

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ  
ФЕДЕРАЦИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ  
БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ имени академика С.П. КОРОЛЕВА  
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)»

*О.В. БАТУРИН, Д.А. КОЛМАКОВА,  
В.Н. МАТВЕЕВ, Г.М. ПОПОВ, Л.С. ШАБЛИЙ*

**РАСЧЕТ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ СТРУКТУРЫ  
ПОТОКА В СТУПЕНИ ОСЕВОГО КОМПРЕССОРА  
В ПРОГРАММНОМ КОМПЛЕКСЕ ANSYS CFX**

*Утверждено Редакционно-издательским советом университета  
в качестве учебного пособия*

САМАРА  
Издательство СГАУ  
2011

УДК СГАУ: 621.438.001.2

ББК СГАУ: 39.55

Б28

Авторы: *О.В. Батури**н*, *Д.А. Колмакова*,  
*В.Н. Матвеев*, *Г.М. Попов*, *Л.С. Шаблий*

Рецензент: д-р техн. наук, проф. С.В. Фалалеев

**Б 28 Расчет пространственной структуры потока в ступени осевого компрессора в программном комплексе *Ansys CFX*: учеб. пособие/ [О.В. Батури***н* **и др.]. – Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2011. – 101 с.: ил.**

Учебное пособие содержит краткие сведения о расчетном исследовании рабочего процесса в ступени осевого компрессора с использованием современного *CFD*-программного комплекса *Ansys CFX*, основанного на решении уравнений Навье - Стокса. Подробно описаны процесс создания расчетной модели, создания сетки конечных элементов в автоматизированном режиме, наложение граничных условий, проведения расчета и обработки его результатов.

Пособие разработано на кафедре теории двигателей летательных аппаратов СГАУ и предназначено для студентов, обучающихся по курсам «Теория, расчет и проектирование авиационных двигателей и энергетических установок», «Теория и расчет лопаточных машин», «Агрегаты наддува двигателей», а также для самостоятельной работы студентов-дипломников, аспирантов, магистрантов и научных работников, чьи исследования связаны с турбомашиностроением.

УДК СГАУ: 621.438.001.2

ББК СГАУ: 39.55

© Самарский государственный  
аэрокосмический университет, 2011

# ОГЛАВЛЕНИЕ

ОСНОВНЫЕ УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ	6
ВВЕДЕНИЕ	9
1. ОСНОВНЫЕ ЭТАПЫ СОЗДАНИЯ РАСЧЕТНЫХ МОДЕЛЕЙ ПОТОКА РАБОЧЕГО ТЕЛА В ПРОТОЧНОЙ ЧАСТИ ТРЕХМЕРНОЙ СТУПЕНИ ОСЕВОГО КОМПРЕССОРА В ПРОГРАММНОМ КОМПЛЕКСЕ <i>ANSYS CFX</i>	12
2. ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ О ПОСТРОЕНИИ РАСЧЕТНЫХ МОДЕЛЕЙ ПОТОКА В МЕЖЛОПАТОЧНЫХ КАНАЛАХ ВЕНЦОВ ОСЕВЫХ КОМПРЕССОРОВ В ПРОГРАММЕ <i>TurboGrid</i> ПАКЕТА <i>ANSYSCFX</i>	14
2.1. Типовой алгоритм построения расчетных моделей потока в межлопаточных каналах в программе <i>TurboGrid</i>	14
2.2. Независимый запуск программы <i>TurboGrid</i>	16
2.3. Базовые сведения о работе в программе <i>TurboGrid</i>	16
3. ПОДГОТОВКА ИСХОДНЫХ ДАННЫХ И ПОСТРОЕНИЕ ГЕОМЕТРИИ МОДЕЛИ ПОТОКА РАБОЧЕГО ТЕЛА В ПРОТОЧНОЙ ЧАСТИ СТУПЕНИ ОСЕВОГО КОМПРЕССОРА	28
3.1. Описание геометрии межлопаточного канала в программе <i>TurboGrid</i>	28
3.2. Подготовка файлов с описанием геометрии расчетной области для программы <i>TurboGrid</i>	31
3.3. Загрузка в программу <i>TurboGrid</i> геометрии межлопаточного канала венца осевого компрессора	33
3.4. Задание величины и геометрии радиального зазора	40
3.5. Корректировка размеров входного и выходного участков	42
4. ПОСТРОЕНИЕ СЕТКИ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В СОЗДАННОЙ РАСЧЕТНОЙ ОБЛАСТИ В ПРОГРАММЕ <i>TurboGrid</i>	45
4.1. Создание блочной топологии сетки конечных элементов в межлопаточном канале	45
4.2. Настройка параметров сетки конечных элементов	47
4.3. Оценка качества конечноэлементной сетки	51
4.4. Генерация сетки конечных элементов в расчетной области	55
4.5. Завершение работы с моделью в <i>TurboGrid</i> и передача созданной расчетной модели потока в программный комплекс <i>Ansys CFX</i>	56

5. ПОДГОТОВКА РАСЧЕТНОЙ МОДЕЛИ ТЕЧЕНИЯ ВОЗДУХА В СТУПЕНИ КОМПРЕССОРА В ПРОГРАММЕ <i>ANSYS CFX – PRE</i>	59
5.1. Запуск программы <i>ANSYS CFX-Pre</i>	59
5.2. Создание проекта в программе <i>ANSYS CFX-Pre</i>	60
5.3. Определение основных параметров турбомашины ( <i>Basic Settings</i> )	61
5.4. Загрузка компонентов, составляющих ступень компрессора ( <i>Component Definition</i> )	62
5.5. Определение граничных условий турбомашины и настройка решателя ( <i>Physics Definition</i> )	65
5.6. Проверка созданных интерфейсов ( <i>Interface Definition</i> ) и граничных условий ( <i>Boundary Definition</i> )	68
5.7. Завершение работы с шаблонами <i>Turbomachinery</i>	69
5.8. Редактирование свойств рабочего тела	70
5.9. Запись созданной модели с граничными условиями и передача ее на решение	72
6. РАСЧЕТ ТЕЧЕНИЯ В СТУПЕНИ ОСЕВОГО КОМПРЕССОРА В ПРОГРАММНОМ КОМПЛЕКСЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА <i>ANSYS CFX</i>	75
7. ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ РАСЧЕТА ТЕЧЕНИЯ В СТУПЕНИ ОСЕВОГО КОМПРЕССОРА В ПРОГРАММНОМ КОМПЛЕКСЕ <i>ANSYS CFX</i>	80
7.1. Запуск программы <i>ANSYS CFX – Post</i>	80
7.2. Загрузка результатов решения	81
7.3. Определение результатов расчета как результатов расчета турбомашины	82
7.4. Отображение на экране нескольких межлопаточных каналов	84
7.5. Постройка графиков изменения параметров потока вдоль поверхности лопаток осевого компрессора в произвольном по высоте сечении	85
7.6. Управление отображением расчетной области	87
7.7. Создание турбоповерхностей	88
7.8. Построение картины распределения параметров трехмерного потока в ступени осевого компрессора на созданной турбоповерхности	90
7.9. Построение линий тока в ступени осевого компрессора	96
7.10. Построения поля векторов скорости в ступени осевого компрессора на созданной ранее турбоповерхности	97

7.11. Определение интегральных параметров потока в ступени осевого компрессора	98
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	100

## ОСНОВНЫЕ УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

$b$	-	высота лопатки, хорда профиля;
$c$	-	скорость потока в абсолютной системе координат, теплоемкость;
$c_p$	-	изобарная теплоемкость;
$D$	-	диаметр;
$F$	-	площадь сечения;
$G$	-	массовый расход;
$i$	-	энтальпия;
$i_{PK}, i_{HA}$	-	угол атаки;
$k$	-	показатель адиабаты;
$L$	-	удельная работа;
$l$	-	длина;
$M$	-	число Маха;
$N$	-	мощность;
$n$	-	частота вращения ротора;
$p$	-	давление;
$P$	-	сила, тяга;
$r$	-	радиус;
$R$	-	газовая постоянная;
$T$	-	температура;
$t$	-	шаг решетки;
$\bar{t}$	-	относительный шаг;
$u$	-	окружная скорость;
$w$	-	относительная скорость;
$z$	-	число лопаток в ЛВ, число ступеней, число гребешков лабиринтного уплотнения;
$\tau(\lambda); \pi(\lambda);$ $\varepsilon(\lambda); q(\lambda)$	-	газодинамические функции;
$\alpha$	-	угол между фронтом решетки и вектором абсолютной скорости;
$\beta$	-	угол между фронтом решетки и вектором относительной скорости;
$\delta$	-	величина зазора;
$\delta\alpha, \delta\beta$	-	угол отставания потока в абсолютной и относительной системах координат;
$\gamma$	-	угол установки профиля;
$\eta$	-	коэффициент полезного действия;

$\lambda$	-	приведенная скорость;
$\mu$	-	коэффициент расхода;
$\pi_k^*$	-	степень повышения давления компрессора;
$\rho$	-	плотность;
$\rho_{ст}$	-	степень реактивности ступени;
$\sigma$	-	коэффициент восстановления полного давления;
$\omega$	-	угловая скорость вращения ротора, угол заострения профиля;
$\zeta$	-	коэффициент потерь

## Индексы

*	—	параметр торможения;
<i>1</i>	—	сечение на входе в рабочее колесо;
<i>2</i>	—	сечение на выходе из рабочего колеса;
<i>3</i>	—	сечение на выходе из направляющего аппарата;
<i>в</i>	—	воздух;
<i>рз</i>	—	относящийся к радиальному зазору;
<i>ср</i>	—	относящийся к среднему сечению;
<i>ст</i>	—	относящийся к ступени;
<i>а</i>	—	осевое направление;
<i>opt</i>	—	оптимальный;
<i>р</i>	—	изобарный процесс ( $p=const$ );
<i>г</i>	—	радиальное направление;
<i>с</i>	—	изоэнтропический (идеальный) процесс;
<i>и</i>	—	окружное направление;
<i>w</i>	—	параметр, рассматриваемый в относительном движении, т.е. в системе координат, связанной с вращающимся рабочим колесом;
<i>x, y, z</i>	—	проекции на координатные оси;
$\Delta$	—	изменение величины;
$\lambda$	—	связанный с влиянием скорости потока;
$\Sigma$	—	суммарная величина.

## Сокращения

<b>ВМ</b>	—	верхнее меню;
<b>ВНА</b>	—	входной направляющий аппарат;
<b>ГДФ</b>	—	газодинамические функции;
<b>ГМ</b>	—	главное меню;
<b>ГТД</b>	—	газотурбинный двигатель;
<b>ГТУ</b>	—	газотурбинная установка;
<b>ГУ</b>	—	граничное условие;
<b>КПД</b>	—	коэффициент полезного действия;
<b>ЛВ</b>	—	лопаточный венец;
<b>ЛКМ</b>	—	левая кнопка мыши;
<b>НА</b>	—	направляющий аппарат;
<b>ОС</b>	—	операционная система;
<b>ПЧ</b>	—	проточная часть;
<b>ПКМ</b>	—	правая кнопка мыши;
<b>РЗ</b>	—	радиальный зазор;
<b>РК</b>	—	рабочее колесо;
<b>СКМ</b>	—	средняя кнопка мыши;
<b>СК</b>	—	система координат;
<b>ТРД</b>	—	турбореактивный двигатель;
<b>CFD</b>	—	(англ. аббр. <i>Computational Fluid Dynamics</i> ) -«вычислительная газовая динамика».

Остальные обозначения, индексы и условные сокращения объяснены в тексте.



## ВВЕДЕНИЕ

Газодинамическое совершенствование узлов газотурбинных двигателей как авиационного, так и наземного назначения является основным направлением их развития, поскольку они непосредственно влияют на топливную экономичность и конкурентоспособность изделия в целом. Например, повышение КПД турбины высокого давления ТРД с умеренными параметрами цикла на 1% приводит к снижению удельного расхода топлива на 0,7%. Аналогичное влияние оказывают и другие турбомашин на совершенство ГТД.

В настоящее время турбомашин достигли высокого уровня совершенства. Современные ГТД характеризуются высокими параметрами цикла, что приводит к существенному уменьшению высот лопаток, а тенденция сокращения числа ступеней требует применения высоконагруженных сверхзвуковых венцов. Поэтому достижение заложенного в техническом задании значения КПД турбомашин, не говоря уже о его повышении, является сложной научно-технической задачей. В случае проектирования компрессоров задача осложняется еще и требованием обеспечения достаточных запасов газодинамической устойчивости, а они, как известно, снижаются с ростом параметров цикла. Причем за последние 20...30 лет время на решение задачи сократилось от десяти до 3...5 лет, что требует резко сократить число доводочных испытаний и, по сути, получать конструкцию близкую к окончательной уже «с листа».

Сложившаяся ситуация привела к полному пересмотру процесса проектирования и газодинамической доводки узлов ГТД и ГТУ. В него внедрены новые методики, содержащие наиболее совершенные физические модели. Широко применяются методы вычислительной газовой динамики, основанные на численном решении системы уравнений Навье - Стокса, и способные заменить большую часть дорогих натуральных экспериментов. В настоящий момент времени решение уравнений Навье-Стокса является самым

совершенным методом расчета газодинамических процессов. Применение методов вычислительной газовой динамики позволяет на этапе первоначального проектирования выявить действительную картину течения, определить необходимые изменения элементов ПЧ, ведущие к устранению обнаруженных недостатков, а также открывает возможности для поиска новых прогрессивных решений. Это позволяет проводить значительную часть проектировочных и доводочных работ на компьютере, сократив число экспериментов до минимума.

В мировой практике уже однозначно установлено, что переход к новому процессу проектирования позволяет снизить количество средств на доводку авиационного (газотурбинного) двигателя более, чем на порядок.

В данной работе рассматривается последовательность формирования виртуальных моделей потока воздуха в ступени осевого компрессора газотурбинного двигателя для исследования методами вычислительной газовой динамики. Созданная подобным образом расчетная модель в дальнейшем может быть использована для анализа рабочего процесса спроектированной ступени компрессора, выявления ошибок проектирования и поиска путей увеличения ее газодинамической эффективности.

*CFD*-моделирование любого течения условно можно разделить на следующие этапы:

- выбор расчетной схемы, граничных условий и основных допущений;
- построение расчетной модели: включает в себя определение границ рассматриваемой области, создание расчетной сетки, назначение граничных условий, задание параметров счета;
- непосредственно расчет;
- визуализация результатов расчета и определение основных расчетных параметров (интегральных значений скорости, давления, температуры и т.п.) и анализ выполненных расче-

тов, оценка адекватности распределения параметров по расчетной области.

Данный алгоритм применительно к расчету течения в авиационных и промышленных осевых компрессорах может быть реализован в различных как универсальных (*CFX*, *Fluent*, *StarCD* и т.п.), так и специализированных (*Numeca*, *FineTurbo*, *FlowER* и т.п.) программных комплексах. В настоящей работе приводится практическая реализация этого алгоритма в программном комплексе *Ansys CFX* (на примере 13-й версии), лицензией на использование которого обладает СГАУ.

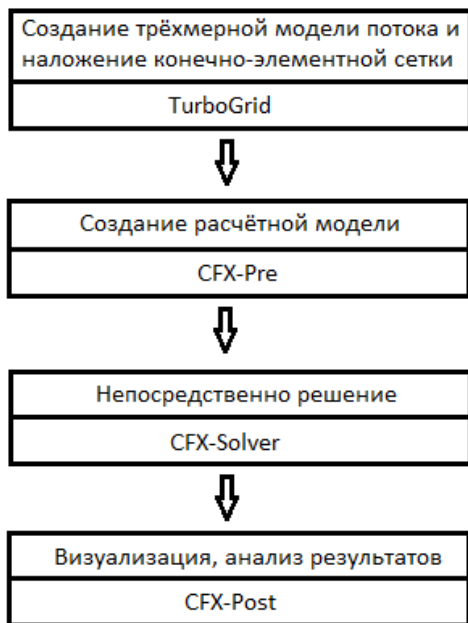
Представленная информация может быть использована в работе учебных, проектных и научно-исследовательских организаций авиационной, ракетно-космической, транспортной, судостроительной, энергетической, нефтегазовой и других отраслей.

# 1. ОСНОВНЫЕ ЭТАПЫ СОЗДАНИЯ РАСЧЕТНЫХ МОДЕЛЕЙ ПОТОКА РАБОЧЕГО ТЕЛА В ПРОТОЧНОЙ ЧАСТИ ТРЕХМЕРНОЙ СТУПЕНИ ОСЕВОГО КОМПРЕССОРА В ПРОГРАММНОМ КОМПЛЕКСЕ *ANSYS CFX*

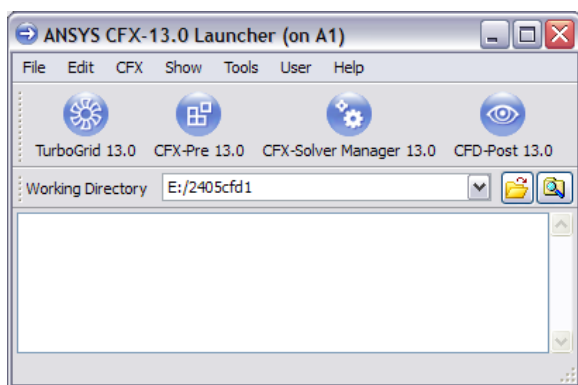
Процесс построения расчетной модели потока в ступени осевого компрессора с помощью современных *CAE* программных комплексов, основанных на решении уравнений Навье – Стокса условно можно разделить на четыре этапа: построение расчетной модели, задание граничных условий, непосредственный расчет, визуализация полученных результатов. При исследовании структуры потока в турбомашинах первый этап целесообразно выполнять в специализированной программе *TurboGrid*. Задание граничных условий осуществляется в модуле *CFX-Pre*, процесс решения производится в модуле *CFX-Solver*, а визуализация полученных результатов – в *CFX-Post* (рис. 1.1). Все упомянутые модули являются частями программного комплекса *Ansys CFX* и запускаются из общего стартового меню (рис. 1.2), доступ которому можно получить из меню «Пуск» ОС «*Windows*»:

*Пуск* → *Программы* → *Ansys 13.1* → *Fluid Dynamics* → *CFX*.

Ниже будет приведен подробный универсальный пошаговый алгоритм построения расчетной модели потока в ступени осевого компрессора в программном комплексе *Ansys CFX*.



*Рис. 1.1. Этапы решения CFD-задачи*



*Рис. 1.2. Стартовое меню программного комплекса Ansys CFX*

## **2. ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ О ПОСТРОЕНИИ РАСЧЕТНЫХ МОДЕЛЕЙ ПОТОКА В МЕЖЛОПАТОЧНЫХ КАНАЛАХ ВЕНЦОВ ОСЕВЫХ КОМПРЕССОРОВ В *TurboGrid***

### **2.1. Типовой алгоритм построения расчетных моделей потока в межлопаточных каналах в программе *TurboGrid***

Программа *TurboGrid* используется в качестве генератора сеток конечных элементов в программном комплексе *Ansys CFX* в задачах, связанных с исследованием течений рабочего тела в элементах турбомашин различных типов. Программа позволяет легко и быстро в автоматизированном режиме создавать качественные расчетные модели для исследования течения в турбомашинах с помощью *CFD*-программ. *TurboGrid* имеет средства, позволяющие строить геометрию расчетной области, накладывая на созданную расчетную область конечноэлементную сетку высокого качества в автоматическом и полуавтоматическом режимах с минимальным количеством настроек. Используемые при этом алгоритмы отличаются высокой скоростью. Так, например, создание сетки с числом ячеек в один миллион занимает на современном персональном компьютере несколько минут. В программе реализована возможность анализа качества сетки.

Построение конечно-элементной сети производится на основе разделения расчетной области на простые блоки, которые могут быть разбиты структурированной сеткой. При этом имеется воз-



**Рис. 2.1.** Процесс создания расчетных моделей турбомашин с помощью *TurboGrid*

сом, навалов, наклонов, саблевидности, несимметричных концевых стенок, укороченных лопаток - «сплиттеров». При построении расчетных моделей возможна параметризация.

Процесс создания модели потока в турбомашине состоит из четырех основных этапов (рис 2.1):

- импорт геометрии лопаточной машины;
- создание топологии;
- построение конечноэлементной сетки;
- анализ качества полученной сетки.

возможность применять все современные топологии сетки:  $H$ ;  $J$ ;  $O$ ;  $C$ ;  $L$ , а также их сочетания. В программе реализован интуитивно понятный интерфейс для создания структурных блоков.

Сетка конечных элементов, полученная в программе *TurboGrid*, обладает высоким качеством по углам скошенности, коэффициентам объема и расширения.

Программа *TurboGrid* позволяет создавать расчетные модели для исследования течения в статичных и подвижных ЛВ осевых и радиальных турбомашин с учетом всех особенностей: зазоров между торцами лопаток и корпу-

## 2.2. Запуск программы *TurboGrid*

Независимый запуск программы *ANSYS TurboGrid* осуществляется из стартового меню комплекса *ANSYS CFX*, которое можно вызвать из меню «Пуск» ОС «Windows»:

Пуск → Программы → Ansys 13.0 → Fluid Dynamics → CFX.

После этого появится окно запуска программы, которое показано на рис. 2.2. В нем, в поле «Working Directory», выбирается папка, в которой будут располагаться рабочие файлы текущей сессии. В ней должны находиться файлы, описывающие меридиональные обводы лопатки (периферийный – *shroud*, и втулочный – *hub*), и файл, описывающий сечения пера лопатки. Все указанные файлы должны иметь расширение *\*.curve* (см. раздел 3). Выбор рабочей папки осуществляется так, как это обычно осуществляется в ОС «Windows» (рис. 2.2).

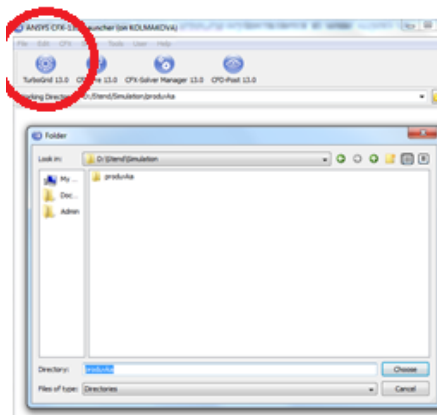


Рис.2.2. Выбор рабочей папки

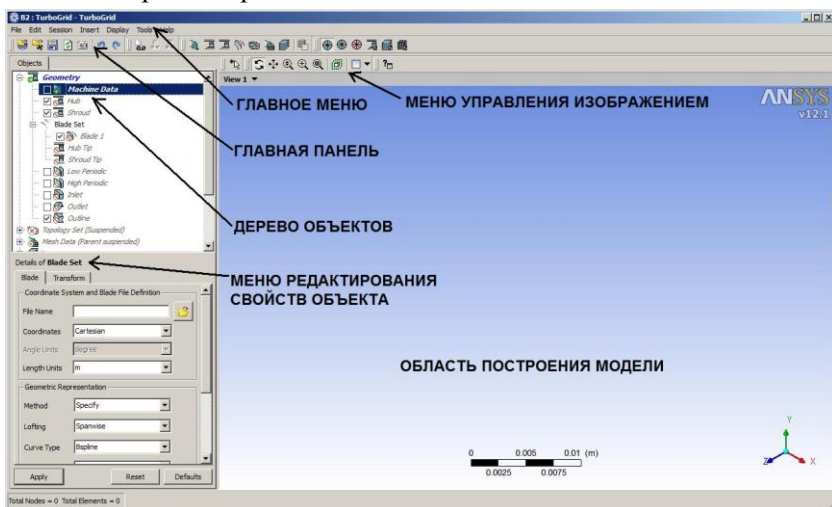
После выбора рабочей папки нажатием ЛКМ (🖱) на иконку *TurboGrid* (рис 1.2 и 2.2) в левой верхней части меню вызывается рабочее окно программы.

## 2.3. Базовые сведения о работе в программе *TurboGrid*

Окно программы *TurboGrid* состоит из следующих элементов (рис. 2.3):



- главного меню (ГМ);
- главной панели инструментов – верхнего меню (ВМ);
- меню управления изображением;
- области построения модели;
- дерева объектов
- меню редактирования свойств объекта.



**Рис.2.3. Внешний вид окна программы TurboGrid**

В *дереве объектов* (рис. 2.3) расположены основные элементы, используемые для работы с геометрией, топологией, настройки параметров сетки, анализа ее качества и т.д. Они расположены в порядке использования при создании расчётной модели. Если дважды щелкнуть ЛКМ (☞) на любом элементе дерева объектов, ниже появляется меню редактирования его свойств, где можно провести необходимые настройки выбранной команды. Доступ к меню редактирования свойств объекта (рис. 2.3) можно также получить, щелкнув ПКМ (☞) на нужном объекте, и выбрав пункт *Edit* в появившемся всплывающем меню.

В главном меню программы *TurboGrid* (рис. 2.3) содержатся команды работы с файлами моделей (чтение, сохранение, импорт), настройки внешнего вида окна программы и т.п. Работа с ними аналогична работе с аналогичными командами большинства других программ в ОС «Windows».















Главная панель инструментов (рис. 2.3) программы *TurboGrid* содержит кнопки быстрого вызова часто используемых команд. Описание команд приведено в табл. 2.1. Действия некоторых команд поясняется рис. 2.7...2.10.

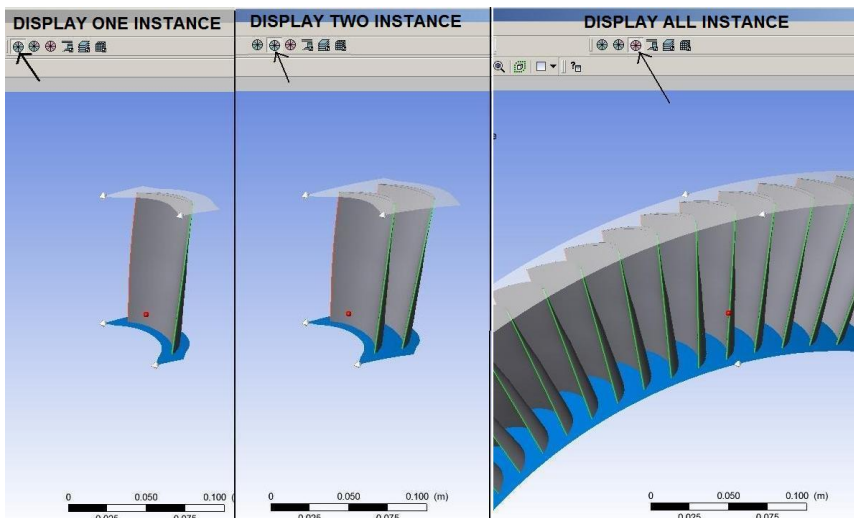
Таблица 2.1

Действия, выполняемые с помощью кнопок главной панели

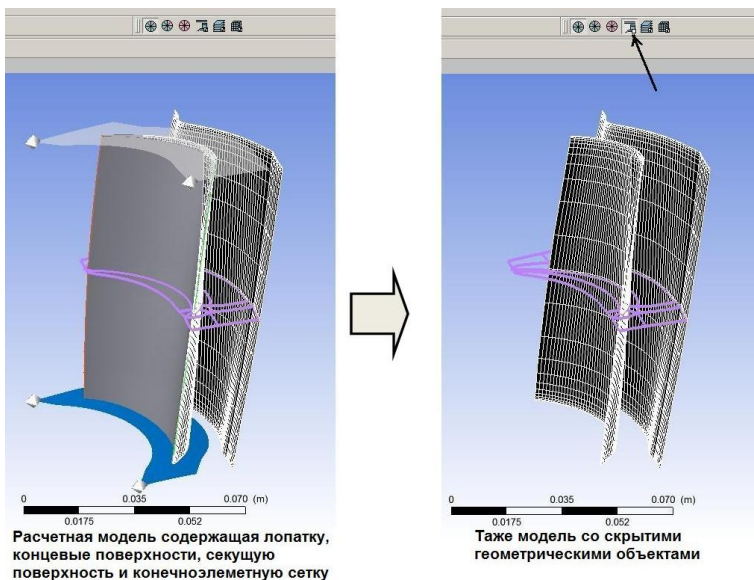
Вид	Название	Действие
1	2	3
	<i>New Case</i>	Создание нового проекта
	<i>Load Blade Gen</i>	Загрузка файла информации о лопаточном венце (с расширением *.inf)
	<i>Load Curves</i>	Загрузка геометрии проточной части на основе файлов с расширением *.curve, содержащих информацию о координатах профиля, втулочной и периферийной концевых поверхностей
	<i>Load State</i>	Загрузка файла состояния (файла настроек) <i>TurboGrid</i> (с расширением *.tst)
	<i>Save State As</i>	Сохранение состояния (настроек) <i>TurboGrid</i> в <i>tst</i> -файл
	<i>Save Mesh As</i>	Сохранение полученной сетки в файл
	<i>Save picture</i>	Сохранение изображения области построения модели в графический файл (табл. 2.2)
	<i>Undo</i>	Отмена предыдущей команды
	<i>Redo</i>	Возврат ранее отмененной команды
	<i>Edit Machine Data</i>	Редактирование свойств венца. После активации команды появляется меню, в котором можно отредактировать число лопаток, положение оси и т.д.

Продолжение таблицы 2.1

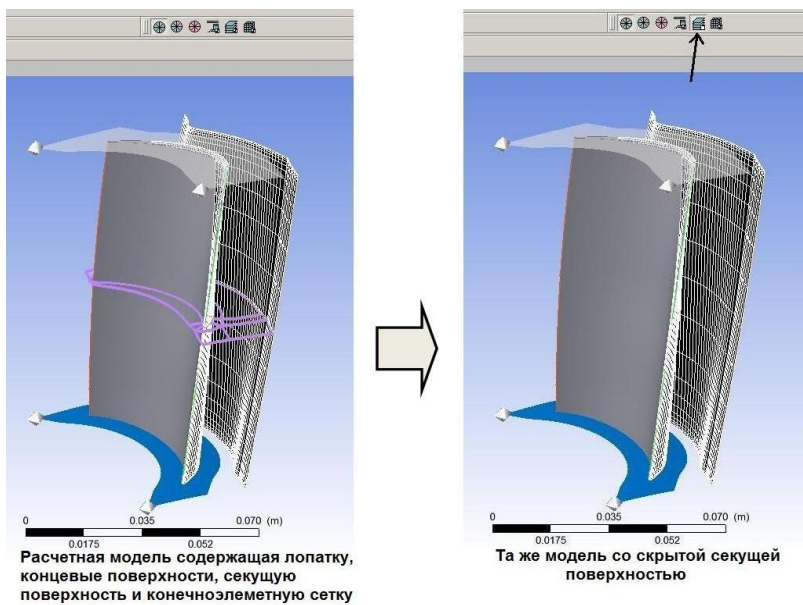
1	2	3
	<p><i>Play session</i>  <i>New session</i>  <i>Start recording</i>  <i>Stop recording</i></p>	<p>Работа с журнальным файлом (файл макроса). В <i>TurboGrid</i> можно записать выполняемую последовательность действий в специальный журнальный файл, а затем, проигрывая его (<i>Play</i>) автоматически повторять нужную последовательность действий</p>
	<p><i>Hub</i></p>	<p>Редактирования свойств втулочной концевой поверхности</p>
	<p><i>Shroud</i></p>	<p>Редактирования свойств периферийной концевой поверхности</p>
	<p><i>Blade</i></p>	<p>Быстрый доступ к меню <i>Blade Set</i></p>
	<p><i>Topology</i></p>	<p>Быстрый доступ к меню <i>Topology</i></p>
	<p><i>Edit Mesh Data</i></p>	<p>Быстрый доступ к меню <i>Mesh Data</i></p>
	<p><i>Edit Layers</i></p>	<p>Быстрый доступ к меню <i>Layers</i></p>
	<p><i>Mesh</i></p>	<p>Перестроение сетки в соответствии со сделанными настройками</p>
	<p><i>Display One Instance</i></p>	<p>Отображение расчетной модели в виде области течения вокруг одной лопатки (рис. 2.4)</p>
	<p><i>Display Two Instance</i></p>	<p>Отображение расчетной модели в виде двух два периодических элементов. Это позволяет оценить форму межлопаточного канала (рис. 2.4)</p>
	<p><i>Display All instance</i></p>	<p>Отображение полной расчетной модели (рис. 2.4)</p>
	<p><i>Hide all geometry objects</i></p>	<p>Выключение отображения геометрии. Конечно-элементная сетка остается видимой (рис. 2.5)</p>
	<p><i>Hide all layers</i></p>	<p>Выключение отображения всех слоёв визуализации топологии (рис. 2.6)</p>
	<p><i>Hide all mesh objects</i></p>	<p>Выключение отображения всех слоёв сетки конечных элементов (рис. 2.7)</p>



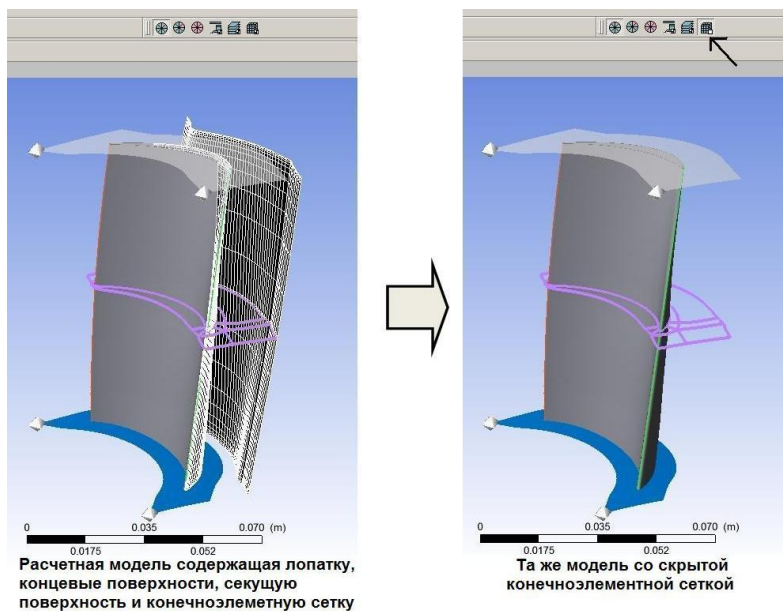
**Рис. 2.4.** Действие семейства команд *Display Instance*



**Рис. 2.5.** Действие команды *Hide all geometry objects*



*Рис. 2.6. Действие команды **Hide all layers***



*Рис. 2.7. Действие команды **Hide all mesh objects***

Внешний вид меню *Save picture* приведен на рис. 2.8, а описание доступных в нем настроек приведены в табл. 2.2.

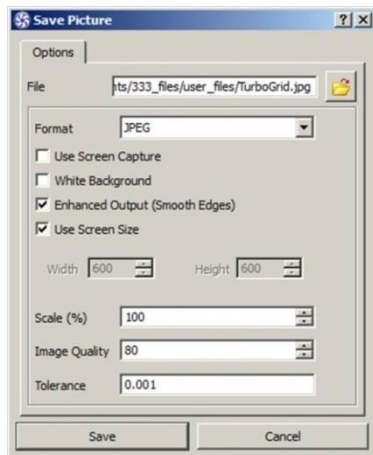


Рис. 2.8. Меню *Save picture*

Таблица 2.2.

Описание настроек, доступных в меню *Save picture*

Название опции	Описание
<i>File</i>	имя и расположение создаваемого файла;
<i>Format</i>	выбор формата графического файла, в котором будет сохранено изображение (доступны форматы *.bmp, *.jpg, *.png и ряд других);
<i>Use screen capture</i>	в файл будет сохранено графическое окно именно так, как оно отображается на экране
<i>White Back Ground</i>	фон рисунка в графическом файле будет записан белым, а не градиентным, как на экране
<i>Enhanced Output</i>	улучшает качество изображения в файле за счет отрисовки граней
<i>Use screen size</i>	при включенной опции сохраненная картинка будет иметь разрешение экрана. В случае если эта опция не активна, пользователь сам может настроить качество изображения, вручную задавая число точек изображения по высоте и ширине картинки
<i>Scale</i>	задание масштаба изображения в процентах
<i>Image Quality</i>	задание качества изображения (при сжатии в форматах с потерей данных – *.jpeg и др.)

В области построения (см. рис. 2.3) находится изображение модели. С его помощью можно оценить результат импорта геометрии, построения сетки и других действий, там же высвечиваются участки с некачественной сеткой. Для того чтобы иметь максимально полное представление, как о геометрии расчетной области, так и качестве сетки в программе *TurboGrid* имеются средства управления изображением. Они во многом схожи с подобными средствами большинства известных *CAD* программ и средства позволяют приближать, удалять элементы геометрии, вращать относительно выбранной точки или оси вращения и перемещать модель в области построения. Внешний вид меню и описание действия каждой его кнопки приведены в табл. 2.3.

Кроме того, в меню управления изображением (см. рис. 2.3), в окне построения модели имеется выпадающий список, который позволяет расположить модель в одном из фиксированных относительно СК положений. Список находится в верхней части окна построения модели и содержит четыре пункта (рис. 2.9):

- *View 1* – изометрическое изображение модели в декартовой системе координат;
- *View 2* – проекция модели на окружную плоскость, образованную осевым и окружным направлениями;
- *View 3* – проекция модели на меридиональную плоскость, образованную осевым и радиальным направлениями;
- *View 4* – аксонометрическое изображение модели в цилиндрической системе координат.

Изображением расчетной модели можно управлять не только применяя команды, вызываемые с помощью кнопок в меню (см. табл. 2.3), но и используя некоторые сочетания клавиш на клавиатуре. Список доступных сочетаний приведен на специальной памятке (рис. 2.10), которая может быть вызвана командой *Show Help Dialog* (см. табл. 2.3).

Таблица 2.3.

## Действия кнопок меню управления изображением

<i>Вид</i>	Название	Действие
	<i>Select</i>	Переводит курсор мыши в режим выбора.
	<i>Rotate</i>	Переводит курсор мыши в режим вращения модели. Вращение происходит при движении мыши с нажатой левой кнопкой.
	<i>Pan</i>	Переводит курсор мыши в режим перемещения расчетной модели по экрану. Перемещение происходит при движении мыши с нажатой левой кнопкой.
	<i>Zoom</i>	Переводит курсор мыши в режим увеличения или уменьшения модели на экране при движении мышью с нажатой левой кнопкой. Движение вверх – приближает модель, вниз – удаляет.
	<i>Zoom Box</i>	Переводит курсор мыши в режим увеличения области модели, которая указывается рамкой.
	<i>Fit View</i>	Располагает модель в окне таким образом, что она занимает все его пространство.
	<i>High lighting</i>	После активации этой команды происходит выделение элемента геометрии щелчком левой кнопки мыши. При этом в меню редактирования свойств объекта появляется меню, в котором можно производить коррекцию настроек выбранного элемента.
	-	Команда позволяет выбрать число окон, в которых будут отображаться модель и их взаимное расположение.
	<i>Show Help Dialog</i>	Вызывает появление памятки, в которой приводятся значения горячих клавиш, с помощью которых можно управлять изображением (рис. 2.10)



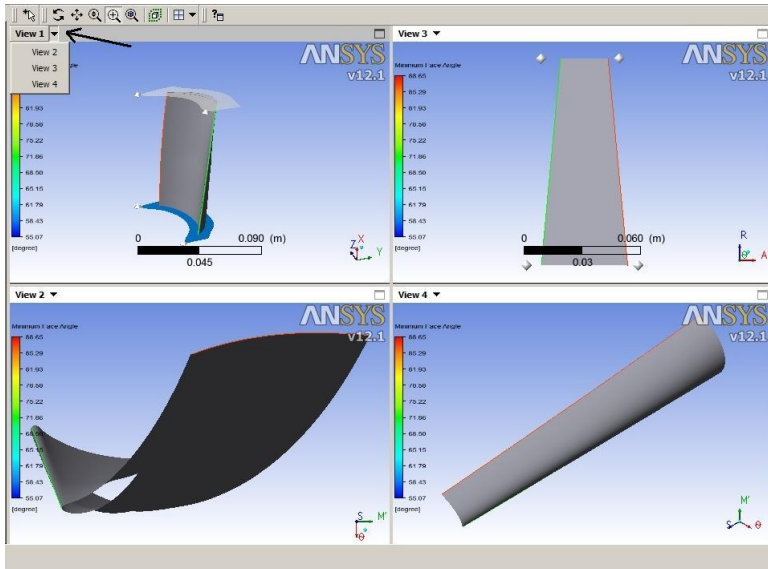


Рис. 2.9. Окно построения модели

Сочетания клавиш, которые могут применяться в *TurboGrid* для управления изображением, приведены в табл. 2.4.

Viewer Key Mapping	
space	Picking/viewing mode
arrow keys	Rotate about X and Y
Ctrl-up/down	Rotate about Z
Shift-arrows	Move light
1, 2, 3, 4	Set number of viewports
c	Fit view
n	Orthographic/perspective
r	Reset view
s	Level-of-detail (auto/off/on)
u	Undo transformation
U	Redo transformation
x, y, z	View towards +X, +Y, +Z
X, Y, Z	View towards -X, -Y, -Z
Close	

Рис. 2.10. Памятка, в которой приводятся значения горячих клавиш для управления изображением

Таблица 2.4

Сочетания клавиш для управления изображением в *TurboGrid*

Сочетание клавиш	Действие
<i>Пробел</i>	переключение между режимами выбора ( <i>Picking</i> ) и манипуляций с изображением. Аналог команды <i>High lighting</i> (табл.2.3)
$\leftarrow, \uparrow, \rightarrow, \downarrow$	вращение вокруг мысленных вертикальной и горизонтальной осей экрана. Аналог команды <i>Rotate</i> (табл.2.3)
<i>Совместно Shift и</i> $\leftarrow, \uparrow, \rightarrow, \downarrow$	перемещение источника света
<i>1,2,3,4</i>	переключения между окнами в окне изображения
<i>c</i>	аналог команды <i>Fit</i> (табл.2.3), размещает модель так, чтобы она занимала все окно
<i>n</i>	переключение между ортогональным и перспективным изображением. Отключает / включает линейку
<i>r</i>	возвращает модель в исходное положение, которое она занимала перед трансформацией
<i>u</i>	отмена трансформации
<i>Shift + u</i>	возврат ранее отмененного действия
<i>x, y, z</i>	взгляд на модель со стороны положительного направления осей <i>x, y, z</i> соответственно. Указанная ось будет направлена ортогонально поверхности окна
<i>Shift+x, y, z</i>	взгляд на модель со стороны отрицательного направления осей <i>x, y, z</i> , соответственно. Указанные оси будут направлены ортогонально поверхности окна

Управление изображением также может осуществляться с помощью мыши.

Действия, выполняемые в *TurboGrid* с помощью мыши по умолчанию, приведены в табл. 2.5.

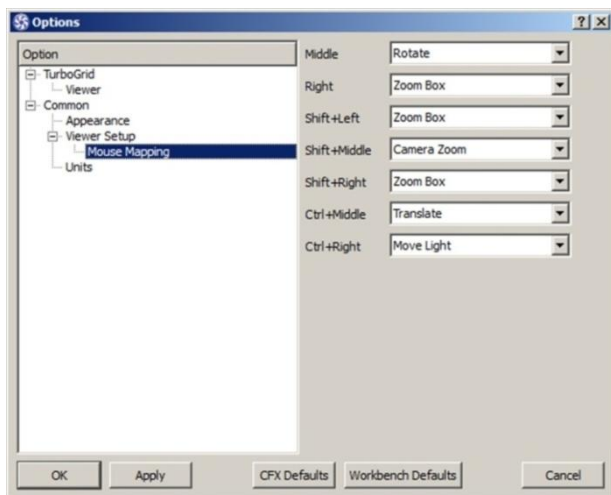
Настроить действия с изображением, выполняемые с помощью мыши, можно с помощью команды главного меню (рис. 2.11):

*ГМ* → *Edit* → *Options* → *Common* → *View Setup* → *Mouse Mapping*.

Таблица 2.5

Действия с помощью мыши в *TurboGrid* (по умолчанию)

Движение мыши	Действие
с нажатой СКМ (  )	вращение модели (  )
с нажатой ПКМ (  )	увеличение модели рамкой
с нажатой ЛКМ (  ) и кнопкой <i>Shift</i>	увеличение модели рамкой
с нажатой СКМ (  ) и кнопкой <i>Ctrl</i>	перемещение модели
с нажатой ПКМ (  ) и кнопкой <i>Ctrl</i>	перемещение источника света

Рис. 2.11. Меню настройки действий, выполняемых мышью в *TurboGrid*

### **3. ПОДГОТОВКА ИСХОДНЫХ ДАННЫХ И ПОСТРОЕНИЕ ГЕОМЕТРИИ МОДЕЛИ ПОТОКА РАБОЧЕГО ТЕЛА В ПРОТОЧНОЙ ЧАСТИ СТУПЕНИ ОСЕВОГО КОМПРЕССОРА**

#### **3.1. Описание геометрии межлопаточного канала в программе *TurboGrid***

Базовым элементом для исследования течения в турбомашинах любого типа является расчетная область – область пространства вокруг обтекаемого тела (лопатки), заполненное рабочим телом. Расчетная область ограничена элементами межлопаточного канала, входного и выходного участков.

Необходимость входного и выходного участка расчетной модели обусловлена тем, что точные эпюры распределения параметров на входе в канал и выходе из него, как правило, неизвестны. Задание полей параметров, существенно отличающихся от действительности, значительно снижает точность расчета и искажает картину реального течения. Вместе с тем, поля параметров на удалении от лопаток имеют большую равномерность. Поэтому добавление в расчетную модель входной и выходной области дает возможность учесть влияние возмущений за решеткой на течение в ней.

Поскольку течение в решетке турбомашин является периодическим, то нет необходимости моделировать его целиком. Для упрощения расчета и сокращения времени его выполнения, обычно рассматривают только один межлопаточный канал, налагая на со-

ответствующие границы расчетной зоны периодическое граничное условие.

Расчетная модель в программе *TurboGrid* строиться, опираясь на форму профиля и меридиональные обводы проточной части. Она, как правило, содержит только один межлопаточный канал (в программе также время имеется возможность задать число лопаток в расчетной области отличным от одного, что используется в частности при построении сплиттеров). Расчетная область состоит из центральной части, в середине которой находится лопатка (*Passage*), входного (*Inlet*) и выходного участков (*Outlet*) (рис. 3.1). Протяженность модели в окружном направлении определяется автоматически в соответствии с числом лопаток. Форма боковой периодической стенки межлопаточного канала повторяет среднюю линию профиля.

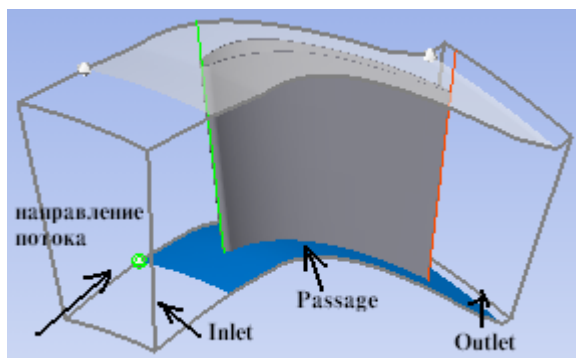
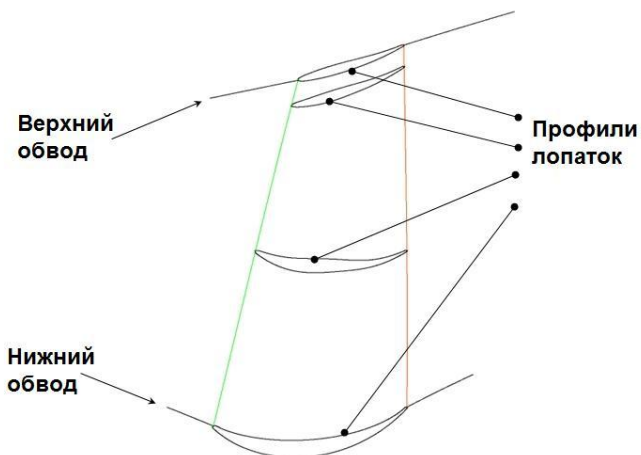


Рис. 3.1. Входная, выходная области и область течения вокруг лопатки

Для облегчения идентификации элементов лопаточной машины они окрашиваются различными цветами:

- перо лопатки (*Blade*) – серым;
- втулочная концевая поверхность (*Hub*) - голубым;
- периферийная концевая поверхность (*Shroud*) – светло серым;
- входная кромка лопатки (*LeadingEdge*) – зеленым;
- выходная кромка лопатки (*TrailingEdge*) – красным.

Программа *TurboGrid* не имеет собственных инструментов для построения элементов геометрии, поскольку позиционируется именно как специализированный генератор сеток конечных элементов. Создание геометрии же предполагается выполнять в других программах из *Turbo*-линейки *Ansys*, например, *Blade Modeler (Blade Gen)*. Данные программы позволяют по основным газодинамическим и геометрическим параметрам проектировать лопаточную машину и создать её геометрическую модель, опираясь на зарубежные методики проектирования. Однако если нужно произвести расчёт уже имеющейся конструкции, то необходимо информацию о её геометрии преобразовать во входной формат *TurboGrid*, т.е. представить турбомашину как набор основных элементов (рис. 3.2), заданных координатами.



**Рис. 3.2. Основные элементы построения геометрии расчетной области**

Таковыми элементами являются (см. рис. 3.2):

- поверхность лопатки, задаваемая набором профилей;
- втулочная поверхность, задаваемая её меридиональным сечением;
- периферийная поверхность, задаваемая аналогично.

Задание координаты выполняется в текстовых файлах с расширением \*.curve.

### 3.2. Подготовка файлов с описанием геометрии расчетной области для программы *TurboGrid*

**ВАЖНО!!!** Для описания геометрии расчетной области турбомашини любого типа в программу *TurboGrid* необходимо загрузить координаты точек поверхности пера, периферийного (верхнего) и втулочного (нижнего) обводов **в виде трех отдельных файлов с расширением \*.curve**. Данные файлы могут быть получены из различных программ профилирования, модулей *Blade Gen*, *Design Modeler*, созданы «вручную» стандартными средствами ОС, либо с применением автоматизированных конвертеров координат. Таким конвертером является, например, программа *Profiler*, разработанная на кафедре ТДЛА. Она позволяет быстро оцифровать чертеж и автоматически перевести данные о геометрии пера из традиционной табличной формы записи в формат \*.curve.

Указанные файлы создаются в соответствии со следующими требованиями:

- *файлы координат точек наружного (периферийного) и внутреннего (втулочного) меридиональных обводов проточной части*. Точки задаются последовательно от входа к выходу. Число точек должно быть достаточным для качественного описания обвода сплайном. Минимальное число точек - две (для прямолинейных обводов);
- *файл координат точек профилей пера лопатки*. Геометрия пера лопатки должна описываться не менее чем двумя сечениями. Точки профиля должны образовывать замкнутый контур. Число точек должно быть достаточным для качественного описания профиля сплайном, особенно в месте сопряжения корытца и спинки с входной/выходной кромкой. Сечение

не должно отстоять от обвода вглубь проточной части более чем на 7% и по возможности не должно пересекать обвод. Наилучший вариант, если первое и последнее сечение находятся за обводами, тогда поверхности пера и меридиональных обводов гарантированно пересекаются.

Все файлы имеют обычный текстовый формат и могут быть легко созданы в обычном текстовом редакторе, например в программе «Блокнот» ОС «Windows». Содержимое файлов периферийного/втулочного обводов и профиля представляет собой три столбца с координатами точек обвода или профиля.

Файлы, содержащие координаты втулочной/периферийной поверхностей имеют следующий вид:

```
253.979586 3.22022526 52.9666667
253.921167 6.32779356 58.1583333
253.878463 7.85659149 64.8333333
253.901748 7.06414810 72.2500000
253.987552 2.51461314 81.8916667
253.949132 -5.08314163 90.0500000
253.720240 -11.9180551 110.000000
```

Первая точка должна находиться выше по течению, чем входная кромка. Последняя – ниже по течению выходной кромки (в случае, если это условие не будет выполнено, программе не удастся найти пересечения обвода и профиля). Первая и последняя точки определяют пределы осевой протяженности расчетной области.

В файлоописания пера, последовательно приводятся координаты точек всех сечений в следующем виде:

```
# Profile 1 at 0.0000%
253.999759 0.349947171 50.2493955
253.999660 0.415740917 50.1732460
...
# Profile 2 at 5.000%
259.297550 1.12727624 50.7276452
```



Первым описывается втулочное сечение, затем расположенное выше и т.д. вплоть до периферийного. Координаты точек должны образовывать замкнутый контур. Количество сечений не ограничено. Каждый профиль начинается со знака «#», затем вводится его имя, оно используется только в качестве комментария, поэтому задавать его можно произвольно.

Координаты точек в файлах \*.*curve* могут быть представлены в декартовой ( $x, y, z$ ), или цилиндрической системах координат ( $r, \theta, a$ ).

Рекомендуется, называть файл периферийного обвода таким образом, чтобы оно содержало слово *shroud*, втулочный обвод – *hub*, файл профиля – *profile* и размещать их в одной папке. В таком случае при выборе одного из них при загрузке геометрии другие будут найдены программой автоматически.

### 3.3. Загрузка в программу *TurboGrid* геометрии лопаточного венца осевого компрессора

Для построения геометрии расчетной области в программу *TurboGrid* необходимо загрузить файлы, описывающие меридиональные обводы лопатки, и файл, определяющий геометрию профилей пера лопатки, создание которых было рассмотрено в предыдущей главе. Кроме того, необходимо задать такие важные для построения геометрии параметры, как ось лопаточного венца (*Principal Axis*), количество лопаток (*# of Blade Sets*) и единицы измерения, в которых была задана геометрия в *curve*-файлах (*Length Units*) – метры, миллиметры и т.п.

Загрузка геометрии с помощью подготовленных *curve*-файлов осуществляется с помощью команды главного меню *Load Curves*:

*ГМ* → *File* → *Load Curves*.

Эта же команда может быть вызвана нажатием ЛКМ



на кнопку *Load Curves*



на панели инструментов (см. табл. 2.1). Внешний вид появляющегося при этом меню показан на рис. 3.3. Настройки, которые могут быть сделаны в этом окне, приведены в табл. 3.1.

К особенностям задания описания геометрии расчетной области в программе *TurboGrid* относится тот факт, что размерность линейных размеров следует выбирать таким образом, чтобы габариты расчетной области находились в диапазоне 0,2...200 единиц. В случае если это условие не будет выполняться, будет выдано сообщение об ошибке, показанное на рис. 3.4.

Учитывая, что размеры лопаточных машин могут меняться от нескольких миллиметров, до нескольких метров у водяных турбин, то следует выбирать размерность исходя из оптимальных размеров модели. Выбор не сказывается ни на чем и не импортируется в расчетную программу и нужен только для того, чтобы размеры были в требуемом диапазоне.

Выход габаритных размеров за пределы рекомендованного диапазона может привести к появлению ошибок, обрезке или пересече-

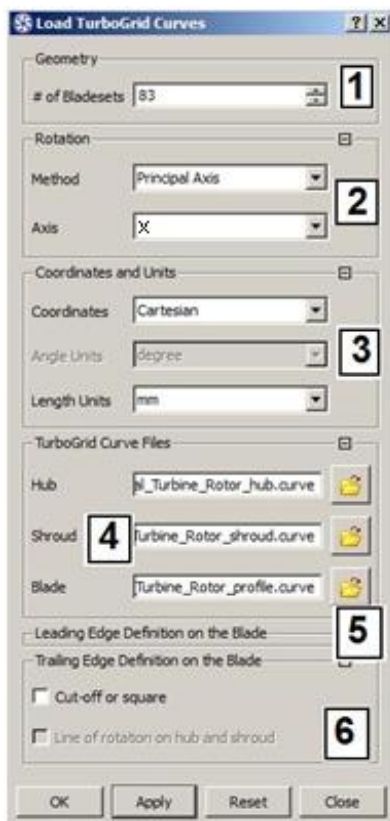


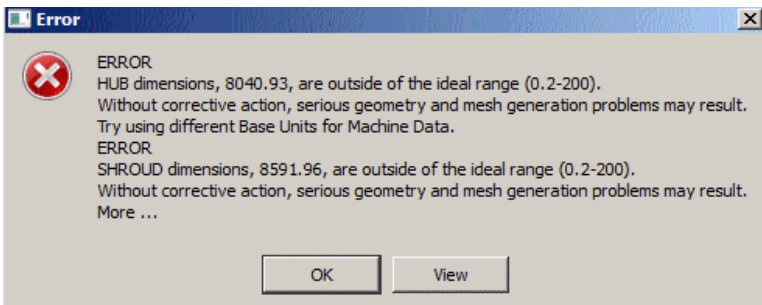
Рис. 3.3. Меню *Load Curves*

нии поверхностей. В случае появления такой ошибки нет необходимости перезагружать программу, достаточно только поменять размерность. При построении расчетных моделей компрессоров и турбин ГТД наиболее приемлемой единицей являются миллиметры, для вентиляторов – сантиметры.

Таблица 3.1.

**Настройки, доступные в меню *Load Curves***


Номер (рис. 3.3)	Название опции	Описание
1	<i># of Blades</i>	число лопаток в венце
2	<i>Rotation</i>	Описание оси вращения. Она может быть задана двумя способами: <i>principal axis</i> – осью является одна из осей глобальной системы координат, либо <i>rotation axis</i> , когда ось задается с помощью двух точек. Возможны следующие варианты глобальных осей ( <i>X, Y, Z, -X, -Y, -Z</i> )
3	<i>Coordinates And Units</i>	тип системы координат (декартова ( <i>Cartesian</i> ) или цилиндрическая ( <i>cylindrical</i> ))
3	<i>Length Units</i>	единицы измерения для линейных размеров
3	<i>Angle Units</i>	единицы измерения для угловых размеров
4	<i>Hub</i>	имя файла с расширением <i>*.curve</i> содержащие координаты втулочного обвода проточной части
4	<i>Shroud</i>	имя файла с расширением <i>*.curve</i> содержащие координаты периферийного обвода проточной части
4	<i>Blade</i>	имя файла с расширением <i>*.curve</i> содержащие координаты профилей лопаток
5	<i>Leading Edge Definition On The Blade</i>	Команды, описывающие построение входных кромок лопатки
6	<i>Trailing Edge Definition On The Blade</i>	Команды, описывающие построение выходных кромок лопатки
6	<i>Cut-Off Square</i>	Обрезанная (прямоугольная) кромка
6	<i>Line Of Rotation Hub And Shroud</i>	Кромка, срезанная меридиональным сечением.



**Рис. 3.4.** Сообщение об ошибке, появляющееся в случае, если размеры расчетной модели выходят за пределы рекомендуемого диапазона

Процесс загрузки геометрии по созданным заранее *curve*-файлам может быть полностью автоматизирован с помощью управляющего файла с расширением *\*.inf*, который должен быть создан заранее в программе *Blade Gen* или вручную в текстовом редакторе. Он загружается с помощью команды главного меню:

*ГМ →File→Load Blade Gen,*

или нажатием кнопки  в главной панели(см. табл. 2.1). Управляющий *inf*-файл имеет следующий вид:

```
!===== CFX-Blade Gen Export =====
AxisofRotation: Z
NumberofBladeSets: 83
Number of Blades Per Set: 1
Geometry Units: MM
Blade 0 LE: Ellipse End
Blade 0 TE: Ellipse End
Hub Data File: Axial_Turbine_Rotor_hub.curve
Shroud Data File: Axial_Turbine_Rotor_shroud.curve
Profile Data File: Axial_Turbine_Rotor_profile.curve
```


Структура *inf*-файла описана в табл. 3.2.


Таблица 3.2.


Структура управляющего *inf*-файла

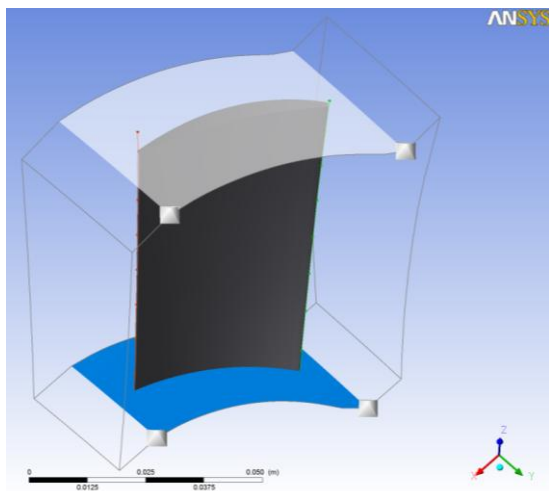
Строка	Задаваемое действие
<i>Axis of Rotation</i>	указывается ось вращения (возможные варианты <i>X, Y, Z</i> )
<i>Number of BladeSets:</i>	указывается число лопаток (периодов) в венце
<i>Number of Blades Per Set:</i>	указывается число лопаток в периоде. Для обычных турбомашин это число равно <i>1</i> . В ряде случаев, например при построении сплиттеров число лопаток в периоде может быть отличным от единицы
<i>Geometry Units:</i>	указывается размерность линейных размеров. Геометрия может быть построена в метрах ( <i>m</i> ), сантиметрах ( <i>cm</i> ), миллиметрах ( <i>mm</i> ), дюймах ( <i>in</i> ), футах ( <i>foot</i> ), микронах ( <i>micron</i> )
<i>Blade 0 LE:</i>	указывается тип линии описывающей входную кромку. Возможны варианты <i>Ellipse End</i> – эллипс или <i>Cut Off End</i> – прямая для срезанных кромок
<i>Blade 0 TE:</i>	то же самое для выходной кромки
<i>Hub Data File:</i>	вводится имя <i>curve</i> -файла с координатами втулочной концевой поверхности
<i>Shroud Data File:</i>	вводится имя <i>curve</i> -файла с координатами периферийной концевой поверхности
<i>Profile Data File:</i>	вводится имя <i>curve</i> -файла с координатами профилей пера лопатки

После запуска команды *Load Curves* или *Load Blade Gen* по заданным исходным данным будет сгенерирована и отображена в области построения модели геометрия расчетной области вокруг одной лопатки (рис. 3.5). На лопатке цветом выделяется входная (красная) и выходная (зеленая) кромки. Каркасное изображение (объект *Outline* в дереве объектов) очерчивает контур трехмерной области, на которую в дальнейшем будет наложена сетка конечных элементов.


Для того, чтобы посмотреть на рабочее колесо целиком, необходимо нажать кнопку *DisplayAllInstances* () на панели инструментов (см. табл. 2.1). Для того чтобы отобразить в рабочей области



только один межлопаточный канал необходимо нажать кнопку *Display One Instance* (  ) на панели инструментов (см. табл. 2.1).

Если в дереве объектов щелчком ЛКМ (  ) активировать опцию *Geometry* → *Machine Data* (поставить галочку), то в окне построения модели будет отображаться радиальная (синего цвета) и осевые оси координат (красного цвета). По умолчанию эта опция не активна.



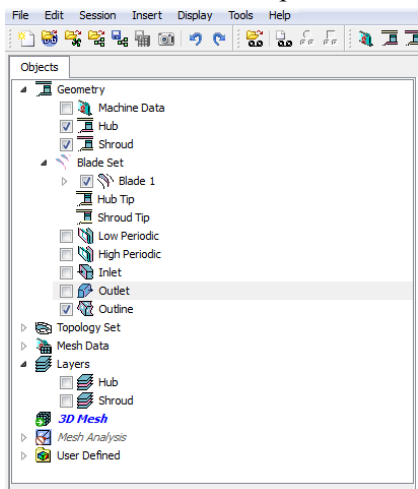
**Рис. 3.5. Геометрия расчетной области, построенная на основании геометрии профиля и концевых поверхностей**

Любые элементы геометрии можно сделать видимыми или не видимыми поставив или убрав с помощью ЛКМ (  ) галочку напротив названия элемента во вкладке *Geometry* в дереве объектов или убрав её (рис. 3.6).

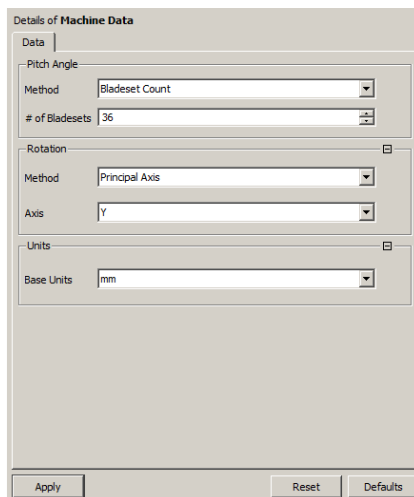
Если дважды щелкнуть ЛКМ (  ) на пункте *Machine Data* во вкладке *Geometry* в дереве объектов (рис.3.6) или щелкнуть ПКМ (  ) на нем же и выбрать из выпадающего меню пункт *Edit*, то под деревом объектов появится вкладка *Details of Machine Data*

(рис.3.7). Ее вид и выполняемые команды во многом совпадает с видом команды *Load Curves*(рис.3.3 и табл.3.1). В меню *Machine Data* можно при необходимости произвести редактирование основных геометрических параметров, например числа лопаток в венце.

Если подобным образом активировать в дереве объектов команду *Geometry*→*Hub*, можно увидеть информацию о файле, который был использован для создания втулки. Аналогичную информацию можно найти, открыв вкладки *Shroud* и *Blade 1*.



**Рис. 3.6.** Дерево объектов



**Рис. 3.7.** Меню *MachineData*

В этих меню, в поле *Geometric Representation* следует проверить настройку: если периферийный или втулочный обвод заданы в виде сплайнов, то параметр типа кривой должен иметь значение *Bspline*(базисный сплайн). Если обвод представляет собой ломаную линию, то параметр типа кривой должен иметь значение *Piecewiselinear* (кусочно-линейная). Следует помнить, что в качестве базисных сплайнов в *TurboGrid* используются кубические сплайны Безье.

Имена объектов в ветви *Geometry* в окне *Object* показаны черным цветом без курсива. Это говорит о том, что геометрия объектов является определенной.

### 3.4. Задание величины и геометрии радиального зазора

Между торцами лопаток и корпусом часто имеется радиальный зазор, предназначенный для гарантированного, с учетом тепловых и силовых деформаций, разделения вращающихся и неподвижных деталей. Как в компрессорах, так и турбинах радиальный зазор имеется над рабочей лопаткой. Кроме того, в осевых компрессорах радиальный зазор часто имеется между нижним торцом направляющей лопатки и втулочной поверхностью. Программа *TurboGrid* позволяет создать радиальный зазор между корпусом и лопаткой как вблизи втулки, так и вблизи периферии.

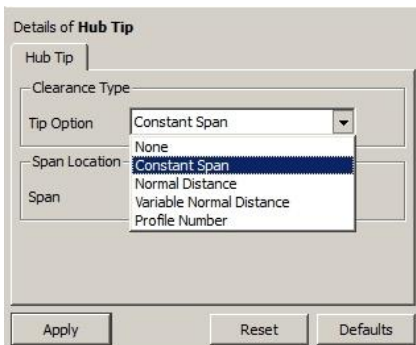
Для построения радиального зазора в проточной части осевого компрессора в дереве объектов в пункте *Geometry* следует выбрать пункт, соответствующий желаемому расположению зазору (*Hub Tip* – если зазор находится у втулки, *Shroud Tip* – если зазор располагается над лопаткой). В результате появится меню, изображенное на рис. 3.8.

Тип радиального зазора выбирается в поле *TipOption*. Здесь возможны следующие варианты:

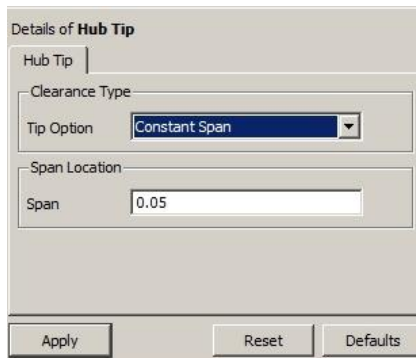
- *None* – зазор отсутствует;
- *Constant Span* – относительный зазор, постоянный по всей ширине венца. Задается в долях от высоты лопатки (например, 0,05 соответствует величине относительного зазора 5% от высоты лопатки). Значение вводится в поле *Span*, которое появляется при выборе данного пункта (рис. 3.9).
- *Normal Distance* – абсолютный зазор, постоянный по всей ширине венца. Величина зазора задается в единицах длины в поле *Tip Clearance* (рис. 3.10).



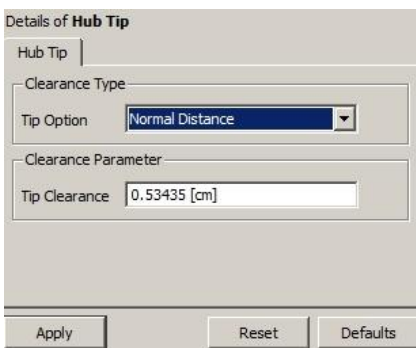
- *Variable Normal Distance* – абсолютный зазор, изменяющийся по ширине венца. Предполагается, что зазор меняется линейно от значения у входной кромки до значения у выходной кромки, которые задаются в полях *Leading Edge* и *Trailing Edge*. Величины зазора задается в единицах длины (рис. 3.11).



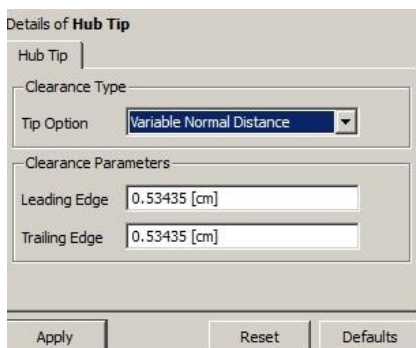
**Рис. 3.8.** Меню задания параметров радиального зазора



**Рис. 3.9.** Меню задания параметров радиального зазора постоянной относительной величины



**Рис. 3.10.** Меню задания параметров радиального зазора постоянной величины



**Рис. 3.11.** Меню задания параметров радиального зазора переменной величины

Выбор типа радиального зазора определяется его геометрией и имеющимися данными о его размере. Однако при расчете течения в компрессоре чаще применяется абсолютный зазор с постоянной ве-

личной (пункт *Normal Distance*). В случае если величина радиального зазора в рабочих условиях не известна, то в первом приближении ее можно взять равной половине монтажного зазора, обычно указываемого на сборочном чертеже компрессора.

### 3.5. Корректировка размеров входного и выходного участков

По умолчанию программой *TurboGrid* выбираются такие положения входного и выходного участков расчетной области, которые позволяют построить вокруг лопатки сетку минимального объема (рис. 3.12). При этом часто размеры расчетной области оказываются меньше габаритов, определяемых длиной меридиональных обводов. Это позволяет сократить размеры расчетной сетки и уменьшить время расчёта. Однако, для расчёта венцов в составе ступени необходимо, чтобы выходная граница предыдущего венца строго совпадала с выходной границей следующего.

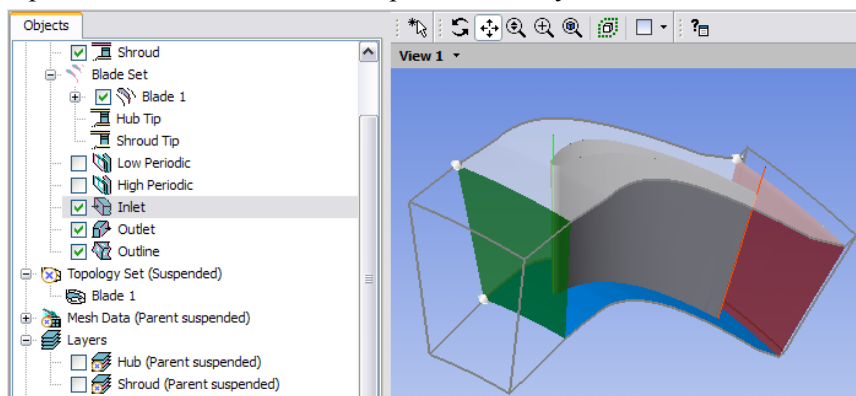


Рис. 3.12. Входная и выходная граница расчетной области

Чтобы добиться желаемого положения входной или выходной границы, её координаты можно корректировать при помощи изменения объектов *Inlet* или *Outlet* в дереве объектов. В этих командах можно ввести необходимые координаты границ входной/выходной области на периферии, втулке, а также в любой точке между вту-

лочной и периферийной поверхностью. Точные координаты точек входной/выходной границ берутся, как правило, с чертежа компрессора.

Для корректировки координат входной области следует двойным щелчком ЛКМ на пункте *Inlet* в дереве проекта вызвать меню редактирования свойств входной области (см. рис. 3.12):

*Geometry* → *Inlet*.

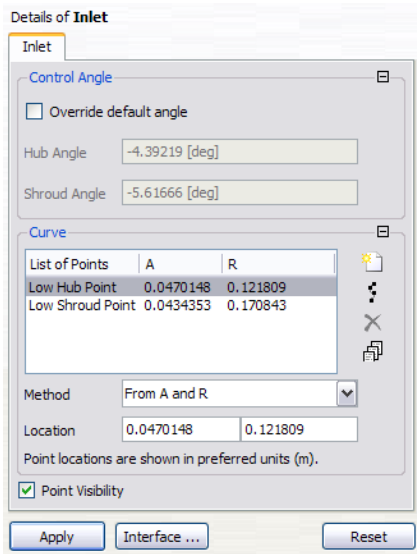
Основную его часть (рис. 3.13) занимает таблица, содержащая координаты точек входной границы. В самом простом случае точек две – *Low Hub Point* и *Low Shroud Point* – это точки, лежащие на втулке и периферии. Положения точек задаются путем ввода в поля под таблицей значений осевой (*A*) и радиальной (*R*) координат. Чтобы задать точку, достаточно задать одну из координат, вторая будет определена автоматически. Координаты точек задаются в абсолютной системе координат в выбранных единицах в поле *Location*.

Если точные координаты входной точки неизвестны, то для входной границы можно ввести  $A=0$ , и автоматически будет найдена минимальная осевая координата, а также соответствующая ей радиальная (рис. 3.13). Описанную операцию нужно произвести для обеих точек (втулочной и периферийной), каждый раз нажимая *Apply* для подтверждения ввода (см. рис. 3.13 и 3.14).

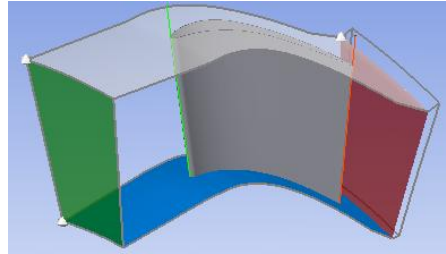
Аналогично задаются координаты для выходного сечения. Если точные координаты точек неизвестны, можно задавать значение *A*, гарантированно превышающее максимальное, например  $A=1$  (1 метр). При этом будет найдено максимально возможное положение выходной границы (рис. 3.15).

На этом построение геометрии расчетной области закончено. Здесь будет целесообразным сохранить полученную модель:

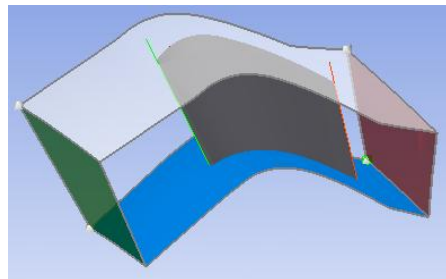
*File* → *Save State As....*



**Рис. 3.13.** Меню редактирования положения входной границы



**Рис. 3.14.** Входная граница после перемещения



**Рис. 3.15.** Результат перемещения обеих границ

## **4. ПОСТРОЕНИЕ СЕТКИ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В СОЗДАННОЙ РАСЧЕТНОЙ ОБЛАСТИ В ПРОГРАММЕ *TURBOGRID***

### **4.1. Создание блочной топологии сетки конечных элементов в межлопаточном канале**

При наложении сетки конечных элементов на расчетные области сложной геометрии, например, турбомашин, зачастую единственным способом получить качественную ортогональную сетку является применение блочной структуры. Смысл такого подхода заключается в разделении геометрии расчетной области на простые блоки, каждый из которых может быть разбит качественной сеткой. Этот подход в автоматизированном режиме реализуется в программе *TurboGrid*.

Построение сетки конечных элементов начинается с деления геометрии на структурные блоки по определенной схеме-топологии (*Topology*). Очевидно, что для получения качественной сетки необходимо предварительно добротнo описать количество, взаимное расположение, форму и другие параметры структурных блоков, а затем уже накладывать на них сетку конечных элементов.

Поэтому следующим шагом в создании расчетной модели потока в лопаточном венце компрессора является создание блочной топологии, на которую опирается сетка. Топология может быть создана в автоматическом и полуавтоматическом режимах. Наибо-

лее общим является последний способ. Он и будет рассмотрен в данном пособии.

**ВНИМАНИЕ!!!** Перед созданием топологии необходимо обязательно отключить опцию *Suspend Object Updates*, щелкнув ПКМ (🖱️) в пункте *Topology Set* в дереве объектов. В появившемся всплывающем меню нужно снять галочку *Suspended*.

Для задания топологии в дереве объектов необходимо

двойным щелчком ЛКМ (🖱️) выбрать пункт *TopologySet*. В результате появится соответствующее меню (рис. 4.1). В нем, в списке *Topology Definition* → *Placement*, следует выбрать пункт *ATM Optimized* и нажать кнопку *Apply*. Данная команда проведет к построению топологии в полностью автоматическом режиме. Никаких других настроек, описывающих топологию, при таком способе не требуется.

После выполнения команды *Topology*, внешний вид созданной топологии сетки конечных элементов будет схематически отрисован в окне построения модели на втулочной и периферийной поверхностях в виде структуры состоящей из утолщенных линий. Тонкие линии покажут предварительный вид сетки конечных элементов (рис. 4.2).

После выполнения команды цвет объекта *Topology Set* в окне *Object Selector* изменится на черный без курсива. Это указывает, что в данный объект в настоящее время полностью определен.

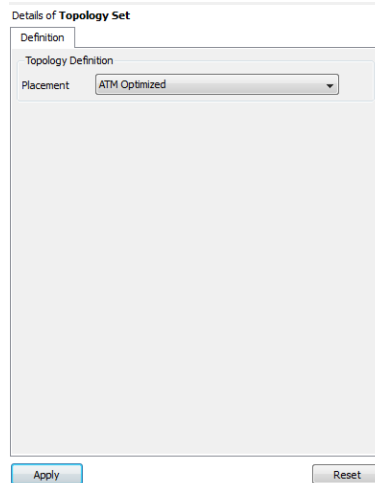
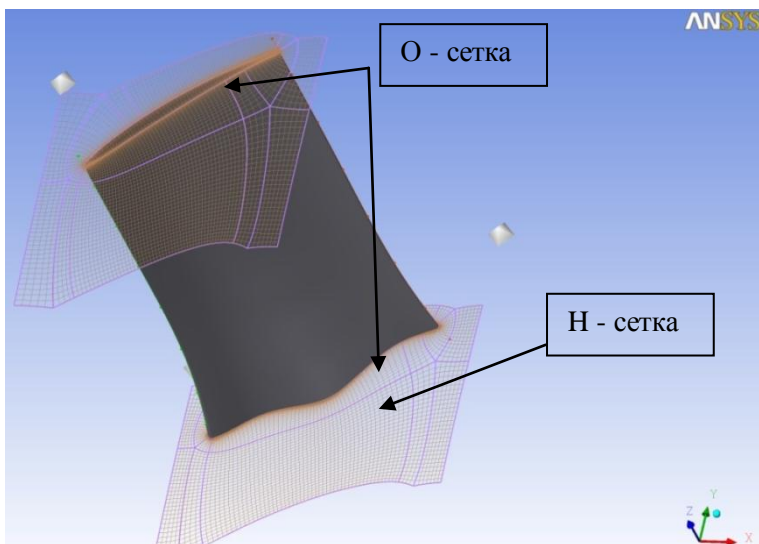


Рис. 4.1. Меню *TopologySet*



**Рис.4.2.** Топология предварительно нанесенной сеткой конечных элементов, построенная в автоматическом режиме (*ATM Optimized*) на расчетной модели РК компрессора

## 4.2. Настройка параметров сетки конечных элементов

Рассмотрим задание параметров сетки конечных элементов, используемой для расчета компрессоров.

Настройка параметров сетки конечных элементов осуществляется в меню *Mesh Data* в дереве объектов. В нем содержатся закладки, которые открывают доступ к настройкам сетки разных регионов расчетной области. Внешний вид данного меню показан на рис. 4.3.

Рассматриваемая в пособии сетка строится по методу задания пользователем желаемого числа элементов в расчетной области. Программа *TurboGrid* будет задавать такие размеры элементов, чтобы общее их количество оказалось приблизительно равным желаемому.

Чтобы задать такой метод построения сетки во вкладке *Mesh Size* (рис. 4.3) в поле *Method* выбирается метод *Target Passage Mesh*

*Size*. В списке *Node Count* (число узлов) программой предлагается несколько вариантов сетки: *Coarse* (грубая), *Medium* (средняя) или *Fine* (хорошая). Каждой опции соответствует своё число элементов, например для *Fine* число элементов равно 250000.

Также необходимо активировать () опцию *Proportional Refinement*, которая контролирует количество элементов в приграничном слое, пропорционально заданному коэффициенту *Factor Ratio*. Чем выше этот коэффициент, тем гуще сетка вблизи пограничного слоя, и тем реже в остальной расчётной зоне.

В поле *Near Wall Element Size Specification* задается, каким образом сетка будет измельчаться вблизи стенок. Обычной настройкой является метод  $y^+$ . При этом размеры конечных элементов в пограничном слое вычисляются на основании желаемого значения безразмерного расстояния первой ячейки от стенки  $y^+$  и критерия Рейнольдса. Критерий Рейнольдса задается в поле здесь же, а  $y^+$  - на вкладке *Passage*.

Величина числа Рейнольдса для компрессоров может быть найдено по следующей формуле:

$$Re = \frac{c \cdot b \cdot \rho}{\mu},$$

где  $\mu$  – значение динамической вязкости рабочего тела на входе в венец;

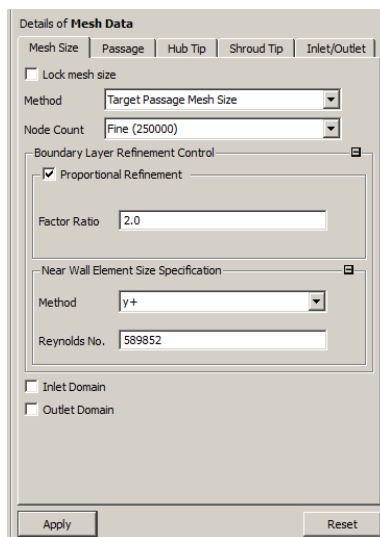


Рис. 4.3. Меню MeshData



$c$  – скорость потока на входе в венец (в относительном движении для РК и абсолютном движении для НА);

$b$  - хорда венца;

$\rho$  - плотность рабочего тела на входе в венец.

Данные для расчета величины числа Рейнольдса могут быть получены по результатам проектировочного газодинамического расчета компрессора.

В случае, если сетка будет накладываться не только на межлопаточный канал, но и на входную и/или выходную область, то на вкладке *Mesh Size* также необходимо активировать () опции *Inlet Domain* и *Outlet Domain* соответственно.

Исходное значение величины параметра *Factor Ratio* в первом приближении можно принять равным 2.

Настройка параметров сетки внутри межлопаточного канала осуществляется во вкладке *Passage* меню *Mesh Data* (рис. 4.4). В табл. 4.1. приведены типовые настройки, используемые при расчете компрессоров с применением модели турбулентности  $k-\varepsilon$  на каф. ТДЛА СГАУ.

При построении сетки в межлопаточном канале при использовании автоматической топологии *ATM Optimized* необходимо контролировать количество конечных элементов на входной и выходной кромке (желательно, чтобы их число находилось в интервале 10...20). Для достижения требуемых параметров необходимо регулировать значения *Factor Ratio* на вкладке *Passage*.

В случае если рассматриваемый венец имеет радиальный зазор, то необходимо описать параметры сетки и для него. Это осуществляется во вкладках *Shroud Tip* меню *Mesh Size* для зазора на периферии и *Hub Tip* для зазора на втулке. Данные вкладки становятся доступными после описания геометрии радиального зазора. Внешний вид вкладок и настройки в них идентичны (рис. 4.5). Опции настройки сетки конечных элементов в радиальном зазоре приведены в табл. 4.2.

Таблица 4.1

Типовые настройки, применяемые во вкладке *Passage* меню *Mesh Data*

Название настройки	Действие настройки	Рекомендованное значение
<i>Method</i>	Задаёт способ разбиения межлопаточного канала по высоте проточной части	<i>Element Constant Size</i>
<i># of Elements</i>	задается общее число элементов по высоте межлопаточного канала	30
<i>Const Elements</i>	число элементов постоянной высоты	10
<i>Hub</i>	определяет значение $y^+$ вблизи втулочной концевой поверхности, что определяет размер первого элемента у данного обвода	10
<i>Shroud</i>	определяет значение $y^+$ вблизи периферийной концевой поверхности, что определяет размер первого элемента у данного обвода	10

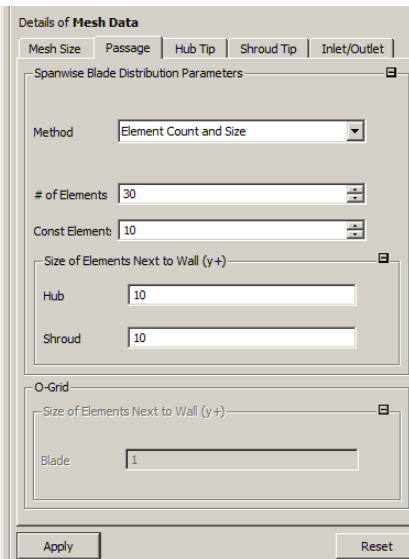


Рис. 4.4. Вкладка *Passage* меню *Mesh Data*

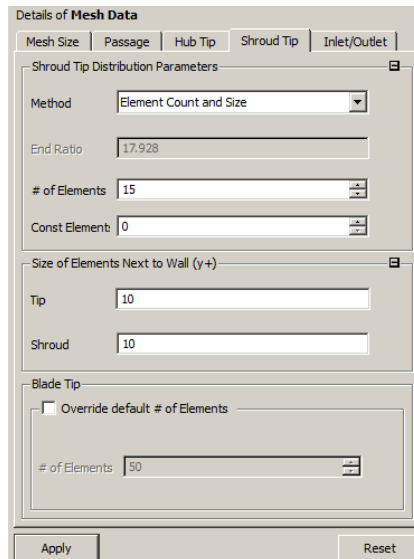


Рис. 4.5. Вкладка *Shroud Tip* меню *Mesh Data*

Таблица 4.2

Типовые настройки, производимые во вкладке *Shroud Tip* меню *Mesh Data*

Название настройки	Действие настройки	Рекомендованное значение
<i>Method</i>	Задаёт способ разбиения межлопаточного канала по высоте проточной части	<i>Element Constant Size</i>
<i># of Elements</i>	задаётся общее число элементов по высоте межлопаточного канала	15
<i>Const Elements</i>	число элементов постоянной высоты	0
<i>Hub</i>	определяет значение $y^+$ вблизи втулочной концевой поверхности, что определяет размер первого элемента у данного обвода	10
<i>Shroud</i>	определяет значение $y^+$ вблизи периферийной концевой поверхности	10

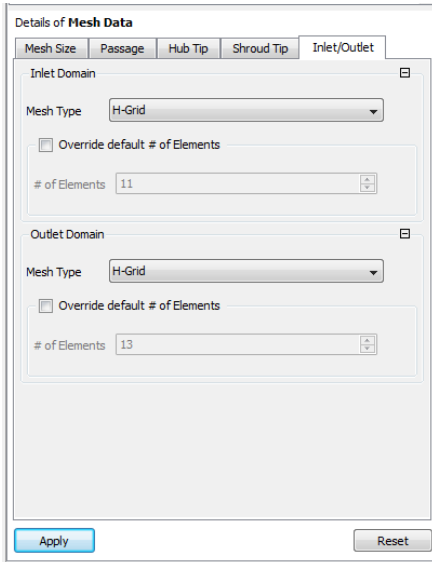
Если расчетная область включает в себя входной или выходной участок, то необходимо описать параметры сетки и для них. Это делается во вкладке *Inlet/Outlet* меню *Mesh Data* (рис. 4.6). В ней целесообразно выбрать топологию сетки *Mesh Type H-типа (H-grid)* как во входной, так и в выходной зонах.

Для расчета студенческих задач связанных с расчетом течения в ступени осевого компрессора достаточным будет число ячеек 250000. При этом значение  $y^+$  примерно равно 30 (*Passage* → *Size of Elements Next to Wall (y<sup>+</sup>)* → *Blade*) (рис. 4.7).

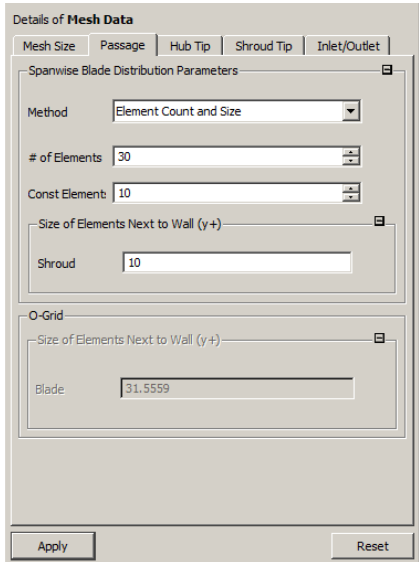
### 4.3. Оценка качества конечно-элементной сетки

После создания топологии и предварительного разбиения следует проверить качество сетки. Проверка качества осуществляется с помощью команды *Mesh Analysis*, находящейся в дереве объектов. После активации этой команды () появится меню *Mesh Statistics*

(рис. 4.8). В нем приводится статистика качества сетки путем описания основных параметров, характеризующих качество сетки.



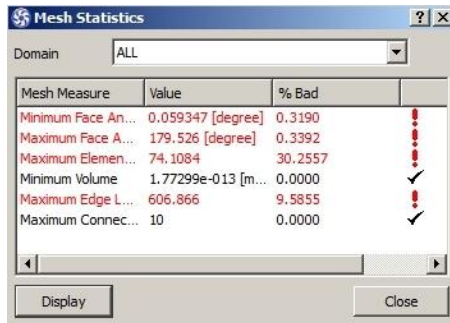
**Рис. 4.6.** Вкладка *Inlet/Outlet* меню *Mesh Data*



**Рис. 4.7.** Вкладка *Passage* меню *Mesh Size*

В этом меню в поле *Domain* выбирается часть расчетной зоны, в которой будет анализироваться качество сетки: *All* – все элементы, включая *Inlet* и *Outlet*; *Passage* – только межлопаточный канал.

В первом столбце указываются названия параметров, характеризующих качество сетки. Во втором столбце *Value* указывается максимальное значение данного параметра по всей расчетной сетке. Если параметр укладывается в заданный рекомендованный диапазон, то в правой части меню *Mesh Statistics* напро-



**Рис. 4.8.** Меню *Mesh Statistics*

тив названия параметра ставится галочка. В противном случае название параметра окрашивается в красный цвет, а напротив него ставится восклицательный знак. Это говорит о том, что значение данного параметра недопустимо, и необходимо принять меры для его изменения. В третьем столбце «% Bad» показывается, сколько процентов ячеек сетки не отвечает требованиям качества.

В программе *TurboGrid* качество сетки контролируется с помощью следующих параметров:

- *Maximum Face Angle* – максимальный плоский угол для всех поверхностей ячеек, которые сходятся в узле. Мера скошенности ячеек;
- *Minimum Face Angle* - минимальный плоский угол для всех поверхностей ячеек, которые сходятся в узле;
- *Maximum Element Volume Ratio* – максимальное отношение объемов соседних ячеек.
- *Minimum Volume* – минимальный объем ячеек сетки. Контроль наличия отрицательных объемов, которые могут появиться из-за ошибок округления координат узлов.
- *Maximum Edge Length Ratio* – максимальное отношение длин наибольшей и наименьшей граней ячеек.
- *Maximum Connectivity Number* – максимальное число ячеек, касающихся узла. Параметр, важный для неструктурных сеток.

В порядке важности эти критерии ранжируются следующим образом (в порядке убывания приоритета):

- минимальный объем – жесткое ограничение, сетки с отрицательными объемами не допускаются;
- максимальный/минимальный угол ячейки – максимальное значение - 165, минимальное - 15. Тем не менее, приемлем выход за рамки.
- отношение длин ребер – допустим перебор свыше 100 единиц без заметного ухудшения точности расчёта;

- отношение объемов соседних ячеек – это требование не является обязательным;
- число связей – это требование также не является жёстким.

Нажатие кнопки *Display* (рис. 4.9) выделяет на расчетной модели красным цветом расположение сеточных элементов, где выбранный критерий качества сетки выходит за рекомендуемый диапазон приемлемых значений (рис. 4.10). При ее нажатии автоматически активируется опция *Mesh Analysis* → *Show Limits*.

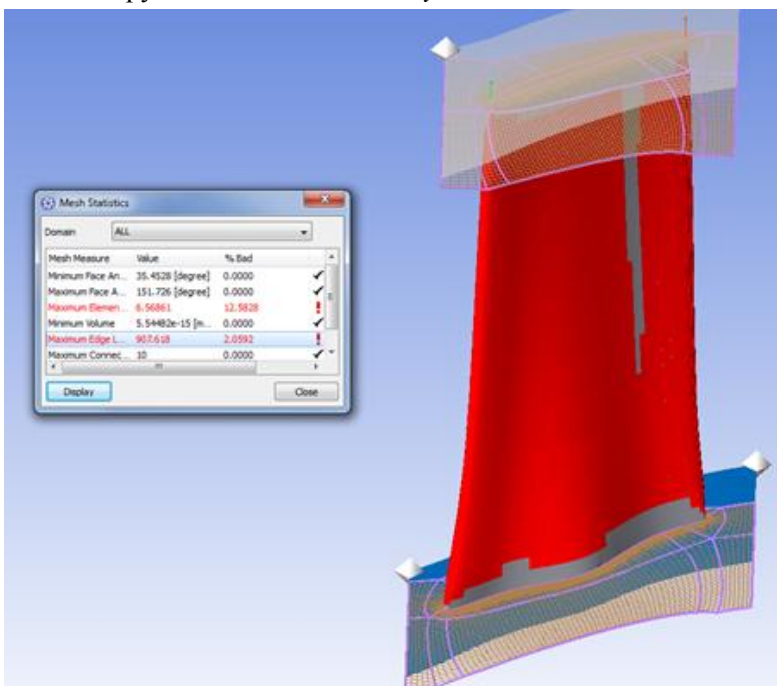


Рис. 4.9. Действие команды *Mesh Analysis* → *Show Limits*

Предельные значения переменных, оценивающих качество сетки, можно задать или скорректировать, выбрав пункт *Mesh Analysis* → *Mesh Limits* в дереве объектов. В появившемся меню (рис. 4.10) можно задать максимальное и минимальное значение переменной.

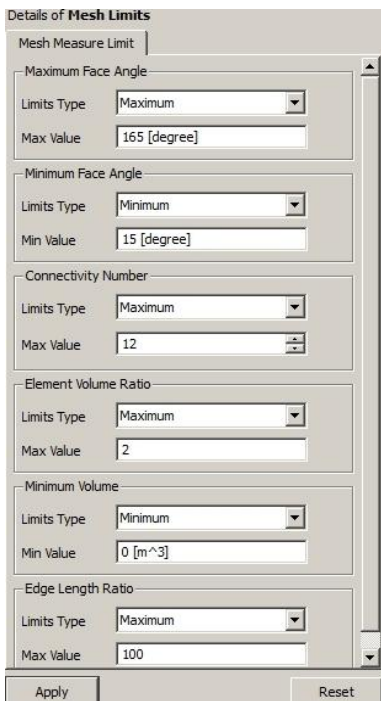



Рис. 4.10. Меню *Mesh Analysis* → *Mesh Limits*

Устранить зоны с неблагоприятной формой конечных элементов можно за счет улучшения геометрии расчетной области, применения другого типа топологии или перемещения контрольных точек.

Однако сетка, созданная на основе автоматической топологии *ATM Optimized*, как правило, имеет хорошее качество. Отклонение от рекомендованных значений обычно имеется только в пунктах *Maximum Edge Length Ratio* и *Maximum Connectivity Number*, что не является критичным для получения качественного решения.

#### 4.4. Генерация сетки конечных элементов

Когда топология полностью определена и качество сетки приемлемо для всех слоев, можно сгенерировать сетку. Это можно сделать несколькими способами:

- вызвать команду *Insert* → *Mesh* в главном меню;
- щелкнуть мышью в рабочем окне и в появившемся меню выбрать *Generate Mesh*;
- нажать кнопку  в главной панели.

Просмотреть построенную сетку конечных элементов можно в меню *3D Mesh* в дереве объектов (рис. 4.11). По умолчанию, один

из этих объектов этого меню, *Show Mesh*, включен для просмотра. Устанавливая галочки напротив интересующего элемента в меню *3D Mesh* можно добиться отображения нужного вида. Пример отображения трехмерной сетки показан на рис. 4.12.

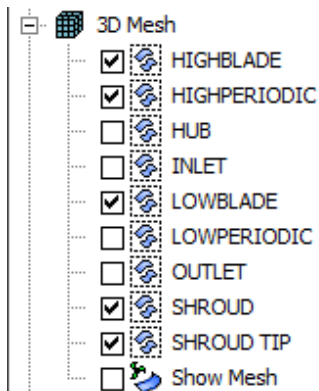


Рис. 4.11. Вкладка *3DMesh*

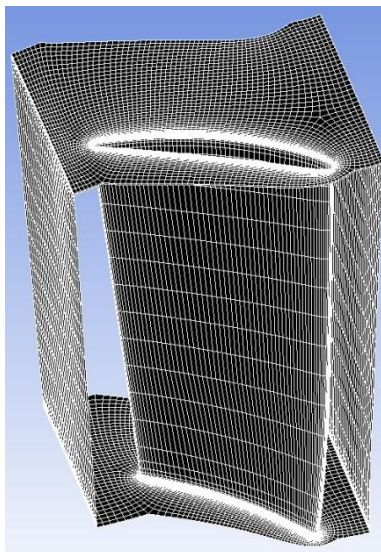


Рис. 4.12. Пример 3D-сетки

#### 4.5. Передача созданной расчетной модели потока из *TurboGrid* в программный комплекс *Ansys CFX*

Таким образом, создание расчетной сетки в межлопаточном канале компрессора в программе *Turbo Grid* можно считать законченным. Далее необходимо сохранить модель и записать файл сетки, на который в дальнейшем в программе *CFX* будут наложены граничные условия.

Сохранение модели *Turbo Grid* выполняется с помощью команды главного меню (рис. 4.13):

*ГМ*→*File*→*Save State As....*



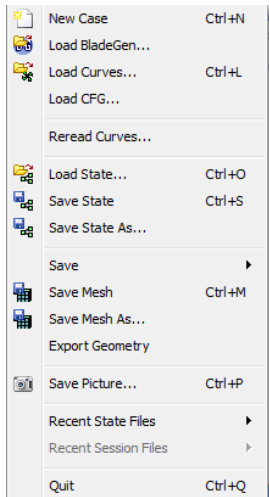


Рис. 4.13. Вкладка File

Модель *TurboGrid* может понадобиться для перестроения сетки или изменения геометрии межлопаточного канала.

Экспорт сетки конечных элементов, для дальнейшего использования в *CFD*-программах осуществляется с помощью команды главного меню:

*ГМ* → File → Save Mesh As...

В результате появится меню, показанное на рис. 4.14. В нём нужно указать имя создаваемого файла и сохранить модель. Также в качестве опций доступно указание единиц измерения (метры, миллиметры) и формы сохранения элементов расчётной области: в одном файле или нескольких (см. рис. 4.14).

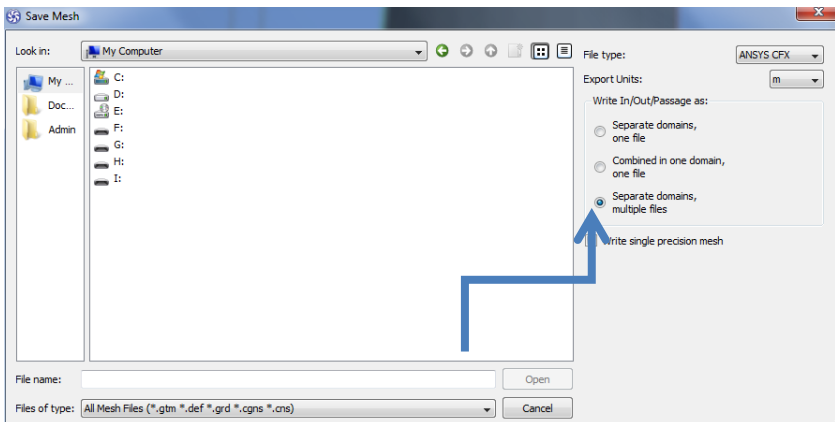


Рис. 4.14. Меню сохранения сетки для дальнейшего использования в *CFD*-программах

Используя последовательность, описанную в главах 3 и 4, следует сформировать конечно-элементные модели потока рабочего тела отдельно для каждого венца: РК, ВНА (если имеется) и НА ступени компрессора.

В случае если расчетная модель имеет входную/выходную область, то сетку можно записать таким образом, чтобы межлопаточный канал и входная/область были записаны в одном файле. Для этого нужно выбрать опцию «*Separate domains, one file*» в меню *Save Mesh As...* (рис. 4.14). Либо сетку для входной (*Inlet*), выходной (*Outlet*) областей и канала лопатки (*Passage*) можно сохранить в разных файлах, выбрав опцию «*Separate domains, multiple files*».

Для всех венцов, кроме последнего входные и выходные области следует записывать одним файлом. Выходную область (*Inlet*) последнего венца (для компрессора это НА) целесообразно записать отдельным файлом.

## 5. ПОДГОТОВКА РАСЧЕТНОЙ МОДЕЛИ ТЕЧЕНИЯ ВОЗДУХА В СТУПЕНИ КОМПРЕССОРА В ПРОГРАММЕ *ANSYS CFX – PRE*

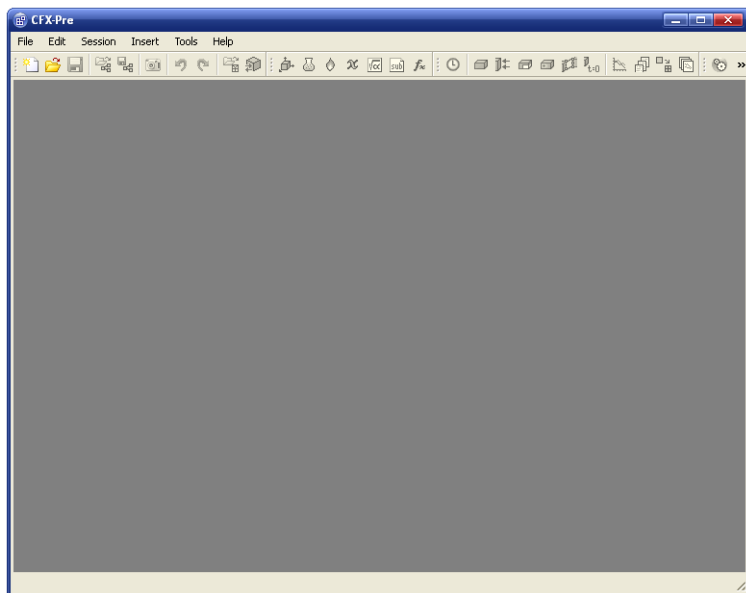
### 5.1. Запуск программы *ANSYS CFX-Pre*

Дальнейшая работа с расчетной моделью, а именно задание свойств рабочего тела, граничных условий и т.п. проводится в пре-процессоре *ANSYS CFX-Pre*. Работа с ним подробно освещается в данной главе пособия на примере первой ступени компрессора высокого давления с входным направляющим аппаратом.

Запуск программы *ANSYS CFX-Pre* осуществляется из меню «Пуск» ОС «Windows»:

*Пуск → Программы → Ansys 13.0 → Fluid Dynamics → CFX*


После этого появится окно запуска программы (см. рис. 1.2). В нем, в поле *Working Directory* следует выбрать папку, в которой будут сохраняться файлы текущей сессии (если это не было сделано ранее). В этой папке должны находиться созданные ранее (по рекомендациям глав 3 и 4) файлы сеточных модели всех венцов компрессора (НА, РК и ВНА). После выбора рабочей папки следует нажать на иконку *CFX-Pre 13.0*. При этом откроется рабочее окно программы (рис. 5.1).

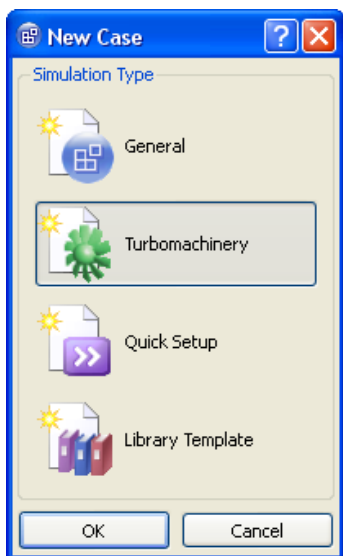


**Рис. 5.1.** Рабочее окно программы *ANSYS CFX-Pre*

## **5.2. Создание проекта в программе *ANSYS CFX-Pre***

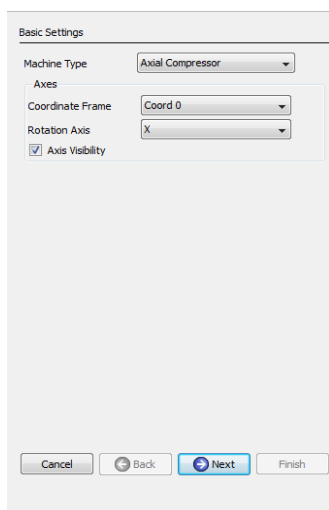
Перед загрузкой в программу *ANSYS CFX-Pre* заранее созданных расчетных моделей НА, РК, ВНА необходимо создать новый проект. Для этого необходимо выполнить следующие действия:

1. Запустить команду *ГМ*→*File*→*New Case* или нажать иконку *New Case* () на главной панели. В результате на экране появится меню *New Case* (рис. 5.2).
2. В появившемся меню *New Case* выбирается вкладка создания расчетной модели потока в турбомашине (*Turbomachinery*). Выбор подтверждается нажатием кнопки *OK*. Выполнение данных действий приведет к тому, что будет запущен специальный интерфейс, содержащий шаблоны, облегчающие подготовку расчетной модели для лопаточных машин. Путём выполнения многочисленных шагов данного шаблона после-



**Рис. 5.2.** Меню создания нового проекта *New Case*

робное описание.



**Рис. 5.3.** Меню *BasicSettings*

довательно задаются все параметры рассчитываемой турбомашины.

3. Затем выполняется сохранение модели командой:

*File* → *Save Case As*.

4. В появившемся меню вводится желаемое имя файла.

5. Нажатием кнопки *Save* (сохранить) подтверждается создание нового проекта по исследованию течения в турбомашине.

Второй пункт данного алгоритма является самым сложным, поэтому ниже приведено его под-

### **5.3. Определение основных параметров турбомашины (*Basic Settings*)**

После выполнения действий указанных в пункте 5.2, в левой части окна программы появится панель *Basic Settings* (рис. 5.3). Она представляет собой шаблон, в котором определяются тип лопаточной машины и ее ось вращения. В указанном меню необходимо выполнить следующие настройки:

1. В поле *Machine Type* (тип турбомашины) из выпадающего списка выбирается тип турбомашины - *Axial Compressor* (осевой компрессор).
2. Задается ось вращения турбомашины. Например, если модель была построена так, что ось вращения компрессора совпадает с осью *X* глобальной системы координат, то в списке *Coordinate Frame*(система координат) выбирается *Coord 0* (СК№0), в поле *Rotation Axis* – ось *X*.
3. Выбор подтверждается нажатием кнопки *Next*.

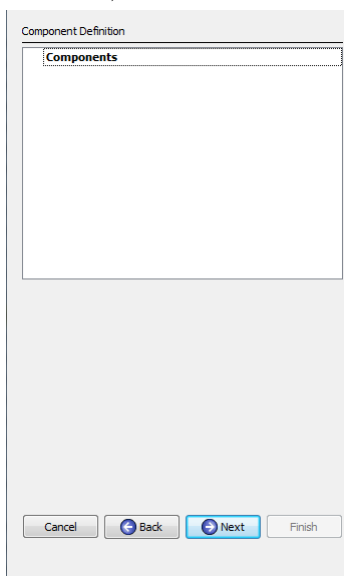
#### **5.4. Загрузка компонентов, составляющих ступень компрессора (*Component Definition*)**

После нажатия кнопки *Next* в предыдущем шаге (раздел 5.4) происходит переход в следующий шаблон описания турбомашин – *Component Definition*. Он имеет вид, изображенный на рис. 5.4. В нем необходимо определить из каких частей состоит исследуемая турбомашина, в какой последовательности они располагаются, и указать предварительно созданные файлы, содержащие конечно-элементные модели. Здесь также определяются основные параметры расчетных моделей.

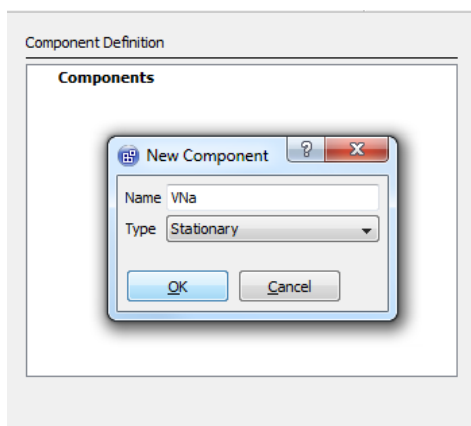
Расчетная модель ступени осевого компрессора состоит из следующих компонентов: неподвижного ВНА (если имеется), подвижного РК, неподвижного НА и неподвижной области перетекания рабочего тела через НА. Для их определения необходимо выполнить следующие действия:

1. Щелкнуть правой кнопкой на белом поле под надписью *Components* (см. рис. 5.4) и из выпадающего меню выбрать пункт *Add Component*. Появится соответствующее меню (рис. 5.5), в котором следует задать имя компонента и определить его тип (*Type*) (вращающийся – *Rotating* для РК или неподвижный – *Stationary* для НА и ВНА).

2. Последовательно, в порядке следования рабочего тела добавить все компоненты расчетной модели: сначала ВНА, затем РК и наконец НА.
3. Первым указывается ВНА (если имеется). Для него выбирается тип *Stationary* и задается имя *VNA* (рис. 5.5). Выбор подтверждается нажатием кнопки *OK*. После этого в левой части окна программы появится меню (рис. 5.6).
4. В нем, в разделе *Mesh* (сетка), в поле *File* (файл), указывается имя файла сетки входного направляющего аппарата (на рис. 5.6 - *KVD\_VNA\_mesh5.gtm*), созданного заранее в *Turbo-Grid* (см. разделы 3 и 4). После этого в рабочем поле окна программы появится сетка, загруженная из данного файла (рис. 5.6).



**Рис. 5.4.** Меню *Component Definition*



**Рис. 5.5.** Панель создания нового компонента *New Component*

Вторым описывается РК. Поскольку он вращается, то течение в нем будет рассчитываться в подвижной СК и для него в меню *Type*

(рис. 5.5) выбирается тип *Rotating*. Выбор подтверждается нажатием кнопки *OK*.

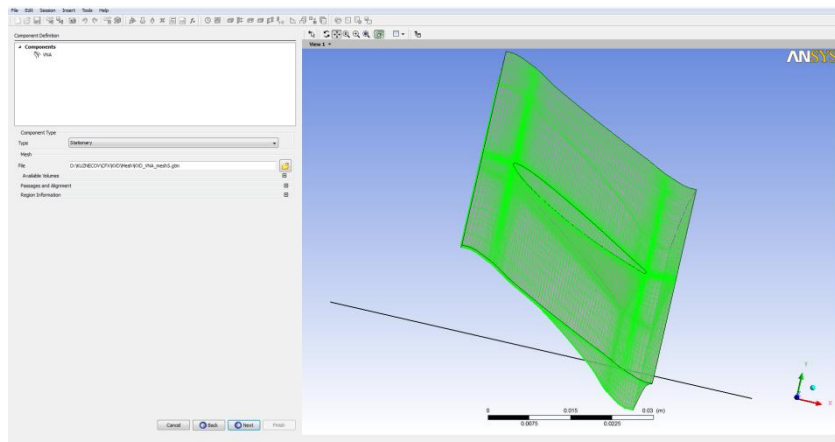


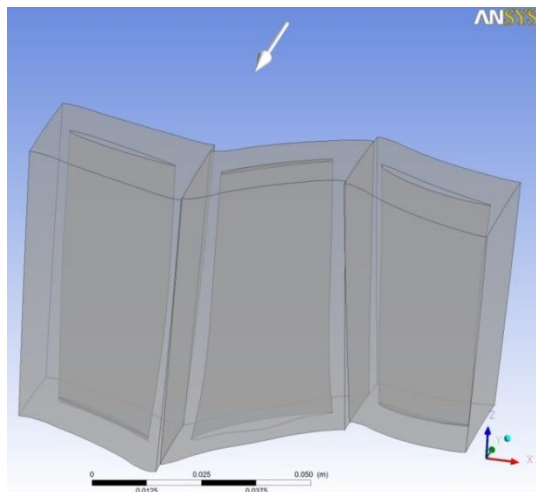
Рис. 5.6. Выбор файла с расчетной моделью ВНА

В появившемся меню, в разделе *Mesh* в поле *Value* задается частота вращения рабочего колеса: (например  $7000 \text{ об/мин (rev min}^{-1}\text{)}$ ), а затем в поле *File* указывается имя файла сетки ПК, созданного в *Turbo Grid*. В этом же меню необходимо поставить галочку () напротив пункта *Wall Configuration* и отметить *Yes* в разделе *Tip Clearance at Shroud* (задать наличие радиального зазора на периферии). После этого на экране появится сетка, загруженная из данного файла.

Наконец, аналогичным способом загружается НА. Он неподвижный (*Type* → *Stationary*). Выбор подтверждается нажатием кнопки *OK*. В появившемся меню, в разделе *Mesh*, в поле *File*, указывается имя файла сетки НА, созданного в *TurboGrid*.

После выполнения данных операций все компоненты будут определены, а на экране будет отображаться модель, состоящая из трех компонентов (рис. 5.7).





**Рис. 5.7.** Ступень осевого компрессора из трёх венцов: ВНА, РК и НА

После загрузки всех компонентов составляющих ступень компрессора, следует перейти к следующему типовому шаблону, нажав кнопку *Next*.

### **5.5. Определение граничных условий турбомашины и настройка решателя (*Physics Definition*)**

На этом шаге определяются физические свойства каждой расчетной области и некоторые параметры решателя. Настройки, вводимые на данном этапе, представлены в виде табл. 5.1.

Наиболее предпочтительным видом ГУ для расчета течения в ступени компрессора является пара полные давление и температура и направление вектора скорости на входной границе, и статическое давление на выходной.

Однако при исследовании течения в компрессоре с такой комбинацией ГУ, из-за того, что давление на выходе компрессора больше чем на входе, решение получается не устойчивым.

Таблица 5.1.

Задание ГУ и параметров решателя в меню *Physics Definition*

Поле настройки	Вводимое значение/ настройка
1	2
<i>Fluid</i> Определяет рабочее тело турбомашины	<i>Air Ideal Gas</i> (воздух с параметрами идеального газа)
<i>Analysis Type</i> → <i>Type</i> Определяет тип решения	<i>Steady State</i> (Стационарный расчёт)
<i>Model Data</i> → <i>Reference Pressure</i> <b>давление, получаемое и задаваемое в расчете, является избыточным</b> , измеряется от уровня справочного (ссылочного, опорного) давления. Для того, чтобы получить истинное значение давления необходимо прибавить к нему так называемое «справочное давление». Если в качестве «справочного давления» принять 0, то данные будут представлены в абсолютных значениях.	0 [atm] (0 атм)
<i>Model Data</i> → <i>Heat Transfer</i> Модель теплопереноса. Определяет, включено ли в расчет уравнение энергии и какого оно типа.	<i>Total Energy</i> (Модель полной энергии, учитывающая изменение температуры при увеличении скорости газа)
<i>Model Data</i> → <i>Turbulence</i> Выбор модели турбулентности	<i>Shear Stress Transport</i> (Модель турбулентности SST, рекомендуется для расчета турбомашин)
<i>Inflow/Outflow Boundary Templates</i> Используемая комбинация граничных условий	<i>P-total Inlet Mass Flow Outlet</i> Комбинация ГУ -полное давление $p^*$ на входе и массовый расход на выходе
<i>Inflow</i> → <i>P-total</i> (На входе → Полное давление) Задается численное значение полного давления $p^*$ на входе в компрессор	101325[Pa] (Па)*

Продолжение таблицы 5.1

1	2
<p><i>Inflow</i> → <i>T-Total</i> (На входе → Полная температура).                      Задается численное значение полной температуры <math>T^*</math> на входе в компрессор</p>	<p>288 [K] *</p>
<p><i>Inflow</i> → <i>Flow Direction</i> (На входе → Направление потока).                      Описывается, каким образом будут задаваться направление вектора скорости на входе в расчетную область</p>	<p><i>Cylindrical Components</i>                      Направление потока на входе будет задаваться через направляющие косинусы в цилиндрической СК, ось которой совпадает с осью турбомашинны</p>
<p><i>Inflow</i> → <i>Inflow Direction</i> (<i>a</i>, <i>r</i>, <i>t</i>)                      (На входе → Направление потока на входе).                      Задаются численные значения направляющих косинусов потока на входной границе в осевом (<i>a</i>), радиальном (<i>r</i>), угловом (<i>t</i>) направлениях</p>	<p>0,866; 0; 0,5*                      Величина направляющих косинусов определяемых углом потока на входе в компрессор. (приведенные значения соответствуют углу на входе в решетку ВНА - 30 градусов)</p>
<p><i>Outflow</i> → <i>Mass Flow</i> (На выходе → Массовый расход).                      Определяет, каким образом будет определяться расход: через периодическую расчетную область или через всю турбомашину. Во втором случае расход через расчетную область будет найден делением общего расхода на число периодических элементов.</p>	<p><i>Per Machine</i>                      (Через турбомашину)</p>
<p><i>Mass Flow Rate</i> (значение массового расхода).                      Задается численное значение массового расхода рабочего тела <math>G</math> через компрессор</p>	<p>21,5 [kg s<sup>-1</sup>] (кг/с) *</p>
<p><i>Interface</i> → <i>Default Type</i>                      Устанавливается вид интерфейса</p>	<p><i>Stage</i> (Ступень)                      Данный интерфейс рекомендуется применять, когда число лопаток в венцах НА и РК разное.</p>

Продолжение таблицы 5.1

1	2
<i>Solver Parameters</i> → <i>Advection Scheme</i> Используемый порядок точности решателя	<i>High Resolution</i> (Второй порядок точности)
<i>Solver Parameters</i> → <i>Convergence Control</i> Настройка параметров сходимости	<i>Auto Timescale</i> (Автоматический выбор масштаба времени)

Для повышения устойчивости решателя особенно в многоступенчатых компрессорах рекомендуется начинать расчет течения, используя другую комбинацию ГУ: полное давление и температура на входной границе и массовый расход на выходной. По этой причине при создании модели выбирается указанная комбинация ГУ. Затем после получения устойчивого схождения решения тип ГУ следует поменять на полное давление и температура на входной границе и статическое давление на выходной.

\* *Прим.* Все численные значения величин обозначенные (\*) приведены для примера. Конкретные значения данных переменных определяются конкретной задачей, решаемой пользователем.

Заданные настройки подтверждаются нажатием кнопки *Next*.

### 5.6. Проверка созданных интерфейсов (*Interface Definition*) и граничных условий (*Boundary Definition*)

Выполняя команды, описанные в предыдущих шагах, программа автоматически создаст расчетную модель потока в ступени осевого компрессора, накладывая, где необходимо, граничные условия на модель и создавая интерфейсы. Интерфейс – это дополнительные граничные условия, которые накладываются на сетку рабочей области. К таким условиям относится периодичность на боковых гранях доменов, а также порядок связи между соприкасаю-

щимися частями разных доменов. На данном шаге можно проконтролировать все созданные программой интерфейсы (рис. 5.8).

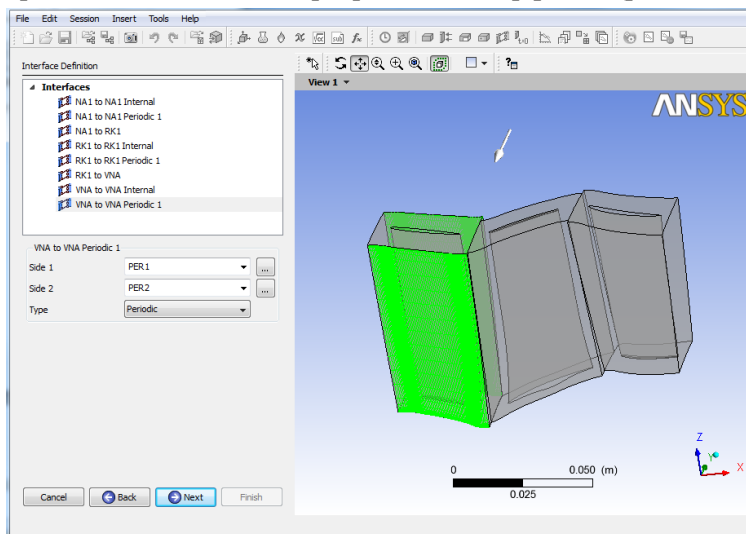


Рис. 5.8. Проверка интерфейсов *Interface Definition*

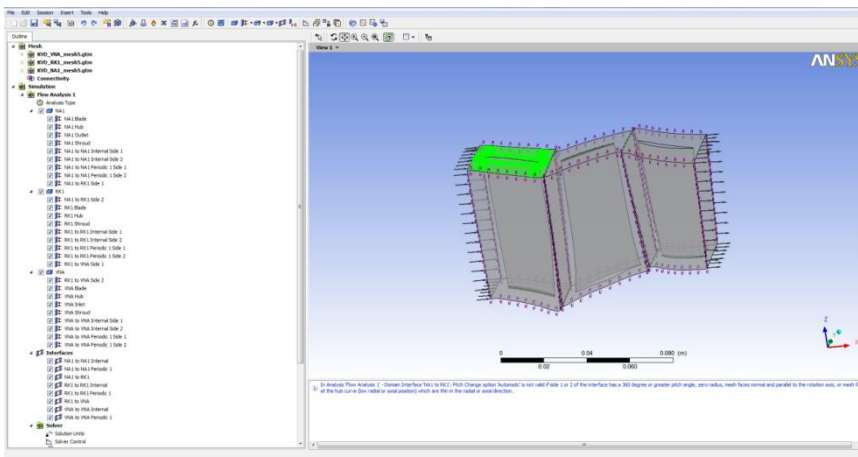
Для того чтобы посмотреть тот или иной интерфейс, необходимо выбрать его в списке интерфейсов. Этот интерфейс будет отображаться в графическом окне, а его параметры появятся ниже списка интерфейсов (рис. 5.8). Следует проверить правильность задания сторон периодичности для интерфейсов периодичности (*Periodic*) и сторон входа и выхода для интерфейсов ступени (*Stage*).

После контроля всех интерфейсов следует нажать кнопку *Next* и на следующей вкладке *Boundary Definition* аналогичным образом проверить созданные граничные условия. После просмотра созданных граничных условий нажимается кнопка *Next*.

## 5.7. Завершение работы с шаблонами *Turbomachinery*

Основные параметры турбомашин, рабочего тела и решателя определены при помощи шаблонов *Turbomachinery*. На данном этапе выполняется завершение работы турбо-шаблона и осуществ-

ляется выход в обычный режим *ANSYS CFX – Pre*. Для этого во вкладке *Operation* необходимо выбрать *Enter General Mode* и нажать кнопку *Finish*. На экране появится стандартный вид рабочего окна программы *ANSYS CFX – Pre* (рис. 5.9).



**Рис. 5.9.** Окно программы *ANSYS CFX–Pre* после завершения работы с шаблонами *Turbomachinery*

## 5.8. Редактирование свойств рабочего тела

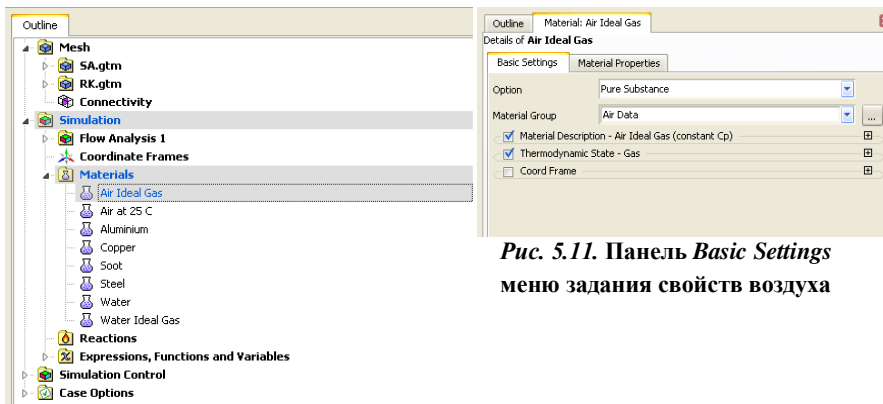
Для корректного решения задач, необходимо учитывать, что свойства рабочего тела меняются при изменении температуры. Соответствующие зависимости необходимо задать при описании физических свойств рабочего тела. Для того чтобы выполнить это, необходимо выполнить следующие действия:

1. В дереве проекта, находящемся в левой части окна программы, в пункте *Materials* (рис. 5.10) следует выбрать подпункт *Air Ideal Gas* (выбранный ранее воздух с параметрами, рассчитываемыми по закону идеального газа) и дважды щелкнуть по нему ЛКМ:

*Outline* → *Simulation* → *Materials* → *Air Ideal Gas*.

На экране появится вкладка *Basic Settings* задания свойств воздуха (рис. 5.11).

- Во вкладке *Basic Settings* необходимо сделать настройки, приведенные в табл. 5.2.



**Рис. 5.11. Панель *Basic Settings* меню задания свойств воздуха**

**Рис. 5.10. Элемент *Air Ideal Gas* в дереве проекта**

**Таблица 5.2**

**Описание свойств рабочего тела в *Basic Settings* меню *Air Ideal Gas***

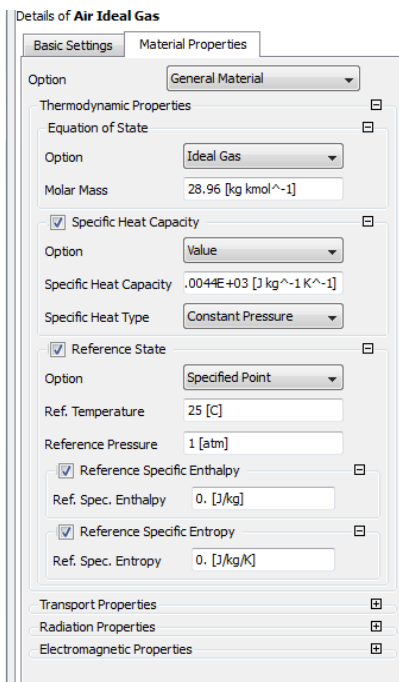
Параметр	Значение
<i>Option</i> (Опция)	<i>Pure Substance</i> (Чистая субстанция, в отличие, например, от диспергированной среды)
<i>Material Group</i> (Групп вещества)	<i>Air Data</i> (Данные воздуха)

- На следующем этапе необходимо перейти во вкладку *Material Properties* (свойства материала). На экране появится панель свойств вещества (рис. 5.12). В ней, в поле *Option*, следует выбрать значение *General Material*.
- Свойства рабочего тела вводятся в соответствующих вкладках на данной панели. Для того чтобы задать термодинамические свойства рабочего тела, необходимо открыть вкладку *Thermodynamic Properties* (термодинамические свойства), на-

жав «+» слева от названия. Значения, которые необходимо ввести в меню, приведены в табл. 5.3.

5. Для того чтобы задать зависимость изменения вязкости от температуры по формуле Сатерленда, следует открыть вкладку *Transport Properties* в панели *Material Properties* и ввести следующие значения (табл. 5.4).


Для сохранения принятых изменений следует нажать *OK*.



**Рис. 5.12.** Панель *Material Properties* задания свойств рабочего тела

## 5.9. Запись созданной модели с граничными условиями и передача ее на решение

На данном этапе расчетная модель полностью готова и ее следует экспортировать в решающий модуль *CFX-Solver Manager*. Для этого необходимо выполнить следующие действия:

1. В главном меню вызвать команду *File* → *Save Case*. После этого будет сохранена расчетная модель со всеми описанными граничными условиями и настройками.
2. Нажать на иконку *Define Run*  на главной панели. В появившемся окне (рис. 5.13) в поле *File name* следует ввести



имя файла и нажать кнопку *Save*. При этом после сохранения файла автоматически откроется *Solver Manager*.

Таблица 5.3.

**Настройка параметров во вкладке *Thermodynamic Properties***

Параметр	Значение
<i>Equation of State</i> → <i>Option</i> (Уравнение состояния → Опция)	<i>Ideal Gas</i> Уравнение идеального газа
<i>Molar Mass</i> (Молярная масса)	28,96 [kg kmol <sup>-1</sup> ] (кг/кмоль)
<i>Specific Heat Capacity</i> Удельная теплоемкость	Отметить ( <input checked="" type="checkbox"/> )
<i>Specific Heat Capacity</i> → <i>Option</i> (Удельная теплоемкость → Опция)	<i>Zero Pressure Polynomial</i> Зависимость теплоемкости от температуры будет вводиться при помощи полинома <sup>1</sup>
<i>Specific Heat Capacity</i> → <i>a1</i>	3,27149
<i>Specific Heat Capacity</i> → <i>a2</i>	6,85475444e-4 [K <sup>-1</sup> ]
<i>Specific Heat Capacity</i> → <i>a3</i>	0 [K <sup>-2</sup> ]
<i>Specific Heat Capacity</i> → <i>a4</i>	0 [K <sup>-3</sup> ]
<i>Specific Heat Capacity</i> → <i>a5</i>	0 [K <sup>-4</sup> ]
<sup>1</sup> Полином зависимости удельной теплоемкости при постоянном давлении $c_p$ от температуры $T$ в программе имеет следующий вид: $\frac{c_p}{R} = a_1 + a_2 T + a_3 T^2 + a_4 T^3 + a_5 T^4, (*)$ где $R = 8341 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$ Таким образом, имеющиеся зависимости теплоемкости от температуры необходимо приводить к виду (*) и на основе этого находить значения коэффициентов $a$ .	

На этом работа в *ANSYS CFX-Pre* в целом закончена, однако его следует оставить открытым, чтобы при необходимости иметь возможность быстро внести изменения в расчетную модель.

Таблица 5.4.

Настройка параметров во вкладке *Transport Properties*

Параметр	Значение
<i>Dynamic Viscosity</i>	<input checked="" type="checkbox"/>
<i>Dynamic Viscosity</i> → <i>Option</i> (Динамическая вязкость → Опция)	<i>Sutherlands Formula</i> (Формула Сатерленда – закон изменения вязкости с температурой) <sup>1</sup>
<i>Dynamic Viscosity</i> → <i>Ref. Temperature</i>	273 [K]
<i>Dynamic Viscosity</i> → <i>Reference Viscosity</i>	17.12e-6 [kg m <sup>-1</sup> s <sup>-1</sup> ]
<i>Dynamic Viscosity</i> → <i>Sutherlands Constant</i>	111 [K]
<i>Dynamic Viscosity</i> → <i>Temperature Exp.</i>	1,5
<i>Thermal Conductivity</i> (Теплопроводность)	Отметить ( <input checked="" type="checkbox"/> )
<sup>1</sup> Формула Сатерленда в программе имеет следующий вид: $\frac{\mu}{\mu_0} = \frac{T_{ref} + S}{T + S} \left( \frac{T}{T_{ref}} \right)^n,$ где $\mu_0$ – ссылочная вязкость ( <i>Reference Viscosity</i> ); $S$ – постоянная Сатерленда ( <i>Sutherlands Constant</i> ); $T_{ref}$ – ссылочная температура ( <i>Ref. Temperature</i> ); $n$ – показатель степени ( <i>Temperature Exp.</i> ).	

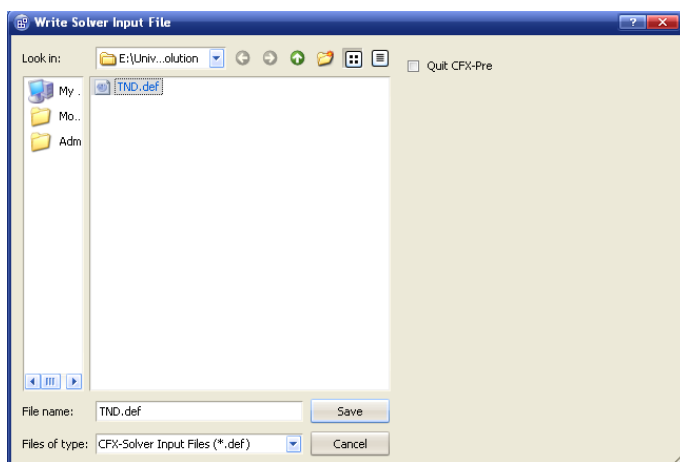


Рис. 5.13. Окно экспорта файла в решатель

## 6. ВЫПОЛНЕНИЕ РАСЧЕТА МОДЕЛИ КОМПРЕССОРА В МОДУЛЕ ANSYS CFX-SOLVER

После запуска решающего модуля *CFX-SolverManager* появится окно, изображенное на рис. 6.1. Если проделать манипуляции, описанные выше, то записанный файл с моделью уже будет загружен и его имя будет высвечено в соответствующем поле (\*.def). Кроме

того, нужно указать режим параллельного счета:

*Run Mode* → *HP MPI Local Parallel*

Параллельный расчет позволяет сократить время вычислений за счет разделения задачи на несколько процессов, запускаемых одновременно на разных процессорах (или физических ядрах одного процессора). Нажимая кнопки (+) и (-) нужно выставить необходимое количество процессов расчета. Оно не должно превышать дос-

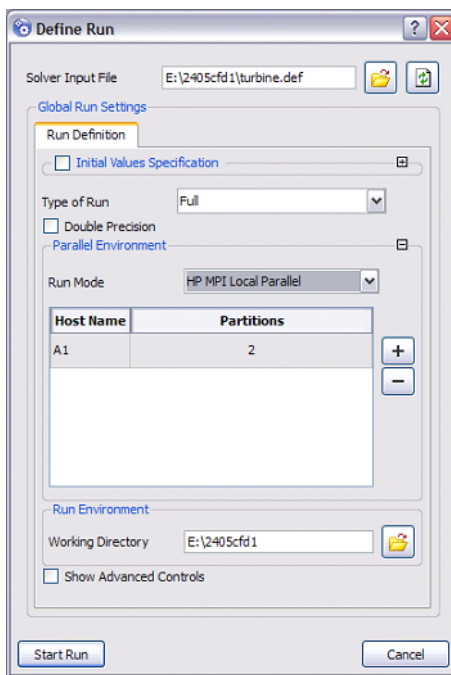
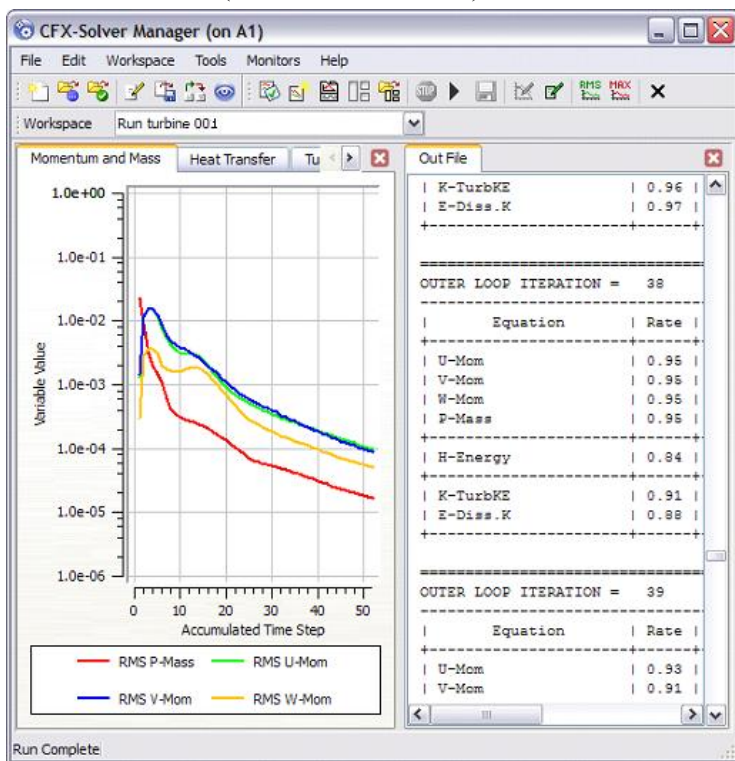


Рис. 6.1. Окно запуска процесса расчета

тупного числа ядер используемого компьютера. Т.е. на четырех-ядерном компьютере целесообразно запускать четыре процесса, на двухядерном - два.

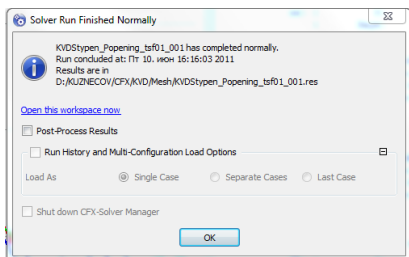
После выполнения настроек запускается процесс расчета нажатием кнопки *StartRun* (начать выполнение).



**Рис. 6.2. Окно CFX-Solver Manager во время выполнения расчета**

После этого начнется выполнение расчета. Внешний вид окна программы *CFX-SolverManager* в процессе расчета показан на рис. 6.3. Видно, что оно состоит из нескольких частей. В левой части отображается график изменения невязок в процессе расчета.

Через 100...200 итераций процесс расчета установится (величины невязок начнут стабильно снижаться с течением итераций). В этот момент можно его остановить, нажав на главной панели





**Рис. 6.3. Сообщение об успешном окончании решения**

ager.

В результате расчета будет сформирован файл \*\_001.res, который содержит результаты расчета для предварительных граничных условий «массовый расход на входе плюс статическое давление на выходе». Теперь нужно задать на входе требуемое по условию задачи полное давление и продолжить расчет, используя в качестве стартовой точки результаты из файла \*\_001.res.

Как отмечалось ранее, исследование течения в компрессоре в первом приближении с целью повышения устойчивости решателя рекомендуется вести с применением следующей комбинации ГУ: полное давление и температура на входной границе и массовый расход на выходной. После того, как будет получено устойчивое схождение при таком сочетании граничных условий, тип ГУ следует поменять на: полное давление и температура на входной границе и статическое давление на выходной. Для этого в программе ANSYS CFX – Pre в дереве проекта следует внести соответствующие изменения

Для этого нужно открыть пре-процессор CFX-Pre, нажав соответствующую кнопку в стартовом окне (рис. 2.9) и открыть нашу задачу, загрузив файл \*.cfx кнопкой Open Case (  ). Затем в дереве проекта найти входное граничное условие (Inlet) и открыть его дважды щелкнув ЛКМ. Далее нужно перейти на вкладке Boun-

кнопку Stop . После этого появится сообщение о сохранении файла результатов расчета с расширением \*.res в рабочей папке (рис. 6.3).

После этого окно можно закрыть, нажав OK, а затем закрыть и CFX-Solver Man-


*dary Details* (параметры границы) и изменить опцию задания массы на «полное давление», а затем задать его (рис. 2.51):

*Mass And Momentum:*

*Option* → *Total Pressure (Stable)*

*Relative Pressure* → *101325 [Pa]*

Сделанные настройки следует подтвердить нажатием кнопки *OK*.

Затем необходимо опять создать файл решателя с помощью кнопкой *Define Run* (  ), при этом указать тот же самый файл *turbine.def* и, поставив галочку *Quit CFX-Pre*, нажать *Save*. В ответ на появившееся сообщение о том, что указанный файл уже существует, следует ответить нажатием кнопки *Overwrite* (перезаписать) – созданный ранее файл для решателя будет заменен новым.

После этого программа *CFX-Pre* запросит о необходимости сохранить сделанные в расчетной модели изменения. Нужно согласиться на сохранение, нажав кнопку *Save&Quit* (Сохранить и выйти).

После этого программа *Ansys CFX-Pre* закроется и автоматически запустится решатель *CFX-Solver Manager*. В его окне запуска расчета (рис. 6.4) нужно поставить галочку *Initial Value Specification* (задание начальных значений), и в появившемся поле *File Name* задать уже имеющийся файл предварительных результатов расчета - \*\_001.res. Кроме того, как и в предыдущем случае, нужно настроить многопроцессорный режим вычислений: поставить *Run Mode* - >*HPMPI Local Parallel* и задать необходимое количество процессов и запустить процесс расчета.

Процесс решения будет выглядеть следующим образом (рис. 6.5). После итерации, на которой закончился предыдущий расчет, будет наблюдаться резкий скачок невязок. Это происходит из-за того, что изменение граничных условий привело к изменению расчетных уравнений. Однако в процессе решения невязки постепенно будут снижаться до требуемого уровня, и тогда расчет оста-

новится, выдав уже знакомое сообщение (рис. 6.5) об успешном создании нового файла результатов \*\_002.res.

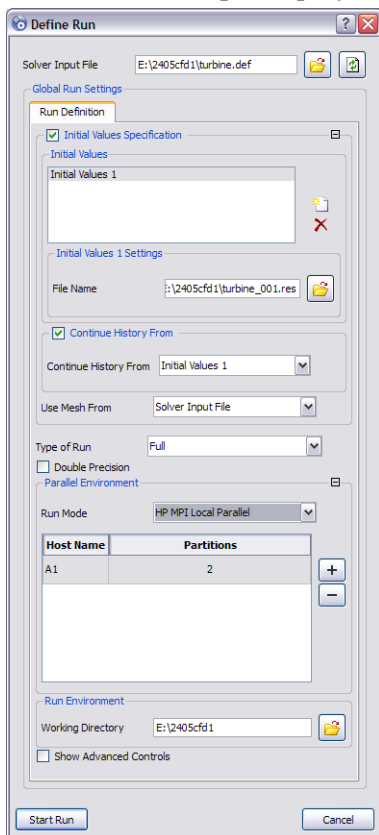


Рис. 6.4. Окно запуска расчета - повторный запуск с инициализацией

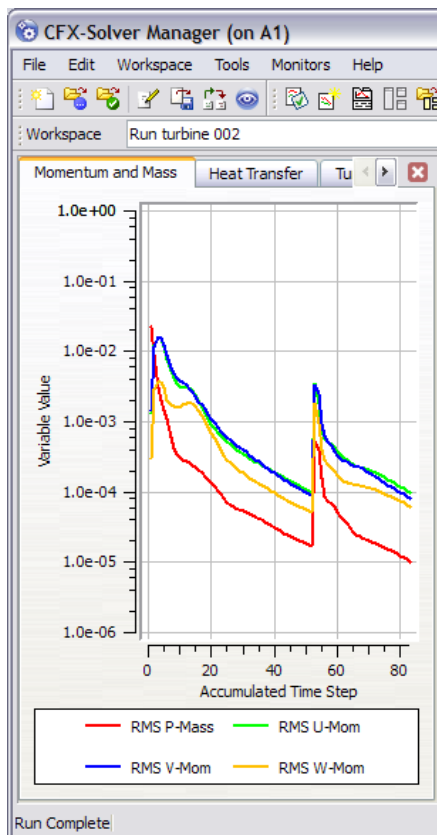


Рис. 6.5. Окно невязок повторно запущенного расчета

В нем нужно поставить галочки *Post-Process Results* и *Shutdown CFX-Solver Manager* (открыть пост-процессор и закрыть решатель) и нажать *OK*. При этом закроется решатель и автоматически откроется пост-процессор.

## **7. ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ РАСЧЕТА ТЕЧЕНИЯ В СТУПЕНИ ОСЕВОГО КОМПРЕССОРА В ПРОГРАММНОМ КОМПЛЕКСЕ ANSYS CFX**

Обработка результатов расчета, полученных с помощью расчетной модели течения газа в ступени осевого компрессора, созданной по рекомендациям в предыдущих разделах, осуществляется в программе *ANSYS CFX-Post*. Данная программа позволяет визуализировать полученные результаты в виде полей распределения параметров в произвольных сечениях, полей векторов, линий тока, графиков, числовых значений интегральных параметров. Программа автоматически запустится, если при окончании расчёта в окне результатов (см. рис. 6.1) поставить галочку (*Post-Process Results*), как было описано в главе 6.

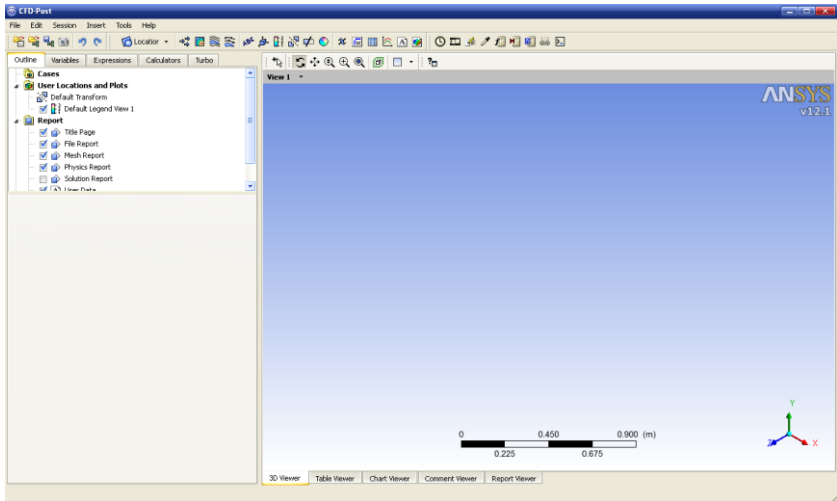
### **7.1. Запуск программы ANSYS CFX-Post**

Однако также существует возможность независимого запуска программы *ANSYS CFX-Post* из меню «Пуск» ОС «Windows»:

*Пуск* → *Программы* → *Ansys 13.0* → *Fluid Dynamics* → *CFX - Post*.

После этого появится окно запуска программы, которое показано на рисунке 2.2. В нем, в поле *Working Directory* выбирается рабочая папка. В этой папке должен содержаться файл с результатами проведенного расчета (\*.res). После выбора рабочей папки, нажимаем на иконку *CFX-Post 13*, после чего открывается рабочее окно программы (рис. 7.1).





**Рис. 7.1.** Рабочее окно программы ANSYS CFX-Post

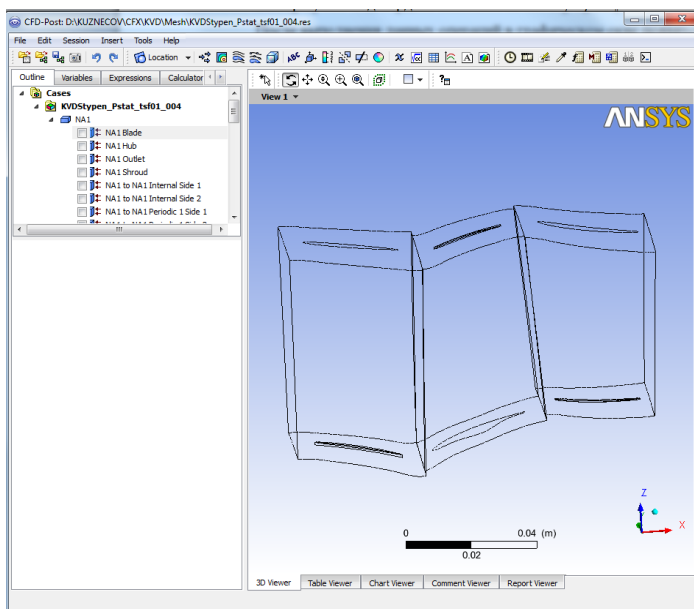
## 7.2. Загрузка результатов решения

Для загрузки полученных результатов решения в программный комплекс ANSYS CFX-Post необходимо выполнить следующие действия:

1. В главном меню вызвать команду *File* → *Load Results*.
2. В открывшемся окне, в поле *File Name* следует выбрать имя файла с результатами расчета с расширением *\*.res*.
3. Подтвердить выбор нажатием на кнопку *Open*.

После выполнения данных операций в графическом окне появится расчетная область загруженной задачи в виде контурных линий (рис. 7.2).

Также запуск программы ANSYS CFX – Post и загрузку файла результатов в нее можно выполнить за один шаг. Для этого следует двойным щелчком открыть *res*-файл из папки, как обычный файл *Windows*.

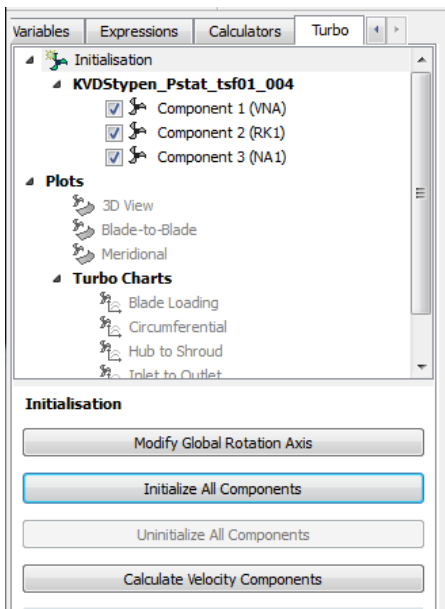


**Рис. 7.2.** Окно программы *ANSYS CFX – Post* после прочтения результатов расчета

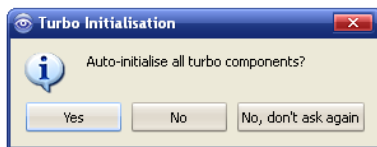
### **7.3. Включение турбо-шаблона пост-процессора**

Программа *ANSYS CFX – Post* является универсальной и может быть использована для отображения результатов расчета в любых задачах. Однако она также содержит ряд шаблонов, позволяющих упростить отображение результатов решения типовых задач. В частности в ней содержится специальный модуль, позволяющий визуализировать результаты расчета турбомашин. Чтобы его активировать нужно выполнить следующие действия:

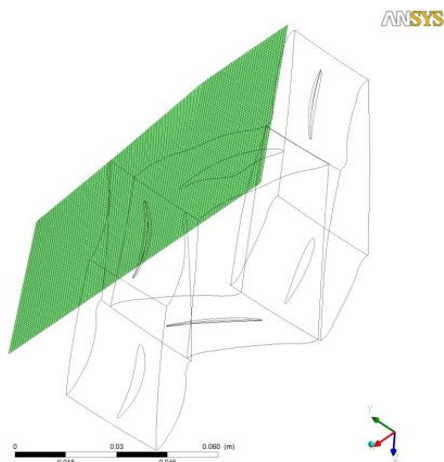
1. Во вкладках над деревом проекта (см. рис. 7.2) нужно переключиться на вкладку *Turbo*. (рис. 7.3).
2. В появившемся на экране окне *Turbo Initialization* (рис. 7.4) следует ответить утвердительно (*Yes*) на предложение автоматически инициализировать турбо-шаблон.



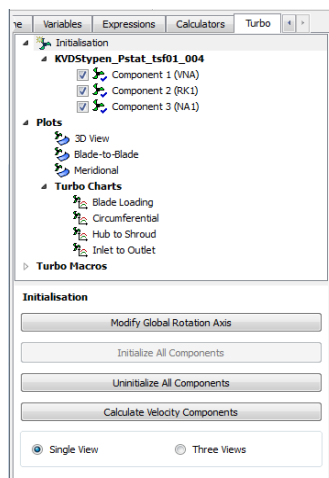
**Рис. 7.3.** Вкладка *Turbo* в дереве проекта



**Рис. 7.4.** Окно *Turbo Initialization*



**Рис. 7.5.** Вид окна программы после инициализации модуля *Turbo*



**Рис. 7.6.** Вкладка *Turbo* после инициализации

Это действие запустит инициализацию необходимых компонентов турбо-модуля. После ее выполнения в графическом окне за расчетной областью появится меридиональное сечение ступени компрессора в ВНА (рис. 7.5), а все надписи во вкладке *Turbo* из бледных (неактивных) станут яркими (активными) (рис. 7.6).

#### 7.4. Отображение на экране нескольких межлопаточных каналов

При выводе результатов расчета течения в турбомашине удобно, чтобы отображалась не только одна межлопаточный канал, а несколько каналов расположенных рядом. Для того, чтобы это сделать необходимо дважды нажать ПКМ на любом из пунктов пункте *VNA*, *RK1* или *NA1* в дереве проекта в панели *Turbo (Initialization)*. В результате под деревом появится диалоговое окно *Details of (...)*. В нем следует выбрать вкладку *Instancing* (рис. 7.7). В поле *# of Copies* нужно ввести, например, число 2 (2 копии). После этого нужно нажать кнопку *Apply*. В результате в графическом окне появятся не одна, а две лопатки (рис. 7.8).

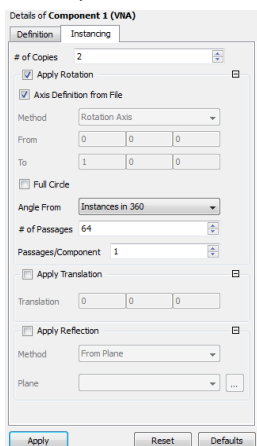


Рис. 7.7. Окно *Detail of (VNA)*

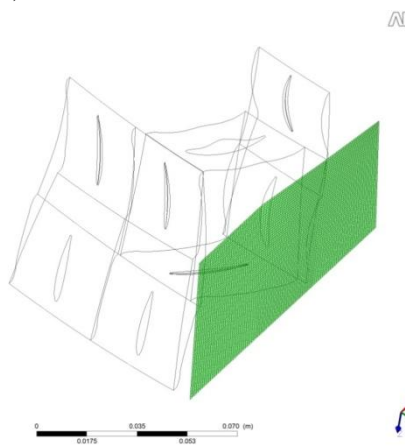


Рис. 7.8. Отображение нескольких копий лопатки


## 7.5. Построение графиков изменения параметров потока вдоль поверхности лопаток в произвольном сечении

*ANSYS CFX-Post* после инициализации турбокомпонентов может использоваться для вывода различных графиков параметров расчета в виде, наиболее часто применяемым в турбомашиностроении таких как:

- Изменение давления на спинке и корытце лопатки по длине профиля (*Blade Loading*);
- Графики изменения параметров в окружном направлении (*Circumferential*);
- Графики изменения параметров по высоте лопатки (*Hub to Shroud*);
- Графики изменения параметров от входа к выходу (*Inlet to Outlet*).

Соответствующие шаблоны для построения графиков находятся в разделе *Turbo Charts* вкладки *Turbo* (см. рис. 7.6).

Для построения графика распределения давления (либо любой другой переменной) вдоль профиля на сечении, находящимся на 0,5 (50%) высоты лопатки, необходимо выполнить следующие действия:

- дважды щелкнуть ЛКМ  в поле *BladeLoading* на панели *Turbo*:  
*Plots* → *Turbo Charts* → *Blade Loading*.

В результате под деревом проекта появится панель построения графи-

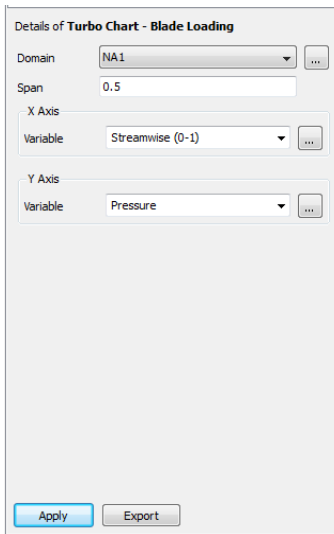
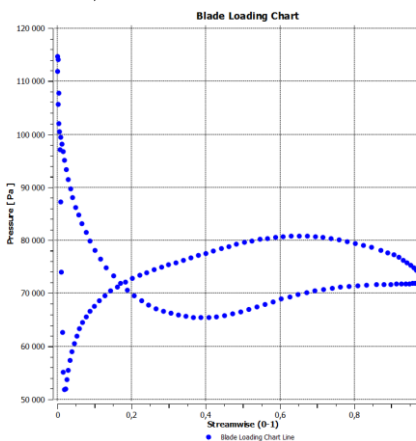


Рис. 7.9. Панель построения графиков

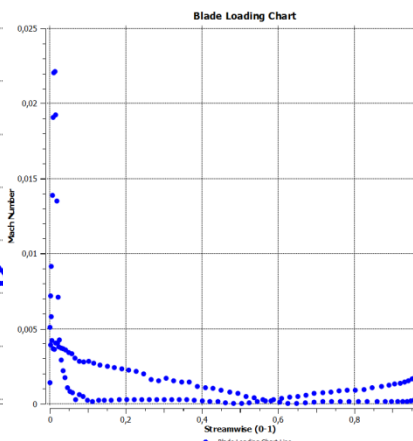
ков (рис. 7.9). В данной панели, в поле *Domain* выбираем нужный венец (на рисунке 7.9 – это  $HA-NA1$ ). В поле *Span* вводится относительная высота расположения профиля, вдоль которого будет строиться график – 0,5.

- В поле *X Axis* → *Variable* вводится параметр, откладываемый вдоль оси *X*. В рассматриваемом примере выбран пункт *Streamwise*– линия тока.
- В поле *Y Axis* → *Variable* нужно выбрать интересующий параметр. Для рассматриваемого примера это давление (*Pressure*).
- После этого нужно нажать кнопку *Apply*.

В результате в рабочем окне появится график распределения статического давления вдоль профиля в средней части лопатки (рис. 7.10).



**Рис. 7.10.** График изменения статического давления вдоль осевой хорды лопатки в среднем сечении



**Рис. 7.11.** График изменения числа Маха вдоль осевой хорды лопатки в среднем сечении

5. В поле *Y Axis* → *Variable* можно выбрать любой другой параметр, например *Mach Number*, и нажать кнопку *Apply*. На экране график распределения сменится графиком распределения числа Маха вдоль профиля (рис. 7.11).

Аналогичным образом можно построить любые другие графики.

## 7.6. Управление отображением расчетной области

Для отображения результатов расчета в графическом виде необходимо перейти во вкладку *Outline* под главным меню. В левой части экрана располагается дерево проекта, где отображаются все графические построения (рис. 7.12).

В дереве проекта под каждым пунктом *VNA*, *RK1* и *NA1* (*Cases* → *KVDStypen\_Pstat\_tsf01\_004* → \*) перечислены поверхности, принадлежащие расчетной области. Для включения их отображения в рабочем окне, необходимо поставить галочку напротив их названия.

Например, для того, чтобы отобразить лопатку и втулочную поверхность направляющего аппарата необходимо отметить в списке *NA1 Blade* и *NA1 Hub*. В результате этой операции лопатки и втулочная поверхность станут видимыми (рис. 7.12).

Аналогично можно отобразить любую границу расчетной модели.

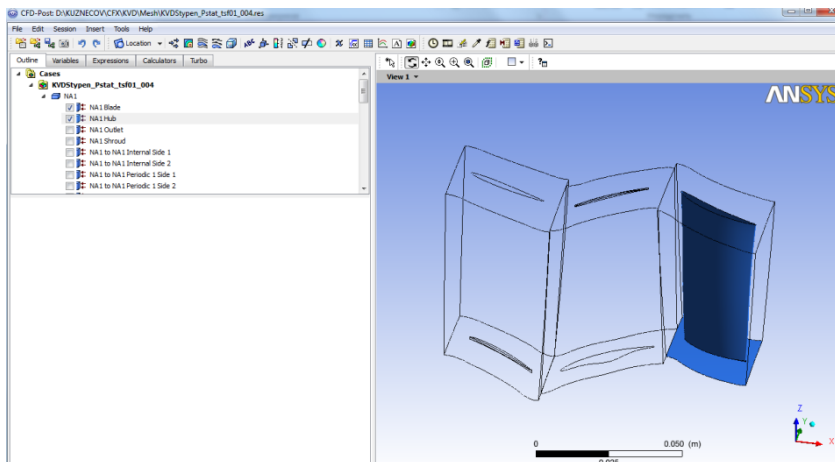


Рис. 7.12. Отображение элементов расчетной области

## 7.7. Создание турбо-поверхностей

Для отображения полей распределения параметров потока в расчетной области удобнее всего пользоваться секущими турбо-поверхностями. В качестве турбо-поверхностей наиболее часто применяются следующие:

- *Constant Span Location* – турбо-поверхности, все точки которых расположены на одинаковом радиусе (относительной высоте лопатки) – осевая поверхность;
- *Constant Streamwise Location* – турбо-поверхности, все точки которых имеют одинаковую координату вдоль оси вращения турбомашины – окружная поверхность.

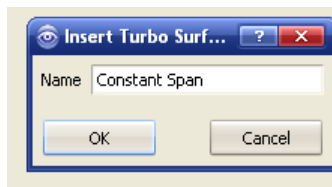
Для построения турбо-поверхностей необходимо выполнить следующие действия:

1. Выполнить команду

*Insert → Location → Turbo Surface;*

2. В появившемся окне *Insert Turbo Surface* (рис. 7.13) ввести имя турбо-поверхности, например, *Constant Span*.
3. Нажать кнопку *OK*.

В результате появится меню *Details of Constant Span*. В нем, на вкладке *Geometry*, в графе *Method* выбирается метод построения турбо-поверхности. В данном случае следует выбрать метод *Constant Span*, что означает, что расположение поверхности будет выбираться относительно высоты лопатки. В графе *Value* (рис. 7.14) устанавливается значение в диапазоне от 0 до 1, что задает положение секущей поверхности в диапазоне от 0% до 100% (0 – втулка, 100 – периферия) высоты лопатки. Например, установим величину параметра



*Рис. 7.13. Меню Insert Turbo Surface*



*Value*, равную 0.05 (5% от высоты лопатки) (рис. 7.17).

Аналогично можно создать турбо-поверхности методом *Constant Span* на высоте 0,25; 0,5, 0,75 и 0,95(и любых других интересующих высот лопатки), проделав действия, аналогичные описанным выше.

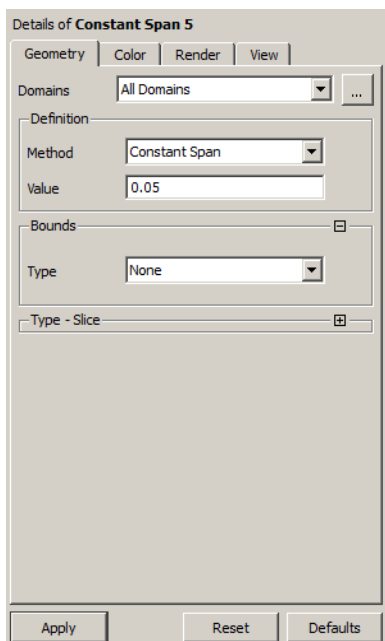
Кроме того, в поле *Domains* можно задать, через какие области пройдет создаваемая поверхность.

По подобному алгоритму строятся турбо-поверхности, перпендикулярные оси вращения:

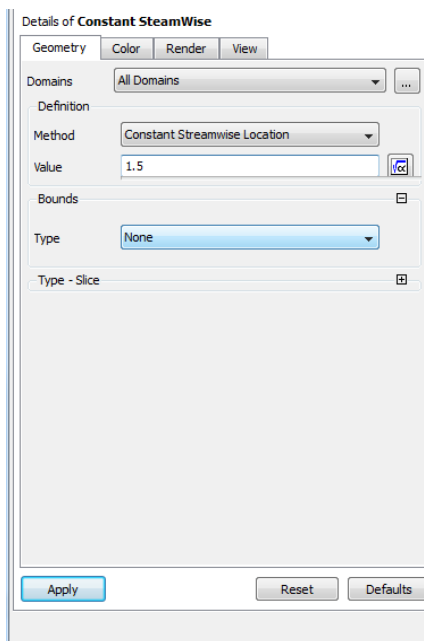
1. Вызывается команда *Insert* → *Location* → *Turbo Surface*;
2. В появившемся окне *Insert Turbo Surface* (рис. 7.15) вводится имя турбо-поверхности «*Constant Steamwise 0*». Величина «0» будет означать, что турбо-поверхность будет находиться на входе в ВНА.
3. Выбор подтверждается нажатием кнопки *OK*.

В результате появляется меню *Details of Constant Steamwise* (рис. 7.15). В нем, на вкладке *Geometry*, в графе *Method* выбирается метод построения турбо-поверхности – *Constant Steamwise Location*, что означает, что расположение поверхности будет выбираться по длине ступени в осевом направлении. В графе *Value* устанавливается значение в диапазоне от 0 до 3. Таким образом, определяется положение секущей поверхности вдоль оси вращения. «0» соответствует входу в расчетную область, а «3» - выходу. Предельное значение равно числу венцов модели. Т.е. значения от «0» до «1» соответствует ВНА, от «1» до «2» – РК и от «2» до «3» – НА. В качестве примера, можно установить величину параметра *Value* равную 1,5 (см. рис.7.15).

Аналогично можно создать изоповерхности, перпендикулярные оси вращения, в других позициях.



**Рис. 7.14.** Меню *Details of Constant Span*



**Рис. 7.15.** Меню *Details of Constant Streamwise*

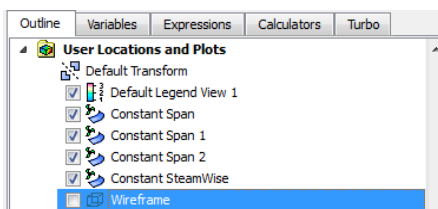
Следует отметить, что отображение созданных турбо-поверхностей можно включать и выключать в меню *Outline* в списке *User Locations and Plots* (рис. 7.16) подобно тому, как включалось изображение лопатки в разделе 7.4. Также двойным щелчком мыши на названии турбо-поверхности в списке *User Locations and Plots* можно получить доступ к меню, где можно изменить ее параметры: цвет, отображение ячеек сетки, прозрачность и т.п. Пример отображения турбо-поверхностей показан на рис. 7.17.

## **7.8. Построение картин распределения параметров потока на созданной турбо-поверхности**

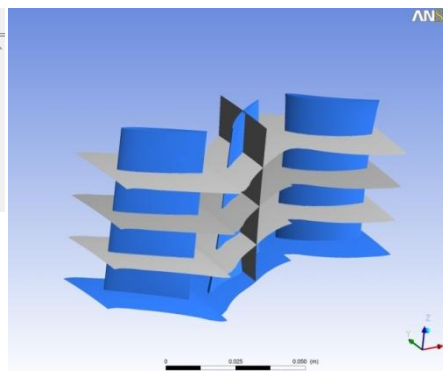
Для просмотра результатов расчета на созданных в предыдущем разделе турбо-поверхностях необходимо задать параметр, распре-

деление которого мы хотим оценить на выбранной поверхности. Для этого нужно вставить элемент визуализации - контур параметров, выбрав в главном меню:

*Insert* → *Contour*.



**Рис. 7.16.** Меню *User Locations and Plots* в дереве проекта



**Рис. 7.17.** Пример отображения изоповерхностей

В появившемся окне необходимо ввести имя создаваемого поля. Например, *Static Pressure Span 50*, если будет создаваться контур распределения статического давления на ранее созданной турбоповерхности *Constant Span 50*. Выбор подтверждается нажатием кнопки *OK* (рис. 7.18).

В меню *Details of Contour* на вкладке *Geometry*, в поле *Locations* нужно выбрать желаемую турбо-поверхность с именем *Constant Span 50*. В списке *Variable* выбирается требуемый параметр потока, в данном случае *Pressure* (статическое давление). Выбор подтверждается нажатием кнопки *Apply*.

Во вкладке *Outline* дерева проектов в списке *User Locations and Plots* (рис. 7.19) сразу появится созданное только что поле распределение параметров (*Contour*) с именем *Static Pressure Span 50*, а в графическом окне – его отображение (рис. 7.20).

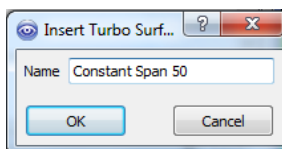


Рис. 7.18. Меню *Insert Contour*

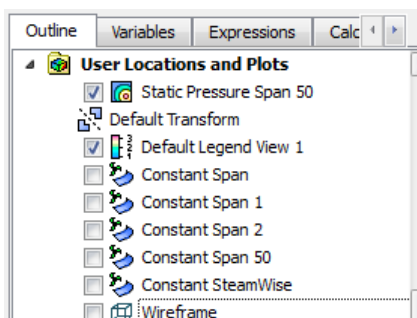


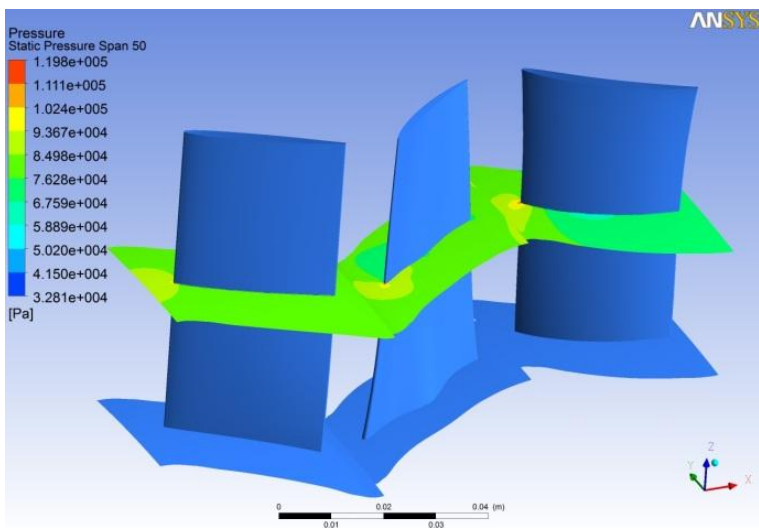
Рис. 7.19. Меню *Outline* дерева проектов

Для лучшего отображения поля распределения можно отключить всю геометрию лопаток и созданные турбо-поверхности, оставив включенным только отображение поля *Static Pressure Span 50* (см. рис. 7.19). Модель можно повернуть таким образом, чтобы построенные поля были хорошо видны. В рассматриваемом примере - ортогонально оси  $Z+$ . Для этого нужно щелкнуть правой клавишей мыши на свободном поле окна визуализации и в появившемся всплывающем меню выбрать *View1* → *Predefined Camera* → *View From Z+*.

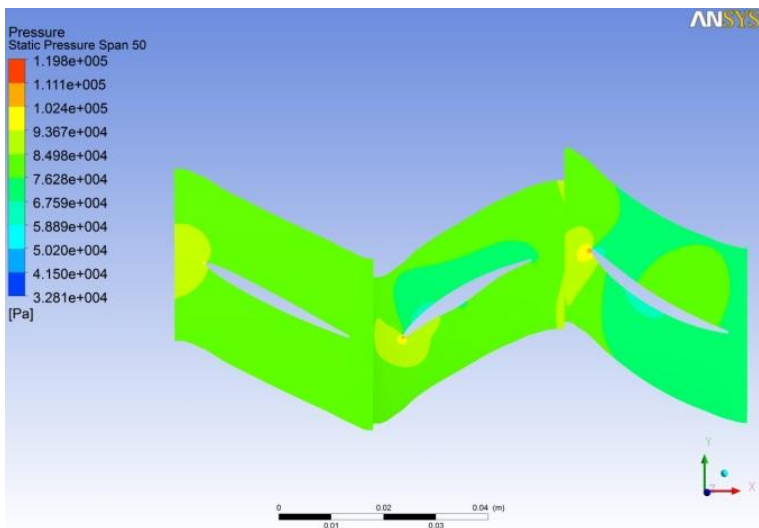
По приведенному выше алгоритму можно построить распределения параметров *Static Pressure*, *Static Temperature*, *Mach Number*, *Total Pressure*, *Total Temperature* на турбо-поверхностях *Constant Span 50*. (рисунки 7.20...7.24).

Аналогично строятся поля распределения параметров на поверхностях, перпендикулярных оси вращения (рис. 7.25).

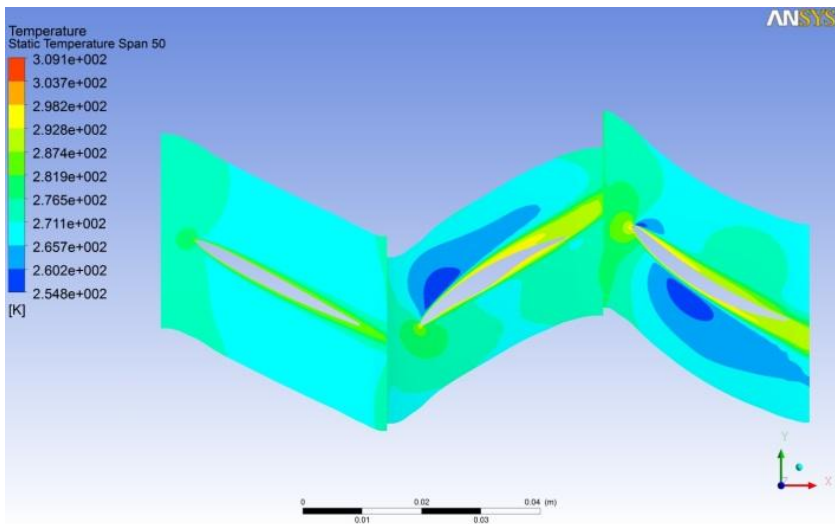
Кроме того, поля распределения параметров можно задавать не только на создаваемых поверхностях, но и на уже существующих: на перу лопаток, втулочных или периферийных поверхностях и т.д. Для этого при создании контура в поле *Locations* необходимо выбрать требуемую поверхность. Например, *VNA Blade*. Пример распределения статического давления по перу лопатки показан на рис. 7.26.



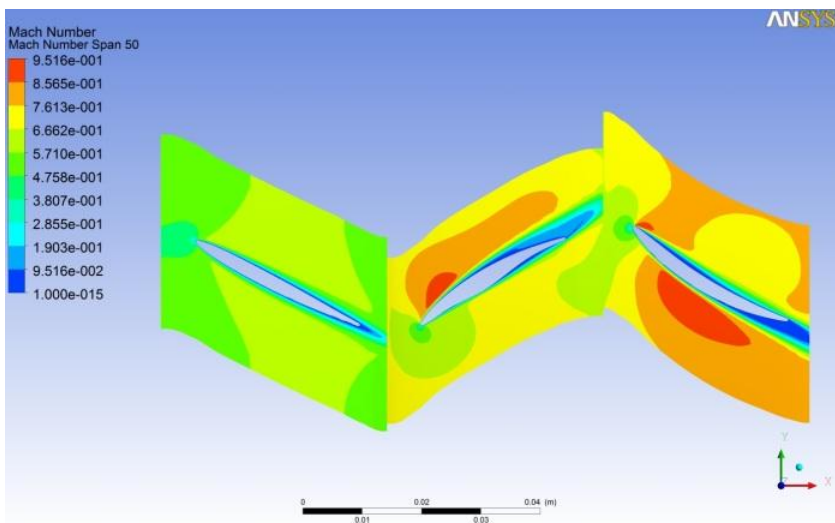
**Рис. 7.20.** Результат отображения поля статических давлений



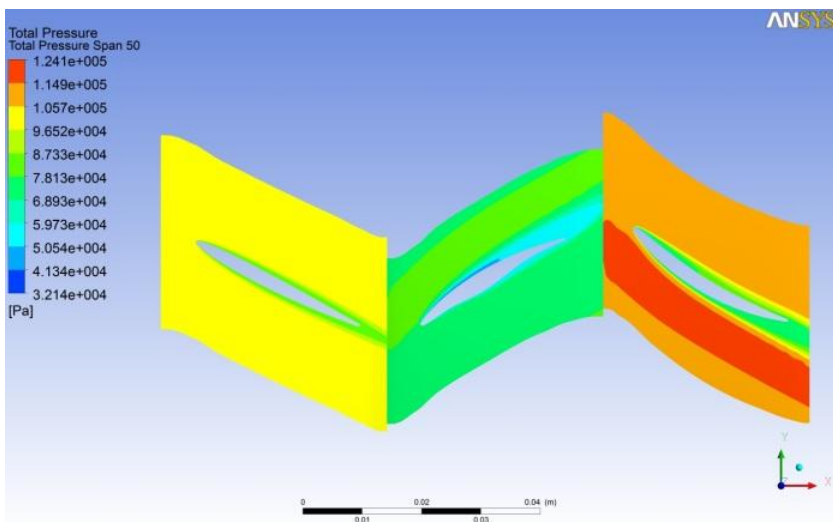
**Рис. 7.21.** Поле распределения статических давлений в сечении 50% по высоте ступени



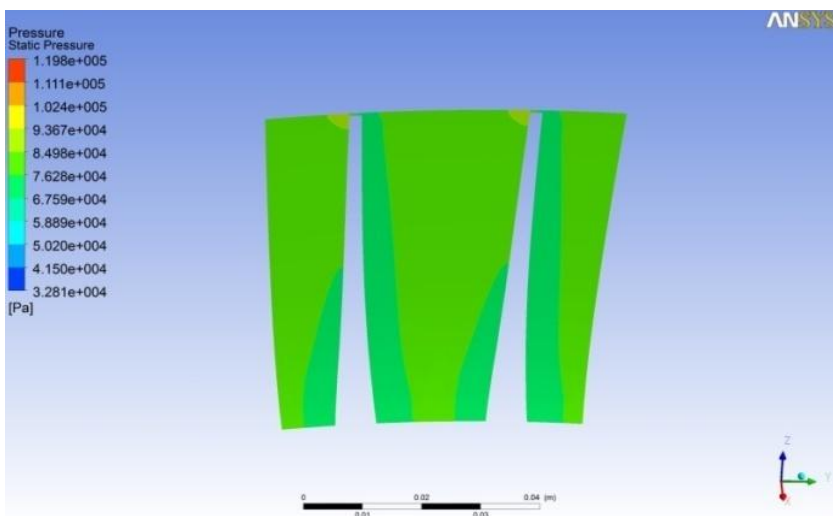
**Рис. 7.22.** Поле распределения статических температур в сечении 50% по высоте ступени



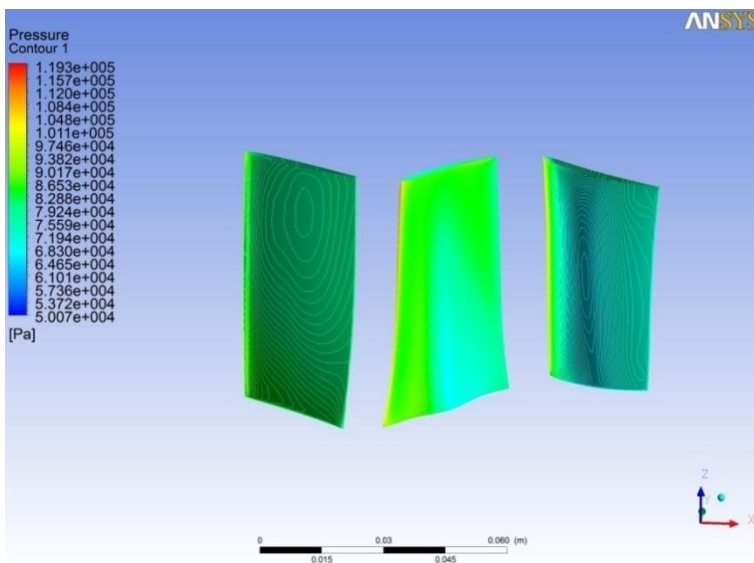
**Рис. 7.23.** Поле распределения чисел Маха в сечении 50% по высоте ступени



**Рис. 7.24.** Поле распределения полных давлений в сечении 50% по высоте ступени



**Рис. 7.25.** Поле распределения статических давлений в сечении перпендикулярном оси вращения, находящемся в середине расчетной области



**Рис. 7.26.** Поле распределения статических давлений на пере лопаток ступени компрессора

## 7.9. Построение линий тока в ступени осевого компрессора

Построение линий тока осуществляется с помощью команды:

*Insert* → *Steamline*.

После ее активации появится меню, в котором следует ввести имя линии тока и нажать кнопку *OK*.

В результате в меню *Details of Steamline* на вкладке *Geometry*, в поле *Type* нужно выбрать тип линии тока *3D Steamline* (трехмерная линия тока). В списке *Start From* («начинать от ...») нужно выбрать *VNAInlet*, что значит, что построение линий тока начнется от входного сечения ступени.

В поле *# of Points* (количество линий тока) в первом приближении можно задать *250*.

В поле *Variable* следует задать параметр, для которого будут строиться линии тока, в данном случае *Velocity*.



Сделанные настройки принимаются нажатием кнопки *Apply*.

Во вкладке *Outline* дерева проектов в списке *User Locations and Plots* сразу появится созданный только что объект *Steam line 1*, а в графическом окне – его отображение (рис. 7.27).

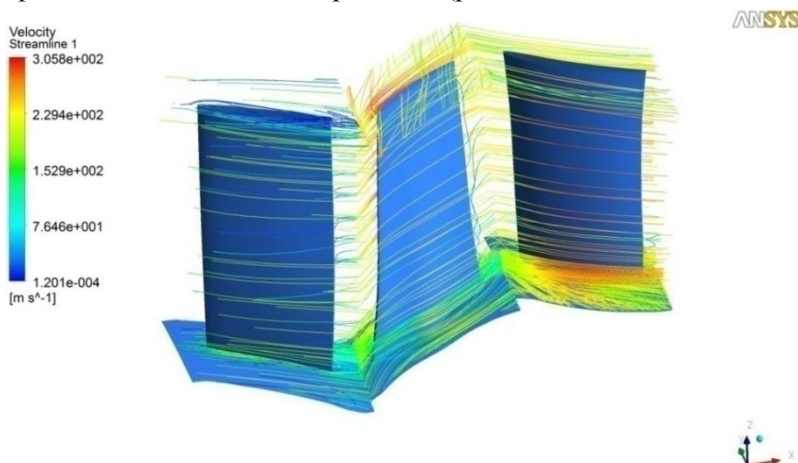


Рис. 7.27. Созданные линия тока в межлопаточном канале

## 7.10. Построение векторного поля на турбо-поверхности

Построение векторов осуществляется с помощью команды:

*Insert* → *Vectors*.

После ее активации появится меню, в котором следует ввести имя создаваемого векторного поля (например, *VelocitySpan 50*) и нажать кнопку *OK*.

В результате в меню *Details of Vectors* на вкладке *Geometry*, в списке *Locations* нужно выбрать турбо-поверхность для построения векторов *Constant Span 50*. В графе *Variable* выбрать переменную, в цвета изменения которой будут окрашиваться вектора, например *Velocity*. Сделанные настройки принимаются нажатием кнопки *Apply*.

Для лучшего отображения поля распределения следует отключить всю геометрию и созданные турбо-поверхности, оставив включенным только отображение объекта *VelocitySpan 50*. Для повышения информативности изображения рекомендуется развернуть его параллельно экрану (в рассматриваемом примере вдоль перпендикулярно оси *Z*). Для этого нужно щелкнуть правой клавишей мыши на свободном поле окна визуализации и в появившемся всплывающем меню выбрать *View* → *Predefined Camera* → *View Towards Z+* (рис. 7.28).

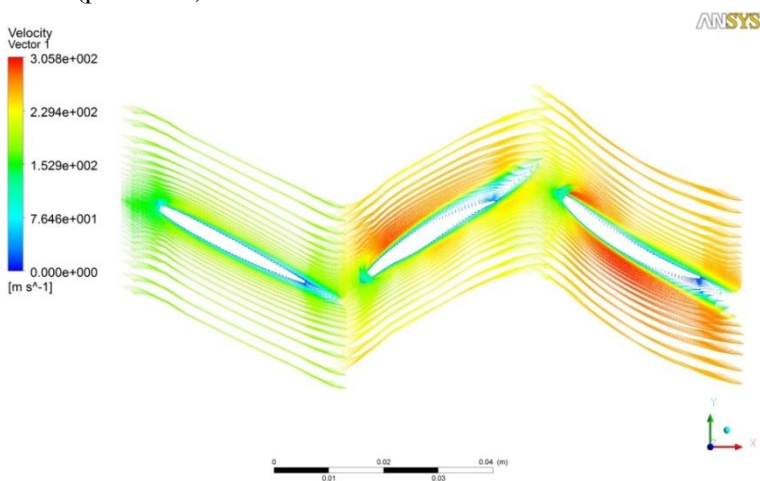


Рис. 7.28. Векторное поле скорости в сечении компрессора

## 7.11. Определение интегральных параметров потока

Кроме всех вышеперечисленных функций программа *ANSYS CFX-Post* позволяет вычислять интегральные параметры. Например, можно оценить расход на входе и выходе в расчетную область. Для этого в программе существует специальный калькулятор (*Function Calculator*).

Для того, чтобы запустить калькулятор необходимо либо перейти во вкладку *Calculators* под главным меню и выбрать *Function Calculator*, либо выполнить команду главного меню:

ГМ → Tools → Function Calculator.

Рабочее окно калькулятора представлено на рис. 7.29.



Рис. 7.29. Окно вычислителя интегральных параметров

В поле *Function* необходимо ввести требуемый параметр, в данном случае это расход (*mass Flow*). В поле *Location* – область расчета параметра, например, сначала нужно выбрать входное сечение расчетной области *VNAInlet* и нажать кнопку *Calculate*. В поле *Results* будет показана рассчитанная величина. Перед следующим расчетом необходимо снять галочку с параметра «*Clear previous results on calculate*», это позволит сохранить все рассчитанные величины. Далее, выбирая сечение на выходе из ступени *NA1 Outlet* и нажимая кнопку *Calculate* можно найти значение расхода на выходе.

Аналогичным образом можно найти интегральные значения любых переменных в любых сечениях.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. *Белоусов, А.Н.* Теория и расчет авиационных лопаточных машин [Текст]/*А.Н. Белоусов, Н.Ф. Мусаткин, В.М. Радько.* - Самара: ФГУП "Издательство Самарский Дом печати", 2003. – 336с.
2. *Холщевников, К.В.* Теория и расчет авиационных лопаточных машин [Текст]/*К.В. Холщевников, О.Н. Емин, В.Т. Митрохин.* – М.: Машиностроение, 1986. – 432с.
3. *Japike D., Vaines N.C.,* Introduction to Turbomachinery [Текст]. Concept NREC ЕТІІNc
4. *ДейчМ.Е.* Техническая газодинамика. – М.: Госэнергоиздат, 1961. – 671с.
5. *Андерсон, Д.* Вычислительная гидромеханика и теплообмен [Текст]. В 2-х томах/ *Д. Андерсон, Дж. Таннехил, Р. Флетчер.* – М.: Мир, 1990.- 384с.
6. *Бойко А.В., Говоруценко Ю.И., Ершов С.В.* Аэродинамический расчет и оптимальное проектирование проточной части турбомашин. - Харьков: НТУ "ХПИ", 2002. – 341с.
7. *Патанкар, С.* Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости [Текст]/ *С. Патанкар.* – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 150с.
8. *Рейнольдс А. Дж.* Турбулентные течения в инженерных приложениях: Пер. с англ. – М.: Энергия, 1979. – 408 с.
9. Турбулентность. Принципы и применение. Под ред. *У. Фроста и Т. Моудлена.* – М.: Мир, 1980. – 220с.
10. *Флетчер, К.* Вычислительные методы в динамике жидкостей [Текст]. В 2-х томах/*К. Флетчер.* – М.: Мир, 1991. – 1056с.
11. *Шлихтинг Г.* Теория пограничного слоя. – М.: Наука, 1974. - 711с.
12. [www.ansysolutions.ru](http://www.ansysolutions.ru)[электронный ресурс].
13. *Ansys CFX Users Manual*[электронный ресурс].

Учебное издание

*Батурин Олег Витальевич  
Колмакова Дарья Алексеевна  
Матвеев Валерий Николаевич  
Попов Григорий Михайлович  
Шаблий Леонид Сергеевич*

**РАСЧЕТ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ СТРУКТУРЫ ПОТОКА В  
СТУПЕНИ ОСЕВОГО КОМПРЕССОРА В ПРОГРАММНОМ  
КОМПЛЕКСЕ ANSYS CFX**

*Учебное пособие*

Научный редактор  
Редакторская обработка  
Корректорская обработка  
Компьютерная верстка О.В. Батурин, Л.С. Шаблий

Самарский государственный  
аэрокосмический университет.  
443086, Самара, Московское шоссе, 34

---

Изд-во Самарского государственного  
аэрокосмического университета.  
443086, Самара, Московское шоссе, 34