺
Project vertices
Orient with geometry
2D Blocking

Рисунок 2.41 - Создание блока

Выбирается инструмент Geometry  $\rightarrow$  Create Point  $\rightarrow$  Parameter along a Curve, устанавливается метод Parameters, значение параметра устанавливается равным 0.25, в поле Curve выделятся сначала линия curve\_130, в поле Name вводится название sup1. Apply. Затем в поле Curve выделяется линия curve\_131, в поле Name вводится название sup2.Apply. Аналогичные операции повторяются, изменяя параметр на 0,75 и названия точек на sup3 и sup4 соответственно (см. рисунок 2.42).

Create Point
Part GEOM
Name
Inherit Part
<b>1 1 1 1 1 1 1 1</b>
Points method
Parameters
Parameter(s)
Curve 🚺 🛞

Рисунок 2.42 - Создание точек на линиях

Открывается Geometry  $\rightarrow$  Create/ Modify Curve  $\rightarrow$  Segment Curve, устанавливается метод Segment by point, в поле Curve выделяется линия curve\_130, в поле Points выделяются точки sup1\_130, sup2\_130. Apply (см. рисунок 2.43).

Create/Modify Curve
Part GEOM
Name
🔲 Inherit Part
المن المن المن المن المن المن المن المن
10 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1
r# 🔘
-Segment Curve
Segment by point
Curve 🖉
Points 🚫 😧

Рисунок 2.43 - Сегментирование линий

Аналогичным образом разбивается линия *curve\_131*.

Выбирается инструмент *Blocking*  $\rightarrow$  *Associate*  $\rightarrow$  *Associate Vertex*, ассоциация вершин блока проводится на точки, в поле *Vertex* вводятся вершины блоков, в поле *Point* – необходимые точки.

Вершины блока ассоциируются согласно рисунку 2.44.



Рисунок 2.44 - Ассоциация вершин блока

Открывается *Blocking*  $\rightarrow$  *Split Block*  $\rightarrow$  *Ogrid Block*, в поле *Ogrid block* нажимается кнопка Select face и выбираются грани блока так, как это показано на рисунке 2.45.



Рисунок 2.45 - Выбор граней блока

Создается набор вспомогательных точек (координаты в миллиметрах): Sup5 (500 ; 1700 ; 1500), sup6 (500 ; 1700 ; -1500), sup7 (500 ; -1100 ; 1500), sup8 (500 ; -1100 ; -1500), sup9 (-6250 ; 1700 ; 1500), sup10 (-6250 ; 1700 ; -1500), sup11 (-6250 ; -1100 ; 1500), sup12 (-6250 ; -1100 ; -1500).

В результате Ogrid разбиения блока внутренние вершины ассоциируются с дополнительными точками, как показано на рисунке 2.46.



Рисунок 2.46 - Ассоциация вершин блока, образованных в результате Ogrid разбиения

Удаляется блок, показанный на рисунке 2.47.



Рисунок 2.47 - Удаление блока

Выбирается инструмент *Blocking*  $\rightarrow$  *Split Block*  $\rightarrow$  *Split Face*, в поле *Face* выделяется грань блока, в поле *Edge* – ребро (см. рисунок 2.48).



Рисунок 2.48 - Деление грани блока

Создаются дополнительные точки, с котрыми ассоциируются вершины (см. рисунок 2.49).

sup13 (-750 ; 1700 ; 1500), sup14 (-750 ; 1700 ; -1500)



Рисунок 2.49 - Ассоциирование вершин блока на точки sup13, sup14

Выбирается инструмент Blocking  $\rightarrow$  Create Block $\rightarrow$  Extrude Face(s), устанавливается метод Fixed distance, в поле Select Face(s) выделяется грань, показанная на рисунке 2.50, *a*), в поле Distance вводится 1000.

Открывается Blocking  $\rightarrow$  Merge Vertices  $\rightarrow$  Merge Vertices, в поле Merge Vertices by Number выбирается 2 Vertices, в поле 2 Vertices вводятся вершины блоков, следуя рисунку 2.50, b).


Рисунок 2.50 - а) используемые грани блока; b) стягивание вершин блоков

Используется инструмент *Blocking*  $\rightarrow$  *Split Block*  $\rightarrow$  *Split Face* для разбиения грани представленной на рисунке 2.51, *a*), результат показан на рисунке 2.51, *b*).



Рисунок 2.51 - а) используемая грань блока, b) результат деления грани

Выделяется грань, показанная на рисунке 2.52, *a*) и последовательно делится до результата, представленного на рисунке 2.52, *b*).



Рисунок 2.52 - а) используемая грань, b) результат деления грани

Используется инструмент *Blocking*  $\rightarrow$  *Create Block* $\rightarrow$  *Extrude Face*(*s*), выбирается метод *Interactive*, выделяются грани показанные на рисунке 2.53, *a*), результат представлен на рисунке 2.53, *b*).



Рисунок 2.53 - а) используемые грани, b) результат вытягивания блоков

Боковые грани, представленные на рисунке 2.54, *a*) поочередно делятся и одновременно стягиваются вершины (см. рисунок 2.54, *b*) – 2.54, *d*)).



Рисунок 2.54 - Деление боковых граней и стягивание вершин поэтапно а-d

Удаляются блоки, показанные на рисунке 2.55.



Рисунок 2.55 - Удаление блоков

Создаются вспомогательные точки:

sup15 (-6250 ; -467 ; 1537), sup16 (-6250 ; -200 ; 1040), sup17 (-5990 ; -467 ; 1537), sup18 (-5590 ; -200 ; 1040), sup19 (-4790 ; -467 ; 1537), sup20 (-4790 ; -200 ; 1040), sup21 (-6250 ; 1700 ; 1500), sup22 (-6250 ; 1700 ; 1040), sup23 (-1504 ; -1100 ; 1505), sup24 (-955 ; 1100 ; 1135), sup25 (-6250 ; -467 ; -1537), sup26 (-6250 ; -200 ; -1040), sup27 (-5990 ; -467 ; -1537), sup28 (-5590 ; -200 ; -1040), sup29 (-4790 ; -467 ; -1537), sup30 (-4790 ; -200 ; -1040), sup31 (-6250 ; 1700 ; -1500), sup32 (-6250 ; 1700 ; -1135)

Включается отображение части *FRONT\_BASE* и проводится ассоциация вершин блоков на дополнительные точки соответственно рисунок 2.56.



Рисунок 2.56 - Ассоциация вершин блока

Выделенные грани блока на рисунке 2.57, *a*) делятся до результата, представленного на рисунке 2.57, *b*).



Рисунок 2.57 - а) используемые грани, b) результат деления граней

Включается отображение части *BACK\_BASE* и проводится ассоциация вершин, следуя рисунку 2.58.



Рисунок 2.58 - Ассоциация вершин

Из указанной на рисунке 2.59, *a*) грани вытягивается блок (*Blocking*  $\rightarrow$  *Create Block*  $\rightarrow$  *Extrude Face*(*s*)) и его вершины стягиваются соответственно рисунку 2.59, *b*) (*Blocking*  $\rightarrow$  *Merge Vertices*).



Рисунок 2.59 - а) создание блока, b) стягивание вершин

Выделяются грани, представленные на рисунке 2.60, *a*) и делятся до результата 2.60, *b*).



Рисунок 2.60 - а) используемые грани, b) результат деления граней

Создаются вспомогательные точки:

sup35 (-6250 ; 560 ; 1040), sup36 (-6250 ; 900 ; 1040), sup37 (-5990 ; 900 ; 1040), sup38 (-5990 ; 560 ; 1040), sup39 (-4790 ; 900 ; 818), sup40 (-6250 ; 560 ; -1040), sup41 (-6250 ; 900 ; -1040), sup42 (-5990 ; 900 ; -1040), sup43 (-5990 ; 560 ; -1040), sup44 (-4790 ; 900 ; -818).

Проводится ассоциация вершин на дополнительные точки (см. рисунок 2.61).



Рисунок 2.61 - Ассоциация вершин блока

Из выделенных граней на рисунке 2.62, *а* вытягивается блок, вершины которого стягиваются с вершинами, представленными на рисунке 2.62, *b*.



Рисунок 2.62 - а) используемые грани, b) стягивание вершин

Выделяются грани представленные на рисунке 2.63, *a*), добавляется блок (*Blocking*  $\rightarrow$  *Create Block* $\rightarrow$  *Extrude Face*(*s*)), вершины которого стягиваются (*Blocking*  $\rightarrow$  *Merge Vertices* $\rightarrow$  *Merge Vertices*), следуя рисунку 2.63, *b*)



Рисунок 2.63 - а) используемые грани, b) стягивание вершин блока

Выбирается инструмент деления граней, выделяется грань, показанная на рисунке 2.64, a) и разбивается последовательно до результата, показанного на рисунке 2.64, b).



Рисунок 2.64 - а) используемая грань, b) результат деления грани

Создаются вспомогательные точки:

sup45 (-5990; 0; 420), sup46 (-4790; 0; 420), sup48 (-4790; 560; 420), sup49 (-5990; 0; -420), sup50 (-4790; 0; -420), sup51 (-4790; 560; -420), sup52 (-5990; 560; 420), sup53 (-5990; 560; -420).

Вытягиваются блоки из граней, показанных на рисунке 2.65, *a*). Вершины образованных блоков стягиваются (ассоциируются) с вершинами (точками), представленными на рисунке 2.65, *b*).



Рисунок 2.65 - а) используемые грани, b) стягивание, ассоциирование вершин блока

Далее, из граней, показанных на рисунке 2.66, *a*) создаются блоки (*Blocking*  $\rightarrow$  *Create Block*  $\rightarrow$  *Extrude Face*(*s*)), вершины которых стягиваются (см. рисунок 2.66, *b*)).



Рисунок 2.66 - а) используемые грани, b) стягивание вершин блоков

Выбирается инструмент *Blocking* → *Associate* → *Associate Edge to Curve* и проводится ассоциация блоков с границами расчетной области (см. рисунок 2.67).



Рисунок 2.67 - Ассоциация граней блоков с линиями

Выполняется ассоциация выделенных граней блоков с линиями (см. рисунок 2.68).



Рисунок 2.68 - Ассоциация граней блоков с кривыми

Выбирается инструмент Blocking  $\rightarrow$  Associate  $\rightarrow$  Associate Face to Surface, устанавливается метод Part, в поле Fase(s) выделяются грани блоков показанных на рисунках, номера которых указаны в таблице 2.23, в поле Surface part выбирается соответственная часть геометрической модели.

Номер рисун-	Название ча-	Номер рисун-	Название ча-
ка	сти	ка	сти
2.69	FRONT_BASE	2.73	UP
2.70	BACK_BASE	2.74	ТМР

Таблица 2.23 – Таблица ассоциаций поверхностей

2.71	CAB	2.75	IN
2.72	DOWN		



Рисунок 2.69 - Используемые грани блоков для ассоциации с частью FRONT\_BASE



Рисунок 2.70 - Используемые грани блоков для ассоциации с частью ВАСК\_ВАЅЕ



Рисунок 2.71 - Используемые грани блоков для ассоциации с частью САВ



Рисунок 2.72 - Используемые грани блоков для ассоциации с частью DOWN



Рисунок 2.73 - Используемые грани блоков для ассоциации с частью UP



Рисунок 2.74 - Используемые грани блоков для ассоциации с частью ТМР



Рисунок 2.75 - Используемые грани блоков для ассоциации с частью IN

Используется инструмент *Blocking*  $\rightarrow$  *Pre-Mesh Params*  $\rightarrow$  *Edge Params*, в поле *Edge* выделяется разбиваемое ребро блока, в поле *Nodes* устанавливается количество узлов, в поле *Mesh law* выбирается функция распределения узлов по грани.

Функция разбиения выбирается так, чтобы область, где численное решение должно быть максимально точным, имела наибольшее количество узлов. На рисунке 2.76, *a*), *b*) представлено разбиение ребра, при котором по мере удаления от корпуса судна к границе расчетной области расстояние между узлами увеличивалось.



Рисунок 2.76 - а) разбиваемое ребро блока, b) функция распределения узлов

На рисунках 2.77, 2.78 представлено число узлов, задаваемое на ребрах первой части блочной структуры расчетной области модели судна на воздушной подушке.



Рисунок 2.77 - Число разбиений ребер блоков первой части судна на воздушно подушке



Рисунок 2.78 - Количество узлов на ребрах блоков первой части судна на воздушно подушке

На рисунке 2.79 показана предварительная сеточная модель первой части блочной структуры расчетной области для модели судна на воздушной по-

## душке.



Рисунок 2.79 - Предварительная сетка первой части расчетной области для модели судна на воздушной подушке

Выбирается инструмент Blocking  $\rightarrow$  Pre-Mesh Quality Histograms, выбирается критерий Determinant 2x2x2, устанавливается диапазон значений координат X=[-1;1]. Apply. Диаграмма качества сетки представлена на рисунке 2.80.





Для более точных расчетов необходимо создавать более качественную сетку, значение детерминанта элементов которой стремится к единице. Сеточная модель считается не работоспособной, если существуют элементы с отрицательным значением детерминанта. Для увеличения качества сеточной модели следует подбирать более удачное расположение и разбиение блоков, так, чтобы грани конечного объема стремились к взаимной ортогональности.

Для создания сеточной модели выполняется Blocking > Pre-Mesh >

Convert to Unstruct Mesh (см. рисунок 2.81).

Model Geometr Geometr Mesh Gotking Gotkin	y I es es
	esh ✔ Wire Frame
BT Parts	Solid & Wire
BACK-	
	No projection
	Project vertices
	Project edges
	✓ Project faces
-	Recompute
	Show Size Info
	Convert to Unstruct Mesh
	Convert to MultiBlock Mesh
	Reference MultiBlock Mesh
	Scan planes
	Cut plane
	Output Blocks

Рисунок 2.81 - Создание сеточной модели

Далее создается файл сеточной модели, выбирается *Output* → *Select solver*, устанавливается программа, с помощью которой будет производиться расчет (см. рисунок 2.82).

Solver Setup		Ŷ
Output Solver	ANSYS CFX	•
Common Structural Solver	ANSYS	•
🔲 Set As Default		

Рисунок 2.82 - Установки экспортируемого файла

Открывается *Output* → *Write input*, вводится путь сохранения сеточной модели. *Done* (см. рисунок 2.83).

🚸 CFX5	x
Please edit the following CFX5 options.	
Boco file: korp1.fbc	
Output CFX5 file D:/download/job_Ansys/korpus/korp1.cfx5	$\geq$
Scaling: 🔿 Yes 💿 No	
x scaling factor: 0.001	
y scaling factor: 0.001	
z scaling factor: 0.001	
Coordinate system: 💿 Global 🔿 Local	
ASCII or BINARY file:	
Single or Double Precsion: 🔿 Single 💿 Double	
CFX-5 Version: C Pre-5.5 @ 5.5 or later	
Done Cancel	

Рисунок 2.83 - Установка пути сохранения сеточной модели

## 2.4.3.2 Часть 2

Открывается файл геометрической модели корпуса Korp.tin. С помощью Blocking  $\rightarrow$  Create Block $\rightarrow$  Initialize Blocks создается основной блок, вершины которого проецируются на точки, как показано на рисунке 2.84.



Рисунок 2.84 - Создание второй части блочной структуры сеточной модели расчетной области для корпуса судна на воздушной подушке

Создаются вспомогательные точки:

sup54 (-6980 ; 1100 ; 1505), sup55 (-6250 ; -1100 ; 1500), sup56 (-6250 ; 1700 ; 1467), sup57 (-6980 ; 1700 ; 1467), sup58 (-6980 ; 1700 ; 1467), sup59 (-6980 ; 1700 ; 1040), sup60 (-6250 ; 1700 ; 1040), sup61 (-6980 ; 1100 ; -1505), sup62 (-6250 ; -1100 ; -1500), sup63 (-6250 ; 1700 ; -1467), sup64 (-6980 ; 1700 ; -1467), sup65 (-6980 ; 1700 ; -1467), sup66 (-6980 ; 1700 ; -1040), sup67 (-6250 ; 1700 ; -1040), sup67 (-6250 ; -1040), sup70 (-6250 ; -1040)

340; 1040), sup71 (-6250; -340; -1040).

Используя инструмент *Ogrid Block*, основной блок делится и ассоциируется с дополнительными точками (см. рисунок 2.85, *a*)-*c*)).



Рисунок 2.85 - а) используемые грани Ogrid деления, b) результат деления блока,

с) ассоциация вершин блока

Удаляется внутренний блок (см. рисунок 2.86).



Рисунок 2.86 - Удаление блока

Выбирается инструмент деления граней (*Blocking*  $\rightarrow$ *Split Block*  $\rightarrow$  *Split Face*) выделяются грани показанные на рисунке 2.87, *a*, делятся последовательно до результата, представленного на рисунке 2.87, *b*); образованные вершины ассоциируются с точками из геометрической части *BACK\_BASE* (см. рисунок 2.87, *c*)).



Рисунок 2.87 - а) используемые грани, b) результат деления граней, c) ассоциация новых вершин

Используется инструмент *Blocking*  $\rightarrow$  *Create Block*  $\rightarrow$  *Extrude Face(s)*, из выделенной грани (см. рисунок 2.88, *a*)) вытягивается блок, вершины которого ассоциируются с дополнительными точками (см. рисунок 2.88, *b*)).



Рисунок 2.88 - а) используемая грань для создания блока, b) ассоциация вершин блока с точками

Создаются вспомогательные точки:

sup72 (-6250 ; -31 ; 656), sup73 (-6980 ; 31 ; 594), sup74 ( -6250 ; 1281 ; 656), sup75 (-6980 ; 1219 ; 594), sup76 (-6250 ; -31 ; -656), sup77 (-6980 ; 31 ; -594), sup78 ( -6250 ; 1281 ; -656), sup79 (-6980 ; 1219 ; -594).

Выбирается инструмент *Blocking*  $\rightarrow$  *Split Block*  $\rightarrow$  *Ogrid Block*, выделяются грани, показанные на рисунке 2.89, *a*), блок разбивается и созданные вершины ассоциируются с дополнительными точками (см. рисунок 2.89, *b*)).



Рисунок 2.89 - а) используемые грани, b) ассоциация вершин блока с точками

Удаляется блок, выделенный на рисунке 2.90.



Рисунок 2.90 - Удаление блока

Создаются вспомогательные точки:

sup80 (-6950 ; 1219 ; 594), sup81 (-6453 ; 1281 ; 656), sup82 (-6950 ; 31 ; 594), sup83 (-6453 ; -31 ; 656), sup84 (-6950 ; 1219 ; -594), sup85 (-6453 ; 1281 ; -656), sup86 (-6950 ; 31 ; -594), sup87 (-6453 ; -31 ; -656).

Выделенная грань блока на рисунке 2.91, *а*) делится, и образованные вершины ассоциируются с дополнительными точками (см. рисунок 2.91, *b*)).



Рисунок 2.91 - а) используемая грань, b) ассоциирование вершин

Создаются дополнительные точки:

sup88 (-6980 ; 460 ; 151), sup90 (-6950 ; 460 ; 151), sup91 (-6980 ; 776 ; 165), sup92 (-6950 ; 776 ; 165), sup93 (-6980 ; 460 ; -151), sup94 (-6950 ; 460 ; -151), sup95 (-6980 ; 776 ; -165), sup96 (-6950 ; 776 ; -165).

Из выделенных граней на рисунке 2.92, *a*) вытягиваются блоки, вершины которых ассоциируются с дополнительными точками и стягиваются между собой (см. рисунок 2.92, *b*)).



Рисунок 2.92 - а) используемые грани, b) создание блоков и ассоциация вершин с точками

Создаются вспомогательные точки: sup97 (-6444 ; 776 ; 165), sup98 (-6250 ; 776 ; 165), sup99 (-6444 ; 460 ; 151), sup100 (-6250 ; 460 ; 151), sup101 (-6444 ; 776 ; -165), sup102 (-6250 ; 776 ; -165), sup103 (-6444 ; 460 ; -151), sup104 (-6250 ; 460 ; -151).

Из выделенных граней на рисунке 2.93, *a*) вытягиваются блоки, вершины которых ассоциируются с дополнительными точками и стягиваются между собой (см. рисунок 2.93, *b*)).



Рисунок 2.93 - а) используемые грани, b) создание блоков и ассоциация вершин с точками

Создаются вспомогательные точки:

sup105 (-6620 ; 776 ; 165), sup106 (-6620 ; 844 ; 48), sup107 (-6620 ; 460 ; 151), sup108 (-6620 ; 406 ; 49), sup109 (-6620 ; 776 ; -165), sup110 (-6620 ; 844 ; -48), sup111 (-6620 ; 460 ; -151), sup112 (-6620 ; 406 ; -49).

С помощью инструмента *Blocking*  $\rightarrow$  *Split Block*  $\rightarrow$  *Split Face*, выделенную грань (см. рисунок 2.94, а)) делят на три части и из образованных частей вытягивают три блока (см. рисунок 2.94, b)).



Рисунок 2.94 - а) используемая грань, b) создание блоков и ассоциирование вершин

Создаются дополнительные точки:

sup113 (-6444 ; 1266 ; 640), sup114 (-6242 ; 1266 ; 640), sup115 (-6444 ; -15 ; 640), sup116 (-6242 ; -15 ; 640), sup117 (-6444 ; 1266 ; -640), sup118 (-6242 ; 1266 ; -640), sup119 (-6444 ; -15 ; -640), sup120 (-6242 ; -15 ; -640).

Выбирается инструмент *Blocking*  $\rightarrow$  *Split Block*  $\rightarrow$  *Split Block*, блок делится по указанному ребру на рисунке 2.95, *a*) и образованные вершины ассоциируются с дополнительными точками (см. рисунок 2.95, *b*)).



Рисунок 2.95 - а) деление блока по выделенному ребру, b) ассоциирование вершин блока с точками

Создается набор точек:

sup121 (-6610 ; 1434 ; 46), sup122 (-6610 ; 1198 ; 573), sup123 (-6610 ; 52 ; 573), sup124 (-6610 ; -184 ; 46), sup125 (-6610 ; 1434 ; -46), sup126 (-6610 ; 1198 ;

-573), sup127 (-6610 ; 52 ; -573), sup128 (-6610 ; -184 ; -46), sup129 (-6444 ; 1529 ; 48), sup130 (-6444 ; 1529 ; -48), sup131 (-6444 ; -279 ; 48), sup132 (-6444 ; -279 ; -48).

Выделенные грани на рисунке 2.96, *a*) делятся последовательно до результата, показанного на рисунке 2.96, *b*).



Рисунок 2.96 - а) используемые грани, b) результат деления граней

Из выделенных граней создаются блоки (*Blocking*  $\rightarrow$  *Create Block*  $\rightarrow$  *Extrude Face*(*s*)) (см. рисунок 2.97, *a*)) и образованные вершины ассоциируются (стягиваются) с точками до результата, приведенного на рисунке 2.97, *b*).



Рисунок 2.97 - а) используемые грани, b) результат ассоциирование и стягивания вершин созданных блоков

Выделенные ребра на рисунке 2.98 ассоциируются с окружностями.



Рисунок 2.98 - Ассоциация ребер

Строятся дополнительные точки:

sup133 (-6950 ; -200 ; 1040), sup134 (-6250 ; -200 ; 1040), sup135 (-6950 ; -200 ; -1040), sup136 (-6250 ; -200 ; -1040).

Из выделенных граней (см. рисунок 2.99, *a*)) вытягиваются блоки и ассоциируются с точками, представленными на рисунке 2.99, *b*)).



Рисунок 2.99 - а) используемые грани, b) ассоциация вершин

Выбирается инструмент Blocking  $\rightarrow$  Associate  $\rightarrow$  Associate Face to Surface, устанавливается метод Part, в поле Fase(s) выделяются грани блоков, показанных на рисунках в таблице 2.24, в поле Surface part выбирается соответственная часть геометрической модели.

Номер рисунка	Название геометрической части
2.100	RING
2.101	HUB
2.102	INTERFACE1
2.103	INTERFACE2
2.104	TMP
2.105	UP_TMP
2.106	DOWN
2.107	BACK_BASE
2.108	PILON

Таблица 2.24 – Таблица ассоциации поверхностей



Рисунок 2.100 - Используемые грани блоков для ассоциации с частью RING



Рисунок 2.101 - Используемые грани блоков для ассоциации с частью HUB



Рисунок 2.102 - Используемые грани блоков для ассоциации с частью INTER-FACE1



Рисунок 2.103 - Используемые грани блоков для ассоциации с частью INTER-FACE2



Рисунок 2.104 - Используемые грани блоков для ассоциации с частью ТМР



Рисунок 2.105 - Используемые грани блоков для ассоциации с частью UP\_TMP



Рисунок 2.106 - Используемые грани блоков для ассоциации с частью DOWN



Рисунок 2.107 - Используемые грани блоков для ассоциации с частью ВАСК\_ВАЅЕ



Рисунок 2.108 - Используемые грани блоков для ассоциации с частью PILON

Проводится разбиение ребер построенной блочной структуры, аналогично первой части производится сгущение сеточной модели к корпусу судна (см. рисунок 2.109).



Рисунок 2.109 - Функция распределения узлов для сгущения сеточной модели

Остальные ребра блочной структуры разбиваются равномерно с количеством узлов, представленным на рисунках 2.110 - 2.112.



Рисунок 2.110 - Количество узлов на ребрах блоков второй части судна на воздушно подушке



Рисунок 2.111 - Количество узлов на ребрах блоков второй части судна на воз-



Рисунок 2.112 - Количество узлов на ребрах блоков второй части судна на воз-

## душно подушке

Проверяется качество сетки на наличие отрицательных элементов. Вид предварительной сеточной модели второй части блочной структуры корпуса судна на воздушной подушке представлен на рисунке 2.113.



Рисунок 2.113 - Предварительная сетка второй части блочной структуры модели судна на воздушной подушке.

Для второй части блочной структуры модели судна создается файл сеточной модели с названием korp2.cfx5.

2.4.3.3 Часть 3

Открывается файл геометрической модели корпуса *Korp.tin*. С помощью *Blocking*  $\rightarrow$  *Create Block*  $\rightarrow$  *Initialize Blocks* создается основной блок, вершины которого проецируются на точки, как это показано на рисунке 2.114.



Рисунок 2.114 - Создание основного блока для третьей части блочной структуры судна

Создаются вспомогательные точки:

sup137 (-9500 ; -1100 ; 2000), sup138 (-9510 ; 1700 ; 1500), sup139 (-6980 ; 1700 ; 1500), sup140 (-6980 ; -1100 ; 1505), sup141 (-9500 ; -1100 ; -2000), sup142 (-9510 ; 1700 ; -1500), sup143 (-6980 ; 1700 ; -1500), sup144 (-6980 ; -1100 ; -1505).

С помощью инструмента *Blocking*  $\rightarrow$  *Split Block* основной блок делится на две части (см. рисунок 2.115, *a*)). Выбирается инструмент *Ogrid Block*, выделяются грани, показанные на рисунке 2.115, *a*) и образованные вершины ассоциируются с дополнительными точками (см. рисунок 2.115, *b*)).



Рисунок 2.115 - а) используемые грани, b) результат ассоциации вершин

Удаляется блок, показанный на рисунке 2.116.



Рисунок 2.116 - Удаление блока

Создаются дополнительные точки:

sup145 (-9510 ; 1404 ; 14), sup146 (-9510 ; 1240 ; 498), sup147 (-9510 ; 1240 ; 528), sup148 (-9510 ; 30 ; 528), sup149 (-9510 ; 30 ; 498), sup150 (-9510 ; -134 ; 14), sup151 (-9510 ; 1404 ; -14), sup152 (-9510 ; 1240 ; -498), sup153 (-9510 ; 1240 ; -528), sup154 (-9510 ; 30 ; -528), sup155 (-9510 ; 30 ; -498), sup156 (-9510 ; -134 ; -14), sup157 (-9510 ; 1300 ; 1500), sup158 (-9500 ; -293 ; 1462), sup159 (-9510 ; 1300 ; -1500), sup160 (-9500 ; -293 ; -1462).

Выделенная на рисунке 2.117, *a*) грань последовательно разделяется до результата рисунок 2.117, *b*) и образованные вершины ассоциируются с дополнительными точками (см. рисунок 2.117, *c*)).



Рисунок 2.117 - а) используемая грань, b) результат деления грани, c) ассоциация образованных вершин

Выбирается инструмент *Blocking*  $\rightarrow$ *Split Block*  $\rightarrow$  *Split Face*, выделяются грани показанные на рисунке 2.118, *a*, делятся до результата, представленного на рисунке 2.118, *b*.



Рисунок 2.118 - а) используемые грани, b) результат деления граней

Создаются дополнительные точки:

sup161 (-7444 ; 1404 ; 210), sup162 (-7445 ; 1240 ; 708), sup163 (-7444 ; 1240 ; 710), sup164 (-7444 ; -134 ; 210), sup165 (-7445 ; 30 ; 708), sup166 (-7444 ; 30 ; 710), sup167 (-6980 ; -293 ; 1467), sup168 (-6980 ; 1300 ; 1500), sup169 (-7444 ; 1404 ; -210), sup170 (-7445 ; 1240 ; -708), sup171 (-7444 ; 1240 ; -710), sup172 (-7444 ; -134 ; -210), sup173 (-7445 ; 30 ; -708), sup174 (-7444 ; 30 ; -710), sup175 (-6980 ; -293 ; -1467), sup176 (-6980 ; 1300 ; -1500), sup177 (-7444 ; -1100 ; -290), sup178 (-7444 ; -1100 ; 708).

Из граней, показанных на рисунке 2.119, *a*) вытягиваются блоки; образованные вершины ассоциируются с дополнительными точками и стягиваются до результата, представленного на рисунке 2.119, *b*).



Рисунок 2.119 - а) используемые грани, b) ассоциация вершин

Создаются дополнительные точки: sup179 (-7259 ; -293 ; 1467), sup180 (-7250 ; -340 ; 1040), sup181 (-7250 ; -200 ; 1040), sup182 (-7180 ; -10 ; 544), sup183 (-7199 ; -10 ; 517), sup184(-7180 ; -175 ; 44), sup185 (-7199 ; -174 ; 17), sup186 (-7180 ; -10 ; -456), sup187 (-7199 ; -10 ; -482), sup188 (-7180 ; 1260 ; 544), sup189 (-7199 ; 1260 ; 517), sup190 (-7180 ; 1425 ; 44), sup191 (-7199 ; 1425 ; 17), sup192 (-7180 ; 1260 ; -456), sup193 (-7199 ; 1260 ; -483), sup194 (-7250 ; -340 ; -1040), sup195 (-7250 ; -200 ; -1040), sup196 (-7250 ; -293 ; -1467), sup197 (-7250 ; -959 ; -1505), sup198 (-7250 ; -1100 ; -1505), sup199 (-7250 ; -1100 ; -300), sup200 (-7250 ; -1100 ; 700), sup201 (-7250 ; -1100 ; 1505), sup202 (-7250 ; -959 ; 1505).

Выделенные грани на рисунке 2.120, *a*) делятся до результата, представленного на рисунке 2.120, *b*).



Рисунок 2.120 - а) используемые грани, b) результат деления граней

Создаются дополнительные точки:

sup203 (-6980 ; -959 ; 1505), sup204 (-6980 ; -293 ; 1467), sup205 (-6980 ; -340 ; 1040), sup206 (-6980 ; -200 ; 1040), sup207 (-6980 ; -1100 ; 700), sup208 (-6980 ; -1100 ; -300), sup209 (-6980 ; -175 ; -70), sup210 (-6980 ; -10 ; 431), sup211 (-6980 ; -10 ; 418), sup212 (-6980 ; -175 ; -82), sup213 (-6980 ; 10 ; -582), sup214 (-6980 ; -10 ; -569), sup215 (-6980 ; -340 ; -1040), sup216 (-6980 ; -200 ; -1040), sup217 (-6980 ; -293 ; -1467), sup218 (-6980 ; -959 ; -1505), sup219 (-6980 ; 1260 ; 418), sup220 (-6980 ; 1260 ; 431), sup221 (-6980 ; 1425 ; -70), sup222 (-6980 ; 1425 ; -82), sup223 (-6980 ; 1260 ; 569), sup224 (-6980 ; 1260 ; -582).

С помощью инструмента *Blocking*  $\rightarrow$  *Split Block*  $\rightarrow$  *Split Face* выделенные грани на рисунке 2.121, *a*) делятся до результата, представленного на рисунке 2.121, *b*).


Рисунок 2.121 - а) используемые грани, b) результат деления граней

Из выделенных граней на рисунке 2.122, *a*) вытягиваются блоки, и образованные вершины ассоциируются до результата, представленного на рисунке 2.122, *b*).



Рисунок 2.122 - а) используемые грани, b) ассоциация вершин

Удаляется пять блоков, представленных на рисунке 2.123.



Рисунок 2.123 - Удаление блоков

Выбирается инструмент Blocking  $\rightarrow$  Associate  $\rightarrow$  Associate Face to Surface, устанавливается метод Part, в поле Fase(s) выделяются грани блоков показанных на номерах рисунков таблицы 2.25, в поле Surface part выбирается соответственная часть геометрической модели.

	1
Номер рисунка	Название геометрической части
2.124	UP
2.125	OUT
2.126	TMP
2.127	BACK_BASE
2.128	RULI
2.129	DOWN

Таблица 2.25 – Таблица ассоциации поверхностей.



Рисунок 2.124 - Используемые грани блоков для ассоциации с частью UP



Рисунок 2.125 - Используемые грани блоков для ассоциации с частью ОUT



Рисунок 2.126 - Используемые грани блоков для ассоциации с частью ТМР



Рисунок 2.127 - Используемые грани блоков для ассоциации с частью ВАСК\_ВАЅЕ



Рисунок 2.128 - Используемые грани блоков для ассоциации с частью RULI



Рисунок 2.129 - Используемые грани блоков для ассоциации с частью DOWN

Разбиваются ребра блоков. Сгущение сеточной модели проводится к корпусу судна (см. рисунок 2.130).



Рисунок 2.130 - Функция распределения узлов по выделенным ребрам

Остальные ребра блочной структуры разбиваются равномерно, количество узлов показано на рисунках 2.131 - 2.133.



Рисунок 2.131 - Количество узлов на ребрах блоков третьей части судна на воздушно подушке



Рисунок 2.132 - Количество узлов на ребрах блоков третьей части судна на воздушной подушке



## Рисунок 2.133 - Количество узлов на ребрах блоков третьей части судна на воздушной подушке

Проверяется качество сеточной модели на наличие отрицательных элементов. Вид предварительной сетки представлен на рисунке 2.134.



Рисунок 2.134 - Предварительная сеточная модель третьей части блочной структуры расчетной области судна на воздушной подушке

Создается файл сеточной модели для третьей части модели судна на воздушной подушке с названием korp3.cfx5.

### 2.4.4 Построение блочной структуры расчетной области для модели винта

Винт состоит из шести одинаковых лопастей (см. рисунок 2.135), поэтому в данном подразделе подробно рассматривается построение лишь одной шестой части от всей блочной структуры.



Рисунок 2.135 - Геометрическая модель винта

Открывается файл геометрической модели винта – Vint.tin.

Создается набор вспомогательных точек:

sup225 (-6950 ; 411 ; -68), sup226 (-6950 ; 458 ; -149), sup227 (-6950 ; 473 ; -164), sup228 (-6950 ; 489 ; -178), sup229 (-6950 ; 577 ; -219), sup230 (-6876 ; 458 ; -149), sup231 (-6876 ; 473 ; -164), sup232 (-6876 ; 489 ; -177), sup233 (-6692 ; 490 ; -179), sup234 (-6689 ; 493 ; -181), sup235 (-6693 ; 495 ; -182), sup236 (-6670 ; 487 ; -176), sup237 (-6673 ; 512 ; -194), sup238 (-6620 ; 411 ; -68), sup239 (-6620 ; 487 ; -176), sup240 (-6620 ; 512 ; -194), sup241 (-6620 ; 577 ; -219), sup242 (-6950 ; 450 ; -791), sup243 (-6610 ; 450 ; -791), sup244 (-6610 ; 295 ; -740), sup245 (-6610 ; 154 ; -659), sup246 (-6693 ; 154 ; -659), sup247 (-6717 ; 172 ; -633), sup248 (-6717 ; 162 ; -664), sup249 (-6721 ; 159 ; -663), sup250 (-6714 ; 198 ; -688), sup251 (-6844 ; 66 ; -587), sup252 (-6829 ; 40 ; -561), sup253 (-6814 ; 15 ; -533), sup254 (-6950 ; -9 ; -504), sup255 (-6950 ; -34 ; -469), sup256 (-6950 ; -59 ; -434), sup257 (-6950 ; -147 ; -244), sup258 (-6610 ; -147 ; -244).

Создается базовый трехмерный блок (*Blocking*  $\rightarrow$  *Create Block*  $\rightarrow$  *Initialize Blocks*), вершины которого ассоциируется с дополнительными точками (см. рисунок 2.136).



Рисунок 2.136 - Создание базового блока

Выбирается инструмент *Blocking*  $\rightarrow$  *Split Block*  $\rightarrow$  *Split block*, блок делится дважды по выбранному ребру на рисунке 2.137.



Рисунок 2.137 - Деление блока по выделенному ребру

Удаляется блок 1, показанный на рисунке 2.138.



Рисунок 2.138 - Удаление блока

Оставшиеся два блока делятся инструментом *Split Block* по выделенным ребрам на рисунке 2.139, a) до результата, представленного на рисунке 2.139, b).



Рисунок 2.139 - а) используемые ребра, b) результат деления блоков

Образованные вершины ассоциируются с дополнительными точками (см. рисунок 2.140).



Рисунок 2.140 - Ассоциация вершин блоков

Из выделенных граней на рисунке 2.141, *a*) вытягиваются блоки, и образованные вершины ассоциируются, стягиваются соответственно рисунок 2.141, *b*).



Рисунок 2.141 - а) используемые грани, b) результат стягивания вершин образованных блоков

С помощью инструмента *Blocking*  $\rightarrow$  *Split Block*  $\rightarrow$  *Split Face* делится грань, показанная на рисунке 2.142, и образованные вершины ассоциируются сдополнительными точками.



Рисунок 2.142 - Грань, используемая для деления

Из граней, показанных на рисунке 2.143, вытягиваются блоки (*Blocking*  $\rightarrow$  *Create Block*  $\rightarrow$  *Extrude Face*(*s*)).



Рисунок 2.143- Грани, используемые для вытяжки блоков

Создаются дополнительные точки:

sup259 (-6814 ; 39 ; -513), sup260 (-6829 ; 64 ; -538), sup261 (-6844 ; 89 ; -563), sup262 (-6693 ; 172 ; -633), sup261 (-6721 ; 177 ; -637), sup262 (-6717 ; 180 ; -638), sup263 (-6718 ; 176 ; -636), sup264 (-6714 ; 210 ; -670).

С помощью инструмента *Split Block* осуществляется деление блоков по выделенному ребру на с использованием дополнительных точек (см. рисунок 2.144).



Рисунок 2.144 – Деление блоков по выделенному ребру

Выбирается инструмент *Blocking*  $\rightarrow$  *Associate*  $\rightarrow$  *Associate Edge to Curve*, ассоциируются линии описывающие лопасть винта (см. рисунок 2.145).



Рисунок 2.145 - Ассоциация ребер

Грани блоков ассоциируются, следуя таблице 2.26.

## Таблица 2.26 – Таблица ассоциации поверхностей.

Номер рисунка	Название геометрической части
2.146	HUB
2.147	INTERFACE1
2.148	INTERFACE2
2.149	RING
2.150	BLADE1



Рисунок 2.146 - Грани блоков, используемые для ассоциации с частью HUB



Рисунок 2.147 - Грани блоков, используемые для ассоциации с частью INTER-FACE1



Рисунок 2.148 - Грани блоков, используемые для ассоциации с частью INTER-FACE2.



Рисунок 2.149 - Грани блоков, используемые для ассоциации с частью RING



Рисунок 2.150 - Грани блоков, используемые для ассоциации с частью BLADE1

Аналогичным образом блочная структура дорабатывается для остальных лопастей; результат представлен на рисунке 2.151.



Рисунок 2.151 - Блочная структура винта

Узлы в сеточной модели располагаются со сгущением к кромкам лопастей (см. рисунок 2.152).



Рисунок 2.152 - Функция распределения узлов на выделенных ребрах

Остальные ребра блочной структуры разбиваются равномерно, количество узлов наребрах показано на рисунке 2.153.



Рисунок 2.153 - Количество узлов на ребрах ребер блочной структуры винта

Проверяется качество сеточной модели; окончательный результат записывается в файл Vint.cfx5.

Общее число узлов всех частей расчетной области составляет  $4 \cdot 10^6$ .

### 2.5 Постановка задачи в программном модуле Ansys CFX – Pre

Расчет задачи обтекания модели судна на воздушной подушке производится двумя этапами. На первом этапе задача решается в стационарной постановке, на втором этапе задача решается в нестационарной постановке. Решение задачи в стационарной постановке дает первое приближение, которое, затем, уточняется в нестационарной задаче. Такое разделение решения задачи позволяет сократить процессорное время ее решения.

#### 2.5.1 Этап 1

Запускается программный модуль Ansys CFX – Pre. Создается новый проект (*File* -> *New case*). Выбирается вычислительный эксперимент типа

General.

Импортируется сеточная модель (см. рисунок 2.154).



Рисунок 2.154 - Импорт сеточной модели

В поле Mesh unit выбирается mm.

Создается рабочая область (Insert  $\rightarrow$  Domain). В поле Locations выбирается блочная структура, соответствующая файлу korpl.cfx5, в поле Domain Type выбирается Fluid Domain (жидкость). В поле Fluid and Particle Definitions выбирается материал сплошной среды – воздух с именем Air at 25, в поле Option из библиотеки материалов выбирается воздух при температуре 25° С, в поле Morphology выбирается сплошная среда – Continuous Fluid. Движение воздуха моделируется относительно стандартных условий: давления 1 атмосфера (Reference Pressure = 1 atm), температура воздуха 25° С, в поле Buoyancy Model выбирается not buoyant (массовые силы отсутствуют), в поле Domain Motion выбирается Stationary, деформация сетки не учитывается (Mesh Deformation = None).

В настройках *Fluid Models* теплообмен не учитывается (*Heat Transfer* = *None*). Модель турбулентности выбирается *Shear Stress Transport* (составная

модель турбулентности SST), в поле *Combustion* устанавливается *None*, в поле *Thermal Radiation – None*.

Создаются граничные условия (*Insert*  $\rightarrow$  *Bondary*  $\rightarrow$  *Domain* 1). В *Domain* 1 реализуется три вида граничных условий:

на границе *IN* устанавливается тип граничных условий – *Inlet*. Скорость набегающего потока определяется переменной с названием vx. Направление устанавливается по нормали к поверхности (*Normal Speed*);

– на границе UP реализуется свободный вход/ выход воздуха (Opening). В поле Mass and Moment устанавливается Opening Pres. and Dirn, Relative Pressure = 0 Pa;

 – нраницы FRONT\_BASE, BACK\_BASE, CAB являются неподвижными стенками (Wall) с условием непротекания и прилипания частиц, DOWN – скользящая стенка, имеющая скорость vx по координате X в противоположном оси направлении.

Создаются *Domain 2*, *Domain 3* которые соответствуют блочным структурам из фалов Korp2.cfx5, Korp3.cfx5. Настройки созданных сред совпадают с *Domain 1* за исключением граничных условий.

Для *Domain 2* используется два вида граничных условий:

– *UP\_TMP* – граница со свободным входом/ выходом воздуха (Opening) при давлении 0 *Pa*;

– *PILON, RING, HUB, BACK\_BASE* – неподвижные стенки с условием прилипания и непротекания частиц воздуха. Область *DOWN* – скользящая стенка, движущаяся со скоростью vx в противоположном направлении оси *OX*.

Для рабочей области *Domain 3* используется следующие граничные условия:

– через область *OUT* реализуется выход воздуха (*Outlet*) при среднем по сечению давлении равном *0 Ра*;

в области UP реализуется свободный вход/ выход воздуха (Opening),
поле Mass and Moment устанавливается Opening Pres. and Dirn, Relative Pressure
= 0 Pa;

– *BACK\_BASE, RULI* – неподвижные стенки с условием прилипания и непротекания частиц, *DOWN* – скользящая стенка, обладающая скоростью равной *vx*. по координате *X* в противоположном оси направлении.

Выбираются установки численного решения (см. рисунок 2.155).



Рисунок 2.155 – Установки численного решения

Устанавливается максимальное количество итераций 1000000, в поле *Timescale control* выбирется *Auto Timescale*, в поле *Length Scale Option* устанавливается *Concervative, Timescale Factor* = 1, в поле *Residual Target* вводится 0.0000001.

Выбираются установки экспортных файлов (см. рисунок 2.156).



Рисунок 2.156 – Установка экспорта данных

В разделе *Backup* создаются два вида сохранения результатов: *Iteration List* и *Iteration Interval*.

Создается переменная с названием vx (см. рисунок 2.157), которой присваивается значение 2 м/с.

Expressions, Functions and Variables       Mathematical Stress       Mathematical Stress			
🔣 Expressi 🔀 User Fur	Insert >	K Expression	
🔜 📠 User Ro			
Simulation Configuration	Reference CCL		
Case Options	Edit in Command Editor		
	🔁 Paste		

Рисунок 2.157 - К созданию переменной

Создается еще одна рабочая область – *Domain 4* – которая соответствует сеточной модели Vint.cfx5. Установки среды для этой рабочей области совпа-

дают с установками для *Domain 1* за исключением поля *Domain Motion*. В поле *Option* устанавливается *Rotating*, угловая скорость вращения рабочей области 1100 оборотов в минуту вокруг оси *X* (см. рисунок 2.158).

-Domain Motion	
Option	Rotating
Angular Velocity	1100 [rev min^-1]
Alternate Rotation N	1odel
_ □ □ Rotational Offset	
Axis Definition	
Option	Coordinate Axis
Rotation Axis	Global X
Mesh Deformation	
Option	None

Рисунок 2.158 - Установка вращения рабочей области

Создаются границы связи рабочих областей – доменов (*Insert* → *Domain Interface*). В результате совпадения имен геометрических частей сеточных моделей Ansys CFX автоматически переименовывает совпадения и разбивает их при необходимости (см. таблицу 2.27).

Таблица 2.27 – Таблица соответствия геометрических частей.

Название геометриче-	Название среды	Новое названиегеометрической
ской части		части
	Domain 1	TMP 2
TMP	Domain 2	Primitive 2D B, Primitive 2D C
	Domain 3	TMP 3
INTERFACE1	Domain 2	INTERFACE1 2
INTERFACE2	Domain 2	INTERFACE2 2

Настройки границ связи между рабочами областями представлены на номерах рисунков в таблице 2.28.

## Таблица 2.28 – Таблица данных границ связи между рабочими областями.

Название области	Номер рисун-
	ка
Domain Interface 1	2.159, <i>a</i>
Domain Interface 2	2.159, <i>б</i>
Domain Interface 3	2.160, <i>a</i>
Domain Interface 4	2.160, <i>б</i>

Basic Settings			Basic Settings	
Interface Type	Fluid Fluid		Interface Type	Fluid Fluid
Interface Side 1			Interface Side 1	
Domain (Filter)	Domain 2		Domain (Filter)	Domain 2
Region List	INTERFACE2 2		Region List	INTERFACE1 2
-Interface Side 2			-Interface Side 2-	
Domain (Filter)	Domain 4		Domain (Filter)	Domain 4
Region List	INTERFACE2		Region List	INTERFACE 1
-Interface Models-			-Interface Models	
Option	General Connection	. 1	Option	General Connection
Frame Change/Mixi	ing Model		-Frame Change/Mixir	ng Model
Option	Stage		Option	Stage
Pressure Prof	ile Decay		Pressure Profil	le Decay
Downstream	Velocity Constraint		Downstream V	elocity Constraint
-Pitch Change			Pitch Change	
Option	Automatic		Option	Automatic
-Mesh Connection Me	ethod		Mesh Connection Me	thod
Mesh Connection -			Mesh Connection	
Option	GGI		Option	GGI
	Control		_ Intersection C	ontrol
	a)			b)

Рисунок 2.159 - а) установки для Domain interface 1, б) установки для Domain interface 2

asic Settings Additi	onal Interface Models		Basic Settings A	dditional Interface Models
erface Type	Fluid Fluid	I	nterface Type	Fluid Fluid
nterface Side 1		Г	-Interface Side 1—	
omain (Filter)	Domain 3		Domain (Filter)	Domain 2
egion List	TMP3		Region List	Primitive 2D B
nterface Side 2			Interface Side 2	
omain (Filter)	Domain 2		Domain (Filter)	Domain 1
egion List	Primitive 2D C		Region List	TMP 2
nterface Models			Interface Models	
otion	General Connection		Option	General Connection
Frame Change/Mixing	Model		-Frame Change/Mi	xing Model
Option	None		Option	None
Pitch Change			-Pitch Change	
Option	None		Option	None
1esh Connection Meth	bd		-Mesh Connection M	lethod-
Mesh Connection			-Mesh Connection	
Option	GGI		Option	GGI
- 🗖 Intersection Con	trol		_ Intersection	Control
	a)			b)

Рисунок 2.160 - а) установки для Domain interface 3, б) установки для Domain interface 4

Создается файл для программного модуля Ansys CFX-Solver (*Tools*  $\rightarrow$  *Solve*  $\rightarrow$  *Start Solver*  $\rightarrow$  *Define Run*) с названием Stationary.def.

### 2.5.2 Этап 2

Запускается программный модуль Ansys CFX – Pre. Открывается файл Stationary.def. Изменяются настройки в типе расчета *Analysis type* (см. рисунок 2.161).

🖻 😨 Simulation		
🖃 😥 Flow Analysis 1		
🗝 🔘 Analysis Type		
🕀 🔽 🖅 Domain 1	Edit	
🕀 🗹 🗹 Domain 2	Edit in Command Editor	
🕀 🗹 🖅 Domain 3		
🕀 🗹 🖅 Domain 4	🗈 Сору	
🕀 🗊 Interfaces		
🖻 🗑 Solver	X Delete	

Рисунок 2.161- Настройка типа расчета (Analysis type)

Необходимые настройки Analysis type представлены на рисунке 2.162.

Basic Settings	
External Solver Coupling	J
Option	None
Analysis Type	
Option	Transient
Time Duration	
Option	Total Time
Total Time	10000 [s]
Time Steps	
Option	Timesteps
Timesteps	0.0005 [s]
-Initial Time	
Option	Automatic with Value
Time	0 [s]

Рисунок 2.162 - Установки типа расчета (Analysis type)

Изменяются настройки численного решения – Solver Control (см. рисунок 2.163).

Basic Settings	Equation Class Settings Advanced Options
Advection Scheme	e
Option	High Resolution
-Transient Scheme	
Option	Second Order Backward Euler
Timestep Initiali	zation
Option	Automatic
Lower Cou	rant Number
Upper Cou	rant Number
Turbulence Numer	rics
Option	First Order
Convergence Cor	ntrol-
Min. Coeff. Loops	1
Max. Coeff. Loops	2
-Fluid Timescale C	Control
Timescale Contro	Coefficient Loops
Convergence Crit	eria
Residual Type	RMS
Residual Target	0.000001
	n Target
Elapsed Wall	Clock Time Control
_ ☐ Interrupt Con	trol

Рисунок 2.163 - Установки численного решения (Solver Control)

В установках Domain interface 3 и Domain interface 4 в поле Interface Models выбирается Transient Rotor Stator.

Создается файл для программного модуля Ansys CFX-Solver (*Tools*  $\rightarrow$  *Solve*  $\rightarrow$  *Start Solver*  $\rightarrow$  *Define Run*) с именем Not\_Stationary.def.

# 2.6 Представление результатов численного решения в Ansys CFX-Post

Запускается программный модуль Ansys CFX – Post. Открывается файл Not\_Stationary.res.

Выбирается инструмент *Insert* → *Contour*, в поле *Locations* указывается область кабины судна, в поле *Variable* указывается давление, в поле *Range* устнавливается *Local*. Результат этих действий является поля давлений на кабине

судна (см. рисунок 2.164).



Рисунок 2.164 - Распределение поля давлений на кабине судна

Аналогично, в поле *Locations* устанавливается поверхность лопасти винта и отображается поле давлений на лопасти винта (см. рисунок 2.165).



Рисунок 2.165 - Распределение поля давлений на лопасти винта

Для построения векторного поля скоростей вблизи лопасти винта выбирается инструмент *Insert*  $\rightarrow$  *Vector*, в поле *Domains* выбирается *Domain 4*, в поле *Locations* указывается плоскость, перпендикулярная лопасти винта, в поле *Variable* выбирается скорость. Результат построения представлен на рисунке

2.166.



Рисунок 2.166 - Векторное поле скоростей вблизи лопасти винта

Для построения линий тока, проходящих, например, через диск винта, выбирается инструмент *Insert*  $\rightarrow$  *Streamline*, в поле *Type* устанавливается *3D Streamline*, в поле *Domains* выбирается *All Domains*, в поле *Start From* выбирается ся область, разграничивающая *Domain 1* и *Domain 4*, устанавливается число линий в количестве (15 линий), в поле *Variable* выбирается *Velocity in Stn Frame*, в поле *Direction* устанавливается *Forward and Backward*. Результат построения показан на рисунке 2.167.



Рисунок 2.167 - Линии тока, проходящие через диск винта

# КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

- 1. Какие задачи решает вычислительный эксперимент при отработке аэрогидродинамических компоновок скоростных судов?
- 2. Каковы основные этапы препроцессорной подготовки задачи?
- 3. В чем заключается преимущества блочно-структурированной сеточной модели в сравнении с неструктурированной моделью?
- 4. В чем смысл ассоциации блока с фрагментом геометрической модели? Как проводится ассоциация вершин, ребер, граней блока?
- 5. Перечислить основные используемые функциональные зависимости распределения узлов по ребру. Как принципиально следует располагать узлы по нормали к неподвижной границе потока?
- 6. В чем состоят основные этапы препроцессорной подготовки препроцессорной подготовки в задаче вычислительной аэрогидродинамики?
- 7. Какие основные инструменты существуют в пакете ANSYS Meshing для модернизации геометрической модели?
- 8. Какие основные инструменты существуют в пакете ANSYS Meshing для трансформации блоков?
- 9. Перечислить и показать основные способы расщепления блоков.
- 10.Какая информация экспортируется из ANSYS Meshing в ANSYS CFX?
- 11. Какие основные граничные условия используются в вычислительной аэрогидродинамике несжимаемой жидкости?
- 12. Основные принципы формирования расчетной области в вычислительных задачах внешней аэрогидродинамики.
- 13.Из каких соображений следует выставлять граничные условия на дальних границах расчетной области в задачах внешней аэрогидродинамики несжимаемой жидкости? Какие граничные условия рекомендуется выставлять на этих границах?
- 14.Какие граничные условия ставятся на обтекаемом вязкой жидкостью неподвижном теле?
- 15.В чем состоит принципиальное отличие осредненных уравнений Навье-Стокса и уравнений Навье-Стокса ламинарного течения вязкой жидкости?
- 16.В чем состоит принципиальное отличие турбулентной (вихревой) вязкости от ламинарной (физической) вязкости потока жидкости?

- 17.Объяснить суть метода объемного слежения (VOF метода).
- 18.Как изменится решение задачи внешней аэрогидродинамики несжимаемой жидкости при изменении давления выходной границе на постоянную величину при задании на входной границе скорости набегающего потока.
- 19.В чем состоит суть разностных схем «против потока»? Зачем нужны эти схемы?
- 20.Сформировать в постпроцессоре программного комплекса ANSYS CFX алгоритм построения поля давления на произвольной поверхности в потоке жидкости. Какие инструменты постпроцессора следует использовать для реализации этой задачи?
- 21.В чем заключается суть составной SST модели турбулентности Ментера?
- 22.Почему на кольцевом насадке движительно-рулевого комплекса возникает сила тяги?
- 23.Почему сила тяги движительного комплекса зависит от скорости движения скоростного судна?

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработана методика расчета движительно-рулевого комплекса (ДРК) с учетом аэродинамической интерференции ДРК с элементми компоновки АСВП. Методика базируется на применении суперкомпьютерных технологий для прямого численного решения уравнений турбулентного движения вязкой жидкости. Рассмотрена физическая и математическая постановки задачи аэродинамики движительно-рулевого комплекса АСВП, ее поэтапное решение с использованием программных комплексов Ansys Meshing, Ansys Extended Meshing, Ansys CFX

2. Приведен пример применения методики с построением геометрической и сеточной моделей корпуса АСВП и ДРК, подготовкой сеточных моделей к решению в программном модуле Ansys CFX – Pre и анализом результатов решения в модуле Ansys CFX-Post.

3. Разработанная методика внедрена в процесс проектирования АСВП и использована при разработке концептуального проекта платформы на воздушной подушке с гибким ограждением баллонетного типа для Крайнего Севера и Каспийского моря. Приведены результаты применения методики по выбору и отработке ДРК и его элементов концептуального проекта платформы на воздушной подушке.

# СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1 Флетчер К. Вычислительные методы в динамике жидкостей. М.:Мир, 1991.

2 Menter, F. R. (1993), Zonal Two Equation k-ω Turbulence Models for Aerodynamic Flows, Technical Report AIAA Paper 93-2906.

3 Пейре Р., Тейлор Т.Д. Вычислительные методы в задачах механики жидкости. Л. : Гидрометеоиздат, 1986. – 352 с.

4 Ferziger J. H., Perić M Computational Methods for fluid Dynamics. Berlin: Springer, 2002. – 3., rev. ed. - 423 p.

5 Patankar. Numerical Heat Transfer and Fluid Flow, Hemisphere Publishing Corp., 1980.

6 Rhie, C.M. and Chow, W.L. A Numerical Study of the Turbulent Flow Past an Isolated Airfoil with Trailing Edge Separation, AIAA Paper 82-0998, 1982.

7 S. Majumdar. Role of Underrelaxation in Momentum Interpolation for Calculation of Flow with Nonstaggered Grids", Numerical Heat Transfer 13:125-132.

8 Harlow F.H., Welch J.E. Numerical study of large amplitude free surface motion. – Phys. Fluids, 1966, 9 p.

9 Станкова Е. Н., Затевахин М. А. Многосеточные методы. Введение в стандартные методы. Институт высокопроизводительных вычислений и информационных систем, 2003.

10 Брусиловский И.В. Аэродинамические схемы и характеристики осевых вентиляторов ЦАГИ. М.:Недра, 1978.

11 ANSYS CFX Tutorial Reference. ANSYS Inc., 2006.

12 Техническое задание на опытно-конструкторскую работу «Разработка концептуального проекта платформы на воздушной подушке (ВП) с гибким ограждением (ГО) баллонетного типа для Крайнего Севера и Каспийского моря» Приложение к Государственному контракту № 12411.1007499.09.118 от 13.07.2012.

140

Леонид Александрович **Игумнов** Павел Сергевич **Кальясов** Василий Владимирович **Шабаров** Любовь Васильевна **Шабарова** Виталий Андреевич **Шапошников** 

# СУПЕРКОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИЖИТЕЛЬНО-РУЛЕВОГО КОМПЛЕКСА АМФИБИЙНОГО СУДНА НА ВОЗДУШНОЙ ПО-ДУШКЕ

### Учебное пособие

Формат 60×84 1/16. Бумага офсетная. Печать офсетная. Гарнитура «Таймс». Уч.-изд. л. . Усл.-печ. л. . Тираж 100 экз. Заказ №

Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского 603950, Нижний Новгород, пр. Гагарина, 23

Типография Нижегородского госуниверситета им. Н.И. Лобачевского 603000, Нижний Новгород, ул. Б. Покровская, 37