

**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
НАГНЕТАТЕЛЬНОГО 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
нагнетательного комплекса амфибийного судна на воздушной
подушке. – Н. Новгород, Нижегородский госуниверситет, 2014. –
101 с.**

ISBN

Принципиальным моментом развития амфибийных судов на воздушной подушке (АСВП) является формирование методической базы, позволяющей принимать обоснованные конструктивные решения при проектировании специфических элементов АСВП. 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. Существующие подходы к отработке аэрогидродинамического комплекса (АГДК) АСВП ориентированы на проведение модельных физических экспериментов и не используют возможностей вычислительного эксперимента, базирующегося на прямом решении уравнений 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.

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	4
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 нагнетательного комплекса.....	5
1.2 Применение методик вычислительного эксперимента для проектных задач аэрогидродинамики АСВП	6
1.3 Подготовка к вычислительному эксперименту: первый этап.....	8
1.4 Подготовка к вычислительному эксперименту: второй этап.....	13
2 Методика моделирования на основе суперкомпьютерных технологий нагнетательного комплекса АСВП	20
2.1 Физическая постановка задачи о работе нагнетательного комплекса АСВП.....	20
2.2 Математическая постановка задачи о работе нагнетательного комплекса АСВП. Особенности численного решения.....	20
2.3 Описание пакета Ansys Meshing/Ansys Extended Meshing.....	23
2.4 Построение сеточной модели судна на воздушной подушке с использованием сеточного генератора Ansys Mesing/Ansys Extended Meshing.....	42
2.5 Работа в среде ANSYS CFX-Post	88
КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ	96
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	98
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	99

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 комплекс, нагнетательный комплекс, несущий комплекс). 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 (АГДК) АСВП ориентированы на проведение модельных физических экспериментов и не используют возможностей вычислительного эксперимента, базирующегося на прямом решении уравнений 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.

Цель настоящей работы состоит в создании на основе суперкомпьютерных технологий методики моделирования нагнетательного комплекса АСВП и в ее применении для выбора и обоснования компоновки концептуального проекта платформы на воздушной подушке. В работе подробно рассмотрена физическая и математическая постановка задач аэродинамики нагнетательного комплекса АСВП, ее поэтапное решение с использованием программных комплексов Ansys Meshing, Ansys Extended Meshing, Ansys CFX. Разобран пример применения методики с построением геометрической и сеточной моделей нагнетательного комплекса АСВП, 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 нагнетательного комплекса

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

- движительно-рулевой комплекс (ДРК), включающий в себя маршевые винты в профилированных кольцевых насадках, направляющие и спрямляющие аппараты, силовые пилоны и систему рулей;
- нагнетательный комплекс, представляющий собой вентиляторы со спрямляющими и направляющими аппаратами и систему воздухопроводов, обеспечивающих подачу воздуха в воздушную подушку (ВП);
- несущий комплекс, включающий в себя область ВП и систему гибких ограждений.

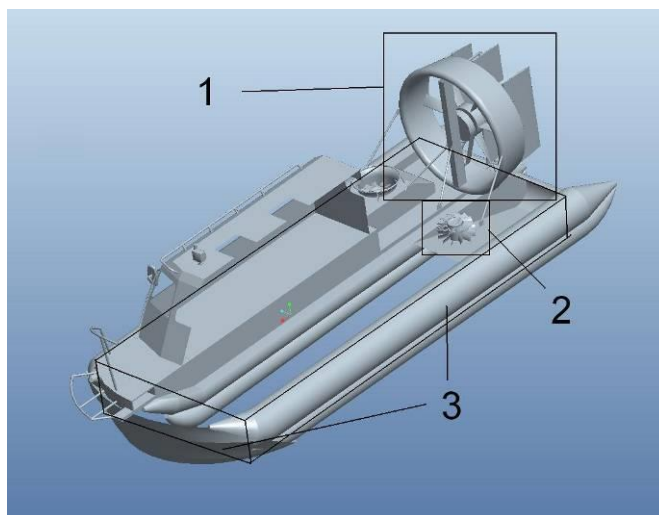


Рисунок 1.1 - Основные элементы аэрогидродинамической компоновки АСВП

По расходно-напорным характеристикам осевых и центробежных вентиляторов, используемых на АСВП, накоплена обширная экспериментальная информация [1 - 5]. Давление в расходно-напорных характеристиках вентиляторов замеряется непосредственно у выхода из коллектора или улитки. Для использования этих данных при проектировании нагнетательного комплекса

АСВП необходимо знать потери в тракте подачи воздуха от воздухозаборника до вентилятора и в тракте от вентилятора до ВП. Приближенная оценка этих потерь по упрощенным схемам [5, 6] достоверна только для простой геометрии. На АСВП геометрия этих трактов может оказаться и оказывается нестандартной, что делает не надежным использование упрощенных схем [5, 6]. Нестандартная геометрия трактов обусловлена необходимостью удовлетворения в проектировании различных и зачастую противоречащих друг другу требований и ограничений. На практике, проектирование нагнетательного комплекса по [1 - 5] может привести к снижению давления и расходов воздуха в ВП по сравнению с расчетными, повышению сопротивления и снижению скоростных характеристик АСВП по отношению к заявленным. Такая ситуация имела место с АСВП «Марс-2000» и АСВП «Хивус» проекта А-32 с исходным вариантом нагнетательного комплекса.

В целом, при разработке АГДК АСВП с баллонетным ГО, 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.

Внедрение методов вычислительного эксперимента в процесс проектирования позволяет решать задачи аэрогидродинамики основных элементов АГДК АСВП и, в частности, нагнетательного комплекса, в наиболее полных постановках.

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:

- создание методики решения задачи заключается в определении размеров 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;

- верификация результатов моделирования по результатам модельных или натурных испытаний;

- 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;

- верификация результатов моделирования по результатам 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 полу-

чить 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 полученных 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 этапа:

- построение геометрической модели;
- создание сеточной модели;
- импорт в вычислительный пакет.

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

В настоящей работе первый этап был реализован 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 других CAD систем (AutoCAD, Pro Engineer, Компас и т.д.). Пакеты программ Ansys Mesing/Ansys Extended Meshing содержат средства по автоматическому изменению геометрии для ее адаптации к построению сетки. Например, существует возможность автоматически «сгладить» выступы или затянуть щели, которые нет необходимо-

сти учитывать при расчетах. Кроме того, существует возможность построения геометрии непосредственно в самом пакете. Геометрическая модель строится по следующей схеме: 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).

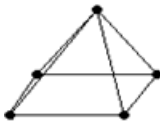
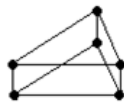
Все геометрические объекты объединены в различные части (Parts). Такой подход позволяет заранее объединить группы элементов, описывающие материалы с разными свойствами или границы с разными граничными условиями. Части может создавать сам пользователь.

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.

Таблица 1.1 - Типы элементов

Одномерный		Двумерный		Трехмерный	
	POINT_1		TRI_3		TETRA_4
	LINE_2		QUAD_4		PYRA_5
-	-	-	-		PENTA_6
-	-	-	-		HEXA_8

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.

На поверхностях и линиях можно задавать количество 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, 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. При этом ортогональная сетка автоматически искажается (рисунок 1.2). Существуют треугольные (вырожденные) блоки.

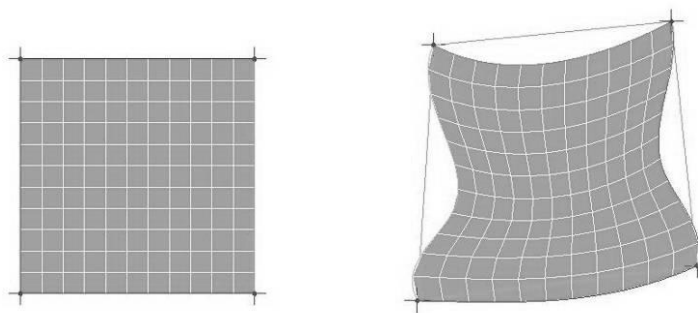


Рисунок 1.2 – Принцип создания структурированной сетки

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.

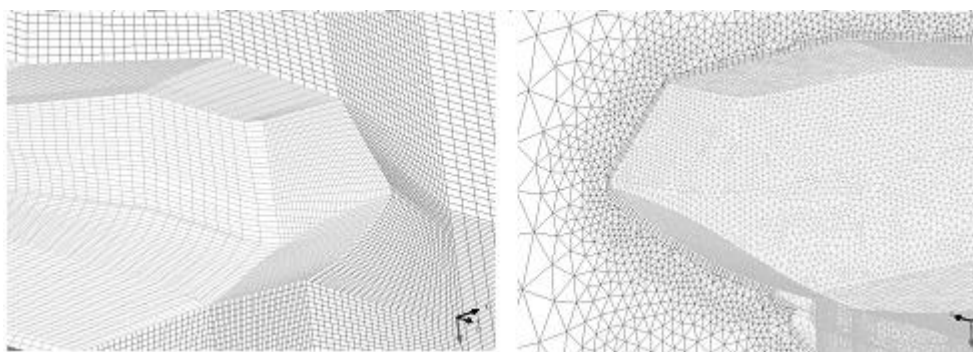


Рисунок 1.3 – Структурированная (слева) и неструктурированная (справа) сетки

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 мелко-сти 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 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, что координатные линии одного семейства будут пересекаться. В результате получаются элементы отрицательного объема (вывернутые наизнанку). Сглаживание сетки исправляет подобные ошибки, как на уровне прообраза, так и при уже сгенерированной сетке. Еще один способ избежать подобных проблем – незначительное, порядка размера одного элемента, изменение геометрии.

После генерации сетки перед ее доработкой (имеется в виду построение призматических слоев после создания тетраэдрической сетки и т.п.) или импортом в вычислительный пакет 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 решатель. Ansys Mesing/Ansys Extended Meshing поддерживает множество вычислительных пакетов: ANSYS, ANSYS CFX, NASTRAN, STAR-CD и др.

1.4 Подготовка к вычислительному эксперименту: второй этап

В общем случае нестационарное течение вязкой жидкости описывается системой уравнений [7] по формулам (1.1 - 1.4):

$$\begin{aligned} & \rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = \\ & = \rho f_x - \frac{\partial p}{\partial x} + 2 \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_e \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_e \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu_e \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \right) \end{aligned} \quad (1.1)$$

$$\begin{aligned} & \rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) = \\ & = \rho f_y - \frac{\partial p}{\partial y} + 2 \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_e \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_e \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu_e \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) \right) \end{aligned} \quad (1.2)$$

$$\begin{aligned} & \rho \left(\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = \\ & = \rho f_z - \frac{\partial p}{\partial z} + 2 \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_e \frac{\partial w}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_e \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_e \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) \right) \end{aligned} \quad (1.3)$$

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

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

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

p – давление, Па; ρ – плотность жидкости, кг/м³; $\mu_{эф} = \mu + \mu_{тур}$ – эффективная вязкость, складывающаяся из ламинарной (физической) вязкости μ и турбулентной (вихревой) вязкости $\mu_{тур}$, Па·с; f_x, f_y, f_z – проекции массовой силы, м/с².

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) [8].

Составная модель Ментера является комбинацией k - ω и k - ε моделей, причем k - ω (k – кинетическая энергия турбулентности, ω – завихренность) акти-

визуруется вблизи твердых границ потока, а вдали от них используется k - ε модель (k - кинетическая энергия турбулентности, ε - скорость ее диссипации).

Модель переноса сдвиговых напряжений Ментера имеет следующие характерные черты:

- стандартная k - ω и преобразованная k - ε модели, в последней их которых ε заменяется на ω , накладываются с помощью функции смещения и объединяются в одну. Функция смещения конструируется таким образом, что принимает единичное значение в пристеночной области, в которой активируется стандартная k - ω модель, и равняется нулю вдали от стенки, в которой используется преобразованная k - ε 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.

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

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

$$\Gamma_k = \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k}; \quad \Gamma_\omega = \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\omega}; \quad \mu_t = \frac{\rho k}{\omega} \frac{1}{\max(1/\alpha^*, \Omega F_2 / (a_1 \omega))} \quad (1.8)$$

$$\Omega \equiv \sqrt{2\Omega_{ij}\Omega_{ij}} \quad (1.9)$$

$$\sigma_k = \frac{1}{F_1 / \sigma_{k,1} + (1 - F_1) / \sigma_{k,2}}; \quad \sigma_\omega = \frac{1}{F_1 / \sigma_{\omega,1} + (1 - F_1) / \sigma_{\omega,2}} \quad (1.10)$$

$$F_1 = \tanh(\Phi_1^4); \quad \Phi_1 = \min \left[\max \left(\frac{\sqrt{k}}{0.09 \omega y}, \frac{500 \mu}{\rho y^2 \omega} \right), \frac{4 \rho k}{\sigma_{\omega,2} D_\omega^+ + y^2} \right] \quad (1.11)$$

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

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

$$Y_k = \rho \beta^* k \omega; \quad Y_{\omega} = \rho \beta \omega^2; \quad D_{\omega} = 2(1 - F_1) \rho \sigma_{\omega,2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \quad (1.14)$$

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

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

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

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

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

Сравнительно недавно Ментером внесены коррекции в модель SST $k-\omega$, сделанные на основе десятилетнего опыта ее эксплуатации. Вместо модуля завихренности Ω 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):

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

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t}(\rho \omega) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \tilde{u}_j \omega) = \\ & = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_{\omega}} \right) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + \frac{\alpha}{v_t} P_k - \beta^* \rho \omega^2 + (1 - F_1) 2 \rho \sigma_{\omega^2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j}. \end{aligned} \quad (1.21)$$

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

$$\tilde{P}_k = \min(P_k, 10\beta^* \rho \omega k), \quad (1.22)$$

$$P_k = \left[\mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) \right] \quad (1.23)$$

G_b - величина поправки на плавучесть, определена выражениями (1.24):

$$G_b = \beta g_i \frac{\mu_t}{Pr_t} \frac{\partial T}{\partial x_i}, \quad \beta = -\frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_p. \quad (1.24)$$

F_1 - функция смещения, вычисляется как (1.25) - (1.26):

$$F_1 = \tanh(\arg_1^4); \quad \arg_1 = \min \left[\max \left(\frac{\sqrt{k}}{\beta^* \omega y}, \frac{500\nu}{y^2 \omega} \right), \frac{4\rho \sigma_{\omega 2} k}{CD_{k\omega} y^2} \right], \quad (1.25)$$

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

μ_t - турбулентная вязкость, $Pa \cdot s$, вычисляется как (1.27):

$$\mu_t = \min \left(\frac{\rho k}{\omega}, \frac{a_1 \rho k}{|S_{ij}| F_2} \right), \quad (1.27)$$

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

$$S = \sqrt{2s_{ij}s_{ij}} \quad (1.28)$$

a_1 - константа, $a_1=0.31$; F_2 - а вторая функция смещения, определяется как (1.29):

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

ϕ - коэффициенты модели, определяются как (1.30):

$$\phi = F_1 \phi_1 + (1 - F_1) \phi_2, \quad (1.30)$$

где ϕ_1 и ϕ_2 являются константами k - ω и k - ε 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 $u, v, w, p, \kappa, \omega$. 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 относится к классу «тяжелых», способных решать сложные задачи с учетом большого количества эффектов. Пользовате-

лю предоставлено выбирать алгоритмы дискретизации, схемы аппроксимации производных в различных членах уравнений (локальных, конвективных, диффузионных, источниковых) и алгоритмы решения линеаризованных 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) [7, 8, 10]. Расчетная аэрогидродинамическая область задачи разбивается на некоторое число непересекающихся контрольных объемов. Используется структурированная сетка и МКО применяется в варианте центрирования по узлу [10] (см. 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 ϕ 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 1.4).

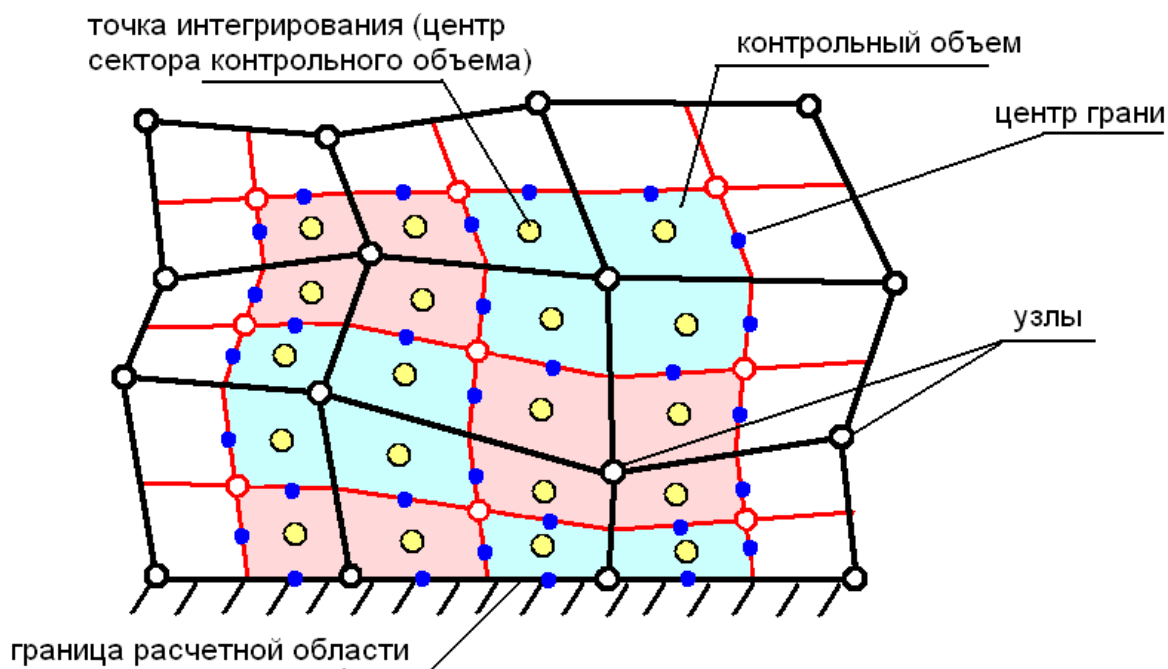


Рисунок 1.4 - Иллюстрация применения МКО в варианте центрирования по узлу

Для определения конвективных производных используется схема «против потока» повышенного порядка точности [7 - 10]. 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 [7, 8, 10] 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 [11, 12] и усовершенствованной в [13]. 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 весовых многофазных жидкостей, и

массовых сил.

Мгновенное положение границы раздела сред «воздух-вода» определяется с помощью метода маркеров и ячеек Харлоу [14] (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 ILU-факторизацию (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 [15]:

- 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 суперкомпьютерах.

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 нагнетательного комплекса АСВП

2.1 Физическая постановка задачи о работе нагнетательного комплекса АСВП

Центробежный вентилятор вращается с заданной угловой скоростью. Модель вентилятора и прилегающих к нему участков воздуховода представлена на рисунке 2.1. Воздух из атмосферы за счет вращения колеса вентилятора поступает в воздушный тракт 1, затем проходит через вентилятор 2, преодолевает второй участок воздушного тракта 3 и выбрасывается в ВП 4, откуда снова попадает в атмосферу 5. Воздух рассматривается как вязкая несжимаемая жидкость. Режим течения турбулентный.

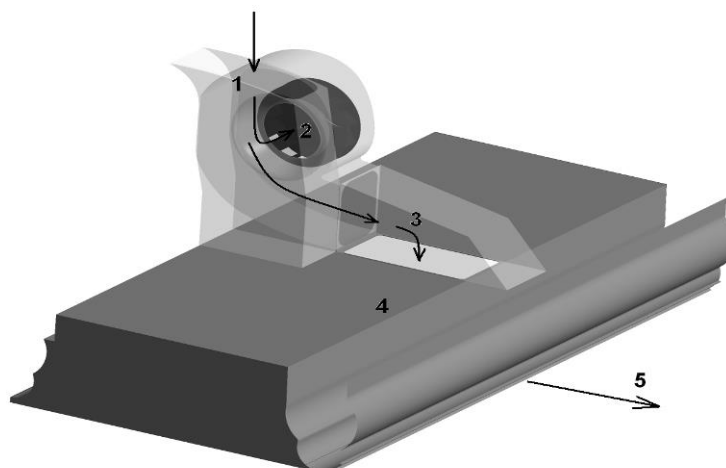


Рисунок 2.1 - Центробежный вентилятор, система воздухопроводов, воздушная подушка

2.2 Математическая постановка задачи о работе нагнетательного комплекса АСВП. Особенности численного решения

Задание граничных условий непосредственно на входе и выходе из воздушного тракта является некорректным, т.к. не учитывает неравномерность потока на входе-выходе воздушного тракта, существенно влияющую на работу вентилятора. Входную границу необходимо относить на 4 – 5 диаметров колеса вентилятора от входа в воздушный тракт. Такой подход позволяет также исследовать работу вентилятора в составе воздушного тракта при различных скоро-

стях движения АСВП. На выходе моделировалось истечение из ВП (рисунок 2.2).

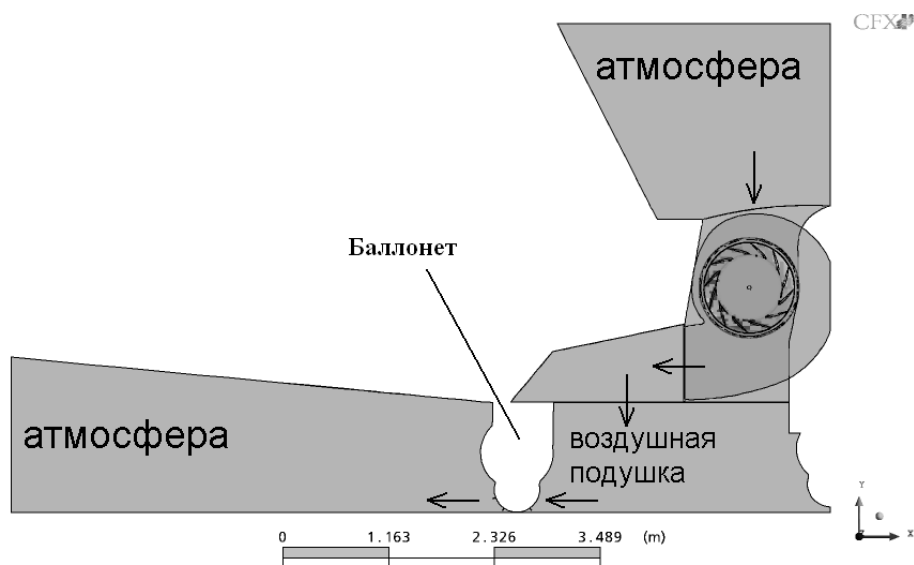


Рисунок 2.2 - Расчетная область

Система уравнений (1.1 - 1.4) решалась при следующих граничных условиях (рисунок 2.3):

- а) на входе – избыточное давление $p = 0 \text{ Н/м}^2$, дающее возможность вентилятору забирать необходимое количество воздуха;
- б) на выходе – среднее избыточное давление $p = 0 \text{ Н/м}^2$;
- в) на баллонете, гибком ограждении и днище АСВП – условие прилипания и непротекания на поверхности $u = 0 \text{ м/с}$, $v = 0 \text{ м/с}$, $w = 0 \text{ м/с}$;
- г) на фрагментах корпуса, воздуховода и кожуха вентилятора – условие прилипания и непротекания $u = 0 \text{ м/с}$, $v = 0 \text{ м/с}$, $w = 0 \text{ м/с}$;
- д) на экране – условие скользящей с обращенной скоростью АСВП стенки $w = \text{const}$, $u = 0 \text{ м/с}$, $v = 0 \text{ м/с}$.

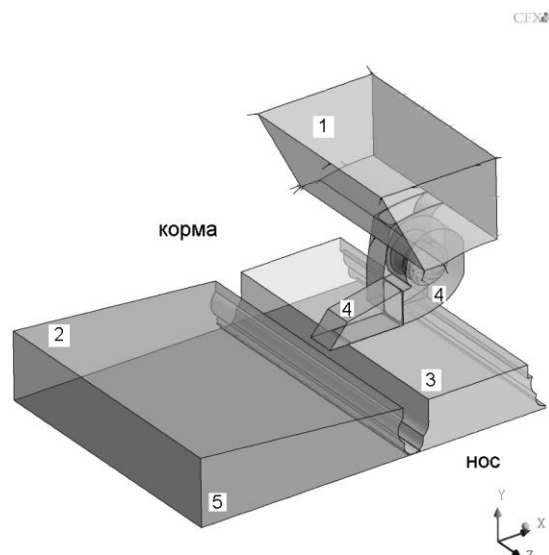


Рисунок 2.3 - Границы расчетной области

Вращение колеса центробежного вентилятора моделировалось как в стационарной, так и в нестационарной постановке.

При расчетах давление в подушке регулировалось путем изменения зазора между баллонетом и экраном. Исследовались режимы работы вентилятора в диапазоне давлений в ВП 1000-2000 Па, характерном для АСВП с ГО баллонетного типа.

Проведен ряд вычислительных экспериментов, в которых учитывалась сжимаемость воздуха. Результаты отличаются от расчетов по несжимаемой модели воздуха на 1 – 2%.

В ходе отработки схемы решения проводилось изменение некоторых математических процедур в алгоритме решения задачи, смена модели турбулентности и некоторых ее параметров, изменение топологии и точности сеточной модели, исследование влияния на результат расположения интерфейсов области обращенного окружного движения воздуха. Значимых изменений в исследуемый результат этот цикл вычислительных экспериментов не внес – результаты моделирования по расходно-напорной характеристике оказались весьма стабильными.

Рассматривалась постановка задачи, в которой колесо вентилятора заменялось системой источников и стоков. Интенсивность источников задавалась исходя из расходно-напорной характеристики по среднему давлению в ВП. Величина давления в ВП на n -ой итерации определяла величину расхода на $(n+1)$ итерации. В такой постановке (без прямого моделирования работы вентилятора), оценка потерь в трассе при различной ее геометрии требовала в 1,5 раза

меньше времени и вычислительных ресурсов за счет уменьшения количества контрольных объемов и увеличения шага интегрирования по времени.

Исследовано поведение решения на сетках различной структуры и мелкости разбиения. Особенностью дискретизации расчетной области является разбиение ее на несколько частей: область у входа в воздуховод, несколько участков воздуховода, улитка, колесо вентилятора, ВП. Части соединяются между собой системой интерфейсов, обеспечивающих непрерывность полей скоростей и давлений. Такой подход существенно упрощает перестроение сетки при изменении геометрии воздуховода и лопастей колеса (было рассмотрено несколько десятков вариантов). С другой стороны, подобная схема приводит к неоптимальному распараллеливанию задачи.

Схема решения отрабатывалась на нагнетательных комплексах АСВП проектов А-32, проектов А-48.

2.3 Описание пакета Ansys Meshing/Ansys Extended Meshing

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

Ansys Meshing/Ansys Extended Meshing представляет наиболее полный на сегодняшний день 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 Meshing/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 Meshing/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*, *PATRAN*, *STAR-CD* и другие.

Процесс создания сеточной модели в модуле HEXA представлен в виде Блок-схемы на рисунке 2.4.

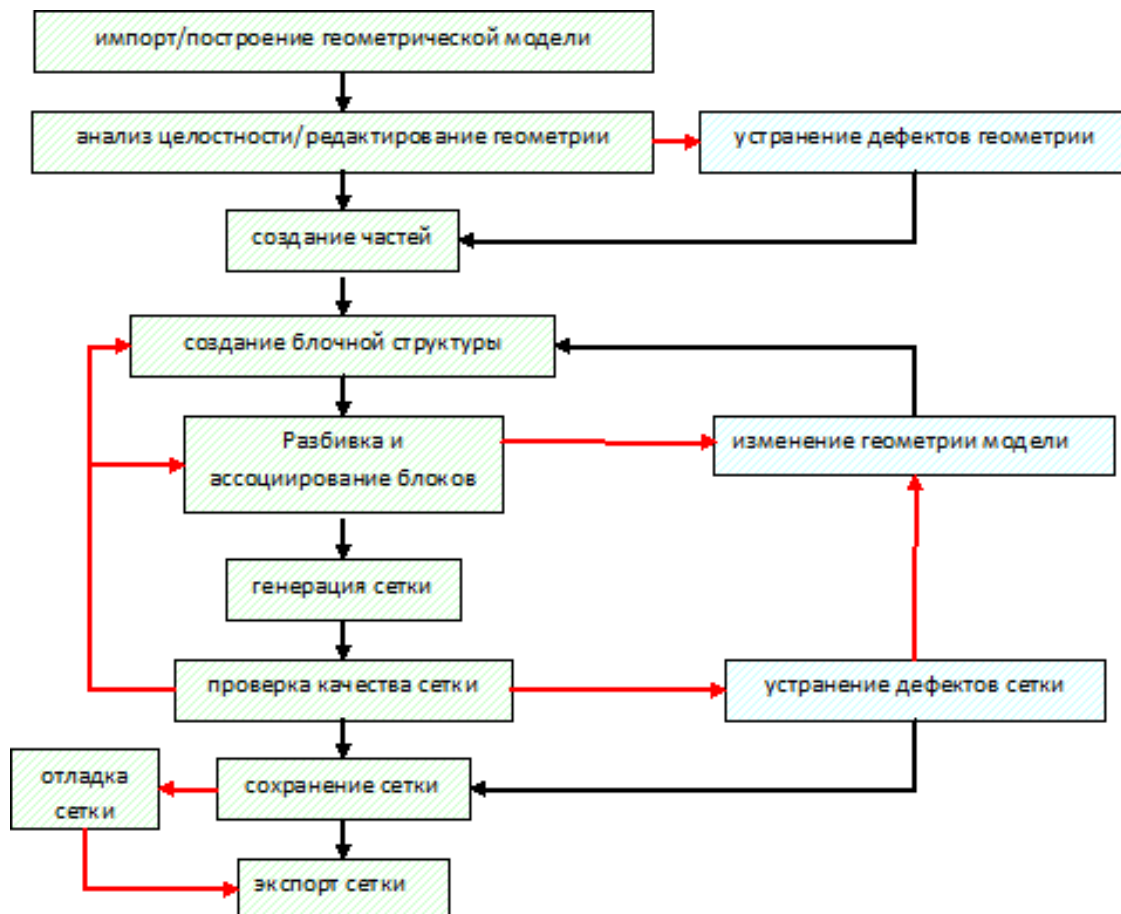


Рисунок 2.4 - Блок-схема создания сеточной модели

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 2.5).



Рисунок 2.5 - 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* . 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 исходной;
- *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 :

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

- *Arc from 3 Points* . 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* . 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 помощью 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* . Создание поверхности, включающей 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;
- *Create 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 по-

поверхности с вырезами «целой» поверхности), *Extend Surface*  (удлинение поверхности), *Geometry Simplification*  (преобразование начальной поверхности к более простой).

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

- *By Topology* . Здесь тела строятся двумя методами: *Entire Model* – построение полной модели (используются все замкнутые поверхности, образующие поверхности тел), *Selected surfaces* (построение происходит по выбранным 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 замешивать. Далее строится структурированная сетка для блока, которая автоматически переносится на ассоциированную с блоком сложную фигуру.

Работа с блоками осуществляется в модуле *Blocking* (см. рисунок 2.6). В начале, необходимо построить блок. Блок строится по созданной геометрии. Если геометрия не создана, то *Ansys Extended Meshing* не предоставит возможности построения блока.



Рисунок 2.6 - Модуль работы с блоками – *Blocking*

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 методом 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 по-

строение 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 свойства блока: для трехмерного – *Hexa*, или *Swept*, или *Quarter-O-Grid*, или *Degenerate*; для двумерного – *Quad* или *Unstructured*;

в) *Extrude Face* . Метод построения блока путем экструдирования (выдавливания) через грань другого уже созданного блока, что применимо только для трехмерных блоков. При этом экструзия 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.

з) *2D to 3D Blocks*

Используется при построении трехмерных блоков с использованием двумерных. Содержит три метода построения:

1) *Fill*. Это метод «наполнения». Строится трехмерный блок, который опирается на двумерные, являющиеся его гранями (см. рисунок 2.7).

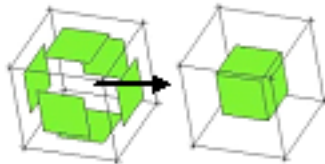


Рисунок 2.7 - Построение блока методом «наполнения»

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;

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*), экструзию геометрических точек/линий в линии/области (*Extrude points/Extrude curves*), установить периодичность узлов (*Set Periodic Nodes*).

д) *3D to 2D*

Создание двумерных блоков из трехмерного блока, при этом двумерные блоки являются гранями начального.

Следующим этапом является ассоциация блока с геометрией  (см. рисунок 2.8).



Рисунок 2.8 - К ассоциации блоков

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

- *Associate Vertex* . Этот способ позволяет ассоциировать вершину блока с точкой;

- *Associate Edge to Curve* . 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*);

- *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* . 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 приступить 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*  (см. рисунок 2.9).

– Эта опция позволяет устанавливать разбиение ребер блоков. В пункте ребро (*Edge*) выбирается нужное ребро блока. В графе длина (*Length*) указывается длина данного ребра, что удобно при расчете числа необходимых узлов на ребре.

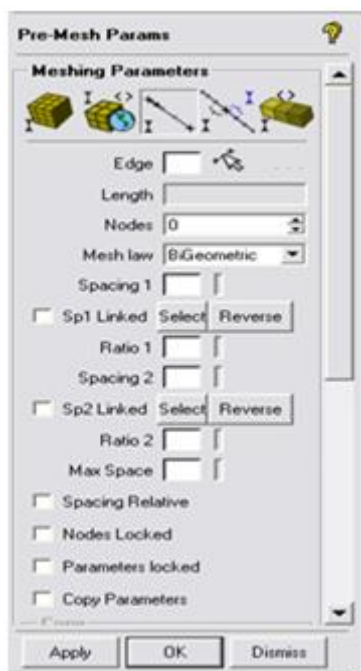


Рисунок 2.9 - Установка разбиений на ребре – *Edge Params*

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* – разбиение, 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*);

б) *Scale Sizes* . Задание 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, установив 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 .

а) *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 2.10);

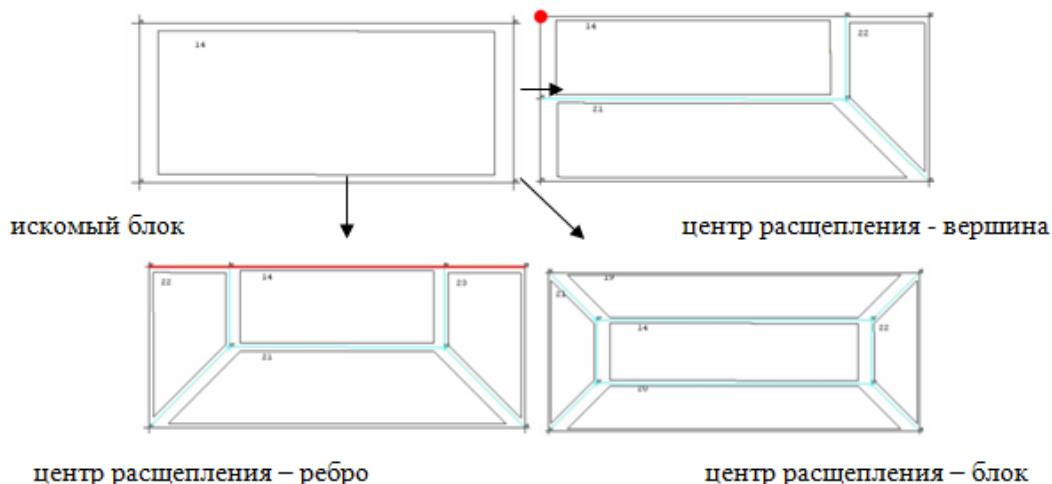


Рисунок 2.10 - Расщепление блока при помощи опции «O-grid Block»

б) *Split Block* . 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.

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

в) *Split Vertices* . Данная опция позволяет расщеплять вершины (рисунок 2.11), при этом необходимо указать вершину, которую следует расщепить;

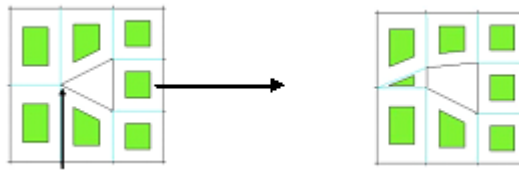


Рисунок 2.11 - Расщепление вершин – *Split Vertices*

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* .

а) *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.

б) *Merge Vertices by Tolerance* . 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 позволяет объединить две вершины при уничтожении блока. Входными параметрами являются ребро блока, границами которого служат объединяемые вершины, и сам блок (см. рисунок 2.12);

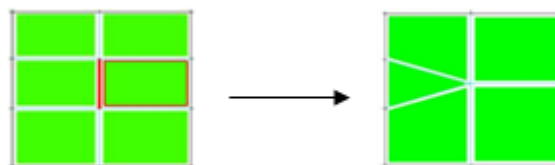


Рисунок 2.12 - Объединение вершин блоков

з) *Merge Vertex to Edge* . 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 2.13.

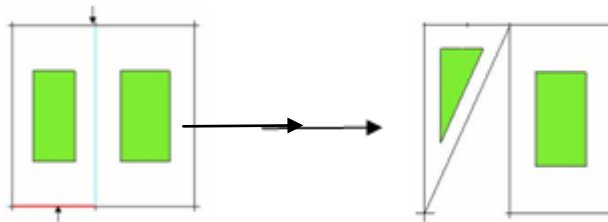


Рисунок 2.13 - Объединение вершин ребра

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* :

а) *Merge Blocks* . 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* . 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* . Данный компонент позволяет перенумеровывать блоки;

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

д) *Modify 0Grid* . 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* . Выстраивание в линию указанных вершин. При помощи *Reference Direction* выбирается прямая линия. В *Vertices* задаются вершины, которые будут проецироваться 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 **Transparent** - прорисовка поверхностей полупрозрачными;
- активирование опции **Show Surface Normals** ведет к отображению вектора нормали к поверхности. Для того чтобы увидеть созданное тело (*Bodies*), необходимо нажать на **Show Bounding Surfaces**.

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 **Show association** - 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 **IJK**, 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 **Convert to Unstruct Mesh**, 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 разбиты 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 2.14).



Рисунок 2.14 - 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 введенную часть). Для выбора точек, кривых, плоскостей, тел надо соответственно снять или поставить выделение над кнопками:    , если же надо выбрать уже существующую часть, то следует нажать на кнопку  и в появившемся меню поставить галочку

ки напротив нужных частей и нажать **Accept**. 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 , 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 Mesing/Ansys Extended Meshing

2.4.1 Постановка задачи

Расчетная область задачи (рисунки 2.15 - 2.18) состоит из следующих частей: 1 – вход; 2 – первая часть воздуховода; 3 – улитка; 4 - колесо вентилятора (данная часть расчетной области является вращающейся), 5 - второй участок воздуховода, 6 - воздушная подушка. Требуется построить геометрию и сетку для представленной расчетной области.

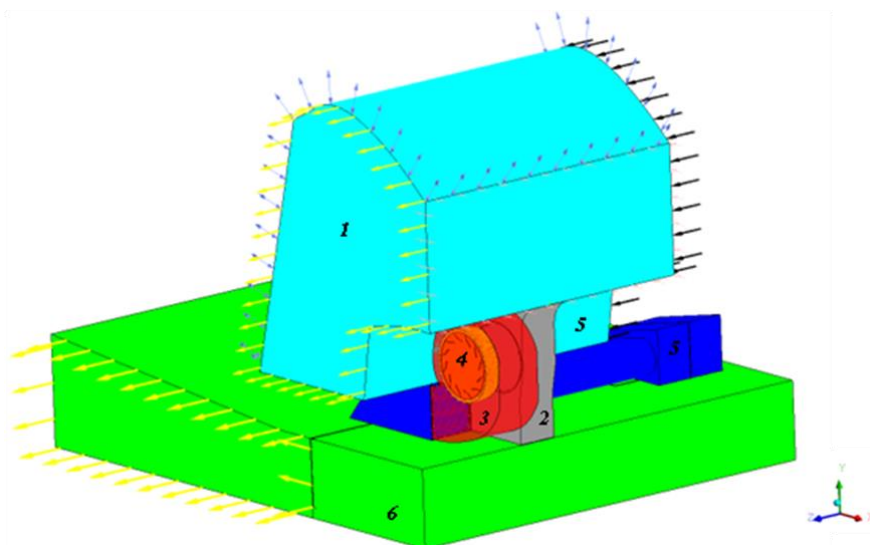


Рисунок 2.15 - Общий вид расчетной области

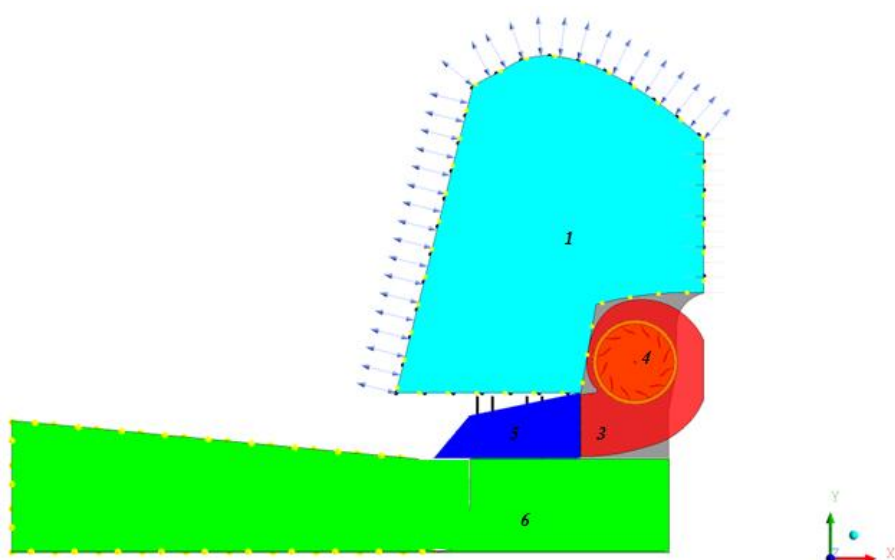


Рисунок 2.16 - Расчетная область: вид спереди

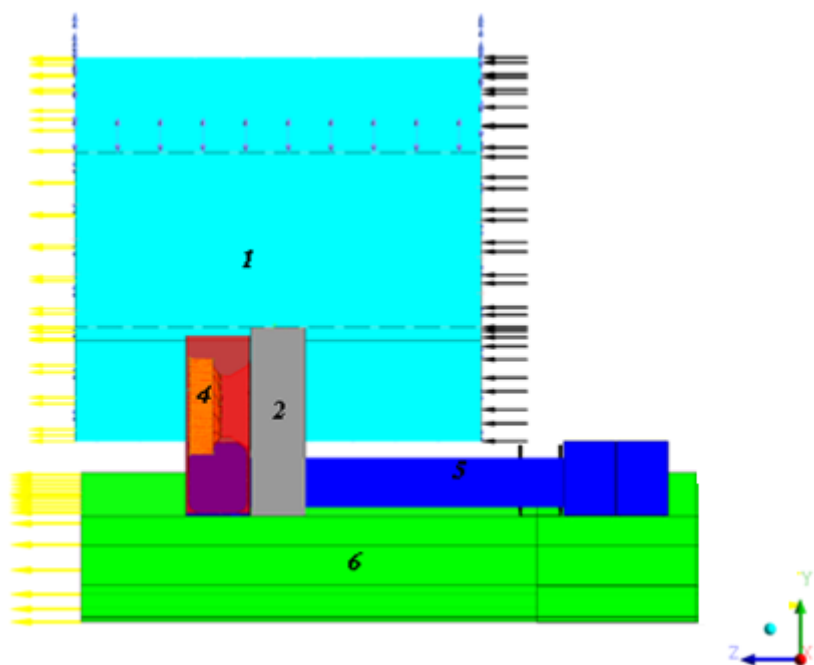


Рисунок 2.17 - Расчетная область: вид сбоку

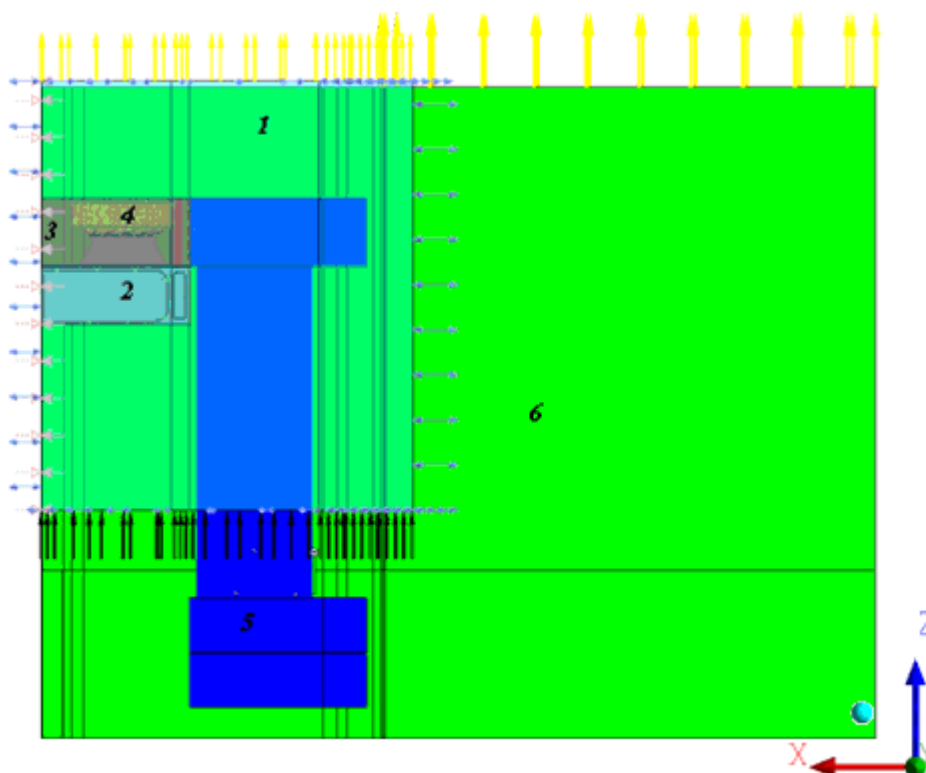


Рисунок 2.18 - Расчетная область: вид сверху

Построение расчетной сетки целесообразно проводить для каждой из шести указанных частей (номера всех частей указаны на рисунке 2.15) отдельно с последующей сшивкой всех элементов при экспорте сетки в препроцессор ANSYS CFX.

2.4.2 Построение геометрии и расчетной сетки в областях входа, воздухо- вода и воздушной подушки

Построение сетки для частей 1 (вход), 2 (первый участок воздуховода), 5 (второй участок воздуховода), 6 (воздушная подушка) расчетной области не представляет технических сложностей и выполняется согласно рекомендациям, изложенным в разделе 1.

На рисунках 2.19 - 2.22 приведены геометрия, блочная структура и итоговая сеточная модель для каждой из указанных частей расчетной области.

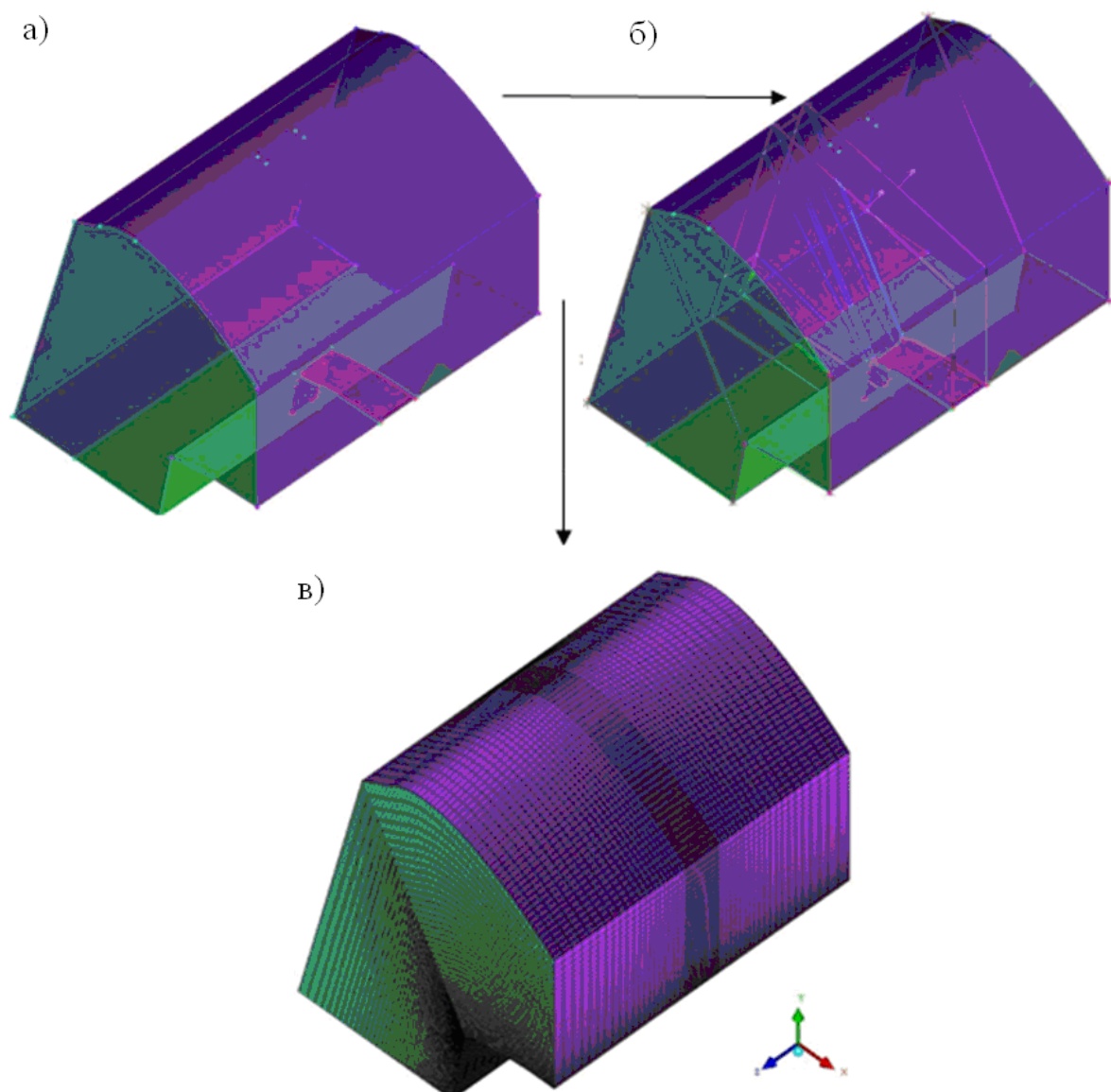


Рисунок 2.19 - а) геометрия входа; б) геометрия и блочная структура; в) сеточная модель входа

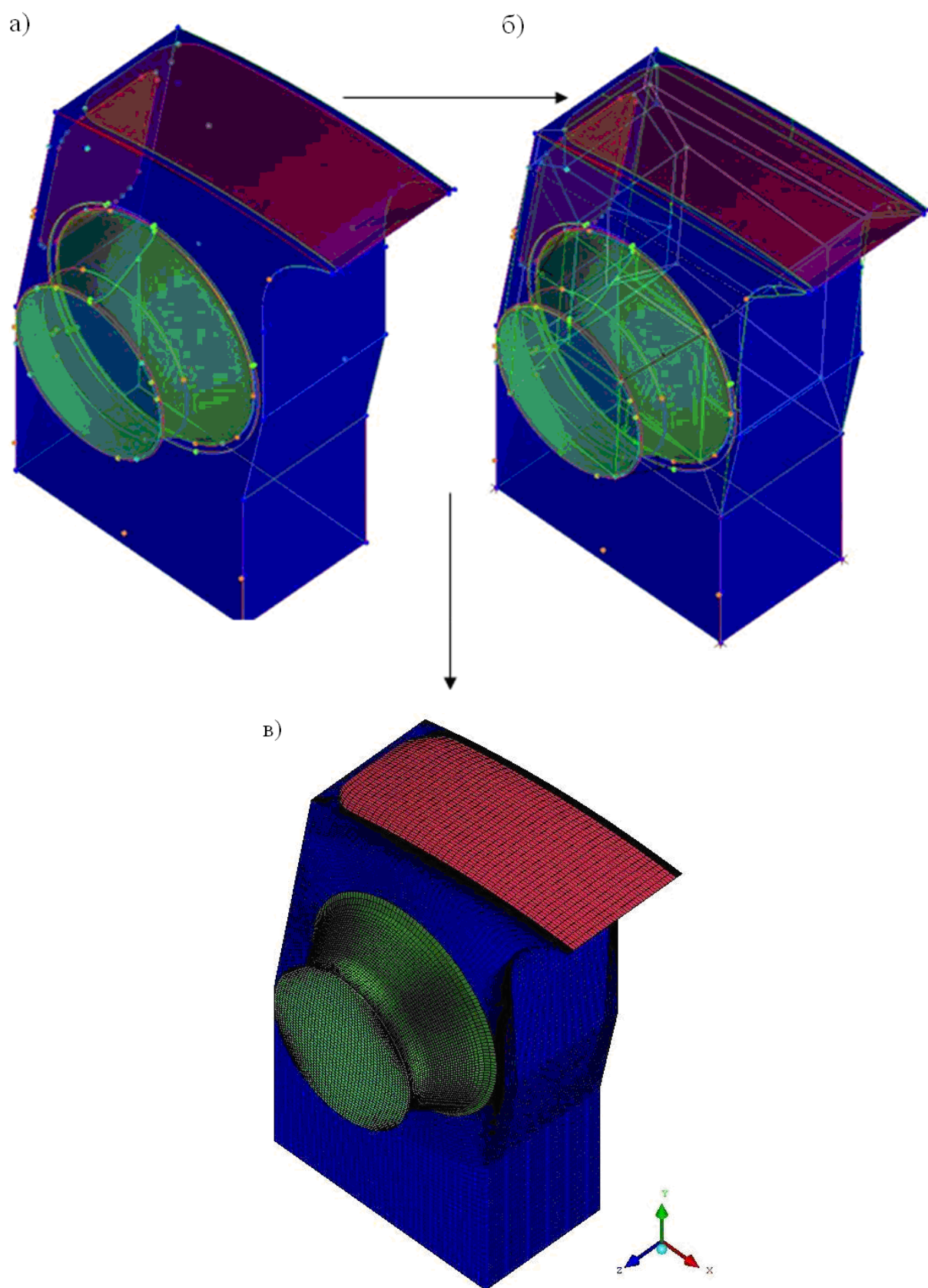


Рисунок 2.20 - а) геометрия первой части воздуховода; б) геометрия и блочная структура;
в) сеточная модель первой части воздуховода

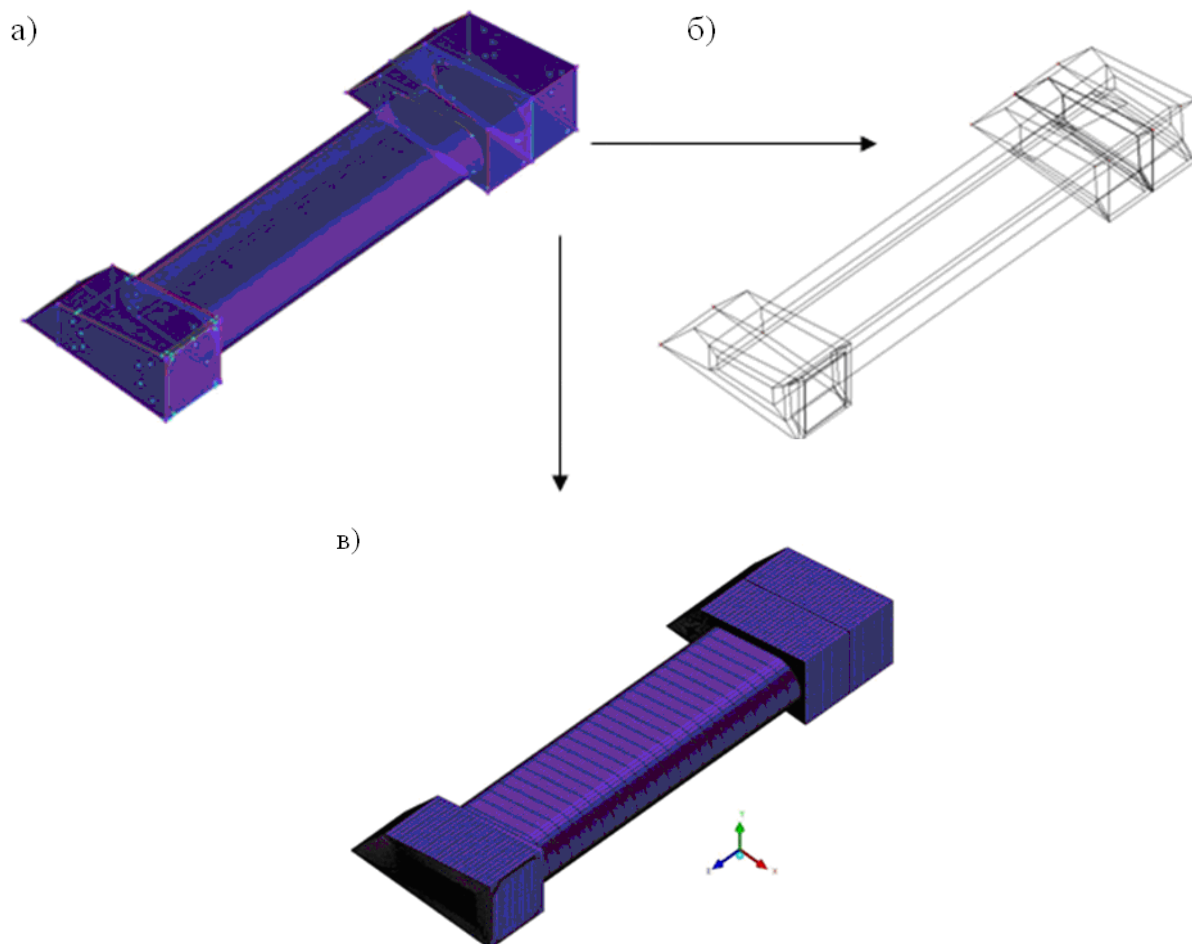


Рисунок 2.21 - а) геометрия второй части воздуховода; б) геометрия и блочная структура;
в) сеточная модель второй части воздуховода

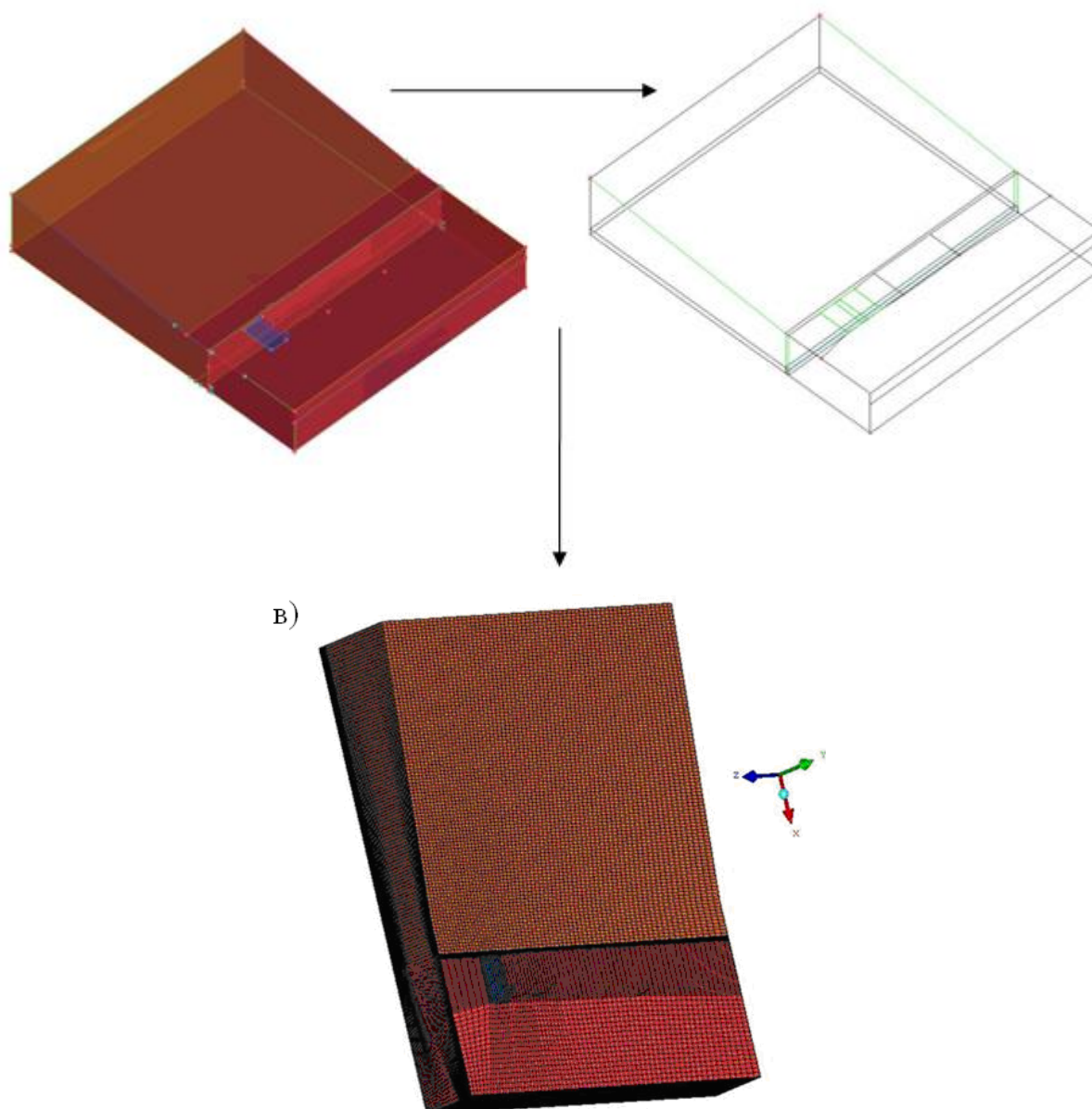


Рисунок 2.22 - а) геометрия воздушной подушки; б) геометрия и блочная структура;
в) сеточная модель воздушной подушки

2.4.3 Построение моделей улитки и колеса вентилятора

Построение моделей улитки, а так же колеса вентилятора является технически наиболее сложной составляющей в создании расчетной сетки для задачи моделирования нагнетательного комплекса АСВП. Поэтому далее поэтапно рассматривается процесс построения геометрии и сетки для частей 3 (улитка) и 4 (колесо вентилятора).

2.4.3.1 Построение модели улитки:

а) построение геометрии внешней границы улитки:

1) создание точек. Точки строятся, используя опцию *Geometry- > Create Point->Explicit Coordinates*: ; и вводятся координаты точек согласно таблице 2.1;

Таблица 2.1 - Координаты точек

x, мм	y, мм	z, мм
-1600	825	0
-1385	887.5	0
-1403	855	0
-1230	1938.5	0
0	1538.5	0
0	764.5	0
-450	258.5	0
-1043	73	0
-1600	25	0
-1600	150	0
-1600	750	0
1500	1425	0
-1506.5	1388.5	0
-309	1910	0

2) построение линий. Все прямые линии строятся при помощи опции *Geometry-> Create/Modify Curve->From Points* . Процесс создания криволинейных границ улитки представлен на рисунке 2.23.

3) построение поверхностей. По всем полученным линиям строится поверхность (*Geometry->Create/Modify Surfaces->From Curves* ) , осуществляется копирование геометрии и перенос скопированной части на расстояние 735 мм вдоль оси z (*Geometry->Transform Geometry-> Translate Geometry* ).

Далее, в полученной пространственной области вдоль оси z строятся линии и поверхности, соединяющие две скопированные части (рисунок 2.24).

Поверхность улитки 1 граничит со второй частью воздуховода. Для создания интерфейса между улиткой и воздуховодом, который должен быть расположен на данной границе, поверхность 1 разделяется на две части (*Geometry->Create/Modify Surfaces->Segment/Trim Surface* ) в соответствии с рисунком 2.25. Аналогично поверхность 2 улитки граничит с первой частью воздуховода, и также должна быть разделена на две части в соответствии с формой и размерами конструкции, а именно из нее необходимо вырезать круговую поверхность.

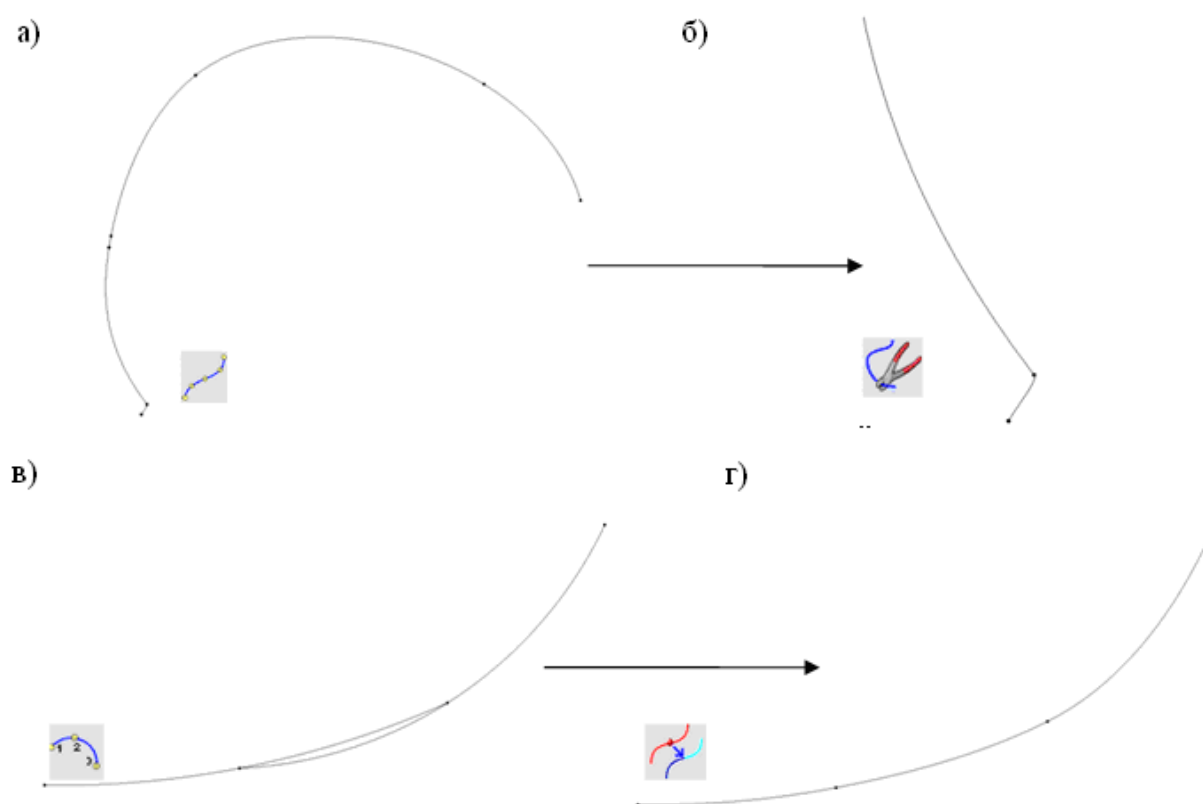


Рисунок 2.23 - а) последовательное соединение точек с помощью опции *From Points*;

б) скругление линии в области вогнутости с помощью опции *Modify curves*;

в) создание двух арок по трем точкам с помощью опции *Arc from 3 Points*;

г) разделение линий с помощью опции *Segment Curve* и удаление вспомогательной линии

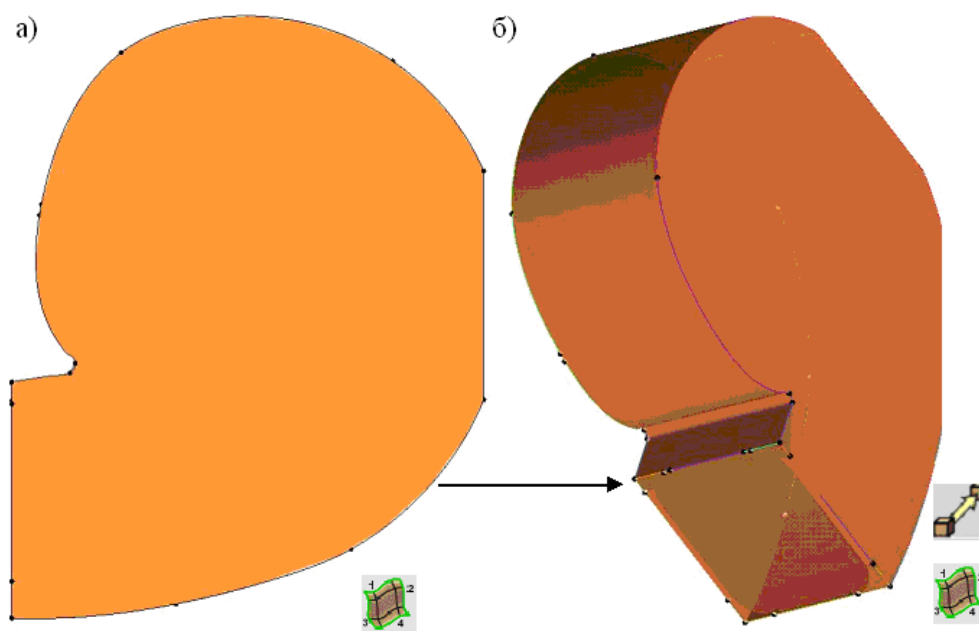


Рисунок 2.24 - а) создание поверхности по линиям с помощью опции *From Curves*;

б) перенос геометрии с копированием вдоль оси z с помощью опции *Translate Geometry* и создание боковых поверхностей улитки с помощью опции *From Curves*

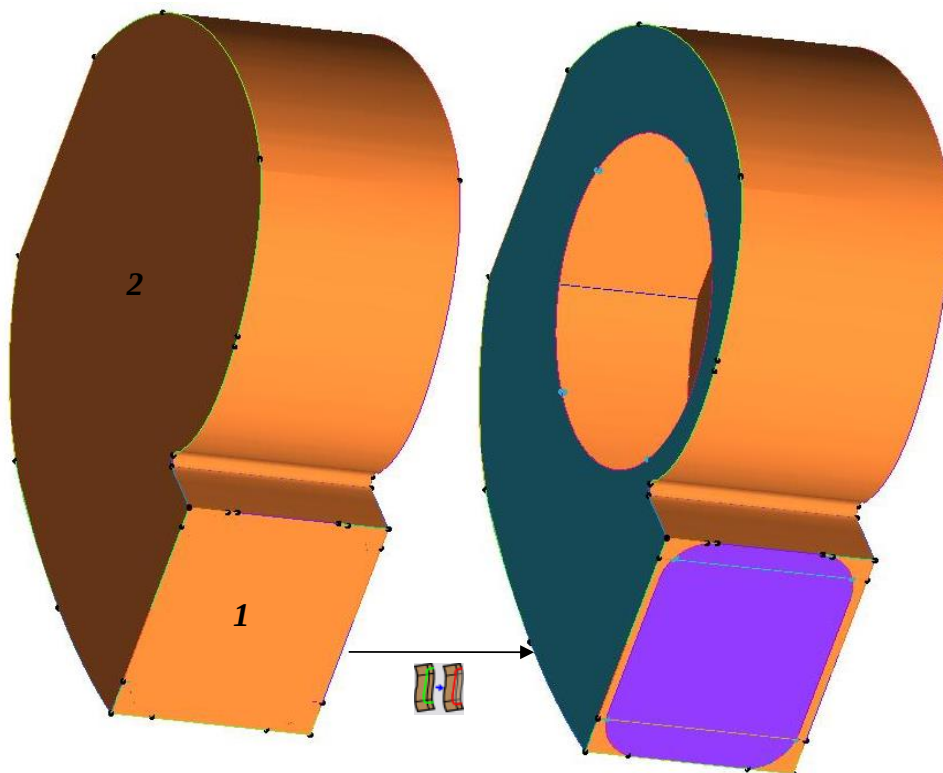


Рисунок 2.25 - Разделение поверхностей 1 и 2 с помощью опции *Segment/Trim Surface*

б) создание геометрии коллектора и стенки колеса вентилятора:

1) создание точек. Построение границы коллектора осуществляется по точкам таблицы 2.2;

Таблица 2.2 - Координаты точек

x, мм	y, мм	z, мм	Примечание
-895	1245	-42	Внутренняя граница колеса вентилятора
-395	1245	-42	
-895	1745	-42	
-895	1245	-308	
-395	1245	-308	
-895	1745	-308	
-345	1245	-42	Внешняя граница колеса
-895	1795	-42	
-345	1245	-308	
-895	1795	-308	
-895	1245	-404	Внутренняя граница коллектора
-535	1245	-404	
-895	1610	-404	
-895	1245	-530	
-545	1245	-530	
-895	1600	-530	
-895	1245	-730	
-395	1245	-730	
-895	1745	-730	
-520	1245	-404	Внешняя граница коллектора
-895	1625	-404	
-530	1245	-530	
-895	1615	-530	
-895	1245	-720	
-365	1245	-720	
-895	1775	-720	
-365	1245	-730	
-895	1775	-730	

2) создание линий. На указанных точках строятся концентрические окружности (*Geometry->Create/Modify Curve->Circle from Center and 2 Points* , рисунок 2.26 а), далее по точкам проводятся образующие боковую поверхность коллектора линии (*Geometry->Create/Modify Curve->From Points* , рисунок 2.26 б).

3) создание поверхностей. С применением опции *Geometry-> Create/Modify Surfaces->Curve Driven*  строится боковая поверхность коллектора. Поверхность торца коллектора строится с помощью опции *Geometry-> Create/Modify Surfaces->From Curves*  (рисунок 2.26 в)). Аналогично строится поверхность интерфейса с первой частью воздуховода, которая на рисунке указана обозначением (*). Далее поверхности разбиваются (*Geometry-> Create/Modify Surfaces->Segment/Trim Surface* ) на части по окружностям (**) и (***), для выделения интерфейса с вращающимся колесом вентилятора, который показан на рисунке красным цветом.

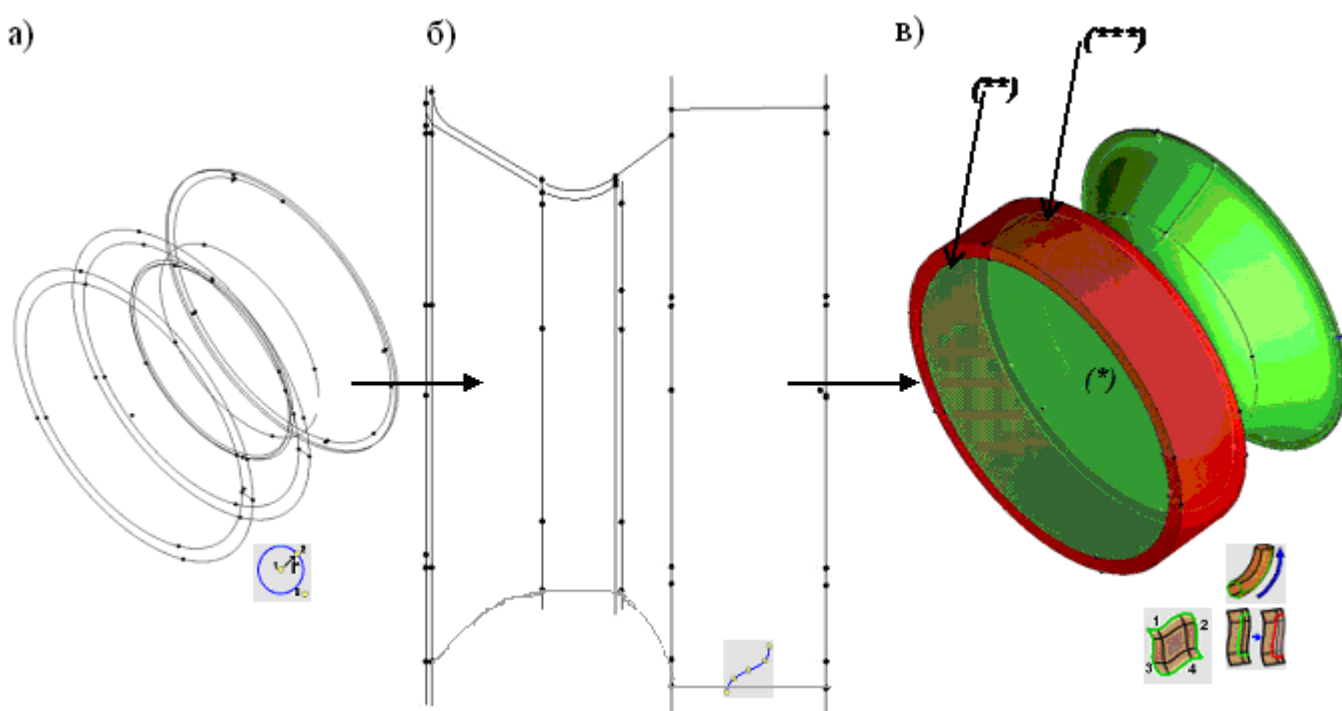


Рисунок 2.26 - а) построение концентрических окружностей с помощью опции *Circle from Center and 2 Points*; б) создание образующих коллектора с помощью опции *From Points* ; в) создание боковой и торцевой поверхностей с помощью опций *Curve Driven* и *From Curves* соответственно, разделение поверхностей с помощью опции *Segment/Trim Surface*.

Общая геометрическая модель улитки имеет вид, представленный на рисунке 2.27.

Далее, построенную геометрию целесообразно разбить на части, на которых впоследствии будут задаваться различные граничные условия. В отдель-

ные части должны быть выделены следующие объекты: поверхность улитки 1, внешняя и внутренняя поверхности коллектора 2, передняя и задняя часть поверхности стенки колеса 3, границы с первой и второй частью воздуховода 4 и 5, три интерфейса с вращающимся колесом вентилятора 6, 7, 8.

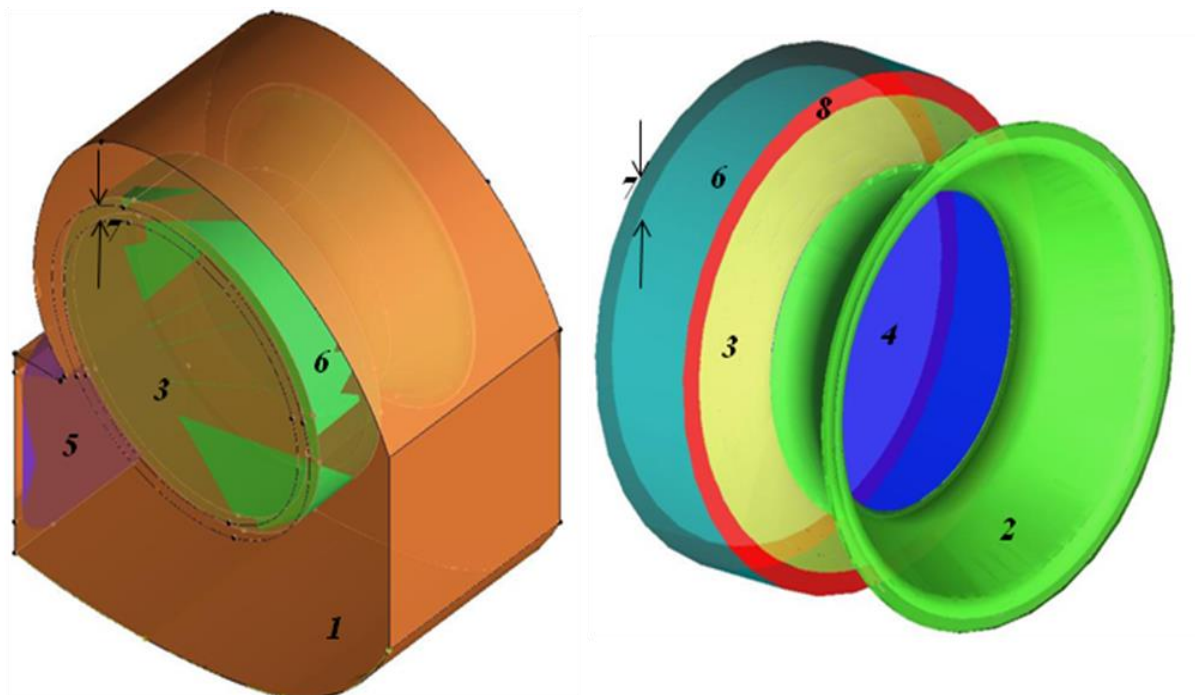


Рисунок 2.27 - Геометрическая модель улитки

в) *построение блочной структуры.*

Ниже приведено пошаговое построение блочной структуры:

1) создание общего блока (рисунок 2.28 а)). Блок создается с применением опции *Blocking->Create Block3D ->Initialize Block*  - *3DBounding Box*. только на круговой части геометрии улитки. Блочную структуру на оставшейся части геометрии целесообразно создать впоследствии;

2) деление блоков. Созданный блок необходимо расщепить так, чтобы граница расчетной области могла быть единственным образом ассоциирована с одной из граней блока.

Деление блока с помощью опции *Blocking-> Split Blok->O-grid Block*  на структуру, указанную на рисунке 2.28 б)). Эта структура необходима для создания границ колеса вентилятора и коллектора. Отметим, что исходный блок делится на четыре нулевых решетки, хотя в соответствии с геометрией расчетной области достаточно было бы создать всего три решетки. Четвертая внут-

ренная решетка создается для того, чтобы обеспечить отсутствие треугольных элементов сеточных элементов в середине конструкции.

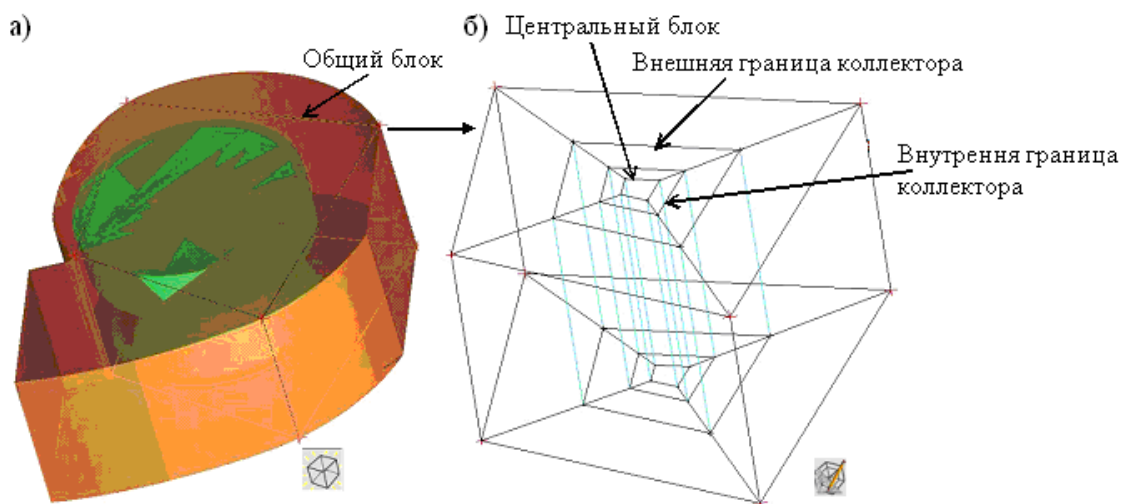


Рисунок 2.28 - а) создание общего блока с помощью *Initialize Block - 3DBounding Box*;

б) последовательное расщепление блока с помощью опции *O-grid Block*

С помощью опции *Blocking->Split Blok->Split Blok*  производится деление всех блоков, кроме четырех внешних, на шесть частей в осевом направлении. Здесь выбираются девять внутренних блоков и осевое ребро блока, по которому необходимо произвести деление. Эта процедура повторяется последовательно пять раз, до результата, проиллюстрированного на рисунке 2.29 а). Создание подобной структуры необходимо для придания блочному каркасу формы, соответствующей форме боковой поверхности коллектора.

3) удаление блоков, находящихся вне границ расчетной области. Разбиение области внутри коллектора и колеса вентилятора данном этапе не производится, поэтому внутренние блоки структуры, отмеченные на рисунке 2.29 б) красным цветом необходимо удалить. Удаление осуществляется с помощью опции *Blocking->Delete Blok* ;

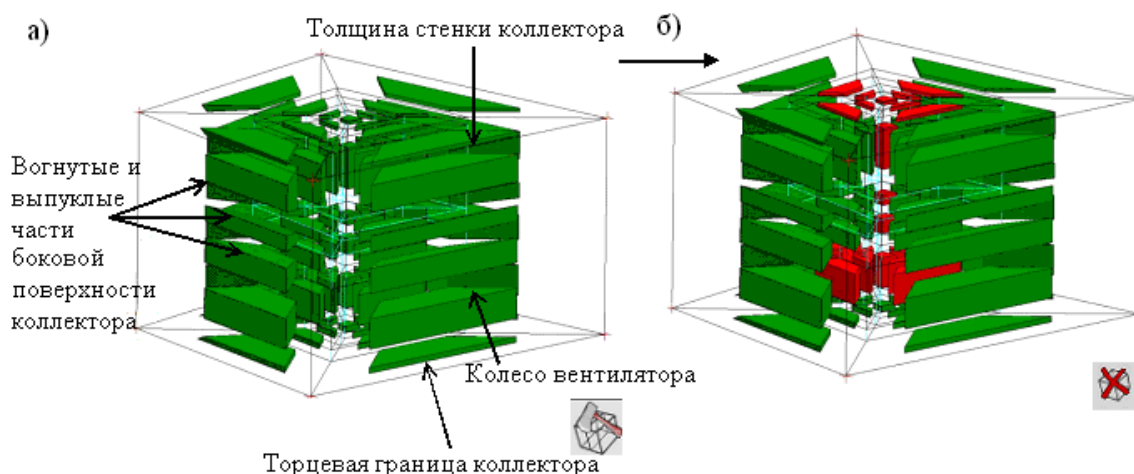


Рисунок 2.29 - а) деление блоков осевым направлением с помощью опции *Split Blok*;

б) удаление блоков красного цвета с помощью опции *Delete Blok*

4) деление грани блока. Для того чтобы создать блочную структуру, в оставшейся части геометрии необходимо боковую грань блока расщепить на три, как показано на рисунке 2.30. Из указанных трех частей впоследствии будет вытянут блок, заполняющий оставшуюся область;

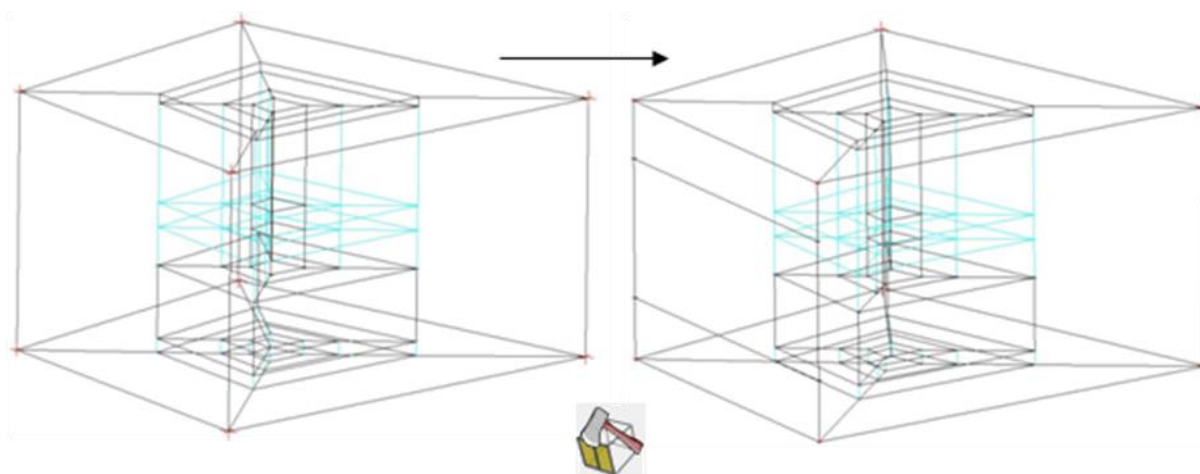


Рисунок 2.30 - Расщепление грани блока на три части с помощью опции *Split Face*

5) вытягивание блока из грани вдоль направляющей (рисунок 2.31 а). Данный этап является завершающим в создании блочного каркаса и осуществляется с помощью опции *Blocking->Create Block3D -> Extrude Face -> Extrude Along Curve* ;

б) ассоциация блоков. Ассоциация вершин блока с точками производится с помощью опции *Blocking->Blocking Associations->Associate Vertex*  (ри-

сунок 2.31 б). Ассоциация граней с линиями производится опцией *Blocking->Blocking Associations-> Associate Edge to Curve*  (рисунок 2.32 а)), ассоциация ребер блока с поверхностями производится с помощью опции *Blocking->Blocking Associations-> Associate Face to Surface*  (рисунок 2.32 б)). Отметим, что необходимости ассоциировать грань блока с поверхностью, если они полностью совпадают, нет. Так же нет необходимости ассоциировать стороны блока с поверхностями, если они являются внешними границами расчетной области. Эти операции производятся автоматически.

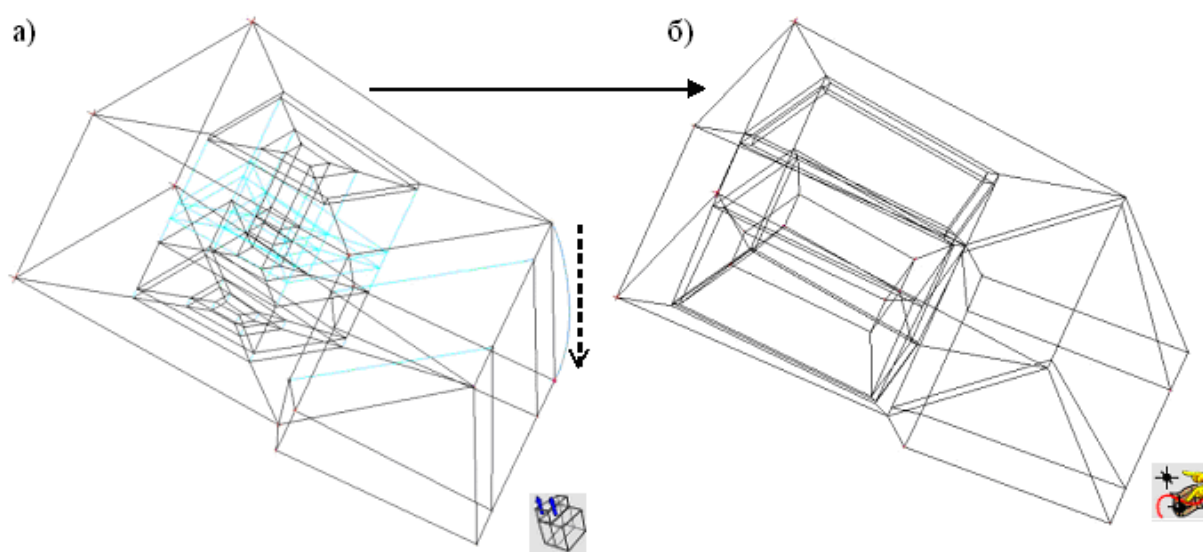


Рисунок 2.31 - а) вытягивание блока вдоль линии с помощью опции *Extrude Along Curve*;

б) ассоциирование вершин блока с точками опцией *Associate Vertex*

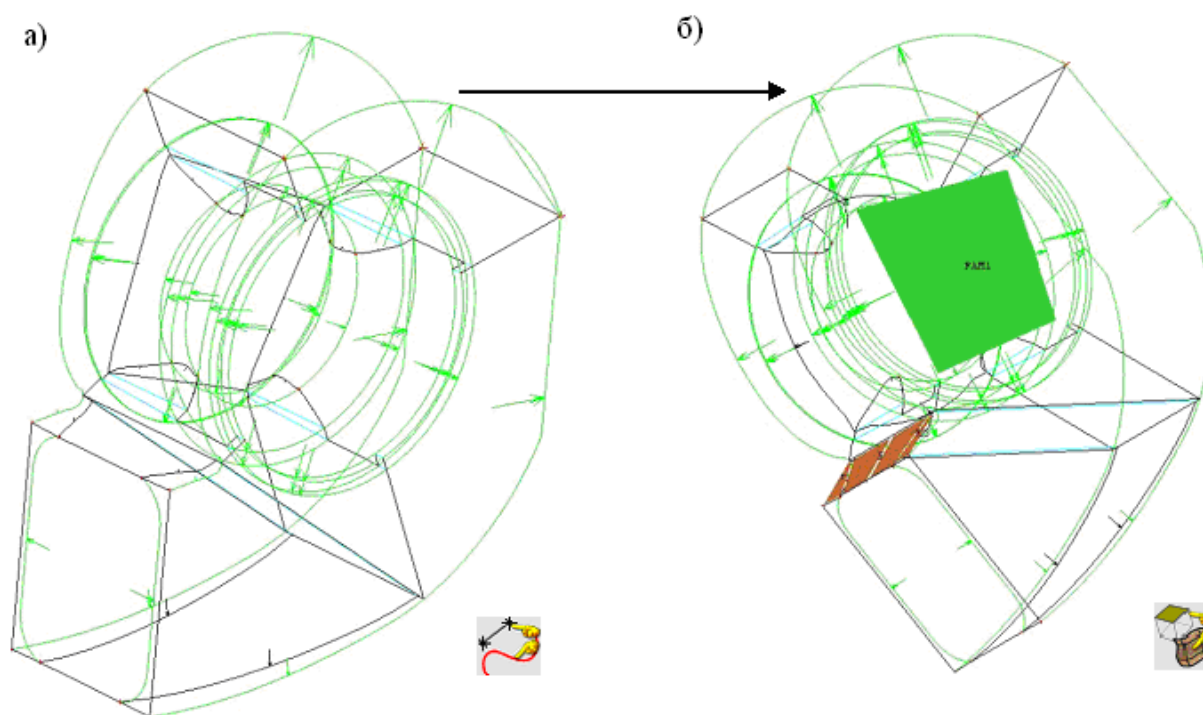


Рисунок 2.32 - а) ассоциирование ребер блока с линиями опцией *Associate Edge to Curve*;

б) ассоциирование граней блока с поверхностями опцией *Associate Face to Surface*

7) установка параметров разбиения производится с помощью опции *Blocking-> Pre-mesh Params->Meshing Patameters* . Число разбиений ребер и задаваемые сгущения приведены в таблице 2.3, при этом наименования ребер представлены на рисунке 2.33. Отметим, что все ребра блоков разбиты равномерно. Целесообразно проверить число узлов сетки, с тем, чтобы в случае необходимости откорректировать число разбиений граней в сторону увеличения или уменьшения числа узлов сетки. Проверка числа узлов осуществляется следующим образом: в дереве видов, при нажатии правой клавишей мыши на элемент *Pre-Mesh* выбирается опция *Show Size Info*. При указанных разбиениях сетка содержит 620 000 узлов.

Таблица 2.3 - Число разбиений ребер

Ребро	Число разбиений
<i>AB</i> и параллельные ему ребра	44
<i>AC</i> и параллельные ему ребра	31

CD и параллельные ему ребра	9
DE и параллельные ему ребра	14
FG и параллельные ему ребра	9
HI и параллельные ему ребра	27
JK и параллельные ему ребра	31
LM и параллельные ему ребра	9
NO и параллельные ему ребра	40

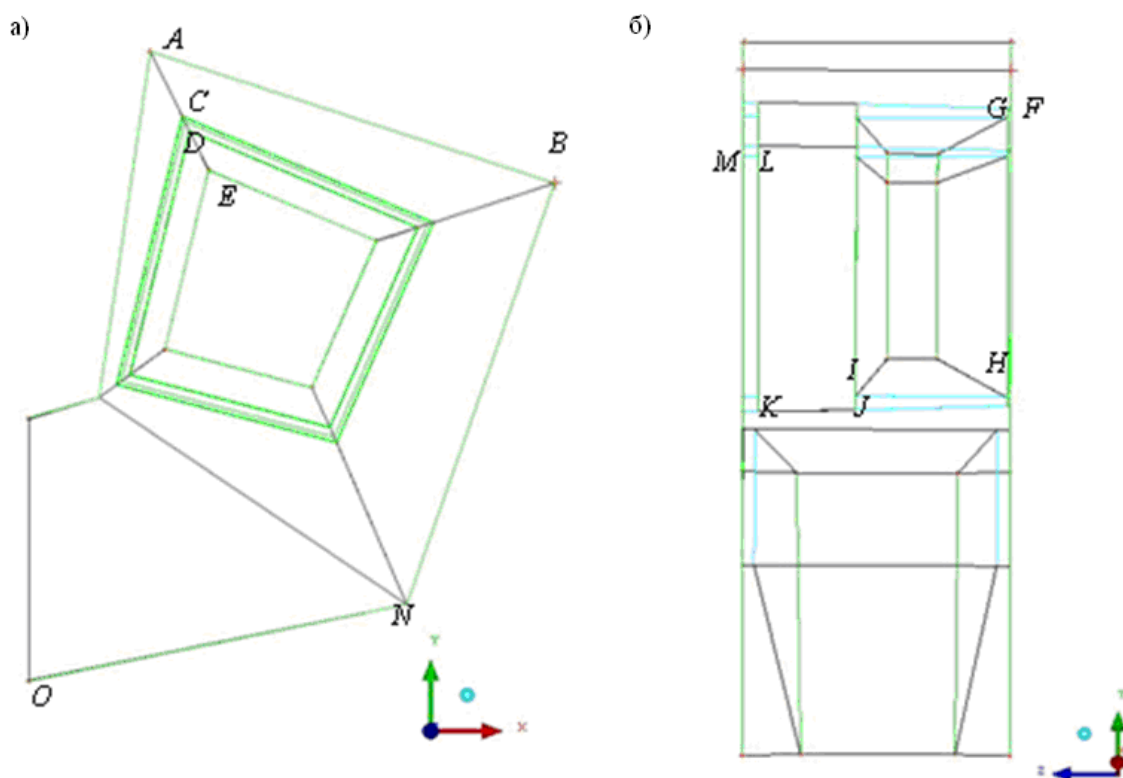


Рисунок 2.33 - а) вид блочной структуры спереди;б) вид блочной структуры сбоку

8) проверка качества сетки. Во-первых, следует отобразить на экране прообраз сетки (рисунок 2.34), активировав галочку *Model->Blocking->Pre-Mesh* во вкладке дерева видов. Если визуально ошибок в прообразе сетки не найдено, то это не означает, что будет получена сетка высокого качества. Для более детальной проверки пакет содержит ряд опций. Одной из наиболее эффективных является диаграмма качества, с помощью которой можно выявить неявные ошибки в прообразе сетки (в большинстве случаев найти вырожденные элементы, имеющие отрицательный объем), а так же найти элементы, обладающие неудовлетворительным качеством (в большинстве случаев это гексаэдрические элементы со слишком острыми или слишком тупыми углами). По-

строение диаграммы качества осуществляется с помощью опции *Blocking->Pre-Mesh Quality* . Для рассматриваемой задачи диаграмма качества приведена на рисунке 2.35, и качество сетки по этой диаграмме можно считать удовлетворительным. Элементы пониженного качества сконцентрированы по краям границы улитки и второй части воздуховода, а так же в зоне искривления боковой поверхности коллектора, что связано с особенностями геометрии расчетной области.

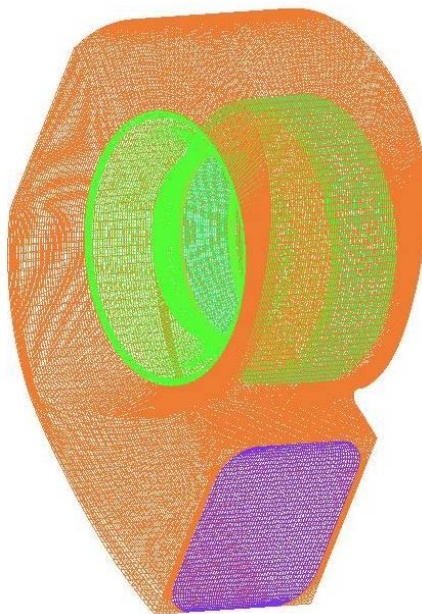


Рисунок 2.34 - Прообраз сетки

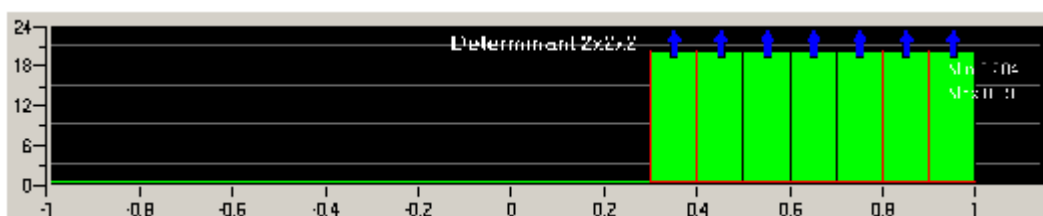


Рисунок 2.35 - Диаграмма качества

9) создание сетки. На рисунке 2.36 а)-г) приведена построенная сеточная модель. Создание сетки производится с помощью опции *Model->Blocking->Pre-Mesh->Convert To Unstruct Mesh* во вкладке дерева видов. После создания сетки ее можно экспортировать в препроцессор. На этом процесс построения сетки в пакете Ansys Meshing/Ansys Extended Meshing можно считать завершенным.

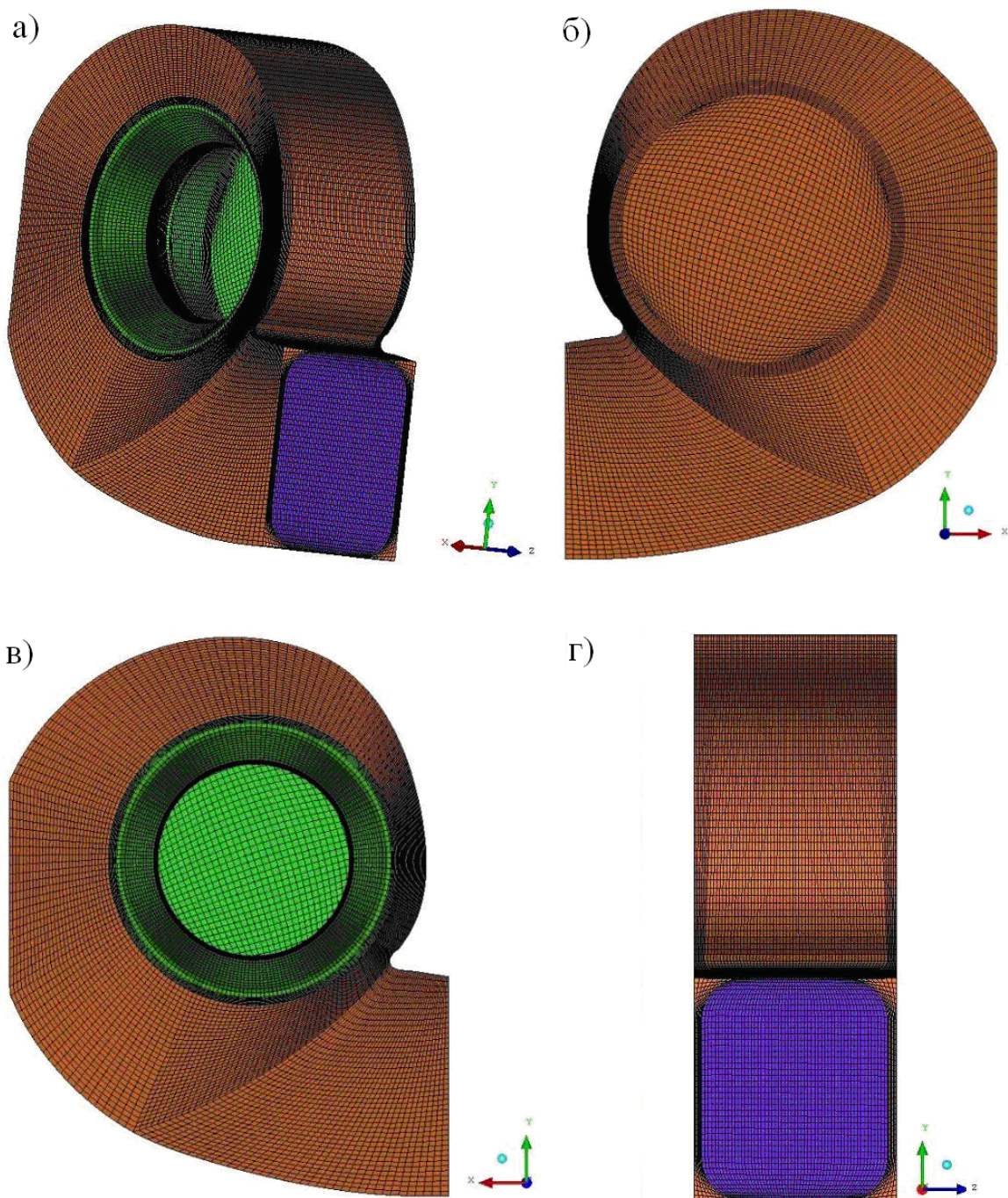


Рисунок 2.36 - а) пространственный вид сеточной модели улитки; б) вид сеточной модели спереди; в) вид сеточной модели сзади; г) вид сеточной модели сбоку

2.4.3.2 Построение модели колеса вентилятора:

а) *создание геометрии*. Геометрия стенок колеса вентилятора (рисунок 2.37) создана при построении геометрической модели улитки.

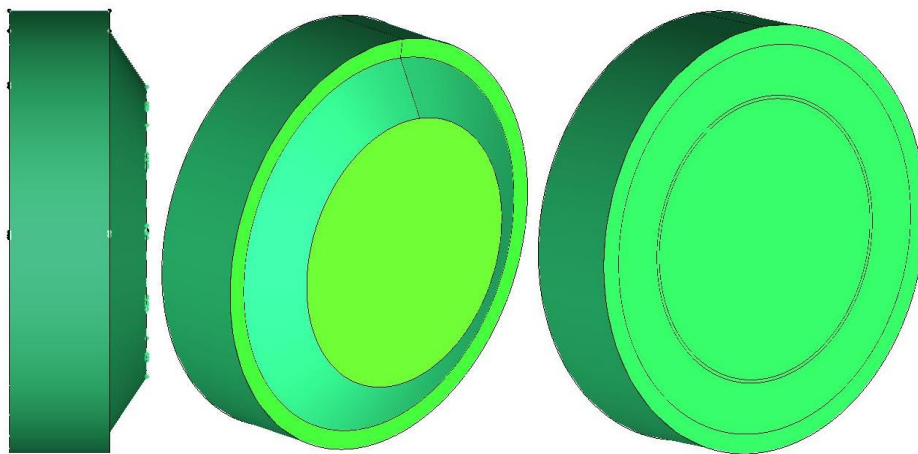


Рисунок 2.37 - Вид колеса вентилятора в разных ракурсах

Координаты профилей двенадцати равномерно распределенных по внутреннему ободу колеса лопастей экспортируются в Ansys Meshing/Ansys Extended Meshing, используя опцию главного меню *File-> Import Geometry*.

На рисунке 2.38 приведена схема построения профиля одной из лопаток, для остальных процедура аналогична.

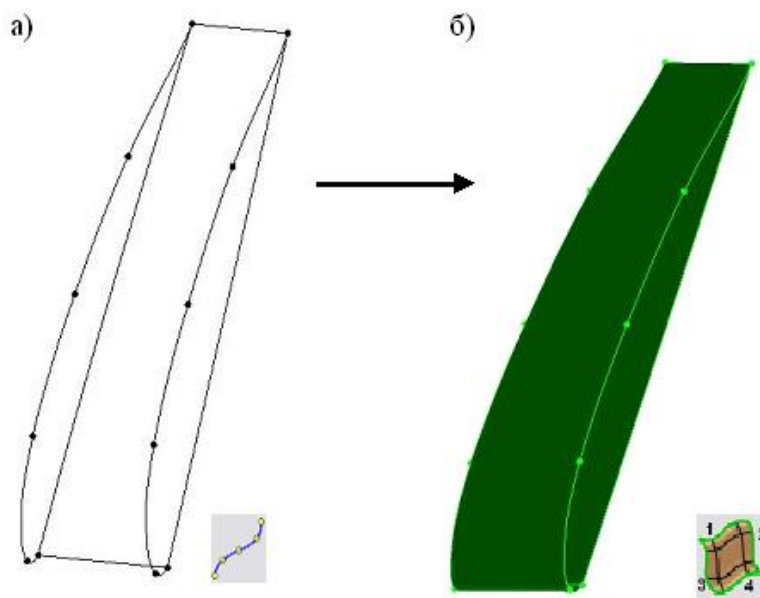


Рисунок 2.38 - а) создание линий по точкам с помощью опции *From Points*;

б) создание поверхности лопасти с помощью опций *From Curves*

Итоговая геометрия колеса вентилятора в различных ракурсах имеет вид, показанный на рисунке 2.39. Аналогично шагам построения геометрической модели улитки, далее производится разделение геометрии на части. В отдельные части должны быть выделены следующие объекты (см. рисунок 2.39): три интерфейса с неподвижной областью улитки 1, 2 и 3, граница колеса с кол-

латором 4, торцевая поверхность колеса 5 и поверхности лопастей вентилятора 6.

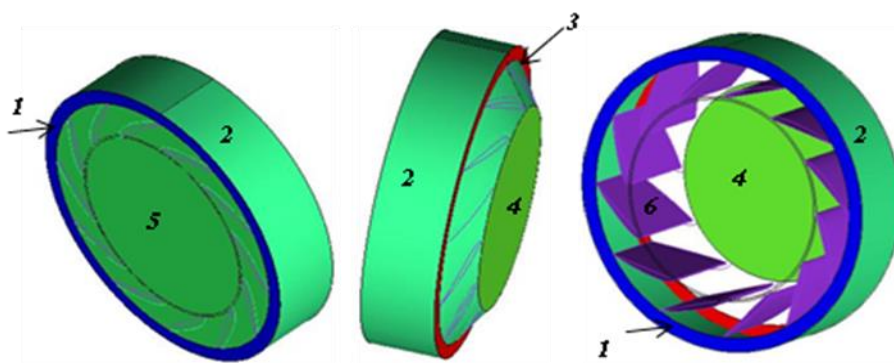


Рисунок 2.39 - Геометрическая модель колеса вентилятора

б) *построение блочной структуры:*

1) создание общего блока (рисунок 2.40 а). Блок создается с применением опции *Blocking->Create Block3D ->Initialize Block*  - *3DBounding Box*;

2) деление блоков. Созданный блок необходимо расщепить так, чтобы граница расчетной области могла быть единственным образом ассоциирована с одной из граней блока. Деление блока производится на структуру, указанную на рисунке 2.40 б) с помощью опции *Blocking->Split Blok->O-grid Block* . Подобная структура необходима для создания внутренней и внешней границ лопастей. Далее, для удобства работы, созданной блочной структуре придается форма, представленная на рисунке 2.40 в) путем ассоциирования вершин блока с соответствующими точками.

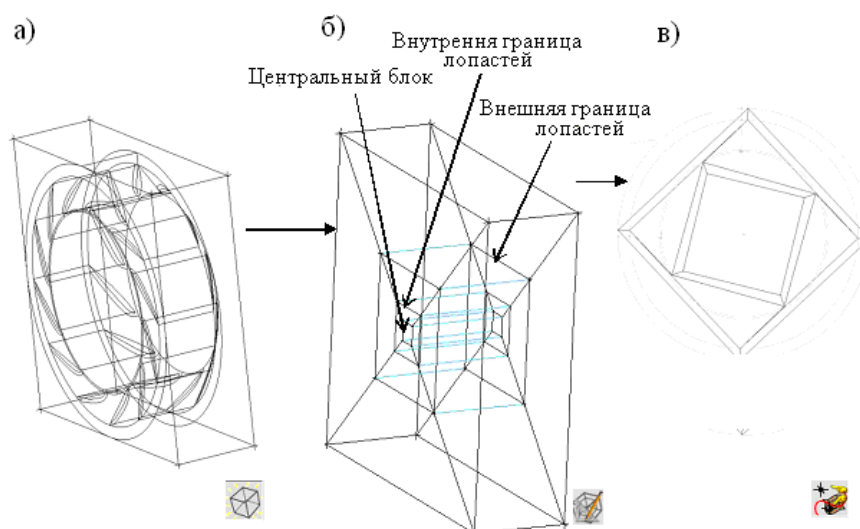


Рисунок 2.40 - а) создание общего блока с помощью *Initialize Block - 3DBounding Box*;

- б) последовательное расщепление блока с помощью опции *O-grid Block*;
 - в) ассоциирование вершин блока с точками с помощью опции *Associate Vertex*
- Деление блоков проводится с помощью опции *Blocking->Split Blok->Split*

 . Этот шаг рассматривается на одной четвертой части блочной структуры (рисунок 2.41 а); для остальных трех частей процесс идентичен. Деление блоков на структуру, показанную на рисунке 2.41 б), необходимо для выделения в отдельные области профилей лопастей;

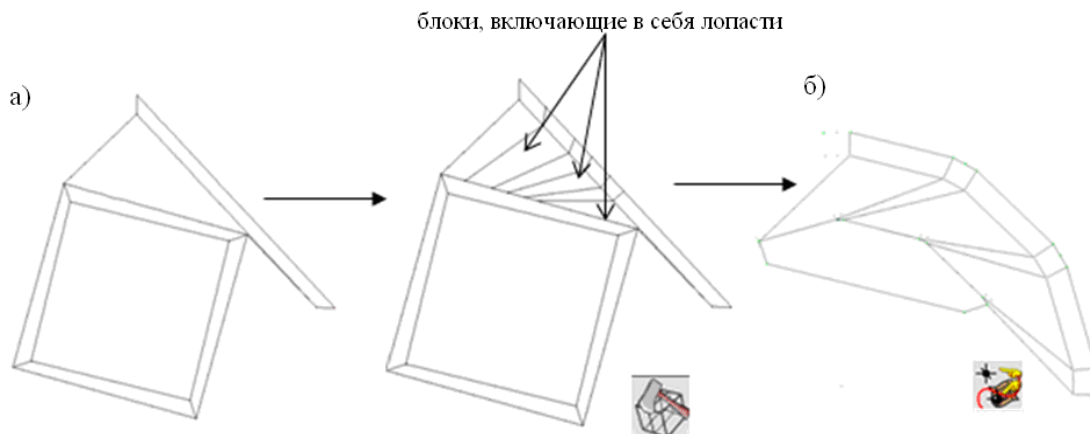
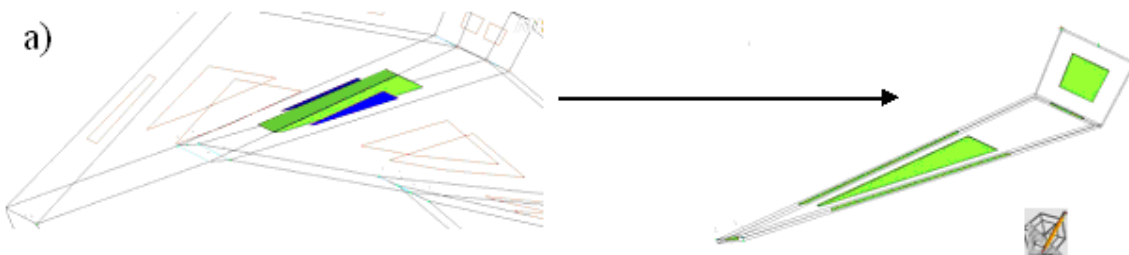


Рисунок 2.41 - а) расщепление блоков с помощью опции *Split Blok*;
б) ассоциирование вершин блока с точками с помощью опции *Associate Vertex*

3) создание блочной структуры для разбиения на узлы (меширования) профиля лопасти. На этом этапе подробно рассматривается процесс модификации одного из блоков для последующего меширования модели лопасти. Для остальных одиннадцати блоков, каждый из которых соответствует модели лопасти рабочего колеса, процедура полностью аналогична.

Во-первых, блок, выделенный под профиль лопасти, разбивается с применением опции *Blocking->Split Blok->O-grid Block*  на пять частей, как это показано на рисунке 2.42 а). Во-вторых, блоки, отмеченные на рисунке 2.42 б) необходимо удалить, так как области внутри лопастей не входят в расчетную область.



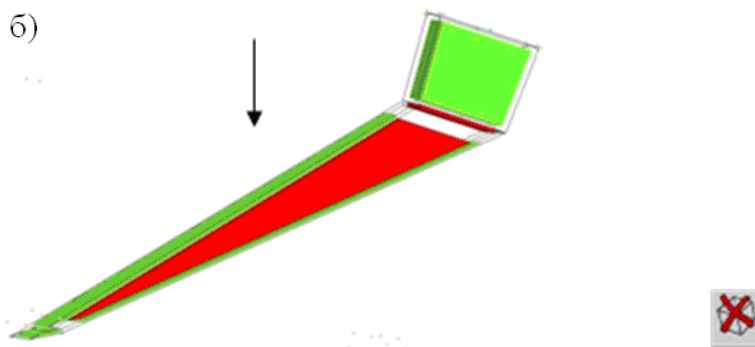


Рисунок 2.42 - а) Расщепление блока с помощью опции *O-grid Block*;
б) удаление блоков красного цвета с помощью опции *Delete Blok*

В-третьих, необходимо провести ассоциирование вершин блоков с соответствующими точками на профиле лопасти. На рисунке 2.43 показан результат ассоциирования вершин в нижней части лопасти. На рисунке 2.44 - процесс ассоциирования в верхней части лопасти. Рассмотрим его более подробно. Здесь необходимо попарные вершины блока слить в одну, ассоциировав их с точками *A* и *B*. Далее верхний блок разбивается на две части опцией *Blocking->Split Blok->Split Blok*



(рисунок 2.44 б). Две новые вершины верхнего блока так же должны быть перемещены в точки *A* и *B*. Таким образом, с указанными точками оказываются ассоциированными по три вершины. Для установления между геометрией и блочной структурой взаимно-однозначного соответствия, вершины, расположенные в одной и той же точке пространства, должны быть слиты в одну с помощью опции *Blocking->Merge Vertices->Merge Vertices by*



Tolerance;

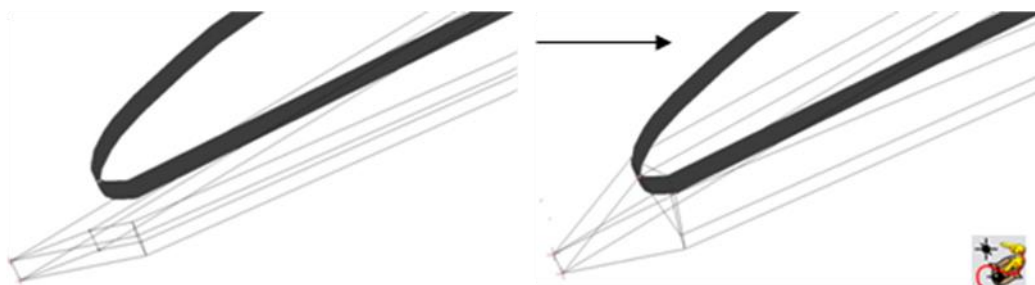


Рисунок 2.43 - Ассоциирование вершин блока с точками с помощью опции *Associate Vertex*

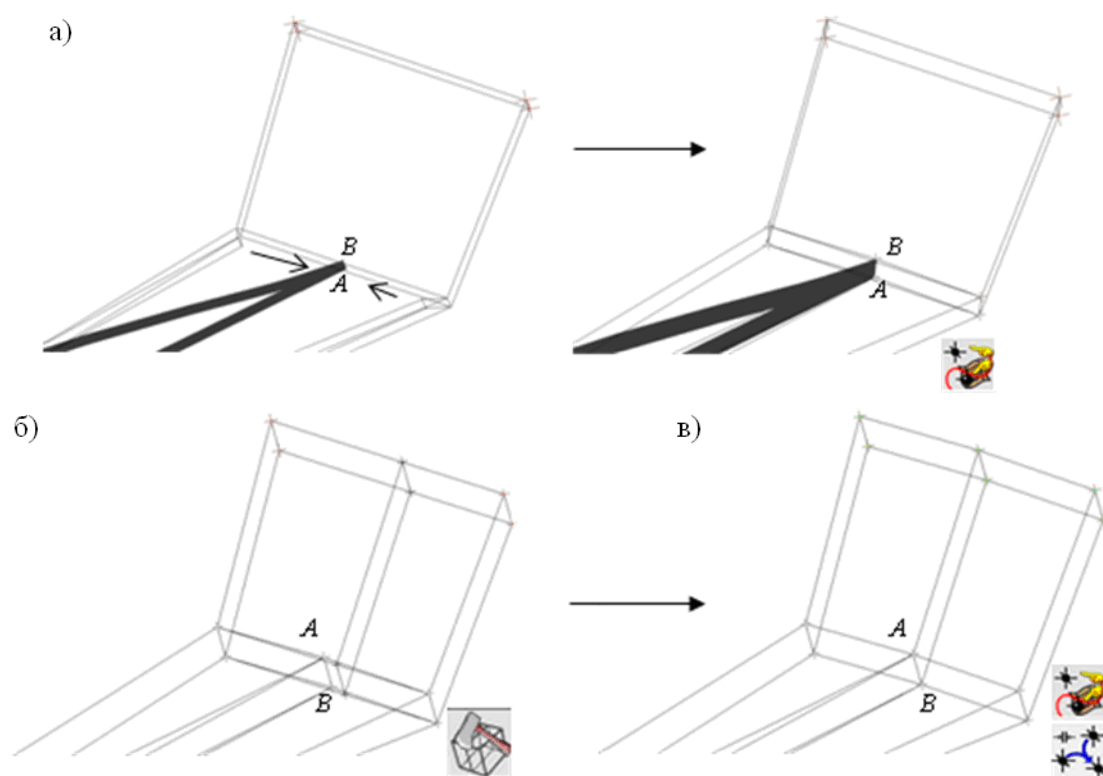


Рисунок 2.44 - а) ассоциирование вершин блока с точками опцией *Associate Vertex*;

б) расщепление верхнего блока с помощью опции *Split Blok*;

в) ассоциирование вершин блока с точками опцией *Associate Vertex* истягивание вершин в одну опцией *Merge Vertices by Tolerance*

4) ассоциация блоков. Необходимо ассоциировать грани блоков с соответствующими линиями с помощью опции *Blocking->Blocking Associations->Associate Edge to Curve* . Для профилей процесс ассоциации показан на рисунке 2.45. На рисунке 2.46 представлена общая картина блочной структуры (вид спереди) со всеми требуемыми ассоциациями. Отметим, что для данной структуры необходимости ассоциировать грани блоков с поверхностями нет, так как расчетная область не содержит внутренних границ;

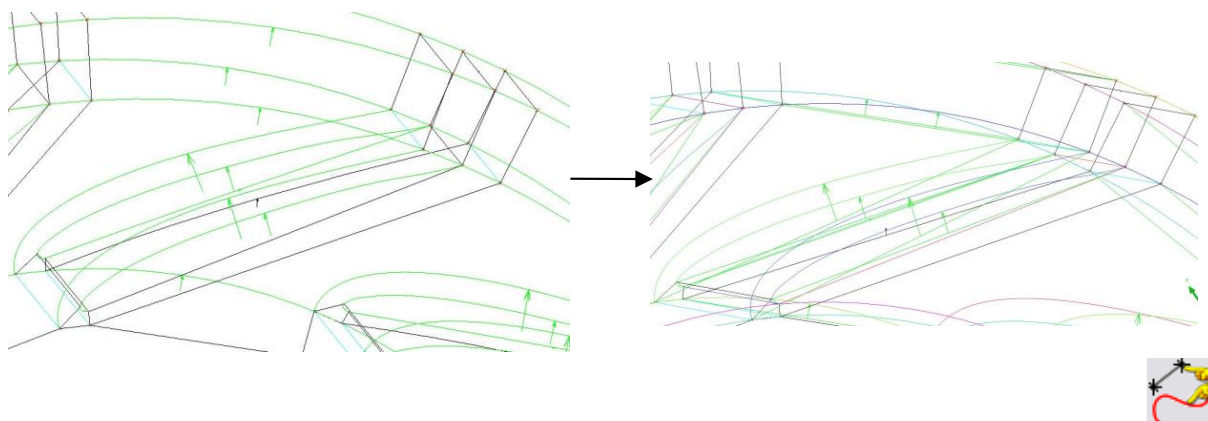


Рисунок 2.45 - Ассоциирование ребер с линиями профиля лопасти с помощью опции *Associate Edge to Curve*

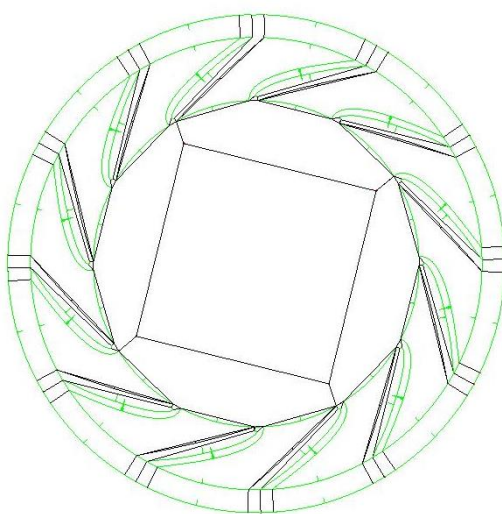


Рисунок 2.46 - Общий вид ассоциированной блочной структуры

5) установка параметров разбиения проводится с помощью опции *Blocking->Pre-mesh Params->Meshing Patameters*. Число разбиений ребер и задаваемые сгущения приведены в таблице 2.4; соответствующие наименования ребер представлены на рисунке 2.47. При указанном числе разбиений сетка содержит 620 000 узлов;

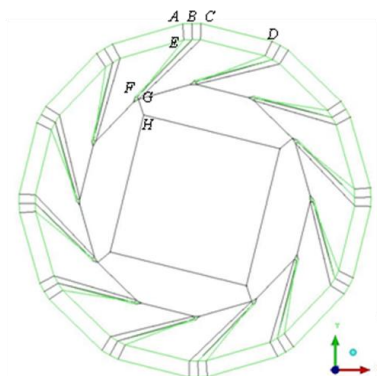


Рисунок 2.47 - Наименования ребер

Таблица 2.4 - Число разбиений ребер

Ребро	Число разбиений	Тип сгущения узлов
Все ребра типа AB и параллель-	9	Равномерное
Все ребра типа BC и параллель-	9	Равномерное
Все ребра типа CD и параллель-	17	Сгущение к обоим конца
AE и параллельные ему ребра	10	Равномерное
EF и параллельные ему ребра	24	Сгущение к обоим конца
GH и параллельные ему ребра	12	Равномерное
Все ребра, параллельные оси z	30	Равномерное

6) проверка качества сетки. Прообраз сетки показан на рисунке 2.48, диаграмма качества - на рисунке 2.49. Наихудшие по качеству 516 элементов сетки расположены на нагнетающих сторонах профилей лопастей; вместе с тем, качество сетки можно считать удовлетворительным;

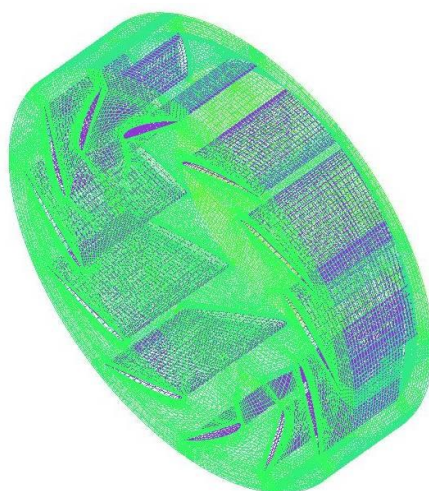


Рисунок 2.48 - Прообраз сетки

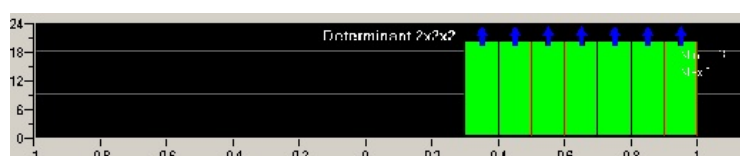


Рисунок 2.49 - Диаграмма качества

7) создание сетки. На рисунке 2.50 а-г) в разных ракурсах приведена построенная сеточная модель

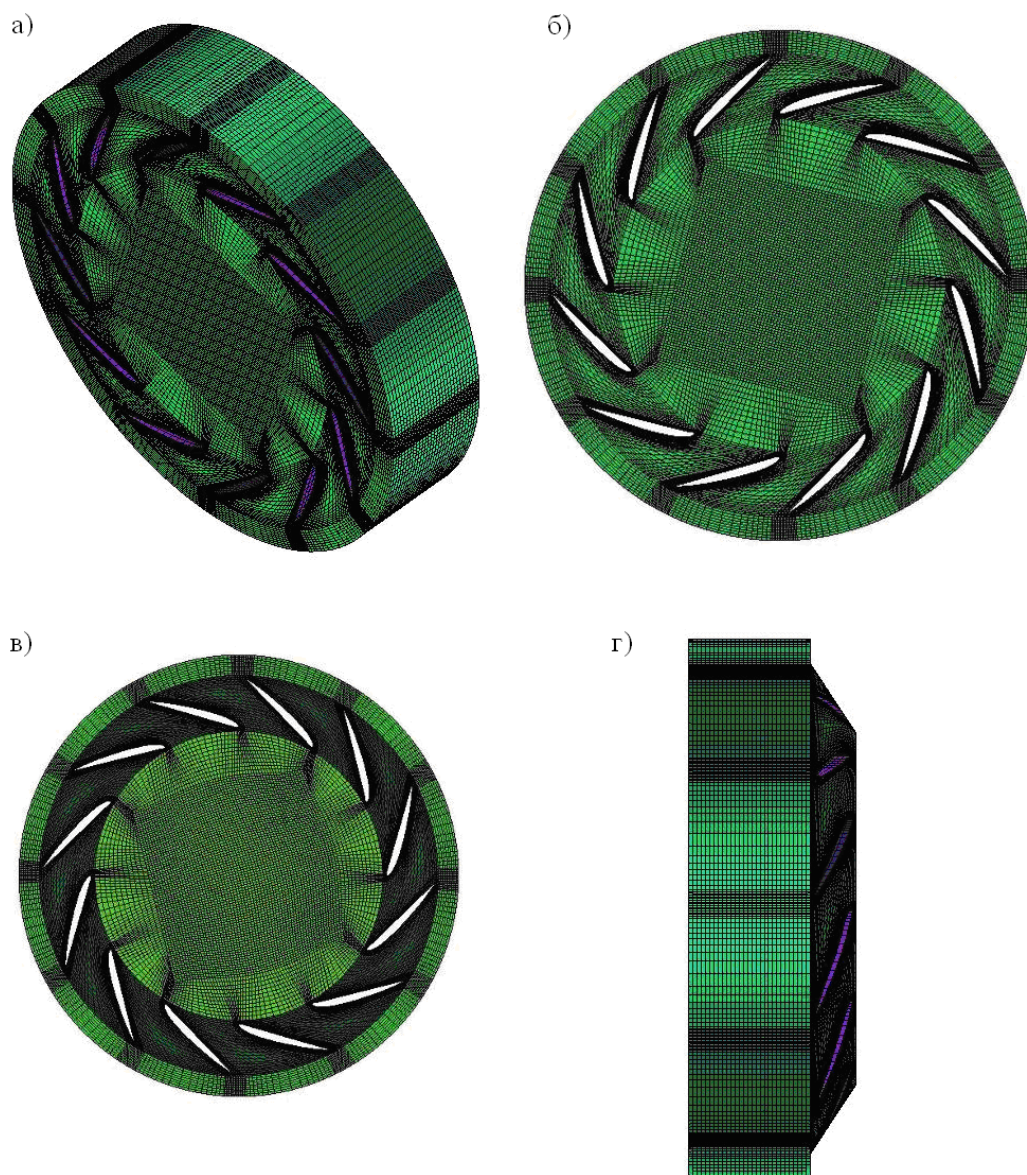


Рисунок 2.50 - а) общий вид сетки; б) вид сетки спереди;
в) вид сетки сзади; г) вид сетки сбоку

2.4.4 Экспорт сеточной модели

На последнем этапе работы в пакете Ansys Extended Meshing необходимо подготовить файл сеточной модели, который будет в дальнейшем экспортирован в препроцессор пакета ANSYS CFX. Для каждой из пяти построенных сеточных моделей формируется файл с расширением .cfx5. Создание его осуществляется следующим образом: в блоке *Output* выбирается опция *Select Solver* , в окне *Output Solver* выбирается пакет ANSYS CFX, в окне *Common Structural Solver* выбирается ANSYS (рисунок 2.51 а)). Далее выбирается опция

Output->Write Input  и в появляющемся диалоговом окне прописывается имя экспортируемого файла сеточной модели с расширением .cfx5 (рисунок 2.51 б)).

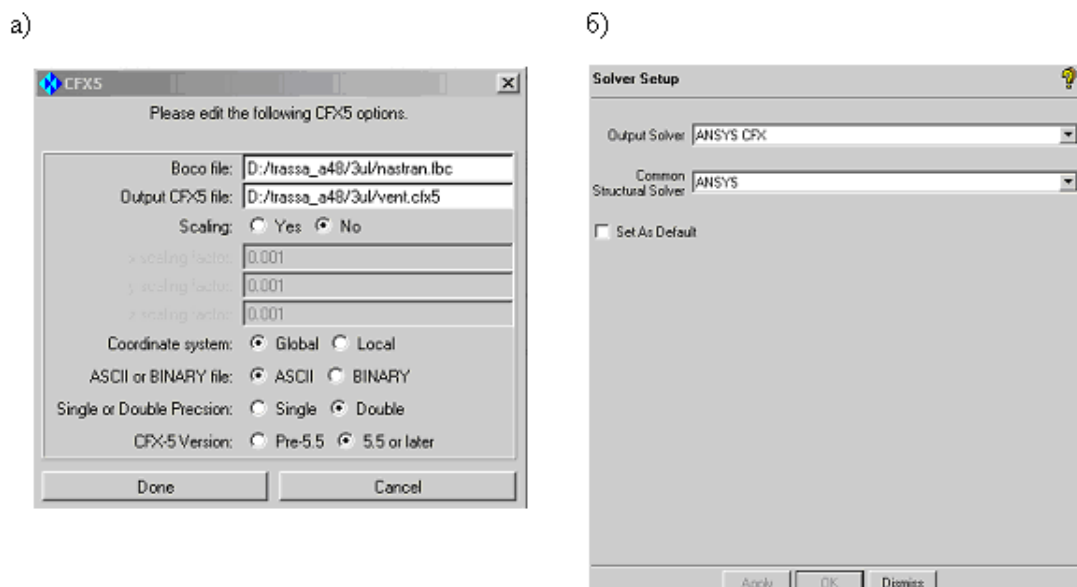


Рисунок 2.51 - а) применение опции *Select Solver*; б) применение опции *Write Input*

Полная сеточная модель содержит 3 млн. узлов.

2.4.5 Работа в среде ANSYS CFX-Pre

В препроцессоре пакета ANSYS CFX осуществляется физико-математическая постановка задачи, задаются свойства сред, граничные и начальные условия, методы решения, шаги интегрирования и т.д.

Ниже рассматривается поэтапная техническая реализация создания физико-математической модели в ANSYS CFX-Pre. Схематично работу в препроцессоре целесообразно проводить по схеме, представленной на рисунке 2.52.

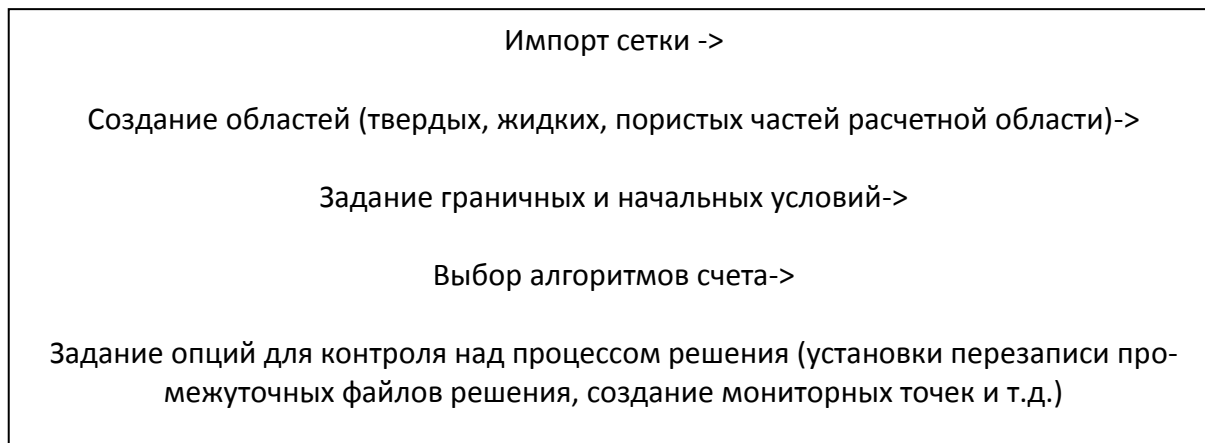


Рисунок 2.52 - Этапы работы в препроцессоре ANSYS CFX

2.4.6 Импорт сеточной модели

Сеточная модель, созданная в Ansys Meshing/Ansys Extended Meshing, должна быть импортирована в CFX-Pre. Для каждой из пяти частей расчетной области импорт сетки осуществляется следующим образом. В главном меню выбирается опция *File->Import Mesh*. В появляющемся диалоговом окне в графе *Files of Type* выбирается *Ansys Extended Meshing*, в графе *Mesh Units* – *mm*, так как при построении размеры геометрической модели задавались в миллиметрах (рисунок 2.53). В графе *File name* выбирается имя файла с расширением *.cfx5, который необходимо импортировать.

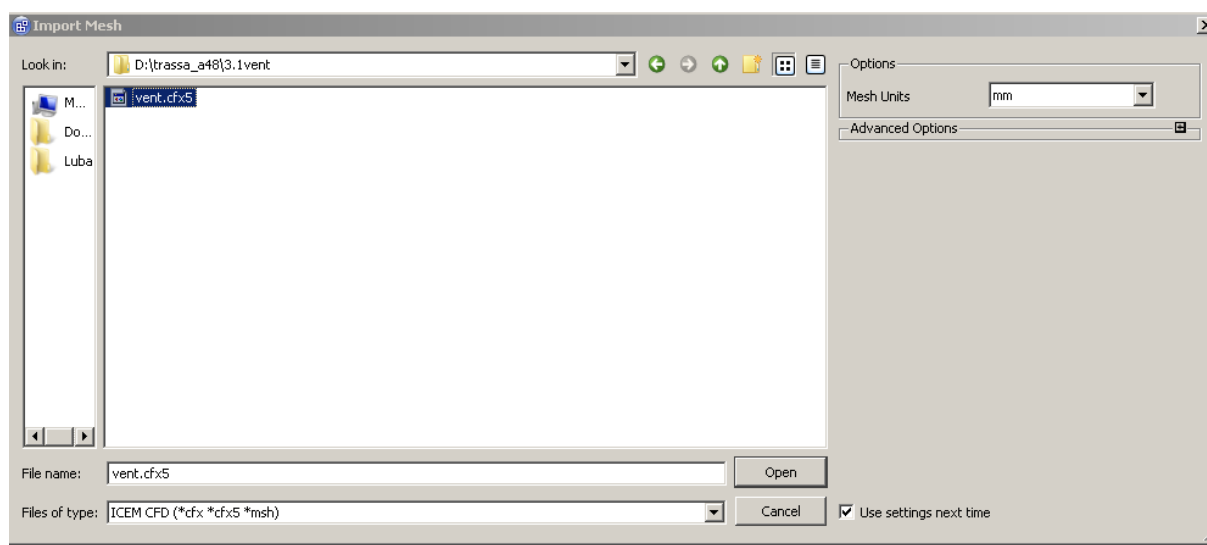


Рисунок 2.53 - Окно *Import Mesh*

2.4.7 Постановка задачи для областей моделей улитки и первой части воздуховода

2.4.7.1 Создание области

Расчетная область (рисунок 2.54) создается при выборе опции главного меню *Insert->Domain*.

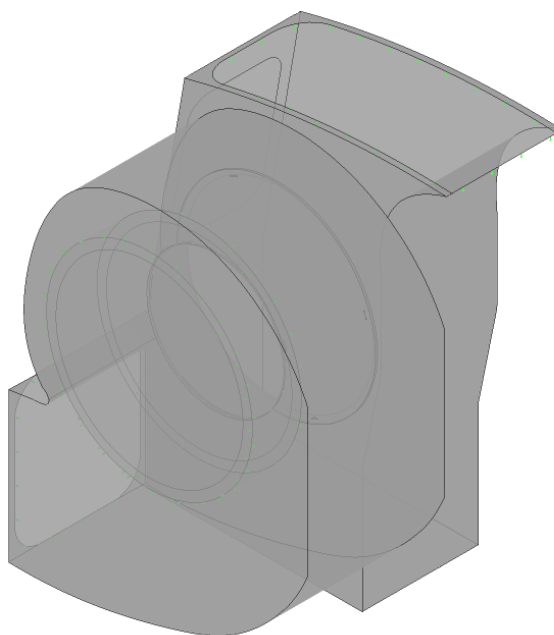


Рисунок 2.54 - Область улитки и первой части воздуховода

Далее, ставится физико-математическая задача для расчетной области.

На вкладке *Basic Settings* (рисунок 2.55) выбираются:

- в поле *Location* - части расчетной области, включаемые в область (улитка, первая часть воздуховода);
- в поле *Domain Type* - тип области (жидкая область);
- в разделе *Fluid and Particle Definitions* - жидкие среды, находящиеся в области (воздух при 25° C);
- в разделе *Morphology* – неразрывная жидкость;
- в поле *Reference Pressure* – атмосферное давление;
- в разделе *Buoyancy Model* - отсутствие гравитации;
- в разделе *Domain motions* – область неподвижна;
- в разделе *Mesh Deformation* – отсутствие деформаций сетки.

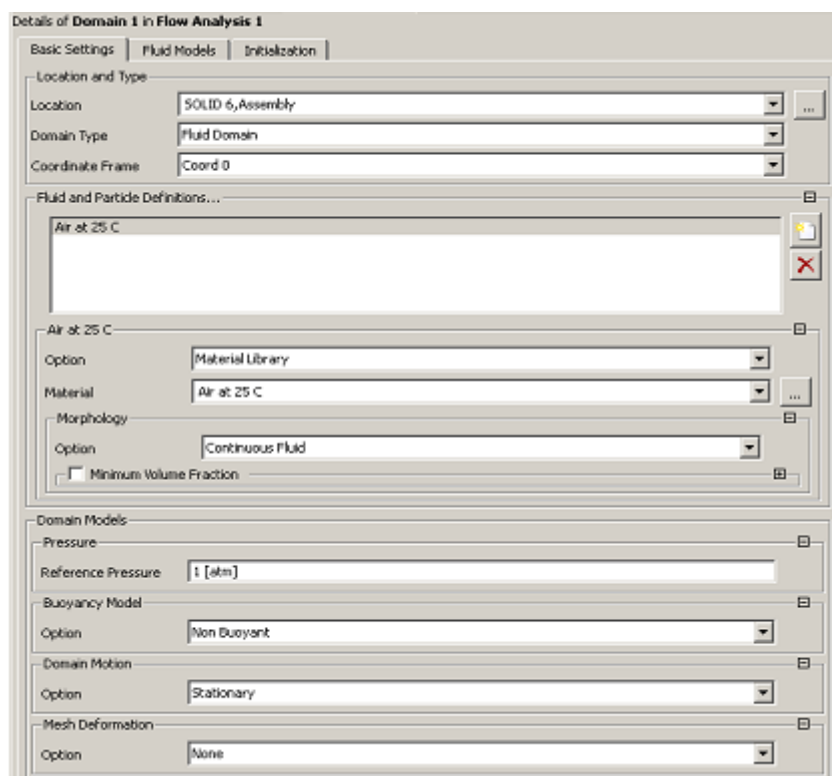


Рисунок 2.55 - Вкладка *Basic Settings*

На вкладке *Fluid Models* (рисунок 2.56) устанавливаются следующие значения:

- *Heat transfer* – none, т.е. задача решается без учета теплопередачи;
- *Turbulence* – Shear Stress Transport, в задаче используется SST-модель турбулентности Ментера;
- остальные параметры остаются, по умолчанию, неактивными, так как в задаче нет необходимости моделировать горение и теплоизлучение.

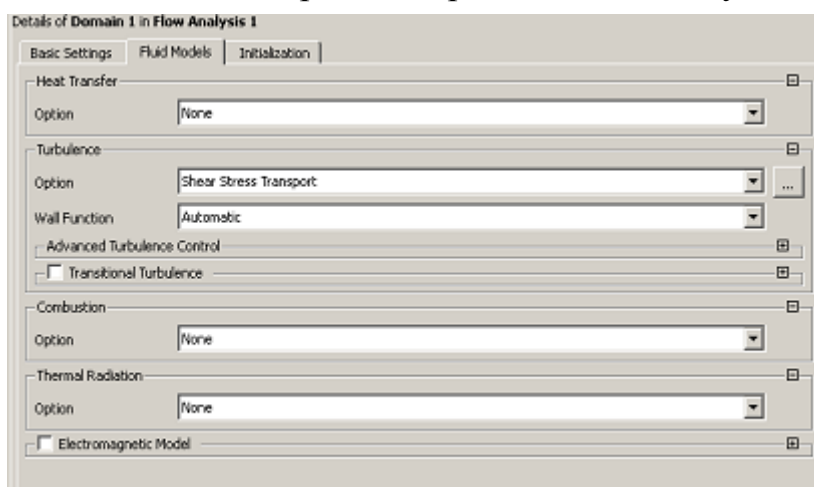


Рисунок 2.56 - Вкладка *Fluid Models*

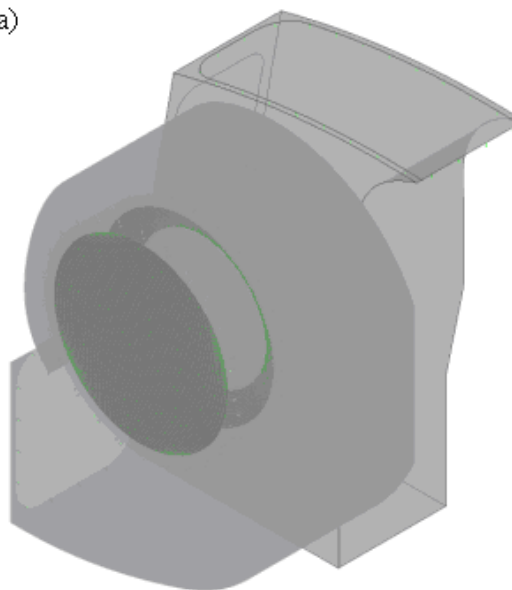
Вкладка *Initialization* остается неактивной. Это означает, что в области выставляются начальные условия по умолчанию, а именно: нулевые поля скоростей и нулевое избыточное давление.

2.4.7.2 Задание граничных условий

Границы области формируются при выборе опции главного меню *Insert-> Boundary*. Необходимо сформировать следующие границы:

- подвижная стенка (рисунок 2.57 а)); на этой границе задаются условие прилипания, компоненты окружной скорости в цилиндрических координатах, а так же по двум точкам ось вращения границы (рисунок 2.57 б));

а)



б)

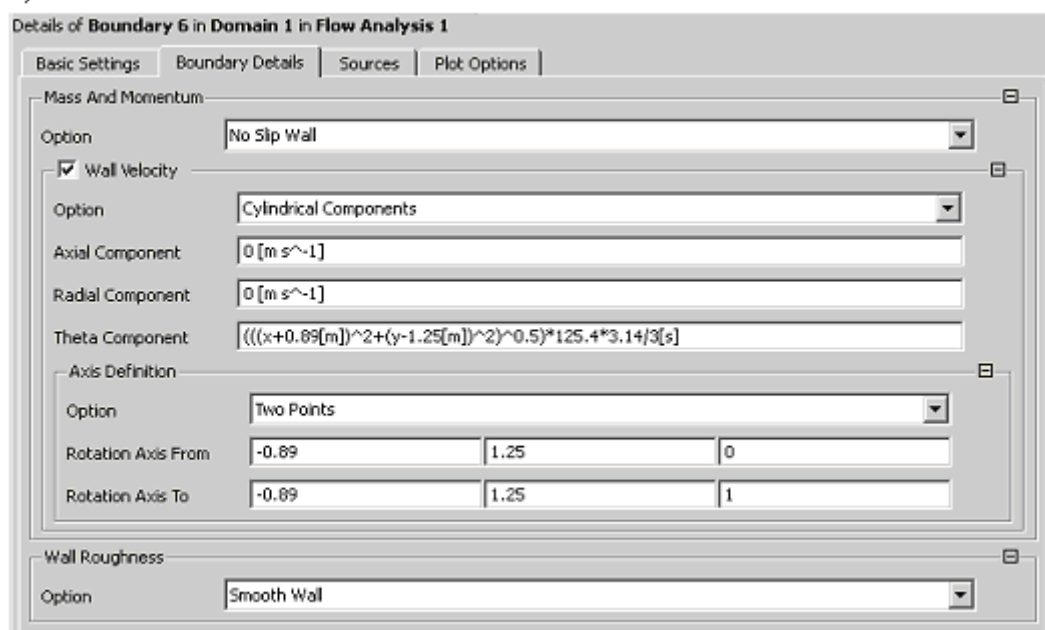


Рисунок 2.57 - а) граница *Boundary 6*;
б) задание граничных условий на *Boundary 6*

– все остальные границы по умолчанию являются неподвижными стенками с заданным на них условием непротекания и прилипания. Такой тип границ, создается автоматически и именуется *Domain Default*. Позже, на части границ, помещенных в *Domain Default* необходимо создать интерфейсы с другими областями задачи (входом, второй частью воздуховода и колесом вентилятора). Оставшиеся границы остаются в *Domain Default*.

2.4.8 Постановка задачи для области воздушной подушки

2.4.8.1 Создание области

Область, созданная для моделирования воздушной подушки, имеет вид, показанный на рисунке 2.58. Как и область улитки и первой части воздуховода, она «заполняется» воздухом при 25°C. Поэтому, все характеристики на вкладках *Basic Settings*, *Fluid Models*, *Initialization* автоматически устанавливаются для рассматриваемой области идентичными области улитки и первой части воздуховода.

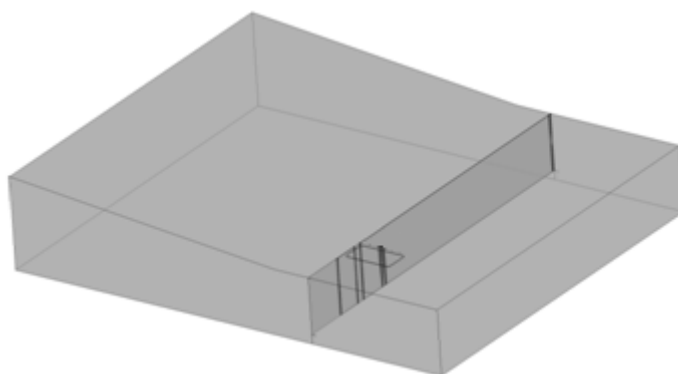


Рисунок 2.58 - Область воздушной подушки

2.4.8.2 Задание граничных условий

В области воздушной подушки (ВП) необходимо создать следующие границы:

- три неподвижных стенки с заданным на них условием прилипания и непротекания (рисунок 2.59);
- выход расчетной области (рисунок 2.60) со средним нулевым избыточным давлением (рисунок 2.61);
- на оставшихся границах области, не включенных в указанные границы, впоследствии будут созданы интерфейсы с другими частями расчетной области (пункт 2.4.12).

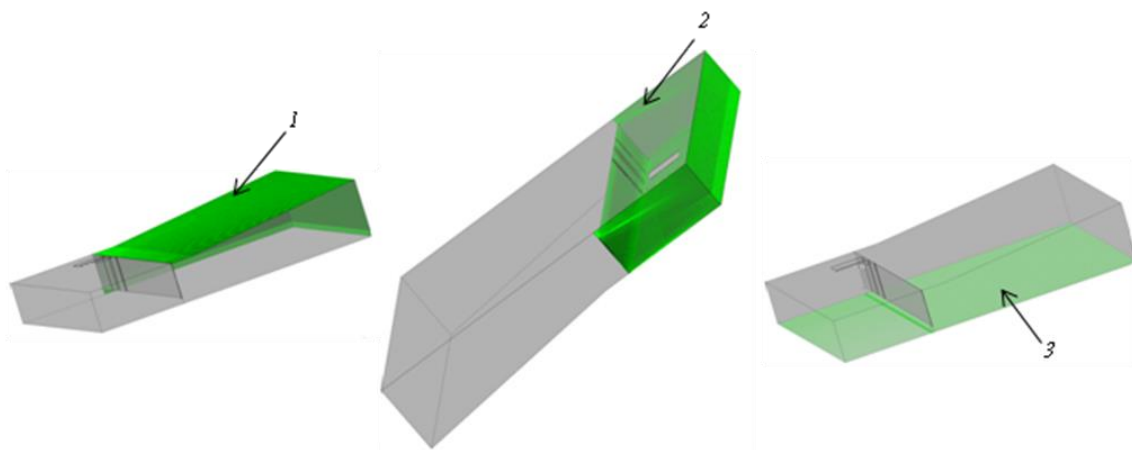


Рисунок 2.59 - Неподвижные стенки в области ВП

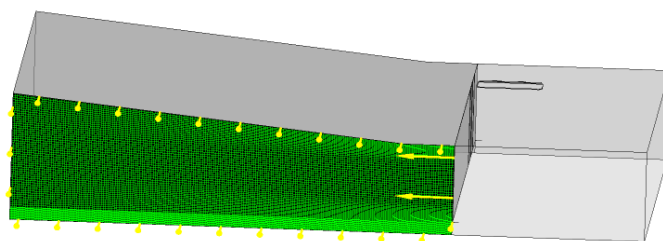


Рисунок 2.60 - Выход расчетной области

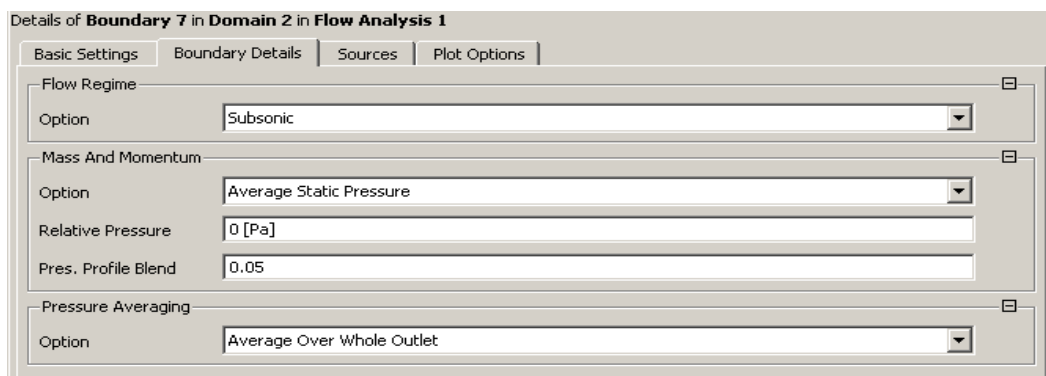


Рисунок 2.61 - Задание граничного условия на выходе

2.4.9 Постановка задачи для области второй части воздуховода

2.4.9.1 Создание области

Область второй части воздуховода (рисунок 2.62), как и предыдущие содержит воздух при 25°C, поэтому никаких дополнительных характеристик для нее задавать не требуется.

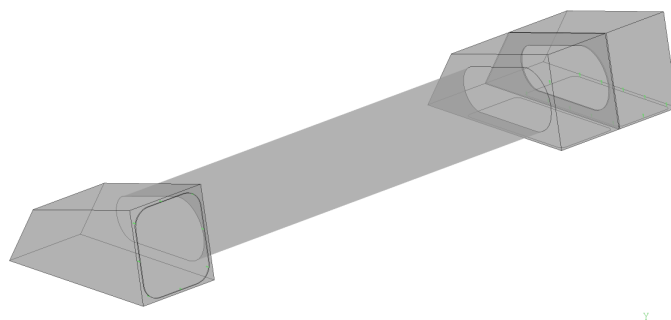


Рисунок 2.62 - Область второй части воздуховода

2.4.9.2 Задание граничных условий

Все границы области кроме интерфейсов с другими частями общей расчетной области, создание которых рассматривается в пункте 2.4.12, являются неподвижными стенками с заданным на них условием непротекания и прилипания (рисунок 2.63).

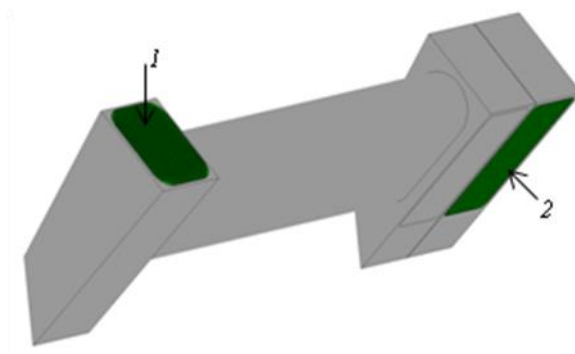
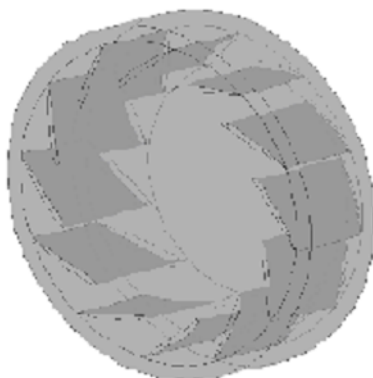


Рисунок 2.63 – Интерфейсы

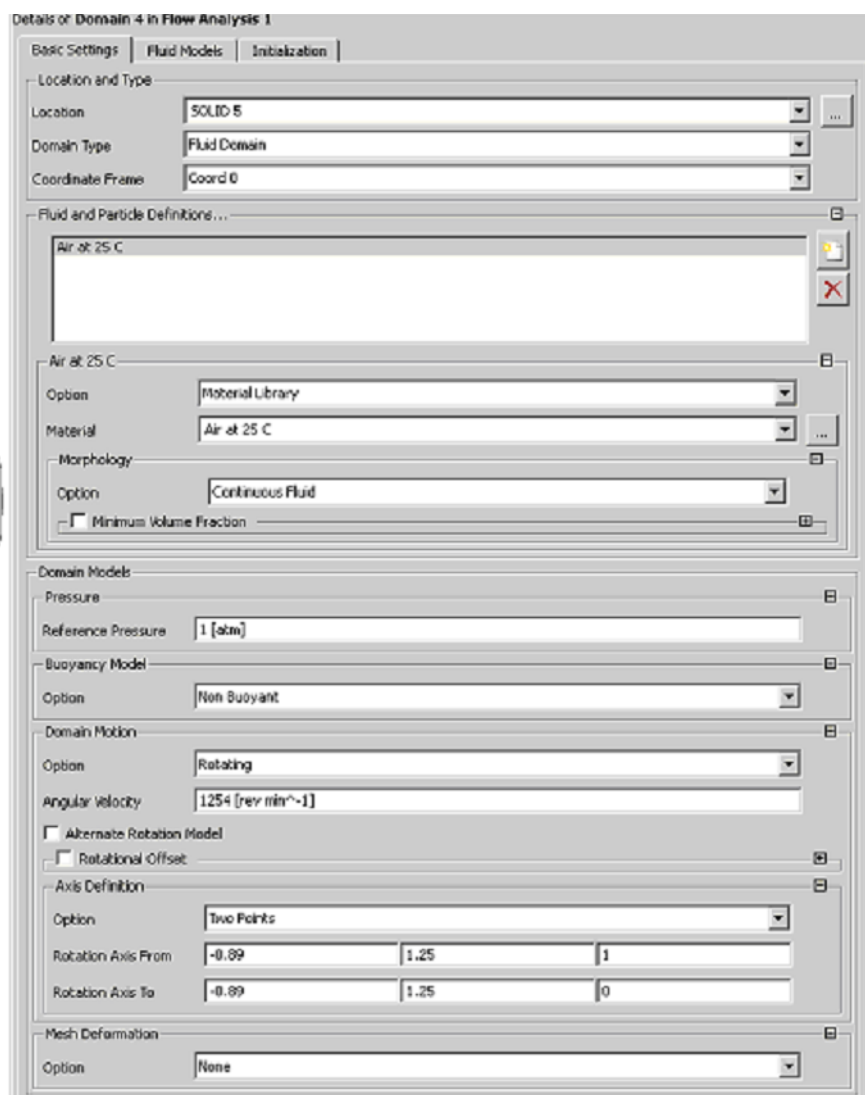
2.4.10 Постановка задачи для колеса вентилятора

2.4.10.1 Создание области

Область, созданная для моделирования колеса вентилятора (рисунок 2.64) содержит воздух при 25°C. Однако, в отличие от всех предыдущих областей, эта часть расчетной области является вращающейся, поэтому условия на вкладке *Basic Settings* для нее следует модифицировать (рисунок 2.64). В поле *Domain motions* необходимо выбрать опцию вращения области, в поле *Angular Velocity* задать угловую скорость вращения, а в поле *Axis Definition* задать ось вращения координатами двух точек.



а)



б)

Рисунок 2.64 – а) область колеса вентилятора;
б) вкладка *Basic Settings* работы с областью колеса

2.4.10.2 Задание граничных условий

Границы области, представленные на рисунке 2.65, по умолчанию задаются как вращающиеся стенки. На оставшихся границах необходимо создать интерфейсы связи с первой частью воздуховода и улиткой (пункт 2.4.12).

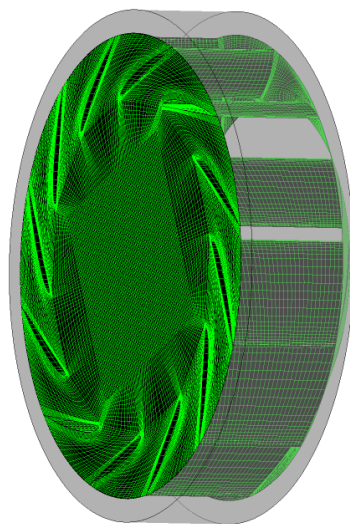


Рисунок 2.65 - Вращающиеся стенки

2.4.11 Постановка задачи для входной области

2.4.11.1 Создание области

Область входа (рисунок 2.66) – не вращающаяся область, в которой содержится воздух при 25°C. Все ее характеристики по умолчанию задаются идентичными областям улитки, воздуховода и воздушной подушки.

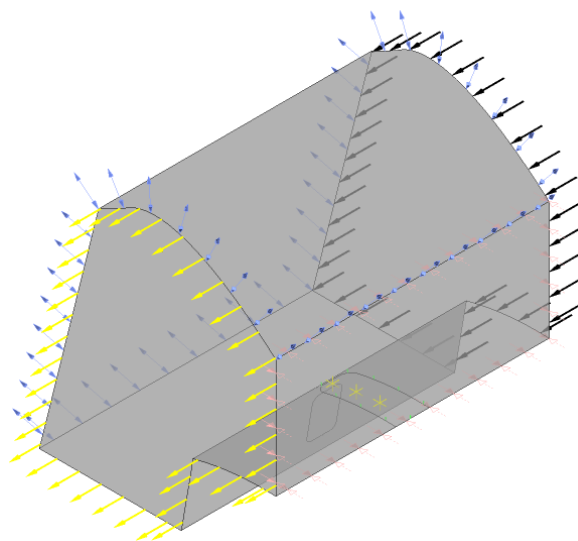


Рисунок 2.66 - Область входа

2.4.11.2 Задание граничных условий

Необходимо создать пять следующих границ:

- открытая граница области – *Boundary 10* (рисунок 2.67) с заданным на ней нулевым давлением (рисунок 2.67);

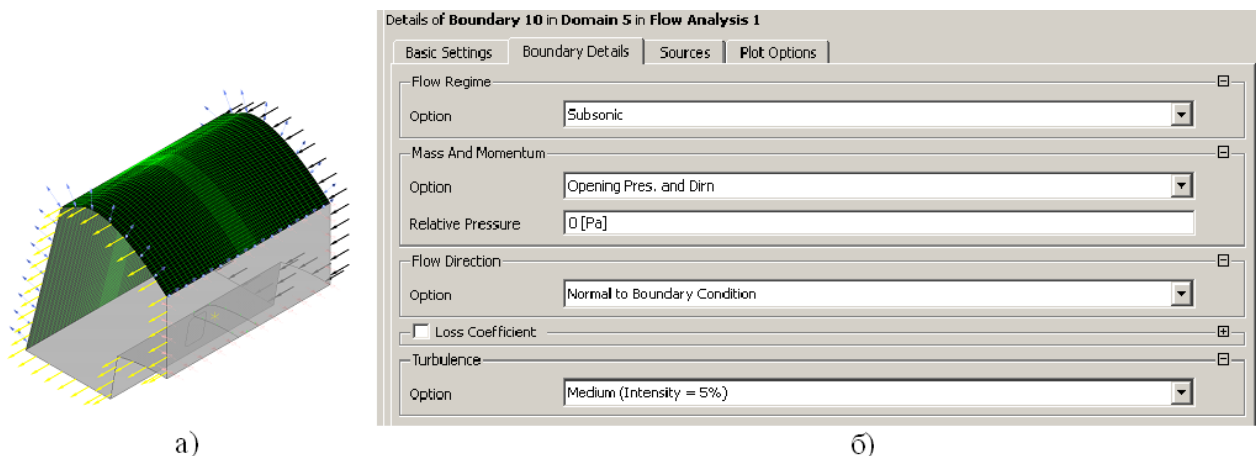


Рисунок 2.67 – а) граница *Boundary 10*; б) задание граничных условий на *Boundary 10*

– входная граница расчетной области – *Boundary 8* (рисунок 2.68), через которую поступает воздух с нормальной скоростью 2 м/с (рисунок 2.68);

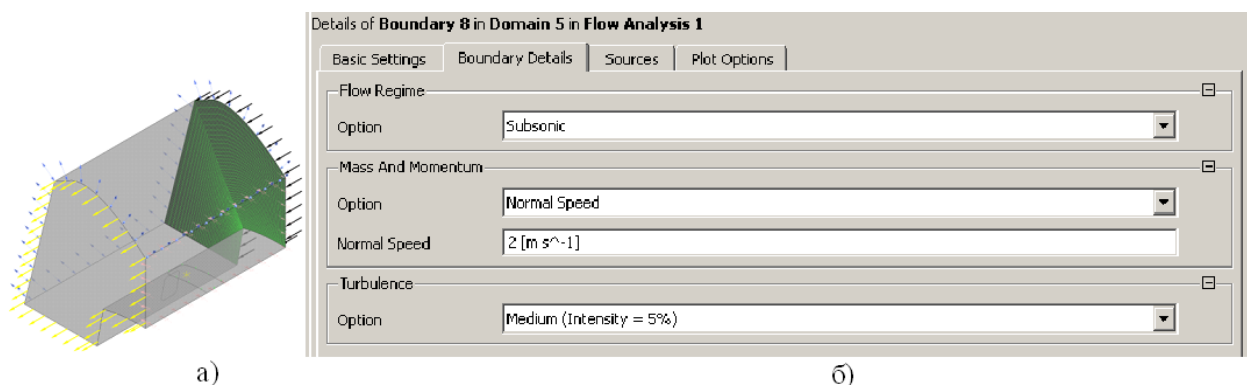


Рисунок 2.68 – а) граница *Boundary 8*; б) задание граничных условий на *Boundary 8*

– плоскость симметрии (рисунок 2.69 а));
 – неподвижная стенка (рисунок 2.69 б)) с заданным условием прилипания;
 – выход расчетной области с нулевым средним избыточным давлением (рисунок 2.69 в)).

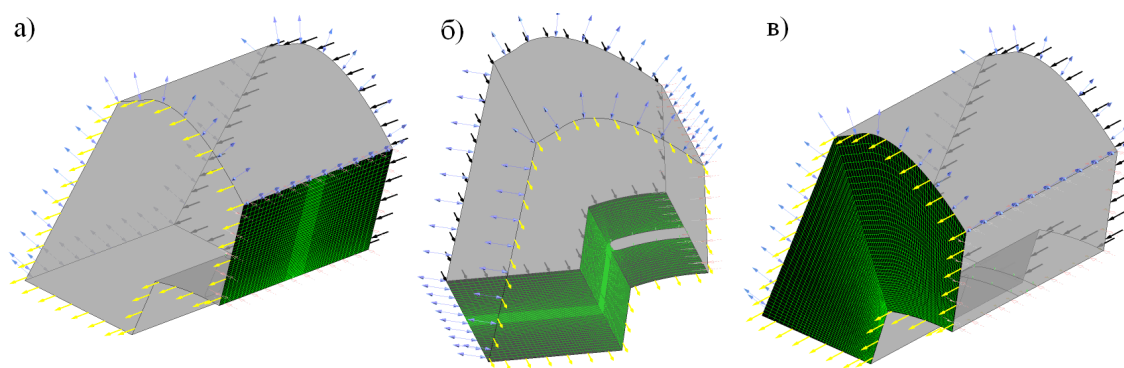


Рисунок 2.69 - Границы области: а) плоскость симметрии; б) неподвижная стенка;
в) выходная граница

2.4.12 Создание интерфейсов

Интерфейсы между различными частями расчетной области создаются с использованием опции главного меню *Insert->Domain Interface*. В задаче требуется создать семь интерфейсов типа «жидкость-жидкость». Первые три интерфейса (1, 2, 3) являются интерфейсами между неподвижными частями расчетной области. Интерфейсы 4, 5, 6, 7 – между неподвижными частями и вращающимся колесом вентилятора.

2.4.12.1 Интерфейс между улиткой и второй частью воздуховода (рисунок 2.70). Все характеристики данного интерфейса необходимо оставить по умолчанию. В разделах *Interface Side 1* и *Interface Side 2* необходимо поочередно выбрать области, интерфейс между которыми создается, необходимо также выбрать наименования двух границ, по которым сшиваются области (рисунок 2.71).

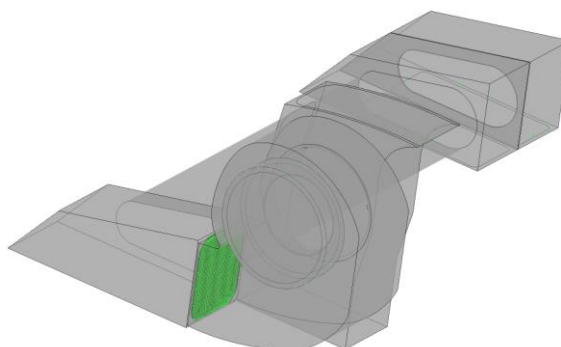


Рисунок 2.70 - Интерфейс улитки и второй части воздуховода

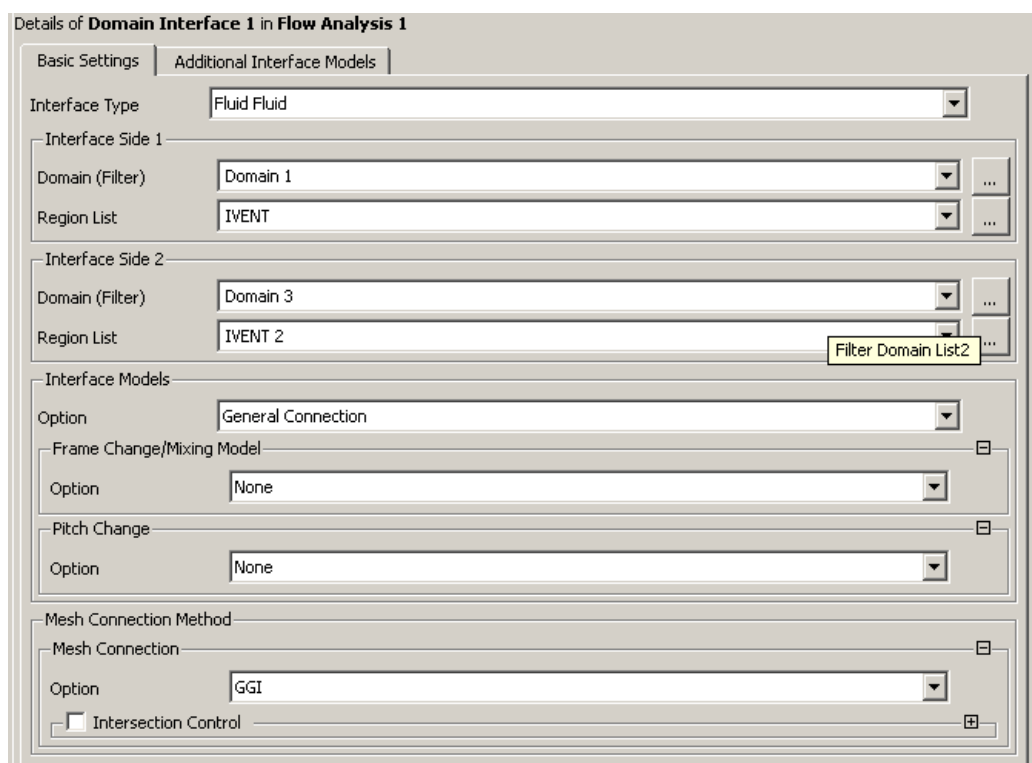


Рисунок 2.71 - Вкладка *Basic Settings* интерфейса между не вращающимися областями

2.4.12.2 Интерфейс между первой частью воздуховода и входной областью (рисунок 2.72) создается идентично первому интерфейсу.

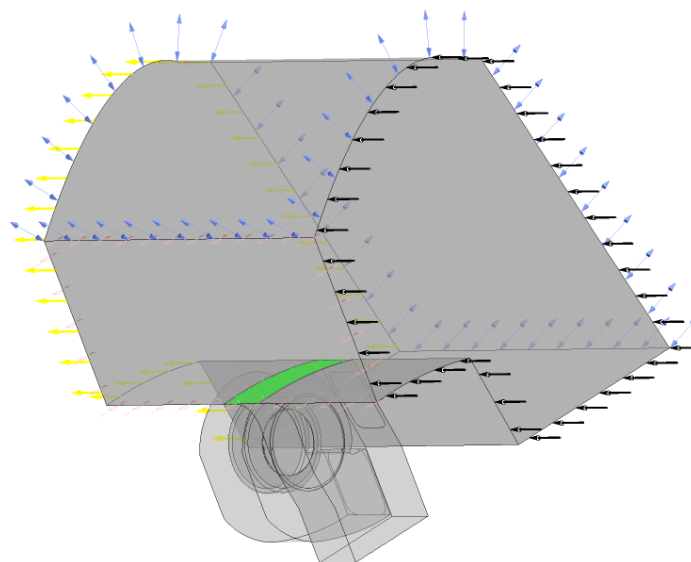


Рисунок 2.72 - Интерфейс входной области и первой части воздуховода

2.4.12.3 Создание интерфейса между воздушной подушкой и второй частью воздуховода (рисунок 2.73) производится аналогично созданию показанных выше интерфейсов.

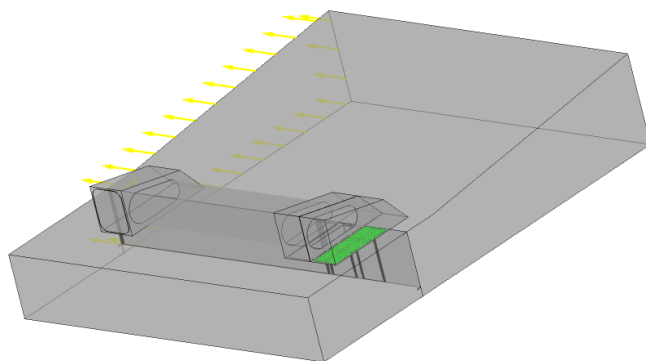


Рисунок 2.73 - Интерфейс воздушной подушки и второй части воздуховода

Следующая группа интерфейсов (2.4.12.4, 2.4.12.5, 2.4.12.6, 2.4.12.7) является границами вращающегося колеса вентилятора с остальными частями расчетной области. При создании интерфейса между вращающейся и неподвижной областями необходимо в разделе *Frame Change/Mixing Model* вкладки *Basic Settings* создаваемого интерфейса выбрать опцию *Stage* (рисунок 2.74).

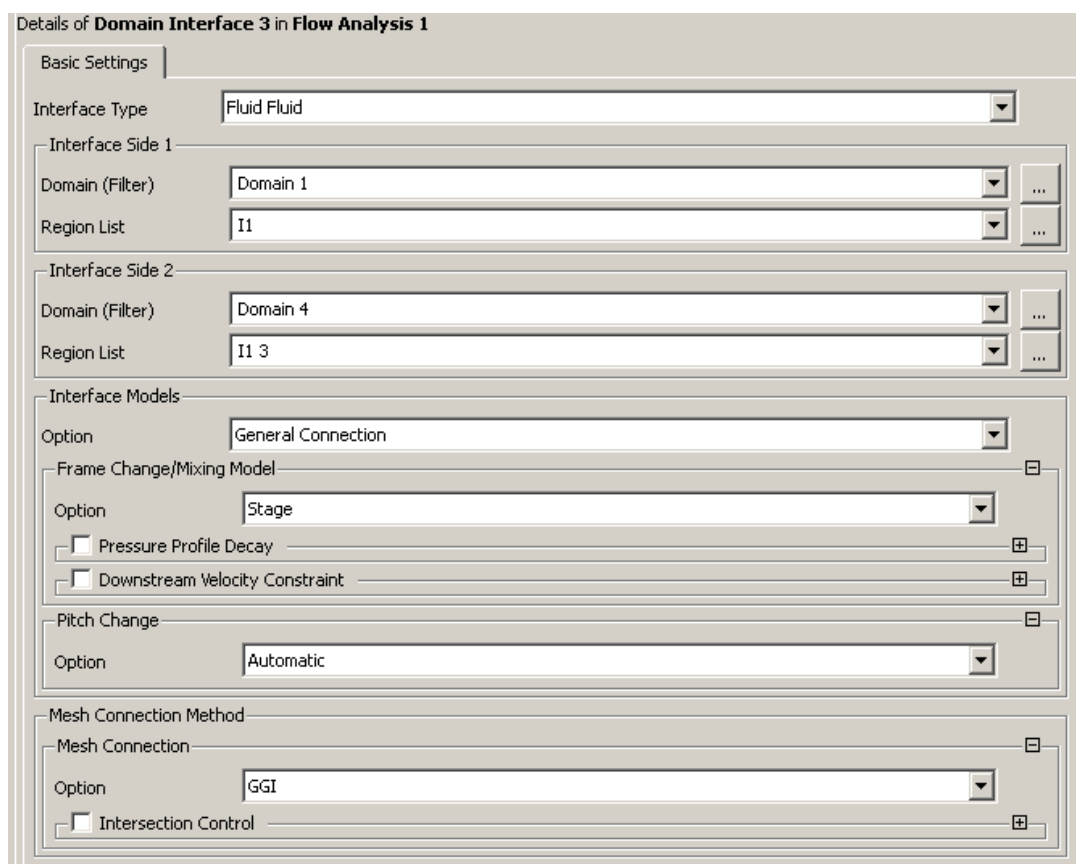


Рисунок 2.74 - Вкладка *Basic Settings* интерфейса между вращающейся и неподвижной областями

2.4.12.4 Интерфейс между колесом вентилятора и первой частью воздуховода (рисунок 2.75).

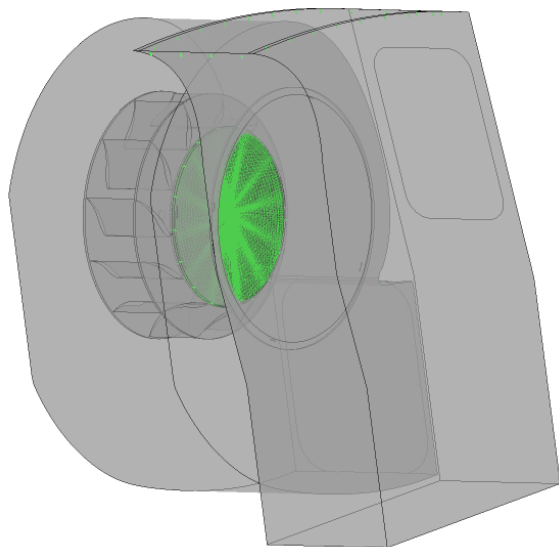


Рисунок 2.75 - Интерфейс колеса вентилятора и первой части воздуховода

2.4.12.5 Интерфейс между улиткой и колесом вентилятора А (рисунок 2.76 а)).

2.4.12.6 Интерфейс между улиткой и колесом вентилятора В (рисунок 2.76 б)).

2.4.12.7 Интерфейс между улиткой и колесом вентилятора С (рисунок 2.76 в)).

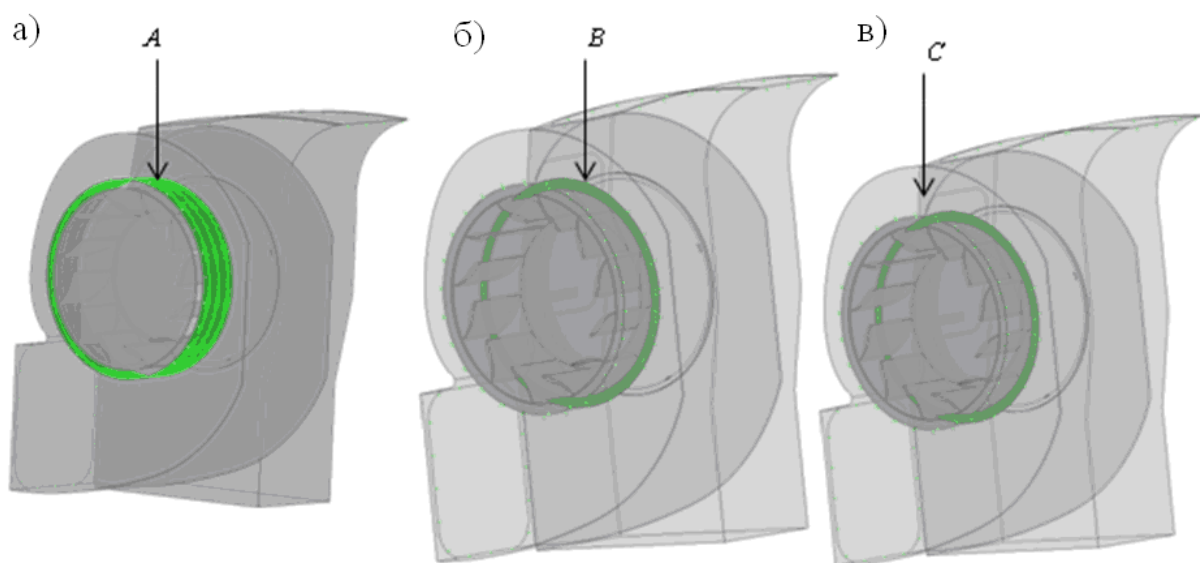


Рисунок 2.76 - а) интерфейс А; б) интерфейс В; в) интерфейс С

2.4.13 Работа в разделе Solver Control

Во вкладке *Basic Settings* раздела *Solver Control* (рисунок 2.77) необходимо задать следующие параметры:

- в разделе *Advection Scheme* - схему адвекции (оставляется по умолчанию *High Resolution* – схема аппроксимации конвективных членов со вторым порядком точности «против потока»);

- в разделе *Convergence Control* - контроль сходимости по количеству итераций (при достижении числа итераций, указанных в поле *Max. Iteration*, решение задачи полагается выполненным);

- в разделе *Fluid Timescale Control* шаг интегрирования (оставляется по умолчанию автоматическим);

- в разделе *Convergence Criteria* - критерий сходимости (задается среднеквадратичный критерий останова).

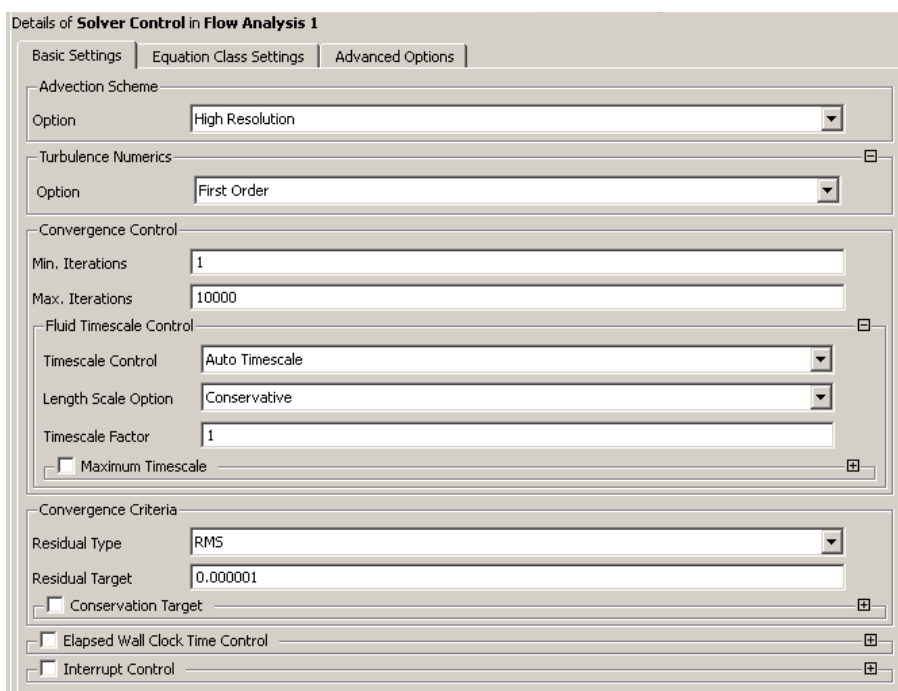


Рисунок 2.77 - Вкладка *Basic Settings* раздела *Solver Control*

2.4.14 Работа в разделе Output Control

Здесь задаются опции, с помощью которых пользователь может отслеживать промежуточные результаты в ходе решения. Целесообразно создать список автоматической перезаписи файлов результатов, например, после трехсотого и пятисотого шагов интегрирования во вкладке *Backup* (рисунок 2.78), а так же несколько мониторинговых точек (рисунок 2.79), для которых решателем

будут выводиться значения давлений на каждом шаге интегрирования. Мониторные точки выбраны на интерфейсе входной области и первой части воздухопровода, а так же внутри области воздушной подушки.

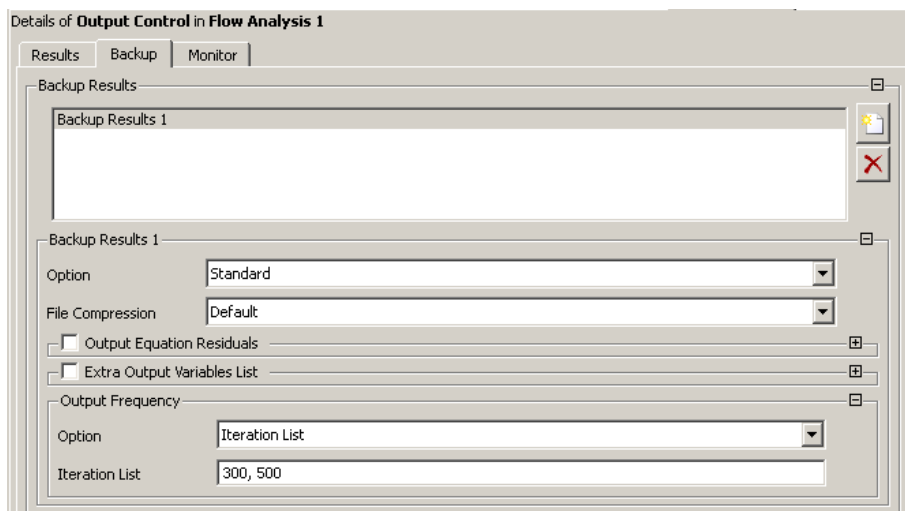


Рисунок 2.78 - Вкладка *Backup* раздела *Output Control*

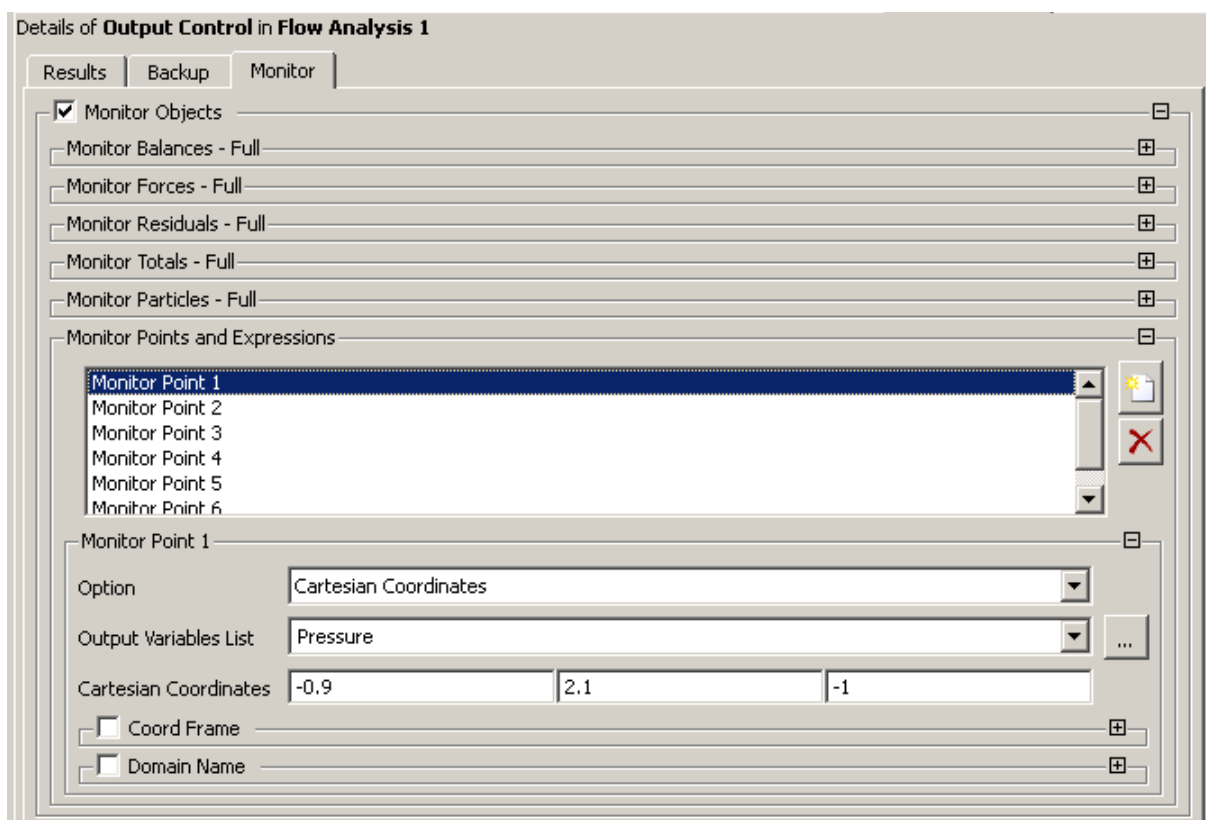


Рисунок 2.79 - Вкладка *Monitor* раздела *Output Control*

На этом процесс создания препроцессорного файла в пакете ANSYS CFX можно считать завершенным. Общий вид созданной модели представлен на рисунке 2.80.

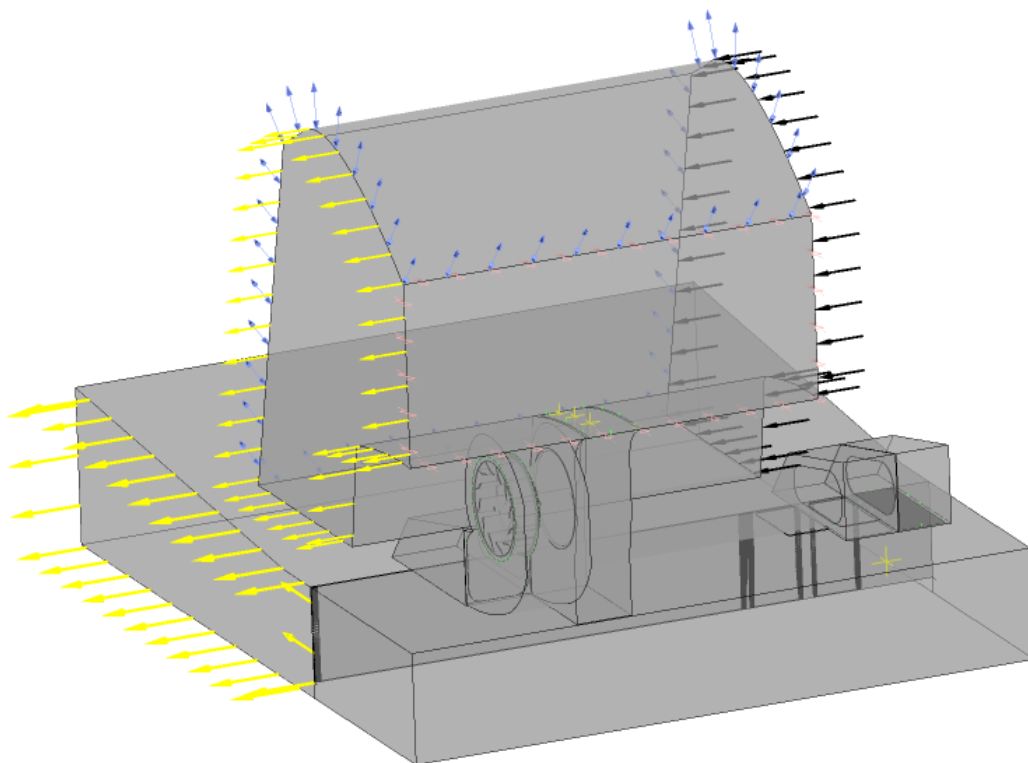


Рисунок 2.80 - Общий вид модели

2.4.15 Экспорт модели в решатель

На последнем этапе работы в среде ANSYS CFX-Pre осуществляется экспорт построенной модели в решатель ANSYS CFX-Solver. Для этого необходимо сформировать файл с расширением .def. Создание его осуществляется следующим образом: на верхней панели инструментов выбирается опция *Write Solver Input file* . Далее в появляющемся диалоговом окне прописывается имя экспортируемого файла сеточной модели *.def (рисунок 2.81).

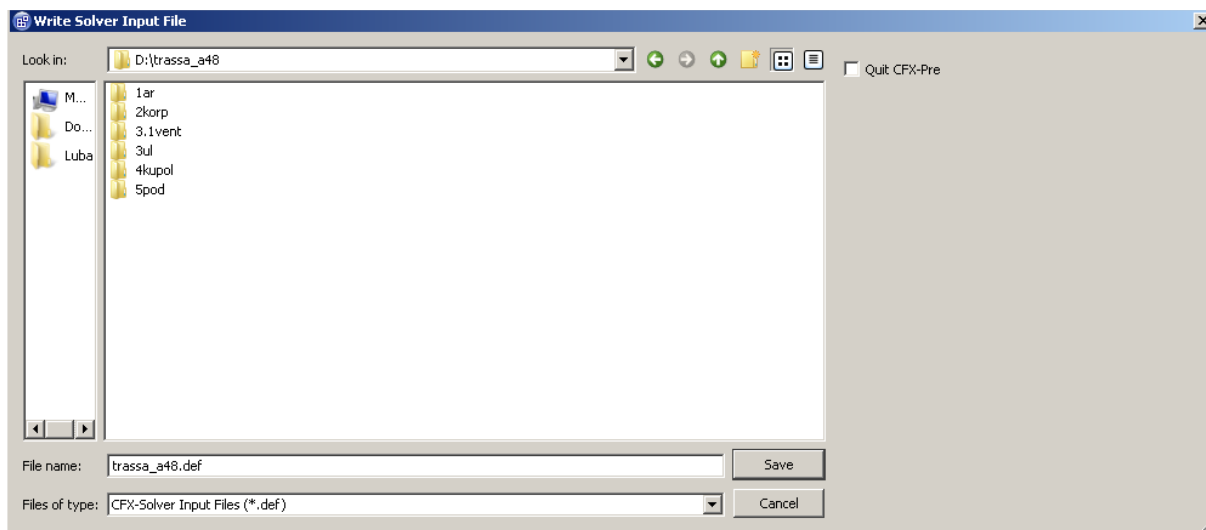


Рисунок 2.81 - Окно *Write Solver Input file*

2.5 Работа в среде ANSYS CFX-Post

После решения задачи в ANSYS CFX-Solver осуществляется анализ полученных результатов в среде ANSYS CFX-Post. Возможности программы позволяют создавать векторные поля скоростей, скалярные поля давлений, скоростей. в различных сечениях расчетной области, линии тока, изоповерхности, графики зависимостей физических переменных и т.д.

Результатом решения задачи являются файлы *.res (файл результатов), *.bak (промежуточный файл результатов), *.trn (файл результатов для задач в нестационарной постановке). Именно с файлами таких типов производится работа в постпроцессоре пакета ANSYS CFX.

В данном разделе приведены возможности ANSYS CFX-Post для задачи о работе нагнетательного комплекса АСВП.

2.5.1 Векторные поля скоростей внутри воздуховода и улитки

Поле скоростей создается на плоскости, параллельной плоскости координат Oxz , рассекающей области воздуховода и улитки посередине (рисунок 2.82). Плоскость создается следующим образом: в блоке *Location*  на верхней панели инструментов выбирается опция *Plane*. Далее в появляющейся вкладке *Geometry* (рисунок 2.83) для создания плоскости выбираются:

- в поле *Domains* области, в которых она строится;
- в разделе *Definition* метод ее построения (параллельно какой-либо координатной плоскости, по точке и нормали, по трем точкам).

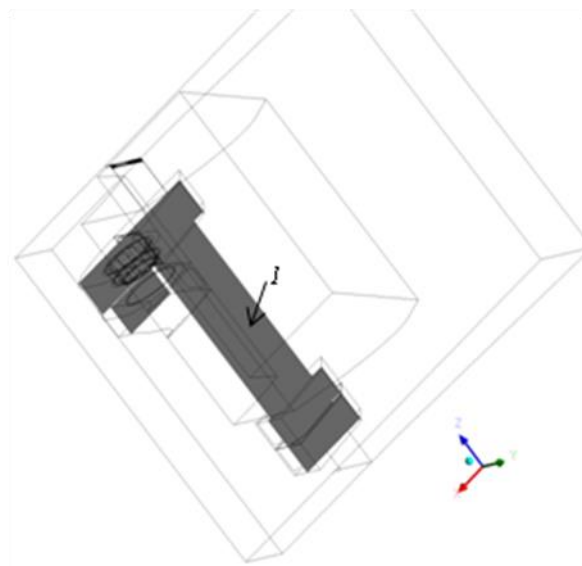


Рисунок 2.82 - Вид плоскости 1

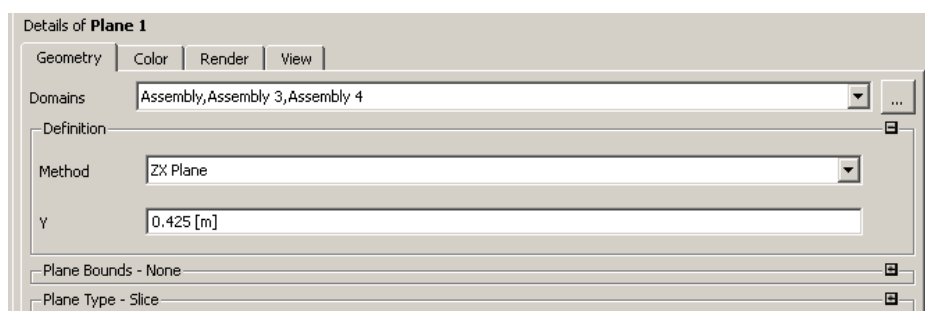


Рисунок 2.83 - Вкладка *Geometry* плоскости

Далее, на плоскости необходимо построить векторное поле (рисунок 2.84). Для этого на верхней панели инструментов выбирается опция Vector . В появляющееся вкладке *Geometry* (рисунок 2.85) выбирается:

- в поле *Domains* - местоположение векторного поля (плоскость 1);
- в поле *Variable* - переменная для которой строится поле (скорость);
- в полях *Reduction* и *Factor* параметры прореживания векторного поля;
- на остальных вкладках задаются различные параметры визуализации векторного поля (цвет, тип и размер стрелок и т.д.).

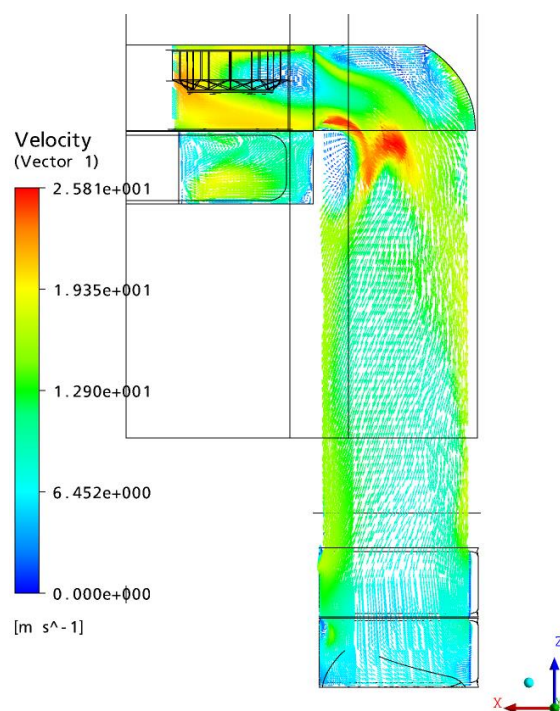


Рисунок 2.84 - Векторное поле скоростей во второй части воздуховода

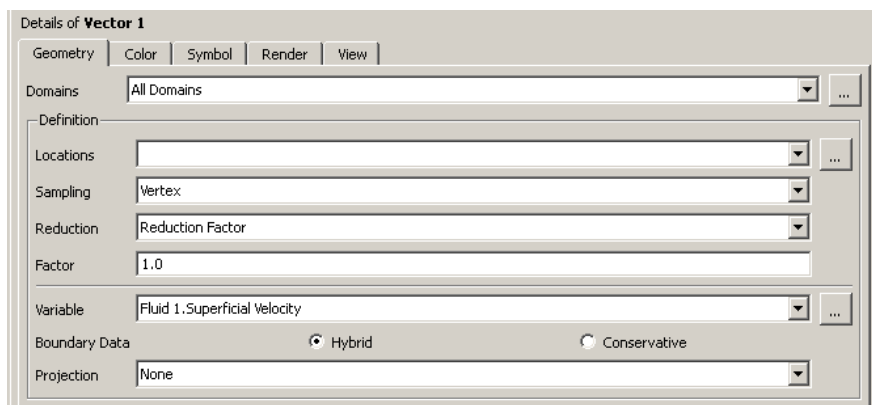


Рисунок 2.85 - Вкладка *Geometry* для построения векторного поля

Аналогично на плоскости 2 (рисунок 2.86), параллельной плоскости Oyz создается поле скоростей (рисунок 2.87).

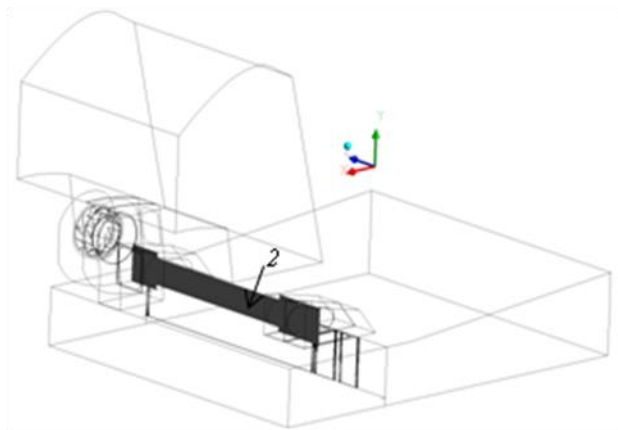


Рисунок 2.86 - Вид плоскости 2

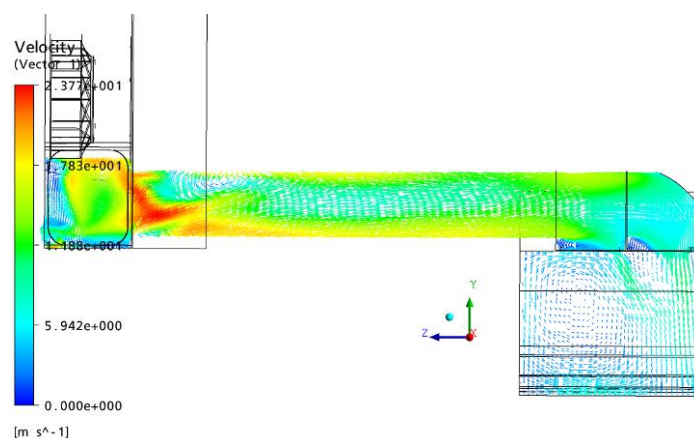


Рисунок 2.87 - Векторное поле скоростей в воздуховоде

2.5.2 Поле давлений и векторное поле скоростей внутри колеса вентилятора и в области улитки

Скалярное поле давлений внутри колеса вентилятора строится в сечении 3, параллельном плоскости Oxy (рисунок 2.88). Для построения поля давлений в верхней панели инструментов выбирается опция *Contour* . На появляющейся вкладке *Geometry* (рисунок 2.89), аналогично векторному полю должны быть выбраны:

- в поле *Domain* области, в которых строится поле;
- в поле *Locations* сечение расчетной области, в котором оно строится;
- в поле *Variable* физическая переменная, для которой строится скалярное поле (в данном случае давление);
- в поле *Range* задается масштабирование цветовой шкалы скалярного поля — минимальное и максимальное значение может быть выбрано по всей

расчетной области (параметр *Global*), только по границе или плоскости, на которой поле строится (параметр *Local*), задано пользователем вручную (параметр *User Specified*) или может быть прорисовано только несколько задаваемых значений (параметр *Value List*);

– в остальных полях задаются параметры для модификации внешнего вида поля.

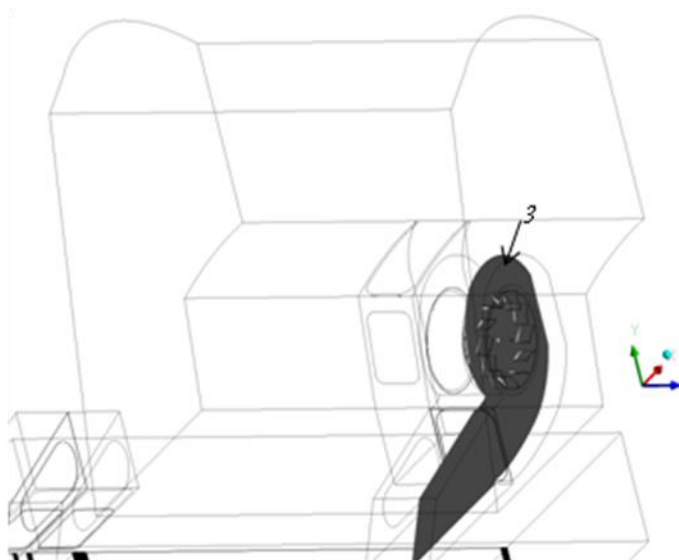


Рисунок 2.88 - Вид плоскости 3

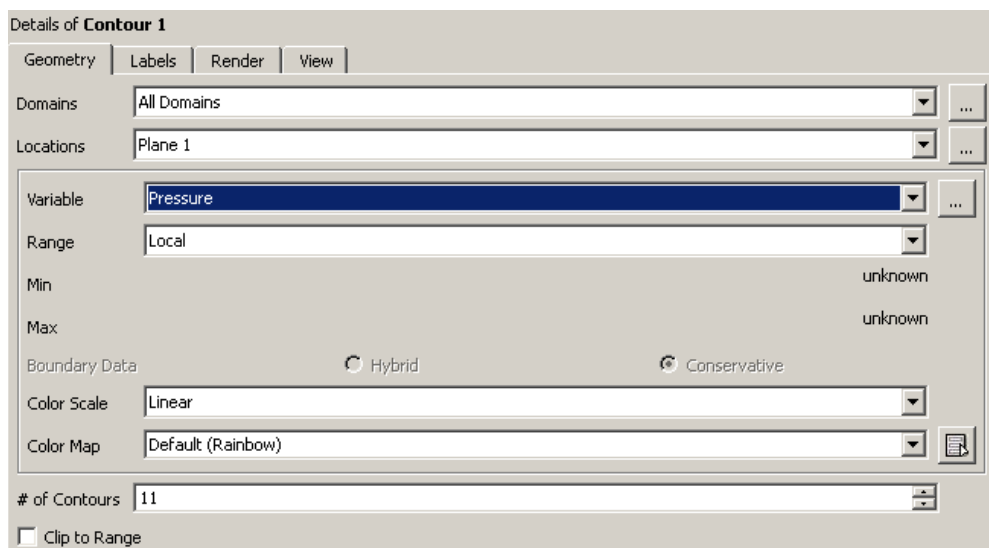


Рисунок 2.89 - Вкладка *Geometry* для построения скалярного поля

На рисунке 2.90 представлено поле давлений в сечении колеса вентилятора.

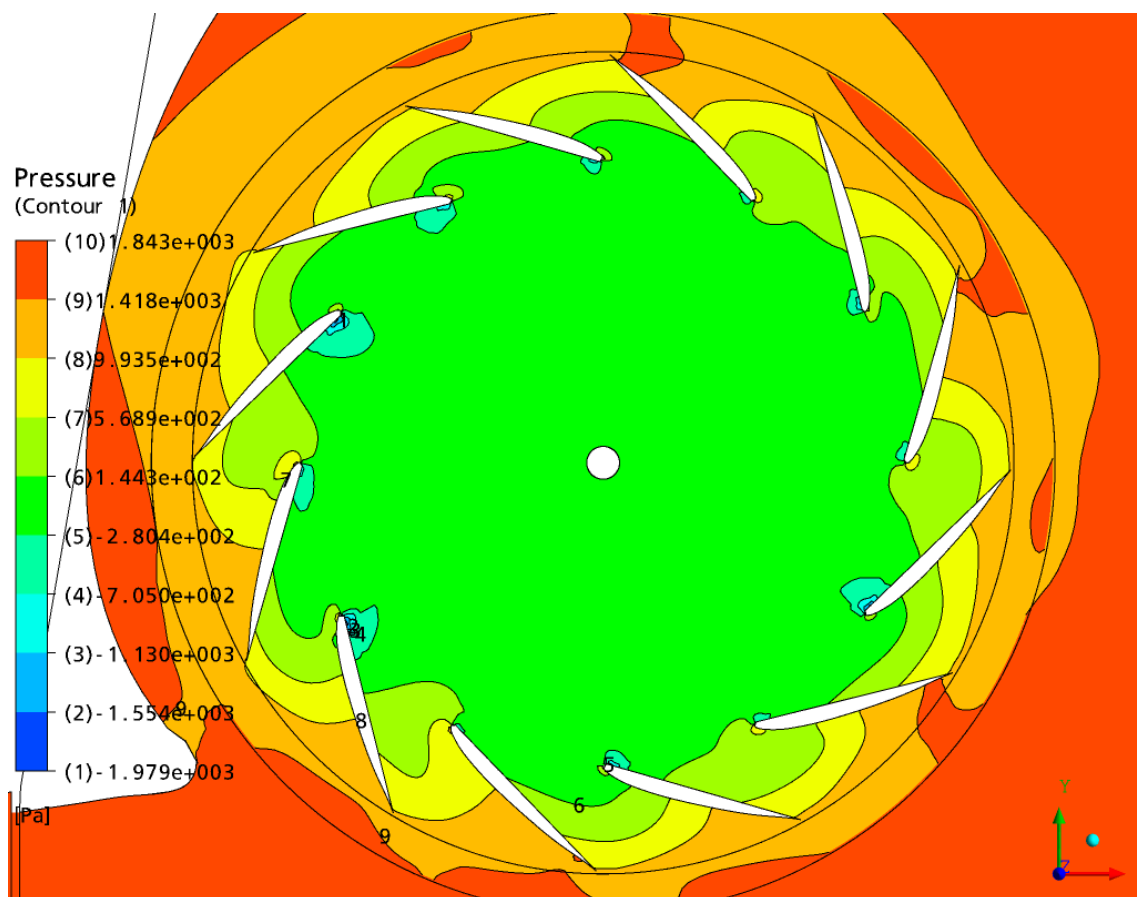


Рисунок 2.90 - Распределение давлений в сечении колеса вентилятора

Аналогично в сечении 4 улитки, воздуховода и колеса параллельном плоскости Oyz (рисунок 2.91) строится поле давлений (рисунок 2.92).

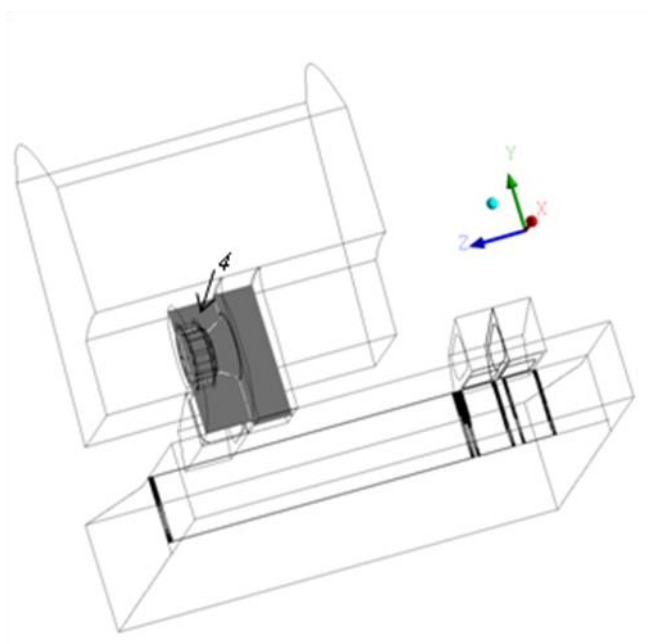


Рисунок 2.91 - Вид плоскости 4

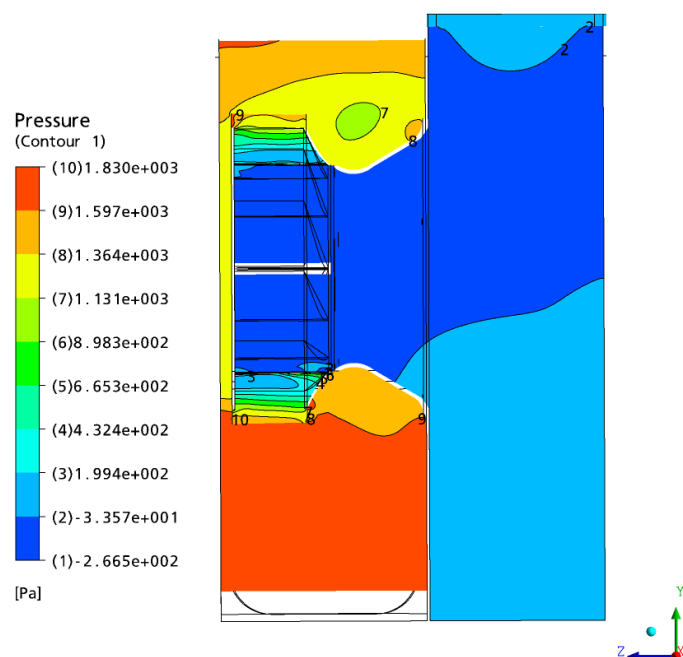


Рисунок 2.92 - Распределение давлений в сечении колеса вентилятора, улитки и первой части воздуховода

На рисунке 2.93 представлено векторное поле скоростей в сечении вентилятора и второй части воздуховода, построенное на плоскости 3; на рисунке 2.94 – более детально показано распределение скоростей в том же сечении расчетной области внутри колеса вентилятора; на рисунке 2.95 – поле скоростей в плоскости 4.

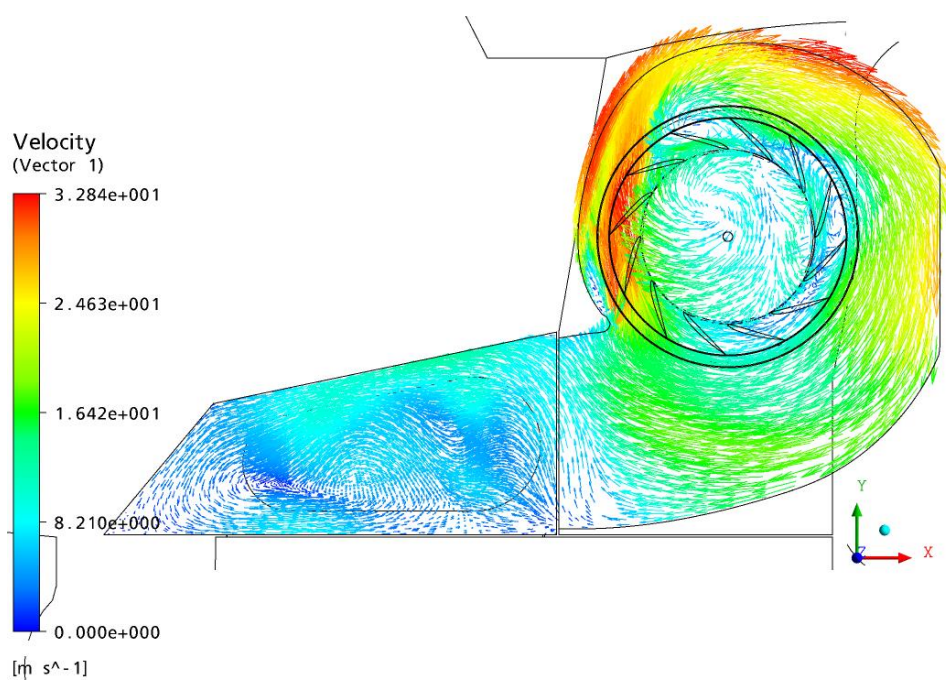


Рисунок 2.93 - Векторное поле скоростей в сечении колеса вентилятора, улитки и второй части воздуховода.

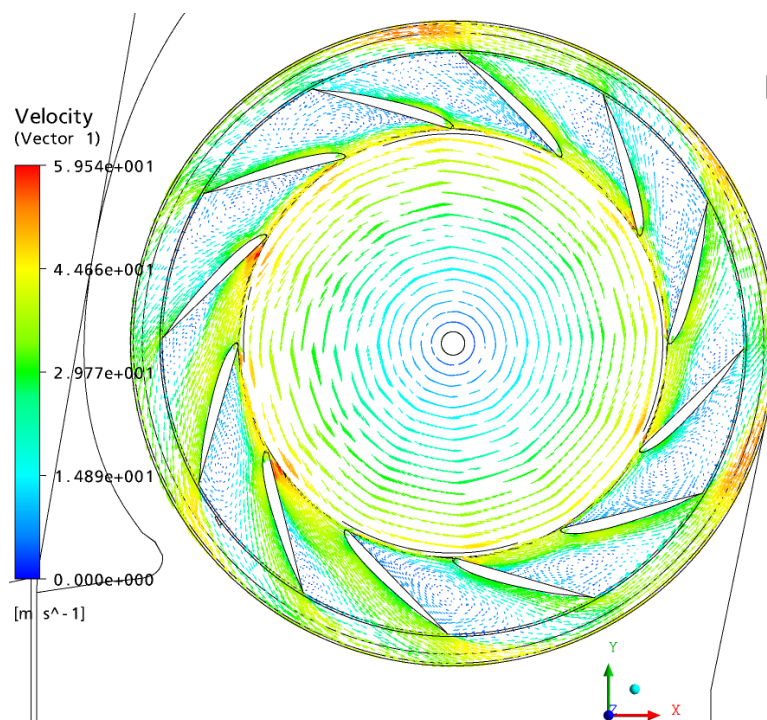


Рисунок 2.94 - Векторное поле скоростей в сечении колеса вентилятора

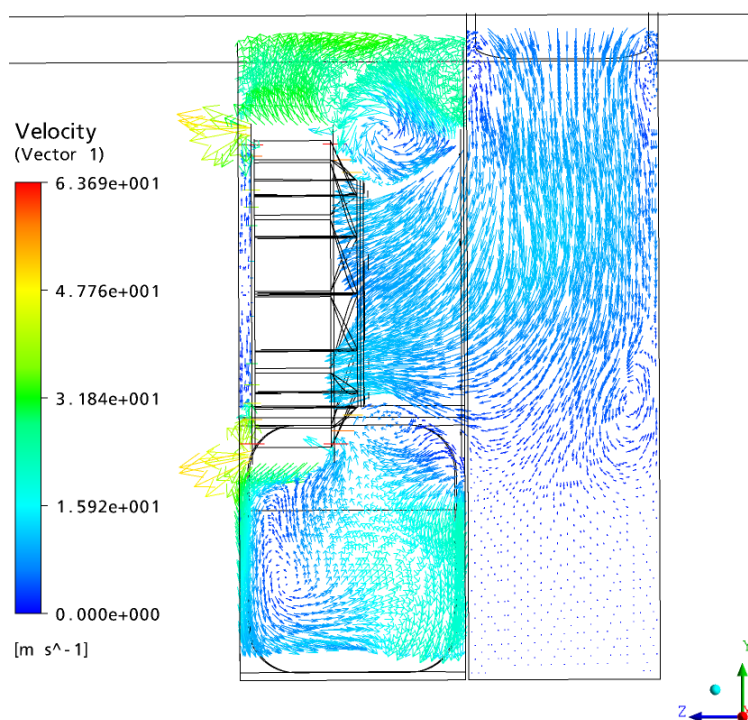


Рисунок 2.95 - Векторное поле скоростей в сечении колеса вентилятора, улитки и первой части воздуховода

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Каковы основные этапы препроцессорной подготовки задачи?
2. Сформировать алгоритм построения геометрической модели нагнетателя.
3. Какие инструменты для построения поверхностей существуют в ANSYS Meshing?
4. Что такое блочная структура сеточной модели?
5. Какие основные инструменты существуют в пакете ANSYS Meshing для модернизации блочно-структурированной сеточной модели?
6. Как проверить качество построенной сеточной модели?
7. Зачем вводятся части (Parts) в ANSYS Meshing? Нужны ли они в препроцессоре и решателе ANSYS CFX?
8. Какие интерфейсы существуют в программном комплексе ANSYS CFX для сопряжения решения в соседних частях расчетной области? В чем заключается вычислительный смысл использования вращающихся интерфейсов?
9. Какие граничные условия используются в задаче расчета нагнетательного комплекса? На каких границах и почему возможно задание альтернативных граничных условий?
10. В чем заключается принцип обращения движения? Когда возможно его применить? Каковы преимущества решения задачи при использовании принципа обращения движения?
11. Когда рекомендуется применять к-ε модель турбулентности? В каких случаях следует применять модель турбулентности к-ω? Как построена составная SST модель турбулентности Ментера?
12. В чем заключается принципиальное отличие турбулентных и ламинарных потоков?
13. В чем состоит принципиальное отличие осредненных уравнений Навье-Стокса и уравнений Навье-Стокса ламинарного течения вязкой жидкости?
14. В чем заключается смысл геометрический и кинематический смысл уравнения неразрывности для несжимаемых течений жидкости?
15. В чем заключается отличие линий тока от траекторий жидких частиц? Когда линии тока совпадают с траекториями?

- 16.Объяснить принцип функционирования осевых и центробежных нагнетателей.
- 17.Дать определение расходно-напорной характеристике нагнетателя. Зачем нужна эта характеристика?
- 18.Как после вычислений в ANSYS CFX получить безразмерную расходно-напорную характеристику нагнетателя?
- 19.Сформировать принципиальную блок-схему расчета расходно-напорной характеристики с использованием инструментов ANSYS Meshing и ANSYS CFX.
- 20.Сформировать в постпроцессоре программного комплекса ANSYS CFX алгоритм построения поля линии тока через произвольную точку расчетной области и построение функциональной зависимости изменения скорости вдоль линии тока в зависимости от выбранной геометрической координаты. Какие инструменты постпроцессора следует использовать для реализации этой задачи?
- 21.Прослеживаются ли аналогии между этапами физического и вычислительного экспериментов в целом и конкретно, при построении расходно-напорной характеристики нагнетателя?

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана методика расчета нагнетательного комплекса с учетом его функционирования «от атмосферы до атмосферы» и конструктивных особенностей нагнетательного тракта. Методика базируется на применении суперкомпьютерных технологий для прямого численного решения уравнений турбулентного движения вязкой жидкости. Рассмотрена физическая и математическая постановки задачи аэродинамики нагнетательного комплекса АСВП, ее поэтапное решение с использованием программных комплексов Ansys Meshing, Ansys Extended Meshing, Ansys CFX

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

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 нагнетательного комплекса и его элементов концептуального проекта платформы на воздушной подушке.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Сборник: Судостроительная промышленность, Л.: сер. ПС, вып.7, с.3-7, 1988.
2. Сборник Промышленная аэродинамика. М.:вып.32, 1975.
3. Соломахова Т.С., Чебышева К.В. Центробежные вентиляторы. Справочник. М.:Машиностроение, 1980.
4. Брусиловский И.В. Аэродинамические схемы и характеристики осевых вентиляторов ЦАГИ. М.:Недра, 1978.
5. Калинушкин М.П. Вентиляторные установки. М.: Высшая школа, 1967.
6. Войткунский Я.И., Фаддеев Ю.И., Федяевский К.К. Гидромеханика. Л.: Судостроение, 1982.
7. Флетчер К. Вычислительные методы в динамике жидкостей. М.:Мир, 1991.
8. Menter, F. R. (1993), Zonal Two Equation $k-\omega$ Turbulence Models for Aerodynamic Flows, Technical Report AIAA Paper 93-2906.
9. Пейре Р., Тейлор Т.Д. Вычислительные методы в задачах механики жидкости. Л. : Гидрометеиздат, 1986. – 352 с.
- 10.Ferziger J. H., Perić M Computational Methods for fluid Dynamics. Berlin: Springer, 2002. – 3., rev. ed. - 423 p.
- 11.Patankar. Numerical Heat Transfer and Fluid Flow, Hemisphere Publishing Corp., 1980.
- 12.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.
- 13.S. Majumdar. Role of Underrelaxation in Momentum Interpolation for Calculation of Flow with Nonstaggered Grids”, Numerical Heat Transfer 13:125-132.
- 14.Harlow F.H., Welch J.E. Numerical study of large amplitude free surface motion. – Phys. Fluids, 1966, 9 p.
- 15.Станкова Е. Н., Затевахин М. А. Многосеточные методы. Введение в стандартные методы. Институт высокопроизводительных вычислений и информационных систем, 2003.
- 16.Брусиловский И.В. Аэродинамические схемы и характеристики осевых вентиляторов ЦАГИ. М.:Недра, 1978.

17. ANSYS CFX Tutorial Reference. ANSYS Inc., 2006.
18. 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.

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

**СУПЕРКОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
НАГНЕТАТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА
АМФИБИЙНОГО СУДНА
НА ВОЗДУШНОЙ ПОДУШКЕ**

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