

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)» (СГАУ)

Г. М. Попов, Е. С. Горячкин, А. В. Кривцов

**Эффективное использование ресурсов
суперкомпьютера «Сергей Королёв» при решении
задач турбомашиностроения с применением
программного комплекса NUMECA**

Электронное учебное пособие

Работа выполнена по мероприятию блока 2 «Развитие и повышение эффективности научно-инновационной деятельности» и блока 3 «Развитие информационной научно-образовательной среды и инфраструктуры» Программы развития СГАУ на 2009 – 2018 годы по проекту «Разработка комплекса технологий использования ресурсов суперкомпьютера «Сергей Королёв» в целях развития инновационной и научно-образовательной среды университета»

Соглашение № 2/5 от 03 июня 2013 г.

С А М А Р А

2013

УДК СГАУ: 621.515 (075)
ББК 39.55
П 58

Авторы: **Попов Григорий Михайлович**
Горячкин Евгений Сергеевич
Кривцов Александр Васильевич

Редакторская обработка: О. В. Батурин
Компьютерная верстка: О. В. Батурин
Доверстка: О. В. Батурин

Попов, Г. М. Эффективное использование ресурсов суперкомпьютера «Сергей Королёв» при решении задач турбомашиностроения с применением программного комплекса NUMECA: электрон. учеб. пособие / Г. М. Попов, Е. С. Горячкин, А. В. Кривцов; М-во образования и науки РФ, Самар. гос. аэрокосм. ун-т им. С. П. Королева (нац. исслед. ун-т). – Электрон. текстовые и граф. дан. (8,6-Мбайт). - Самара, 2013. – 1 эл. опт. диск (CD-ROM).

Учебное пособие содержит подробное описание технологии расчетного исследования рабочего процесса турбомашин в современном CFD - программном комплексе NUMECA с использованием ресурсов суперкомпьютера «Сергей Королёв». Подробно описаны процесс создания расчетной модели, создания сетки конечных элементов в автоматизированном режиме, наложение граничных условий, распараллеливание задачи, запуска её на расчёт и обработки его результатов.

Учебное пособие предназначено для подготовки специалистов, обучающихся по специальности 160302.65 «Авиационные двигатели и энергетические установки» (ФГОС-2), изучающих дисциплины «Теория, расчет и проектирование авиационных двигателей и энергетических установок», «Теория и расчет лопаточных машин», в 6 и 7 семестрах, для специалистов, обучающихся по специальности 140501.65 «Двигатели внутреннего сгорания» (ФГОС-2), изучающих дисциплину «Агрегаты наддува двигателей» в 6 и 7 семестрах; для магистров по направлению 160700.68 «Двигатели летательных аппаратов» (ФГОС-3), изучающих дисциплины «Теория, расчет и проектирование авиационных двигателей и энергетических установок», «Теория и расчет лопаточных машин», в 6 и 7 семестрах, для бакалавров по направлению 141100.62 "Энергетическое машиностроение" (ФГОС-3), изучающих дисциплину «Агрегаты наддува двигателей» в 6 и 7 семестрах.

Разработано на кафедре теории двигателей летательных аппаратов

© Самарский государственный
аэрокосмический университет, 2013

ОГЛАВЛЕНИЕ

ОСНОВНЫЕ УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ	4
ВВЕДЕНИЕ	7
1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ЧИСЛЕННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА В ТУРБОМАШИНЕ	11
2. ТЕХНОЛОГИЯ РАСЧЕТНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА В НЕОХЛАЖДАЕМОЙ МНОГОСТУПЕНЧАТОЙ ОСЕВОЙ ТУРБИНЕ В ПРОГРАММНОМ КОМПЛЕКСЕ <i>NUMECA</i>	15
2.1. Формирование сетки конечных элементов расчетной модели многоступенчатой осевой турбины	17
2.1.1. Загрузка геометрии лопаток и описание их основных параметров	20
2.1.2. Построение сетки конечных элементов	31
2.1.3. Проверка качества сетки конечных элементов	49
2.1.4. Создание сетки конечных элементов в надбандажных полостях	53
2.1.5. Проверка граничных условий	63
2.2. Описание граничных условий и настройки решателя при исследовании течения в ступени осевой турбины с использованием САЕ пакета <i>NUMECA</i>	66
2.2.1. Запуск программы <i>FINE™/Turbo</i>	67
2.2.2. Задание граничных условий	68
2.2.3. Настройка параметров решателя	91
2.2.4. Запуск итерационного расчета	96
2.3. Обработка результатов расчета течения в турбомашине в программном комплексе <i>NUMECA</i>	99
3. РАСЧЁТ ЧИСЛЕННОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА В ТУРБОМАШИНЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РЕСУРСОВ СУПЕРКОМПЬЮТЕРА «СЕРГЕЙ КОРОЛЁВ»	110
3.1. Расчёт численной модели с помощью командной строки	111
3.2. Расчёт численной модели с помощью графического интерфейса на суперкомпьютере «Сергей Королёв»	119
4. ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ РАСЧЕТА ТЕЧЕНИЯ В ТУРБОМАШИНЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РЕСУРСОВ СУПЕРКОМПЬЮТЕРА «СЕРГЕЙ КОРОЛЁВ»	130
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	155

ОСНОВНЫЕ УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

b	-	высота лопатки, хорда профиля;
c	-	скорость потока в абсолютной системе координат;
c_p	-	изобарная теплоемкость;
D	-	диаметр;
F	-	площадь сечения;
G	-	массовый расход;
i	-	энтальпия;
k	-	показатель адиабаты;
L	-	удельная работа;
l	-	длина;
M	-	число Маха;
N	-	мощность;
n	-	частота вращения ротора;
p	-	давление;
r	-	радиус;
R	-	газовая постоянная;
T	-	температура;
t	-	шаг решетки;
u	-	окружная скорость;
w	-	относительная скорость;
z	-	число лопаток в ЛВ, число ступеней;
α	-	угол между фронтом решетки и вектором абсолютной скорости, коэффициент избытка воздуха;
β	-	угол между фронтом решетки и вектором относительной скорости;
δ	-	величина зазора;
η	-	коэффициент полезного действия;
λ	-	приведенная скорость;
ρ	-	плотность;
$\rho_{ст}$	-	степень реактивности;
σ	-	коэффициент восстановления полного давления;
τ	-	ресурс;
ω	-	угловая скорость вращения ротора;
ζ	-	коэффициент потерь

Индексы

<i>*</i>	—	параметр торможения;
<i>0</i>	—	сечение на входе в СА;
<i>1</i>	—	сечение на входе в РК;
<i>2</i>	—	сечение на выходе из РК;
<i>в</i>	—	воздух;
<i>к</i>	—	относящийся к периферийному сечению, сечение на выходе из компрессора;
<i>м</i>	—	механический;
<i>рк</i>	—	относящийся к рабочему колесу;
<i>ср</i>	—	относящийся к среднему сечению;
<i>ст</i>	—	относящийся к ступени;
<i>а</i>	—	осевое направление;
<i>р</i>	—	изобарный процесс ($p=const$);
<i>г</i>	—	связанный с потерями;
<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 СК связанной с вращающимся РК;
<i>x, y, z</i>	—	проекции на координатные оси;
Δ	—	изменение величины;
Σ	—	суммарная величина

Сокращения

<i>ГМ</i>	—	главное меню;
<i>ГТД</i>	—	газотурбинный двигатель;
<i>ГТУ</i>	—	газотурбинная установка;
<i>ГУ</i>	—	граничное условие;
<i>ПКМ</i>	—	правая кнопка мыши;
<i>КПД</i>	—	коэффициент полезного действия;
<i>КЭ</i>	—	конечные элементы;

<i>ЛВ</i>	—	лопаточный венец;
<i>ЛКМ</i>	—	левая кнопка мыши;
<i>ПЧ</i>	—	проточная часть;
<i>РК</i>	—	рабочее колесо;
<i>СА</i>	—	сопловой аппарат;
<i>СК</i>	—	система координат;
<i>СГАУ</i>	—	самарский государственный аэрокосмический университет им. академика С.П. Королева;
<i>ТНД</i>	—	турбина низкого давления;
<i>ТВД</i>	—	турбина высокого давления;
<i>ТСД</i>	—	турбина среднего давления;
<i>CFD</i>	—	принятое в иностранной литературе сокращение термина «вычислительная газовая динамика»

Остальные обозначения, индексы и условные сокращения объяснены в тексте.

ВВЕДЕНИЕ

Одним из способов ускорения и повышения качества проектирования и газодинамической доводки проточной части турбомашин является автоматизация расчетов, которая позволяет проследить влияние изменения конструктивных и режимных параметров на эффективность работы турбомашин в целом, либо ее отдельных элементов. Решение уравнений Навье – Стокса методом контрольных объемов, широко применяющееся в последнее время для исследования проблем газовой динамики, идеально подходит как средство проведения подобных расчетов.

Вместе с тем, подобные расчёты требуют значительных вычислительных и временных ресурсов. Одним из способов уменьшения расчётного времени является применение технологий высокоэффективных высокопроизводительных параллельных вычислений, реализованных на суперкомпьютере СГАУ «Сергей Королёв».

Численное моделирование течения газа в какой-либо расчетной области (например, в межлопаточном канале турбомашин или их совокупности) состоит из нескольких основных этапов [1, 2, 5]:

- построения расчетной области;
- пространственной дискретизации уравнений потока;
- задания граничных условий;
- настройки решающего модуля;
- вычисления параметров потока;
- визуализации результатов расчета.

На первом этапе строится геометрия расчетной области, включающая в себя часть пространства занятую жидкостью или газом, процессы в которой оказывают влияние на картину потока в интересующей области. Далее проводится дискретизация расчетной области, т.е. разделение ее на конечные объемы (ячейки). Она производится таким образом, что ячейки заполняют полностью все пространство расчетной области, не образуя ни пустот, ни пересечений. Теоретически конечные объемы могут иметь любую произвольную форму. Однако с точки зрения точности вычисления, согласно теории методов дискретизации, наиболее оптимальным является использование ортогональных ячеек в форме гексаэдров. Вместе с тем желание построить наилучшую сетку существенно усложняет процесс автоматизированного построения вычислительной сети. В связи с этим построение сетки конечных элементов для расчетных областей сложных формах решается по-разному. Ряд программ использует гибридный тип сети (тетраэдры, призмы, гексаэдры). Другие применяют блочно-структурированную топологию для типовых форм расчетных областей [1, 2, 5].

На втором этапе задаются граничные условия, и проводится расчет. На третьем этапе проводится визуализация результатов решения и их анализ в постпроцессоре.

В настоящее время на рынке предлагается значительное число как универсальных, так специализированных программных продуктов, позволяющих решать описанную выше проблему. По мнению авторов, наилучшим программным комплексом для расчетного исследования рабочих процессов в турбомашинах является *NUMECA*, разработанная в Бельгии под руководством профессора Шарля Хирша [9,10]. Этот программный продукт сегодня содержит наиболее современные специализированные физические модели процессов в лопаточных машинах и методы их численного решения. Алгоритмы и шаблоны программы позволяют

создавать качественные, строго структурированные расчетные модели течения в турбомашинах при минимальном участии пользователя.

Разработанный компанией *NUMECA* решатель *FINE\ Turbo* работает заметно быстрее аналогов, поскольку исключает дополнительные операции внутренней переинтерполяции, связанной с обработкой неструктурированной топологией сети.

Программный комплекс *NUMECA FINE™/Turbo* включает в себя следующие инструменты [9,10]:

- *IGG™* - подпрограмма, которая осуществляет взаимодействие системы создания геометрии с программным обеспечением генератора сетки, основанным на многоблочном структурированном методе;
- *AutoGrid™* - автоматизированная подпрограмма генерации пространственной сетки, базирующийся на структурной многоблочной методике *IGG™*;
- *Euranus* - современный многоблочный решатель потока, способный решать уравнение Эйлера и Навье – Стокса для ламинарных, нестационарных и турбулентных потоков;
- *CFView* -™ подпрограмма – визуализатор результатов решения;
- *FINE™ Graphical User Interface* – легкая в использовании среда, которая включает в себя различное программное обеспечение, объединяет концепцию проектов и позволяет пользователю создать окончательную модель, двигаясь от генерации сетки к визуализации потока, без потребности в излишней манипуляции с файлами.

В данном методическом пособии приводится подробная пошаговая технология расчёта турбомшины с использованием ресурсов суперкомпьютера «Сергей Королёв».

Представленная информация может быть использована в работе учебных, проектных и научно-исследовательских организаций

авиационной, ракетно-космической, транспортной,
судостроительной, энергетической, нефтегазовой и других
отраслей.

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ЧИСЛЕННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА В ТУРБОМАШИНЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РЕСУРСОВ СУПЕРКОМПЬЮТЕРА «СЕРГЕЙ КОРОЛЁВ»

Технология, представленная в настоящем методическом пособии, является типовой и раскрывает основные этапы, приемы, подходы и действия, которые необходимо выполнить инженеру при исследовании рабочего процесса турбомашин разного типа в программном комплексе *NUMECA* с использованием суперкомпьютера «Сергей Королёв». Данная технология излагается на примере исследования структуры потока в двухступенчатой неохлаждаемой осевой турбине низкого давления (ТНД) авиационного ГТД.

Основные параметры ТНД, необходимые для проведения расчетного исследования ее рабочего процесса *CFD* методами представлены на рис.1.1 и в табл. 1.1.

В настоящее время суперкомпьютер СГАУ «Сергей Королёв» позволяет выполнять все стадии численного моделирования турбомашин: подготовку расчётной модели (создание сетки, настройка параметров решателя, определение граничных условий и т.д.), расчёт численной модели и обработку результатов. Однако в подавляющем числе задач моделирования рабочего процесса в турбомашинах рекомендуется стадии подготовки расчётной модели и обработки результатов выполнять на локальных компьютерах, а суперкомпьютер использовать лишь на стадии расчёта численной

модели. Вместе с тем, в данном методическом пособии показано, каким образом возможно осуществить подготовку расчётной модели и обработку результатов с помощью суперкомпьютера «Сергей Королёв».

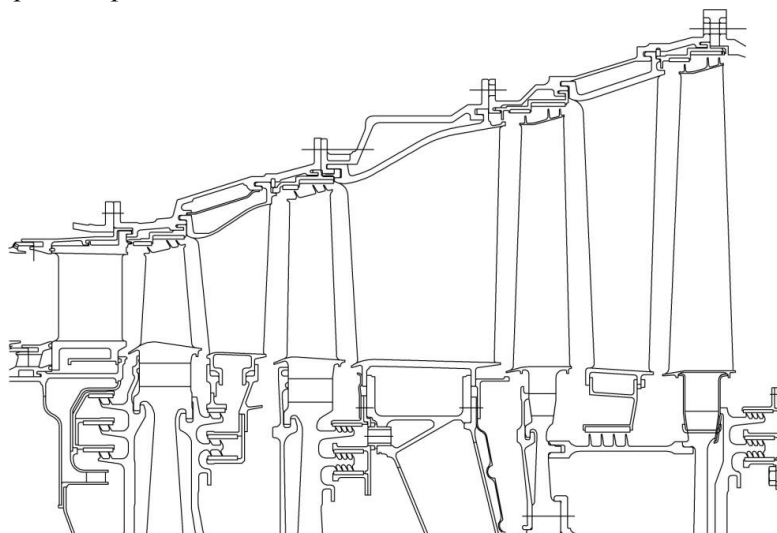


Рис. 1.1. Проточная часть исследуемой турбины НД

Таблица 1.1

Основные параметры рабочего процесса ТНД

Параметр	Значение
Число лопаток СА первой ступени, z_{ca} , шт	30
Число лопаток РК первой ступени, $z_{рк}$, шт	91
Число лопаток СА второй ступени, z_{ca} , шт	60
Число лопаток РК второй ступени, $z_{рк}$, шт	81
Частота вращения ротора $n_{\text{н0}}$, об/мин	5300
Осредненное полное давление на входе в СА первой ступени, p_z^* , Па	605326
Осредненная полная температура на входе в СА первой ступени, T_z^* , К	1098
Осредненный угол входа потока в СА первой ступени, α , град	66
Статическое давление на выходе на радиусе $R=0,1m$, Па	232600

Для работы с суперкомпьютером «Сергей Королёв» на локальном компьютере должны быть установлены и настроены следующие программные продукты: *PuTTY*, *WinSCP* и *Xming*.

Программа *PuTTY* (рис 1.2) предназначена для запуска программ и заданий на суперкомпьютере «Сергей Королёв» с использованием командной строки.

Программа *WinSCP* представляет собой обычный файловый менеджер. При ее запуске, после ввода имени пользователя суперкомпьютера и пароля, открывается доступ к рабочей папке, выделенной пользователю. Копирование файлов в нее с персонального компьютера и обратное копирование результатов принципиально не отличается от работы в типовых файловых менеджерах. Внешний вид программы *WinSCP* может быть настроен пользователем (рисунок 1.3).

Программный комплекс *Xming* является программой *X11* – сервером и необходима для работы с суперкомпьютером в графическом режиме.

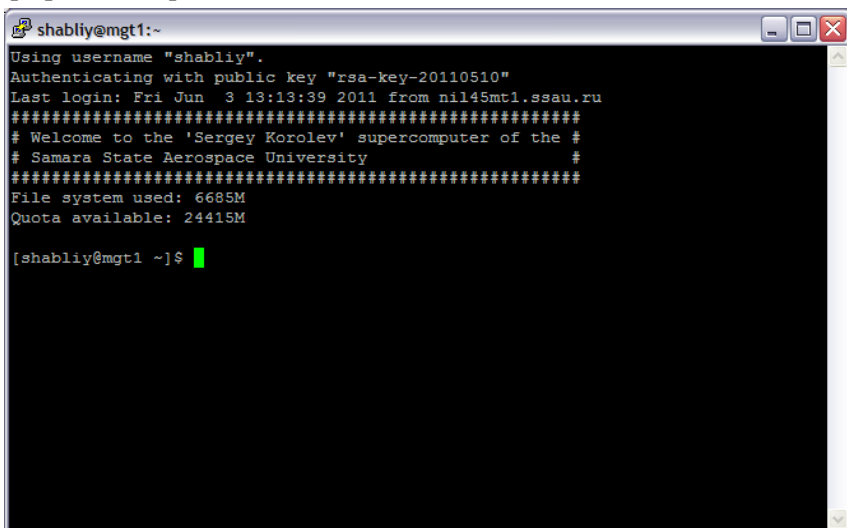


Рис. 1.2. Окно программы *PuTTY*

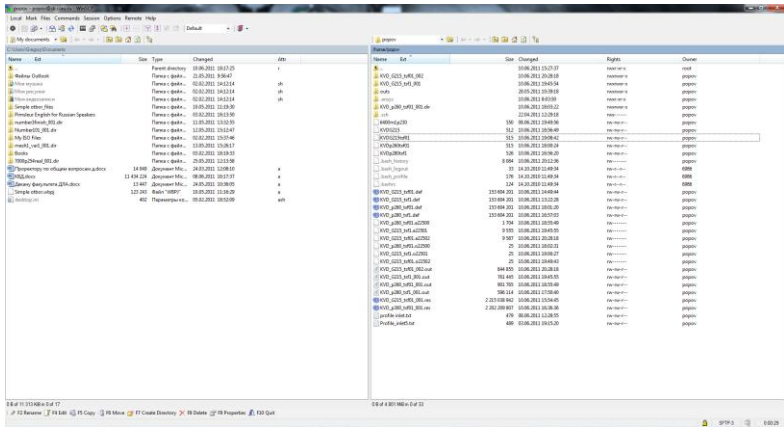


Рис. 1.3. Окно программы WinSCP

2. ПОДГОТОВКА ЧИСЛЕННОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ РАБОЧГО ПРОЦЕССА В ТУРБОМАШИНЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РЕСУРСОВ СУПЕРКОМПЬЮТЕРА «СЕРГЕЙ КОРОЛЕВ»

Построение интересующей исследователя расчетной области для исследования течения в турбомашине осуществляется в модуле *AutoGrid*. Он предназначен для создания качественных конечноэлементных расчетных моделей турбомашин всех основных типов. Его особенностью является возможность построения геометрии расчетной области и сетки для многовенцовых турбомашин в рамках одного проекта (например, в *Ansys CFX* каждый лопаточный венец создается в рамках отдельного подпроекта), а также высокий уровень качества создаваемых сетей при минимальном участии пользователя. Качество сетки достигается за счет применения универсальных шаблонов (схем разбиения межлопаточного канала на блоки), а также использованием мощным инструментом сглаживания сети, включающим возможность деформации структурных блоков.

Подготовку численной модели рекомендуется выполнять на локальном компьютере. Однако в конце данной главы будет также показано, как выполнить подготовку численной модели с использованием графического режима на суперкомпьютере "Сергей Королёв». Стоит отметить, что алгоритм настройки расчётной модели и интерфейсы программных комплексов *AutoGrid*TM и *FINE*TM/*Turbo* при работе на локальном компьютере и в

графическом режиме на суперкомпьютере «Сергей Королёв» не отличаются. Различие состоит только в процедурах запуска программ *AutoGrid*TM и *FINE*TM/*Turbo*.

Шаг 1. Запуск модуля *AutoGrid*TM. Запуск модуля *AutoGrid*TM осуществляется из программы *IGG* или *FINE*. Они в свою очередь запускаются предварительно из меню «Пуск» ОС «Windows»:

Пуск → *Программы* → *NUMECA Software* → *Fine89_1* → *IGG/FINE*.

После выполнения указанного действия появится основное рабочее окно программы *IGG* (рис. 2.1). Для перехода в программу *AutoGrid* необходимо в главном меню (ГМ) программы *IGG/FINE* (рис. 2.1) выбрать пункт:

ГМ → *Modules* → *AutoGrid 5*.

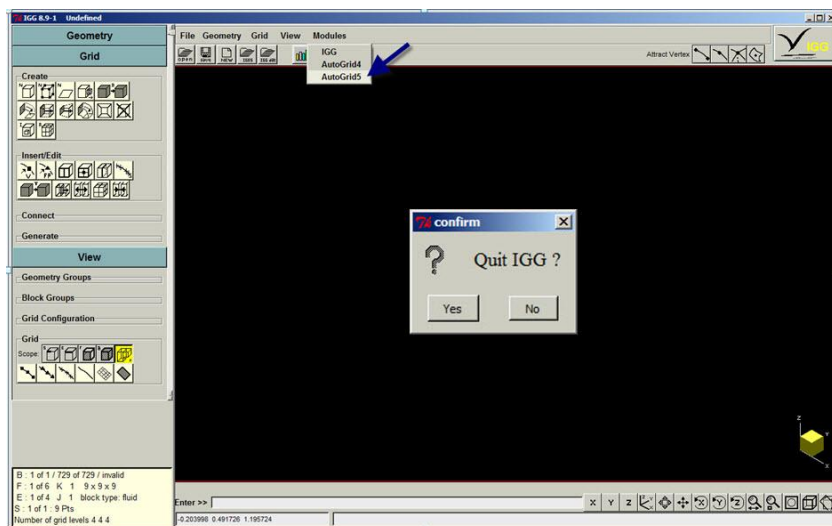


Рис. 2.1. Рабочее окно модуля *IGG*

После этого появится запрос о выходе из модуля *IGG/FINE* (рис. 2.1). Намерение выйти следует подтвердить, нажав кнопку 16

Yes. В результате открывается рабочее окно модуля *AutoGrid*, приведенное на рис.2.2.

Графический пользовательский интерфейс программы *AutoGrid™ v8* включает в себя несколько окон, которые одновременно позволяют визуализировать геометрию и конечно-элементную сетку модели в меридиональном сечении, в сечении межлопаточного канала и в трехмерном виде. Доступ к основному меню и средствам управления осуществляется через главное меню и дерево проекта. В нижней части рабочего поля расположено информационное окно, отражающие сообщения о выполнении тех или иных действий.

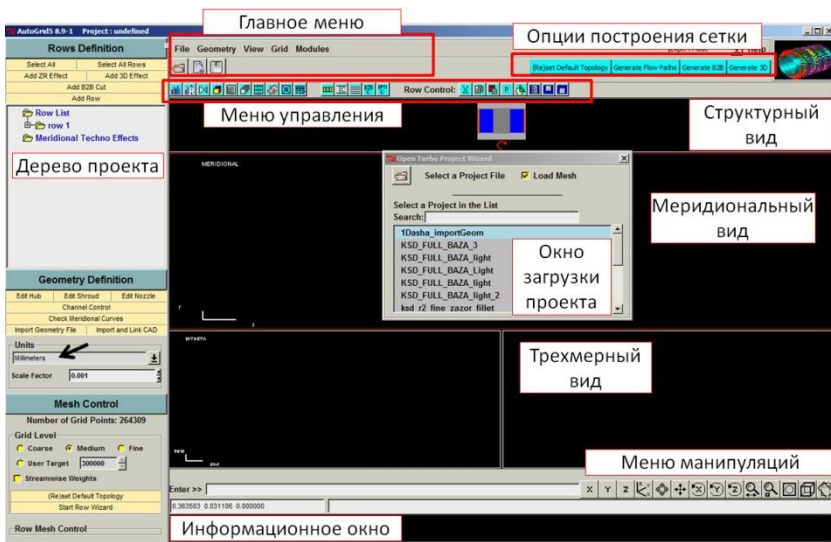


Рис. 2.2. Рабочее окно модуля *AutoGrid™ v8.x*

2.1. Формирование сетки конечных элементов расчетной модели турбомашины

После загрузки стартового окна модуля *AutoGrid™* необходимо закрыть диалоговое окно *Open Turbo Project Wizard*, которое появится автоматически после старта программы. Оно позволяет

пользователю быстро загрузить созданный во время предыдущего сеанса работы с программой файл с расширением *.trb. Этот файл включает необходимые данные для восстановления сетки на идентичной или подобной геометрии. Поскольку в описываемой технологии геометрия расчетной области будет создаваться «с нуля», основываясь на полученных в процессе проектирования форме лопаток и меридиональных обводов проточной части (ПЧ), то выполнять какие – либо действия в окне *Open Turbo Project Wizard* не потребуется.

Шаг 2. Создание нового проекта в модуле *AutoGrid*. Для создания нового проекта в ГМ следует вызвать команду:

ГМ → File → New Project.

После этого появится меню, которое предупреждает о том, что активный до этого момента проект будет закрыт. В нем следует нажать кнопку *Yes*, чтобы подтвердить сделанный выбор.

Затем появится диалоговое окно *Create a new Project* (рис. 2.3). В нем необходимо задать способ описания геометрии расчетной области. Существует два способа: первый способ построение на базе *CAD* файлов, описывающих профиль лопатки, полученных в формате *IGES*, *Parasolid*, *CATIA V5* и т.д. (кнопка *Start a New Project From Scratch* (рис. 2.3)). Второй способ - загрузка файла во внутреннем формате *NUMECA* - *.geomTurbo (кнопка *Initialize a New Project from a geomTurbo File* (рис. 2.3)). При выборе второго варианта следует помнить, файл формата *.geomTurbo включает в себя три основных блока: управляющий файл, блок описания меридионального сечения и блок определения формы лопаток.

Для рассматриваемой турбины НД геометрия расчетной области будет задаваться с помощью предварительно созданных *CAD* файлов в формате *IGES*. Поэтому в окне *Create a new Project* (рис. 2.3) следует выбрать пункт *Start a New Project From Scratch*.

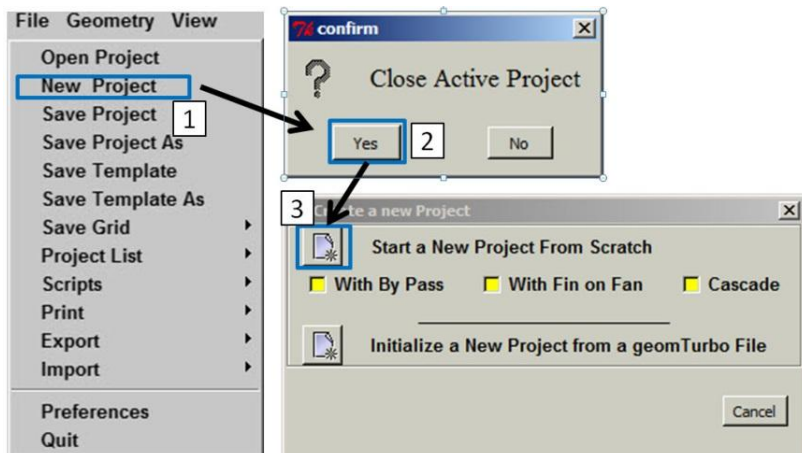


Рис. 2.3. Последовательность создания нового проекта

Для рассматриваемой турбины НДС геометрия расчетной области будет задаваться с помощью предварительно созданных *CAD* файлов в формате *IGES*, описывающих геометрию ПЧ. Поэтому в окне *Create a new Project* (рис. 2.3) следует выбрать пункт *Start a New Project From Scratch*.

Шаг 3. Выбор единиц измерения.

Прежде чем начать работу в *AutoGrid*, необходимо указать единицы измерения, в которых создавалась *CAD* модель, описывающая геометрию ПЧ турбины. Сделать это можно во вкладке *Units* (рис. 2.4), находящейся ниже дерева проекта в левой части рабочего окна. Там, в выпадающем списке, необходимо выбрать нужную размерность. В российской практике размеры элементов турбомашин обычно указываются в миллиметрах (*millimeters*). Эту размерность и следует выбрать.

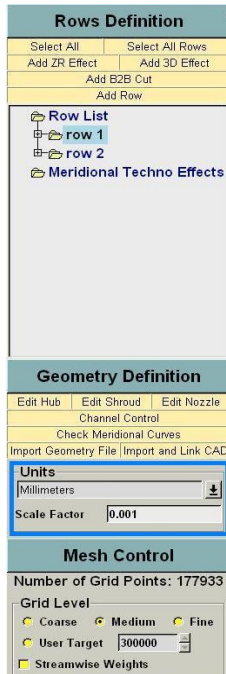


Рис. 2.4. Задание размерности геометрии

2.1.1. Загрузка геометрии лопаток и описание их основных параметров

Для построения геометрии расчетной области с использованием созданных в *CAD* программе геометрии элементов проточной части, необходимо предварительно создать трехмерные компьютерные модели этих элементов. Для корректного описания геометрии расчетной области в любой *CAD* программе необходимо создать линию, представляющую собой меридиональное сечение втулочной концевой поверхности, линию – меридиональную проекцию периферийной концевой поверхности и поверхности лопаток каждого венца. Поверхность каждой лопатки должна описываться двумя или четырьмя поверхностями. В случае если лопатка описывается двумя поверхностями, то одна из них является

спинкой (выпуклой частью), другая – корытцем (вогнутой частью). Поверхности стыкуются между собой на входной и выходной кромке. Если лопатка описывается четырьмя поверхностями, то одна из них описывает спинку, вторая входную кромку, третья корытце, четвертая – выходную кромку. Меридиональные обводы представляют собой пространственные линии.

Эта информация может содержаться как в одном, так и нескольких отдельных файлах. Созданная *CAD* модель должна быть записана в универсальных форматах *IGES* или *Parasolid*.

Модели лопаток и геометрию меридиональных обводов можно получить в любой *CAD* системе, и через файлы экспорта в универсальном формате (*IGES* или *Parasolid*) передать в *NUMECA*.

Пример геометрии, необходимой для описания осевой турбины, показан на рис. 2.5.

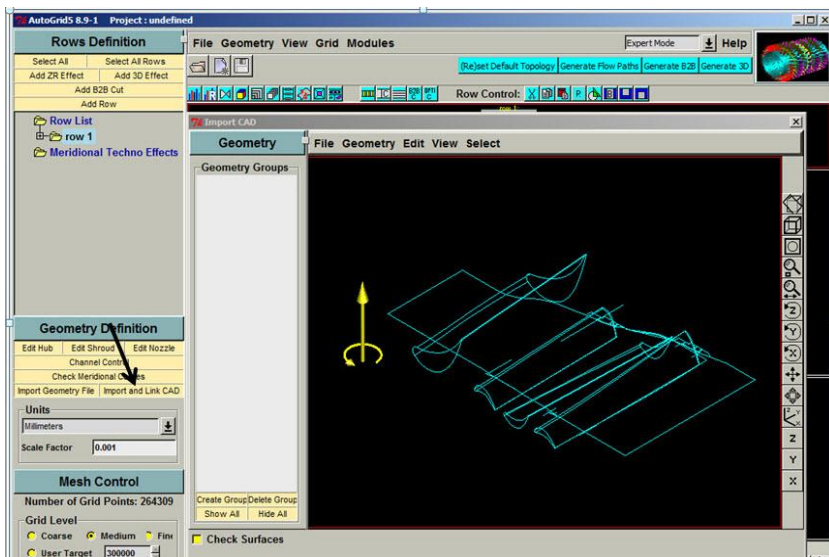


Рис. 2.5. Окно *Import CAD*

Внимание!!! При назначении имени файла геометрии и выборе его расположения на диске ПК необходимо обойтись без русских

букв, как в названии файла, так и названиях папок в которых она размещается.

В следующем шаге будет показано, как загрузить в *NUMECA* элементы геометрии расчетной области, заранее построенные в *CAD* программе, с помощью формата *IGES*.

Шаг 4. Загрузка геометрии элементов проточной части. Для загрузки заранее созданной геометрии ПЧ турбомашин в *NUMECA* необходимо в ГМ программы, в списке, левее кнопки *Help*, выбрать опцию *Expert Mode*. Это действие приведет к тому, что интерфейс программы будет отображаться в полном объеме, открывая доступ к некоторым необходимым командам настройки, недоступным в стандартной конфигурации.

Затем в дереве проекта следует выбрать пункт *Import and Link CAD*. В результате появится меню *Import CAD* (рис. 2.5). В нем следует загрузить созданные ранее *IGES* файлы, содержащие геометрию лопатки и меридиональные обводы, выбрав подменю *File* → *Open*. Если геометрия проточной части содержится в нескольких *CAD* файлах, то они загружаются последовательно, а информация, содержащаяся в них, накладывается друг на друга. После загрузки в окне *Import CAD* появится геометрия ПЧ рассматриваемой модели ступени ТНД. В примере геометрия турбины состоит из четырех лопаток, описанных четырьмя поверхностями каждая (спинка, корытце, входная и выходная кромки) и общих для всех ступеней меридиональных обводов (рис. 2.5).

Шаг 5. Изменение оси вращения турбомашин. В случае если ось турбомашин, загруженная в программу, не совпадает с реальным положением (как на рис. 2.5), то положение оси необходимо изменить. Ось вращения турбомашин в программе описывается как вектор, направление которого можно поменять с помощью команды (рис.2.6):

ГМ → *Edit* → *Geometry Axis*

В появившемся меню необходимо изменить направление оси, установленное по умолчанию. Для этого в строке *Stream Direction* вместо установленного по умолчанию значения $0\ 0\ 1$ вводится новое (например, $1\ 0\ 0$ (обратите внимание, что компоненты вектора отделяются друг от друга пробелом)) (рис.2.6). Сделанные настройки подтверждаются нажатием кнопки *Apply*. После этого окно меню *Geometry Axis* можно закрыть (*Close*).

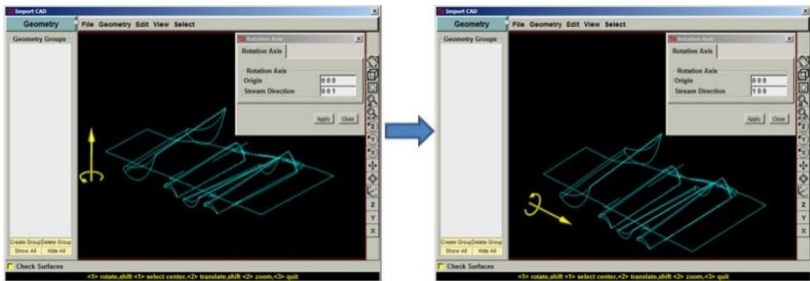



Рис.2.6. Изменение направления оси турбомашины

Шаг 6. Передача загруженной геометрии проточной части турбомашины в *AutoGrid 5*. Загруженную геометрию необходимо передать из окна *Import CAD* в модуль *AutoGrid* таким образом, чтобы программа правильно определила, какая поверхность описывает спинку, какая корытце, какая линия описывает периферийный обвод, какая – втулочный и т.д. Это делается в следующей последовательности:

1. Указывается меридиональная форма тракта. Для этого в окне *Import CAD* запускается команда:

ГМ → *Select* → *Curves*

С ее помощью будут выбраны линии втулочного и периферийного обвода. После запуска команды необходимо выделить все отрезки, принадлежащие одному меридиональному

обводу (например, втулочному). Для выделения можно использовать рамку, которая образуется при движении мыши с нажатой ЛКМ . Выделенные линии изменяют свой цвет.

Все выделенные элементы нужно объединить в группу, что выполняется нажатием кнопки *Create Group*. В появившемся окне следует ввести имя создаваемой группы, например *Hub* (рис.2.7) и нажать кнопку *Create*. После этого имя созданной группы появится в списке в левой части окна. Устанавливая или убирая галочку напротив имени группы можно делать ее видимой или не видимой. Такие же манипуляции следует проделать и с линиями образующими периферийный обвод.

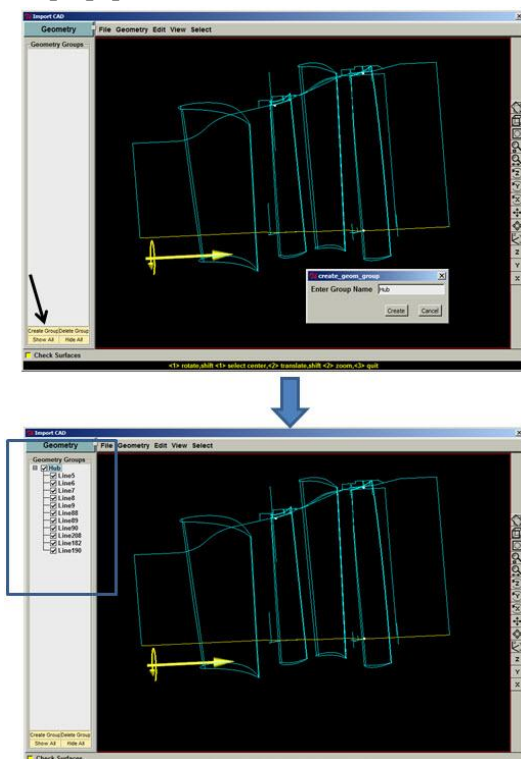



Рис.2.7. Создание группы линий

Затем необходимо щелкнуть ПКМ  на нижнем меридиональном обводе, и в появившемся меню выбрать пункт *Link to Hub*. Таким образом, будет показано, что именно данная линия описывает втулочную концевую поверхность. Аналогичным образом следует поступить с периферийным обводом, но в меню выбрать пункт *Link to Shroud*. После выполнения указанных действий в модуле *AutoGrid5* появится форма меридионального тракта ступени (рис. 2.8).

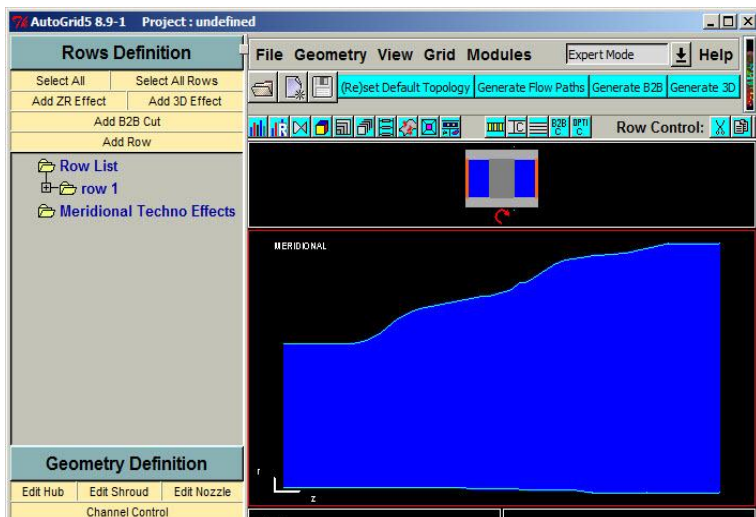



Рис. 2.8. Меридиональный профиль проточной части турбины, загруженный в модуль *AutoGrid5*

2. Следующим шагом необходимо указать программе поверхности, описывающие геометрию пера лопатки каждого конкретного венца, входящего в исследуемую турбомашину. Для этого в окне *Import CAD* необходимо выполнить команду:

ГМ → *Select* → *Surfaces*.

Ее выполнение приведет к тому, что щелчком мыши будут выбираться поверхности, а не линии (как было установлено ранее).

Затем в дереве проекта необходимо выбрать имя первого лопаточного венца (по умолчанию он называется *Row 1*). После этого в окне *Import CAD* следует с помощью ЛКМ выбрать четыре поверхности пера лопатки: спинку, корытце, входную и выходную кромки первого венца (CA). После этого производится щелчок ПКМ , и в появившемся меню выбрать пункт *Link to Blade*. Это действие укажет программе, что выбранные четыре поверхности образуют поверхность лопатки *Row 1*. Если все выполнено верно, то изображение лопатки появится в графическом окне программы *AutoGrid 5* подобно тому, как ранее появились меридиональные обводы (рис.2.9).

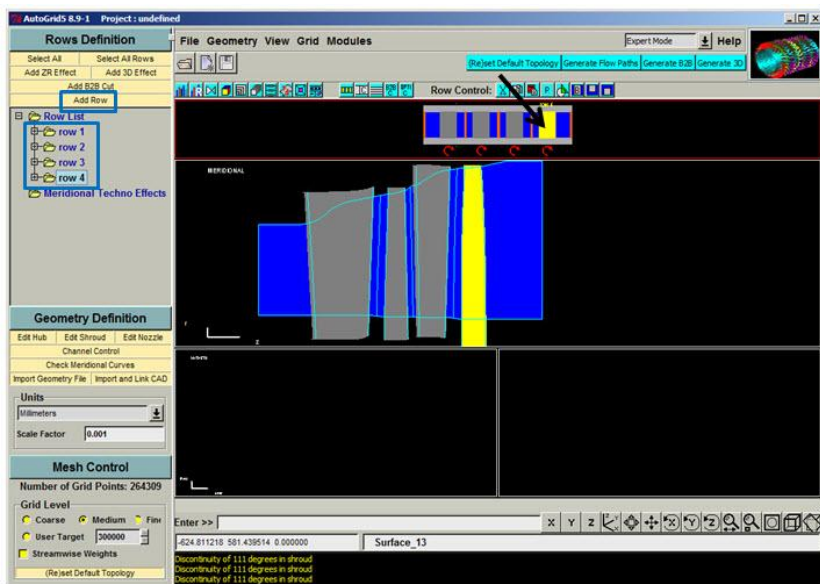




Рис. 2.9 Загруженная геометрия турбины НД

3. Теперь нужно предварительно указать положение входной и выходной кромки выбранной лопатки. Перед этим в окне *Import CAD* следует выполнить команду:

GM → *Select* → *Curves*.

Она вновь переведет окно *Import CAD* в режим выбора линий. Затем следует щелкнуть ПКМ  на любом ребре входной кромки только что введенной лопатки, и в появившемся меню выбрать пункт *Link to Leading Edge*. Так пользователь укажет, что это ребро принадлежит входной кромке. Затем следует повторить те же действия применительно к выходной кромке, но в меню выбрать пункт меню *Link to Trailing Edge*. Созданные кромки будут выделены в графическом окне *AutoGrid* голубыми линиями (рис. 2.9).

Действия 2 и 3 должны быть выполнены для всех остальных лопаток исследуемой турбомашинны. По умолчанию в *AutoGrid5* создан только один венец. Прежде чем указывать поверхности второго и последующего венцов необходимо их добавить с помощью команды *Add Row* в дереве проекта (рис. 2.9). Название каждого венца можно изменить по усмотрению после двойного щелчка ЛКМ  на соответствующую папку. Если загружаемый венец был создан заранее, его нужно активировать, нажав на изображение венца в верхней части графического окна (стрелка на рис. 2.9). В остальном привязка геометрии следующих лопаток не отличается от описания первой.

После выполнения указанных манипуляций в рабочем окне *AutoGrid5* появится проточная часть ТНД с условным изображением лопаток (рис. 2.9). После этого окно *Import CAD* можно закрыть.

Шаг 7. Добавление надбандажных полостей рабочих колес и притрактовых полостей. Рассматриваемая в примере ТНД имеет бандажные полости, для размещения которых в статоре имеются специальные надбандажные полости, которые влияют на рабочий процесс ступеней (рис. 1.1).

Для корректного моделирования рабочего процесса турбины их необходимо смоделировать. Программа *AutoGrid5* имеет

специальные средства для этого. Для добавления притрактовой или надбандажной полости необходимо воспользоваться командой *Add ZR Effect*, кнопка которой находится над деревом проекта. После активации команды в дереве появится соответствующий пункт (рис.2.10).

Выделив этот пункт щелчком мыши, следует нажать кнопку *Import and Link CAD*, находящуюся ниже. Далее, как и в случае с меридиональными обводами, последовательно указываются все линии, относящиеся к надбандажной (притрактовой) полости. Потом щелчком ПКМ вызывается меню, в котором запускается команда *Import Meridional* (рис.2.11).

Те же действия следует сделать и для всех надбандажных и притрактовых полостей имеющихся в исследуемой турбомашине. После этого окно *Import CAD* можно закрыть. В результате в модуле *AutoGrid5* появятся формы надбандажных полостей над обоими рабочими колесами (рис.2.12).

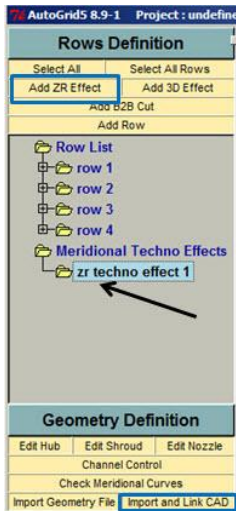


Рис.2.10. Добавление надбандажной полости в расчётную модель

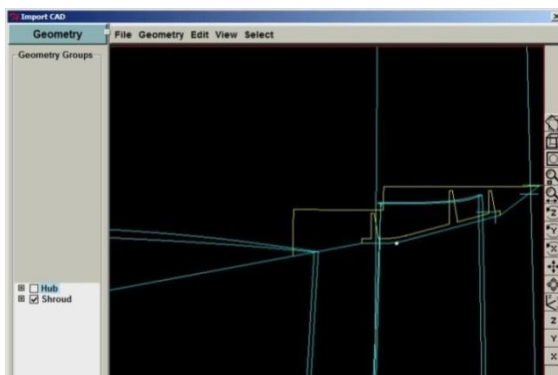





Рис.2.11. Определение границ надбандажной полости

Шаг 8. Задание основных параметров турбомашины. На следующем этапе производится указание основных параметров турбомашины. Вначале задаются параметры первого венца (для турбины – это сопловая решетка). Для этого необходимо щелкнуть ЛКМ  на знаке «+» левее названия венца в дереве проекта (по умолчанию это *row 1*). Данный пункт меню развернется, и в нем двойным щелчком ЛКМ  следует вызвать меню *Properties* (рис. 2.13), где указывается параметры сопловой решетки.

Доступ к той же команде можно получить, если щелкнуть ПКМ  на имени венца и в появившемся списке выбрать пункт *Properties* (рис. 2.13).

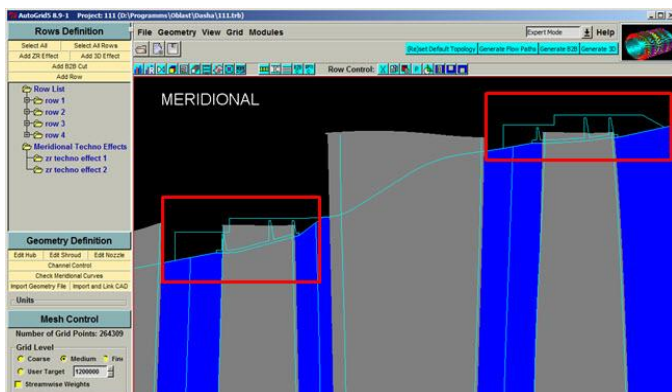


Рис.2.12. Расчетная модель ТНД с загруженными надбандажными полостями

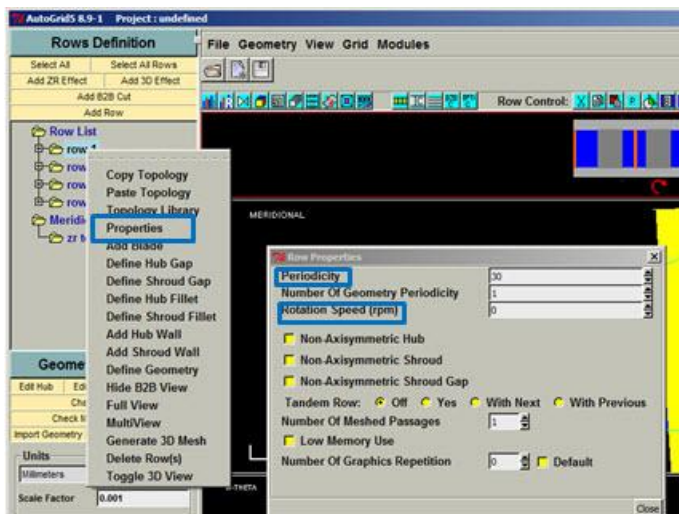



Рис. 2.13. Меню *Properties* и задание параметров сопловой лопатки

В меню *Row Properties* (рис. 2.13), в графе *Periodicity* вводится число лопаток венца (30). В строке *Rotation speed* - скорость вращения (0 – венец неподвижен),

Аналогичные действия выполняются и с другими лопаточными венцами. Информация о числе лопаток в них и частоте вращения ротора приведена в табл. 1.1.

При определении частоты вращения ротора важно правильно указать направление вращения. Оно указывается знаком перед величиной частоты. Знак «+» означает, что лопаточный венец движется по часовой стрелке относительно оси двигателя, знак «-» против часовой стрелки. Задаваемая скорость будет передана в программу *FINE™*, где в дальнейшем будет проходить расчет.

После задания параметров всех лопаточных венцов структурный вид расчетной области изменится: значки, указывающие на вращение венца , останутся, только под рабочими колесами (рис.2.14).

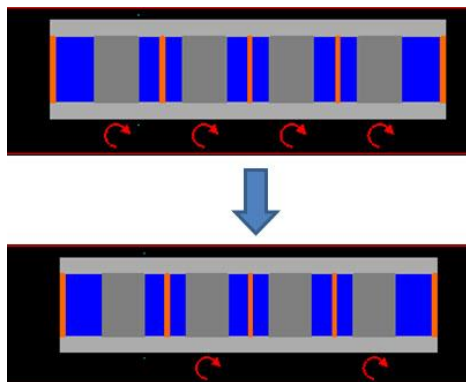


Рис.2.14. Изменение структурного вида расчетной области

Параметры настройки лопаточного венца будут переданы в дальнейшем в решающий модуль и учитываться при назначении граничных условий и влиять на построение сетки не будут.

На этом процесс описания геометрии турбомшины окончен, и опираясь на него, программа сама сгенерирует геометрию расчетной области для исследования течения в ней.

Внимание!!! При задании любых параметров во всех модулях программного комплекса *NUMECA FINE™/Turbo* ввод обязательно подтверждается нажатием клавиши *Enter*.

2.1.2. Построение сетки конечных элементов

Созданная геометрия расчетной области является основой для построения сетки конечных элементов. Наиболее простым способом ее построить в программном комплексе *NUMECA* является функция автоматического построения сети *Row Wizard*. Данная команда автоматически выбирает схему разбиения расчетной области и разбивает расчетную область по определенному шаблону (рис. 2.15). Постройка сетки осуществляется в последовательности, приведенной ниже. Однако, прежде чем начать генерацию сетки конечных элементов необходимо сделать подготовительные настройки.

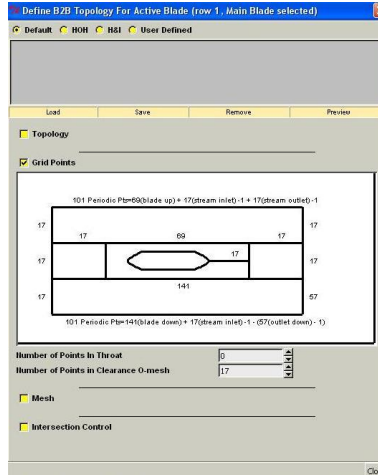


Рис. 2.15. Шаблон сетки в межлопаточном канале

Шаг 9. Коррекция входных и выходных кромок. Поскольку при определении геометрии лопаточных венцов в окне *Import CAD* положение входных и выходных кромок задавалось предварительно, теперь пришло время указать их точное положение.

Для этого выделяются все лопаточные венцы с помощью команды *Select All* в дереве проекта, и запускается команда *Generate B2B* с помощью кнопки, находящейся в верхнем правом углу окна программы (рис. 2.16). Эта команда сгенерирует, сетку в межлопаточных каналах всех венцов. После завершения ее работы в информационном окне появится соответствующее сообщение. На рис. 2.16 представлен результат действия описанной команды.

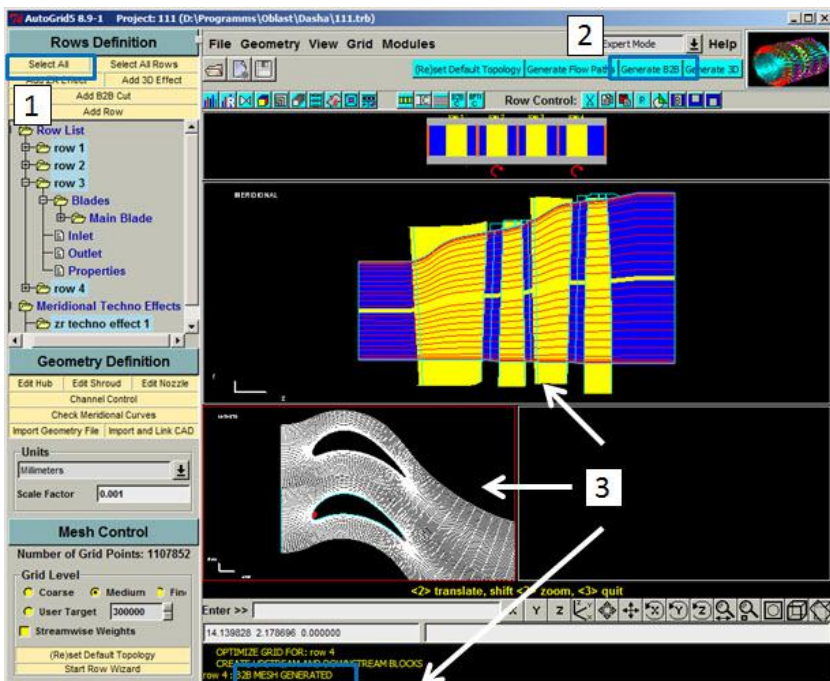




Рис. 2.16. Построение сетки в межлопаточном канале

Далее на получившейся сетке корректируется положение кромок. Для этого курсор подводится к входной (выходной) кромке (рис.2.17). Ее положение обозначено красной точкой. Она лежит на дуге, описывающей входную кромку. Положение этой дуги программа определяет автоматически. Нажимая на красный круг ЛКМ , можно изменять положение дуги. Точку следует переместить таким образом, чтобы она оказалась по центру кромки (рис.2.17).

После коррекции положения кромки в случае необходимости можно изменить ее размер. Для этого щелчком ПКМ  на кромке вызывается меню, в котором вызывается команда *Properties*. В рассматриваемом примере было несколько увеличено значение параметра *Relative Control Distance*.

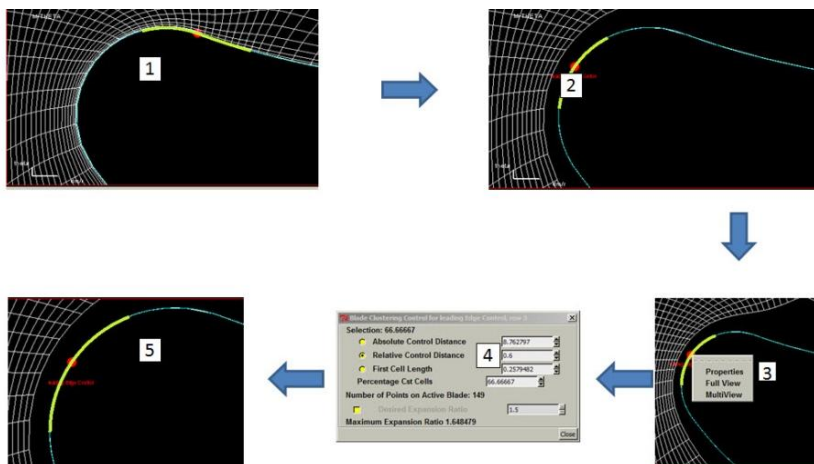

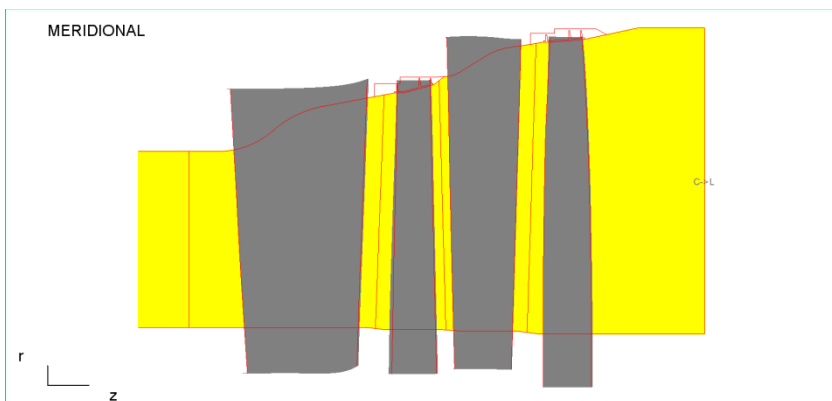


Рис.2.17. Коррекция входной кромки

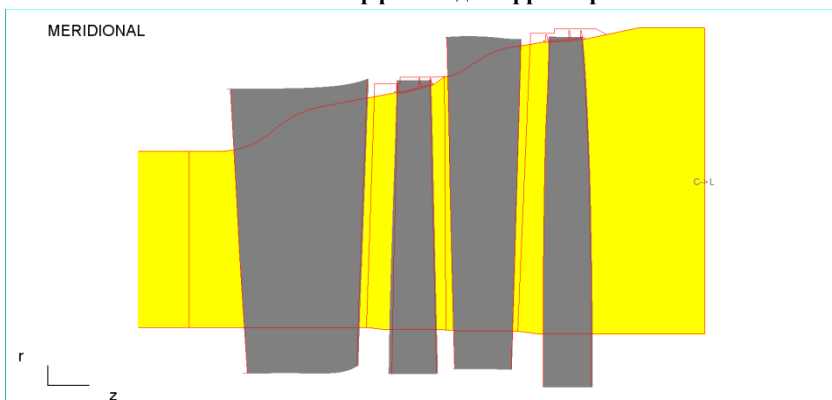
Описанные действия необходимо проделать для входных и выходных кромок всех лопаточных венцов.

После коррекции входных кромок необходимо вновь выделить все ЛВ и заново сгенерировать сетку в межлопаточных каналах (*Generate B2B*).

Шаг 10. Коррекция положения интерфейсов. На следующем этапе необходимо скорректировать положение интерфейсов между подвижными и неподвижными венцами. Их необходимо переместить так, чтобы концы отрезков совпадали с границами надбандажных и притрактовых полостей (рис.2.18). Чтобы это осуществить следует «подцепить» верхнюю точку интерфейса и переместить ее с помощью ЛКМ  в нужное место. При этом их желательно передвинуть дальше от рабочих лопаток в осевом направлении.




Положение интерфейсов до корректировки



Положение интерфейсов после корректировки

Рис.2.18. Коррекция положения интерфейсов

Входную границу расчетной области, сгенерированную по умолчанию целесообразно передвинуть дальше от лопатки в осевом направлении. Для этого производится щелчок ПКМ  на входной границе, затем в появившемся меню выбирается команда *Properties* (рис.2.19). В результате появится диалоговое окно *Row Interface Properties*, в котором следует активировать пункт *Z constant*, и задать рядом с ним величину осевого смещения границы (в примере -280) и нажать *Enter*. После этого окно *Row Interface Properties* можно закрыть.

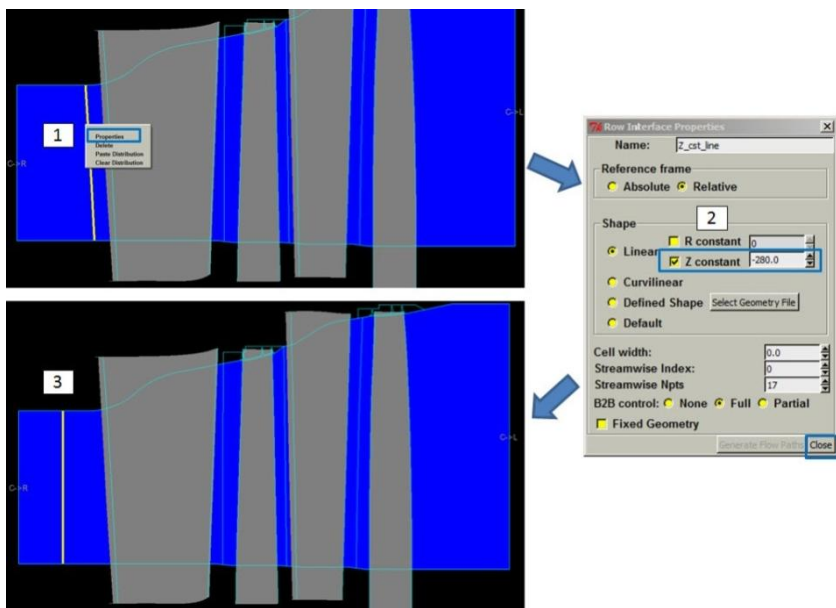


Рис.2.19. Коррекция положения входной границы

Шаг 11. Генерация основной сетки конечных элементов.

Разбиение созданной расчетной области ПЧ сеткой конечных элементов логично проводить последовательно для каждого венца в порядке следования рабочего тела через многоступенчатую турбомашину. То есть первым будет разбиваться СА первой ступени, затем РК первой ступени, СА второй ступени и т.д. Общая последовательность действий, которую пользователь должен для одной ступени выполнить представлена на рис.2.20. Она состоит в следующем.

1. Для того чтобы задать параметры сетки необходимо в дереве или верхней части графического окна выбрать соответствующей венец (по умолчанию *row 1*) и щелкнуть ЛКМ на вкладке *Start Row Wizard* (мастер разбиения лопаточного венца) в нижней части дерева (1 и 2 на рис. 2.20).

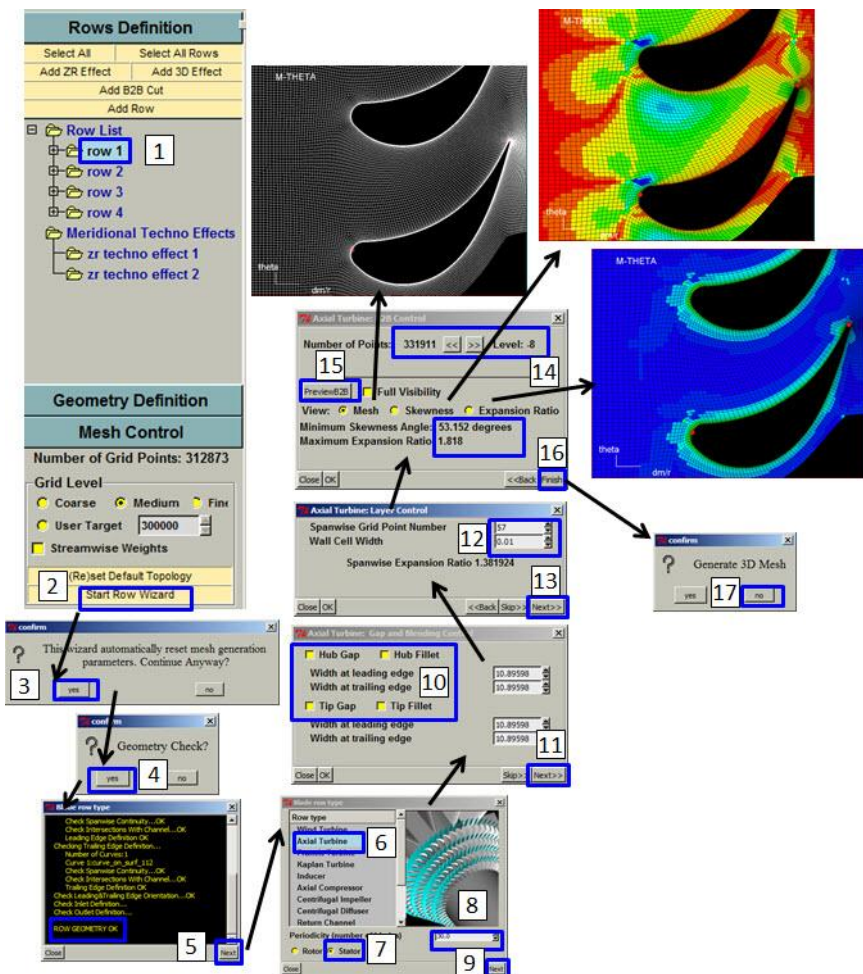


Рис. 2.20. Алгоритм построения конечно-элементной сети соплового аппарата с помощью Row Wizard

2. Появится диалоговое окно, которое предупреждает о том, что Wizard автоматически меняет настройки сети (3 на рис. 2.20). Пользователю следует согласиться с этим, нажав кнопку *yes*.

3. После этого появится следующее диалоговое окно проверки импортируемой геометрии соплового аппарата. В нем также следует нажать кнопку *yes*. Это действие вызовет появление окна

Blade row type, в котором визуализируется процесс проверки качества геометрии ЛВ. Если в ходе проверки ошибок не будет найдено, внизу окна *Blade row type*, загорится сообщение *ROW GEOMETRY OK* (4 и 5 на рис. 2.20).

4. Для перехода в следующее меню, в окне *Blade row type* следует нажать *Next* (5 на рис. 2.20).

5. Появится окно, в котором следует указать тип лопаточной машины – *Axial Turbine* (осевая турбина), тип лопатки *Stator* (неподвижный венец) и количество лопаток в данном венце (30). Сделанные настройки подтверждаются нажатием кнопки *Next* (6...9 на рис. 2.20).

6. После выполнения действия в п. 5 появится окно *Axial Turbine: Gap and Blending Control*. В нем можно указать, что описываемая лопаточная машина имеет радиальные зазоры (как на периферии, так и на втулке) и скругления (галтели) в месте сопряжения пера и концевых поверхностей, а также задать их величины. В сопловых решетках радиальные зазоры отсутствуют. Влияние галтелей в рассматриваемом примере не учитывается. По этой причине при настройке параметров сетки СА в рассматриваемом примере в меню *Axial Turbine: Gap and Blending Control* необходимо деактивировать все отметки со всех пунктов и нажать кнопку *Next* (10 и 11 на рис. 2.20).

7. Следующим появится окно *Axial Turbine: Layer Control*. В нем задается требуемое количество сеточных линий по высоте лопатки, а также размер пристенной ячейки. Число элементов по высоте ПЧ вводится в поле *Spanwise Grid Point Number* (в примере - 57). В строке *Wall Cell Width* вводится размер пристеночной ячейки (в примере - 0,01). Настройки подтверждаются нажатием кнопки *Next* (12 и 13 на рис. 2.20).

При выборе размера первой пристенной ячейки рекомендуется пользоваться полинеаризованным уравнением Блазиуса. Оно было получено для случая обтекания плоской пластины и для решения

задач турбомашиностроения является приближенным (оценочным). Из этого уравнения определяется размер пристенной ячейки, необходимый для обеспечения величины безразмерного расстояния $Y^+ = 1$:

$$y_{wall} = 6 \left(\frac{V_r}{\nu} \right)^{\frac{7}{8}} \left(\frac{L_r}{2} \right)^{\frac{1}{8}} Y^+,$$

где V_r - скорость на входе в лопатку;

L_r - хорда лопатки;

ν - кинематическая вязкость рабочего тела;

y^+ - безразмерное расстояние до стенки. Наиболее предпочтительное значение $y^+ = 1$.

8. В результате выполнения предыдущего действия появится меню *Axial Turbine: B2B Control*. С его помощью осуществляется контроль сетки межлопаточного канала и выбор уровня сетки (густота и количество элементов). Перемещая кнопки «<<» и «>>» следует приблизительно выбрать желаемое число конечных элементов. Точное задание числа элементов в программе *NUMECA* невозможно, поскольку при расчете используются вложенные сетки и число элементов должно быть кратно уровню вложенности. Наиболее предпочтительный размер сетки одного межлопаточного венца *Number of Points* - от 500 000 до 700 000 ячеек.

Используя кнопку *Preview B2B* (15 на рис. 2.20) можно предварительно просмотреть полученный вариант сетки и оценить ее качество. Нажатие данной кнопки приведет к тому, что в графическом окне будет отображена сетка в среднем сечении венца.

9. Активируя опцию \otimes *Skewness* в строке *View*, следует оценить качество сетки по критерию скошенности. Для этого после выбора опции следует нажать кнопку *Preview B2B*. В графическом окне появится изображение сетки, конечные элементы которой будут окрашены в разные цвета в соответствии с величиной

скошенности ячеек. При этом в нижней части окна меню *Axial Turbine: B2B Control* будут отображаться максимальные и минимальные значения параметра скошенности.

Параметр скошенности представляет собой угол между диагоналями конечного элемента. Наилучшим в вычислительном плане является ортогональная ячейка, угол между диагоналями которой составляет 90° . При деформации ячейки данный угол уменьшается. Для получения качественного решения не желательно иметь величину угла менее, чем 20° .

10. Аналогично, активировав опцию *Expansion Ratio* в строке *View*, следует оценить качество сетки по степени расширения КЭ. Наилучшим значением величины *Expansion Ratio* является 1. Допускается повышение той величины до 3,5...5.

11. В случае если параметры качества сетки не удовлетворяют указанным условиям, то ее параметры необходимо скорректировать с помощью меню *Define active topology for active blade* (рис. 2.15). Доступ к данному меню осуществляется нажатием кнопки *B2B Mesh Control Box*, находящейся под главным меню (рис. 2.21).



Рис. 2.21 Положение кнопки *B2B Mesh Control Box*

В появившееся меню (рис. 2.15) следует выбрать опцию *Gird Points* и открыть доступ к меню, позволяющему вручную указать число элементов на границах блоков. Варьируя ими можно добиться приемлемого качества сетки. В частности числом элементов вдоль O - подсьюа можно улучшить скошенность ячеек (стрелка на рис. 2.15).

12. После проверки качества сетки нажатием кнопки *Finish* подается команда на формирование сети. В результате появится диалоговое окно предлагающее сформировать пространственную

сетку в рассматриваемом венце (17 на рис. 2.20). Следует отказаться от этого, нажав кнопку *No*, поскольку сетку удобнее сгенерировать целиком во всей турбомашине, после настройки ее параметров во всех элементах.

После этого сетка в среднем сечении венца отобразится в графическом окне (рис. 2.22).

Аналогично сетка конечных элементов строится для межлопаточного канала рабочей лопатки и всех последующих ЛВ. Блок схема процесса построения сетки для РК приведена на рис. 2.23. Внешний вид сетки конечных элементов турбомашине, сгенерированной в первом приближении показан на рис. 2.24.

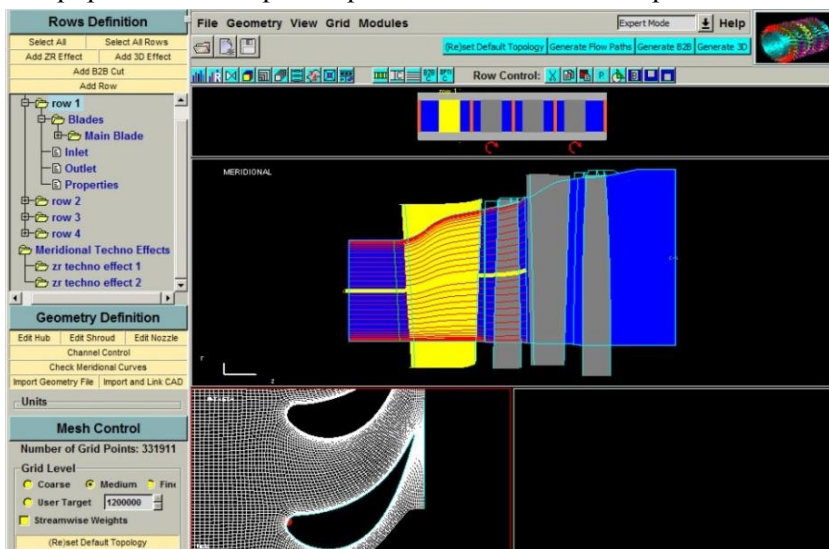



Рис. 2.22. Внешний вид окна программы *AutoGrid* после генерации сетки в первом венце

При задании сетки на последующих лопатках не стоит забывать выбирать нужный венец в дереве проекта и описывать радиальные зазоры при их наличии. При моделировании утечек через бандажные полки величины радиальных зазоров задаются не в

меню *Axial Turbine: Gap and Blending Control*, а способом, который будет описан ниже.

Для доменов сопловых аппаратов, заданные параметры сетки являются окончательными. Работы с доменами СА на данном этапе закончена.

Шаг 12. Подготовка доменов РК к окончательной генерации сетки конечных элементов. После выполнения команды *Start Row Wizard* для каждого из венцов на меридиональном виде появились дополнительные линии *Z Constant Line*, что хорошо заметно из сравнения рисунков 2.18 и 2.25. Вновь образованные линии не позволяют выполнить корректное согласование доменов лопаточных венцов и надбандажных полостей и их необходимо отредактировать.

Для этого автоматически созданные *Z Constant Line* следует удалить, выделив их ПКМ  и в появившемся меню выбрав пункт *Delete*.

Потом эти линии воссоздаются таким образом, чтобы они совпадали с границами входа и выхода надбандажных полостей (рис. 2.26). Цель данного действия состоит в том, чтобы топология сетки изменилась так, как это показано на рис. 2.27.

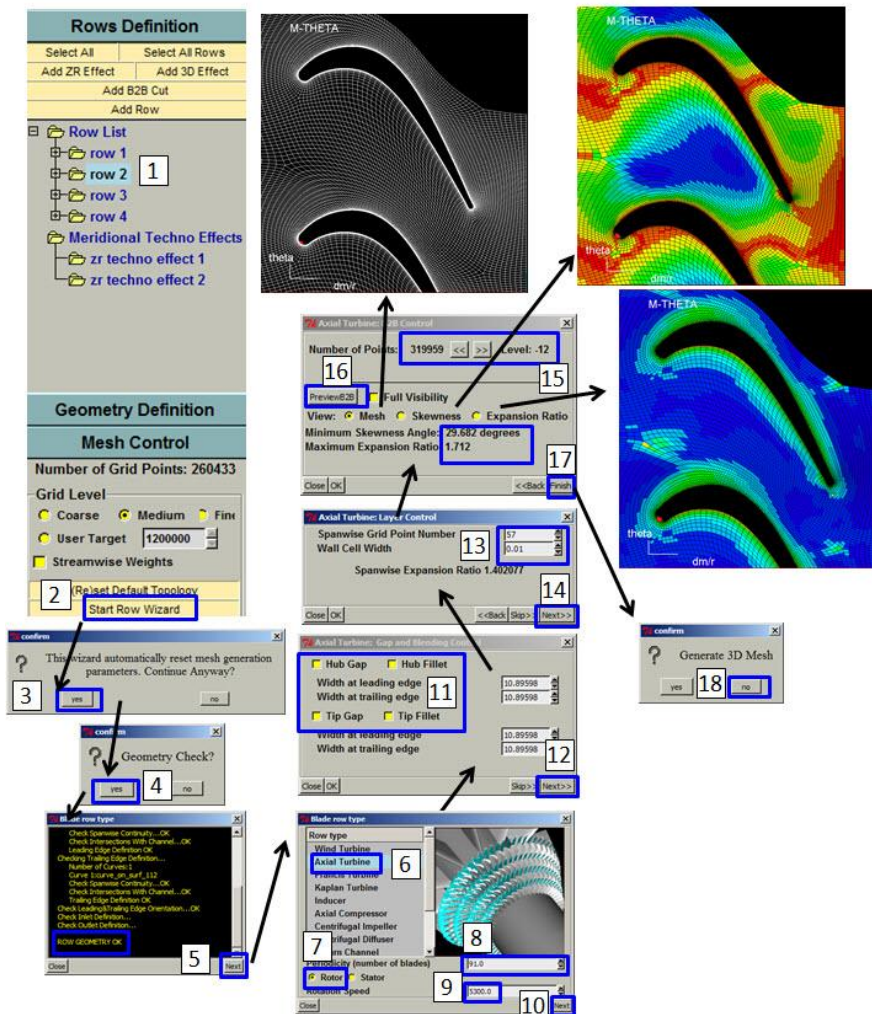


Рис. 2.23. Алгоритм построения конечно-элементной сети рабочего колеса с помощью Row Wizard

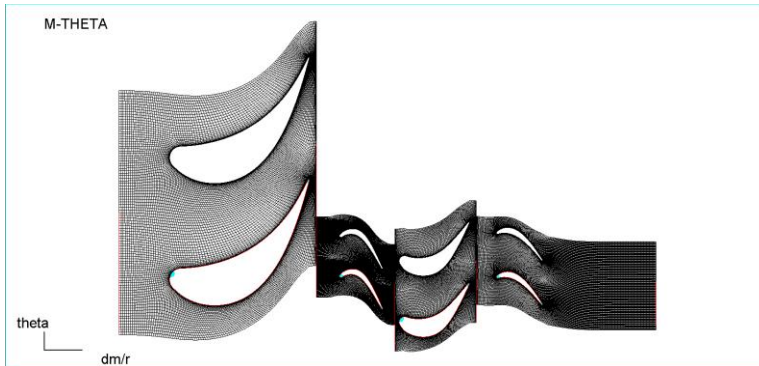


Рис. 2.24. Сетка конечных элементов в турбомашине, построенная в первом приближении с использованием *Start Row Wizard*

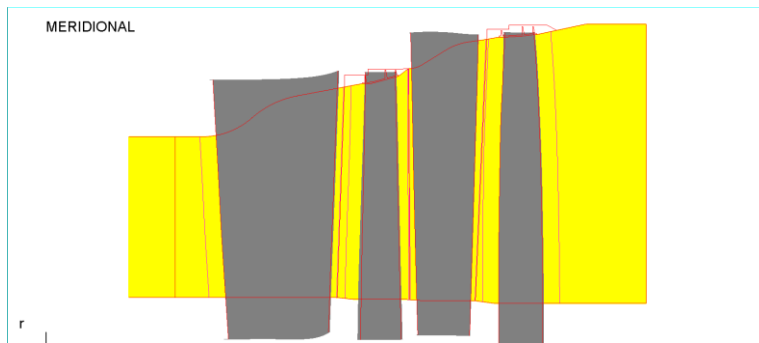


Рис. 2.25. Меридиональный вид проточной части после выполнения команды *Start Row Wizard*

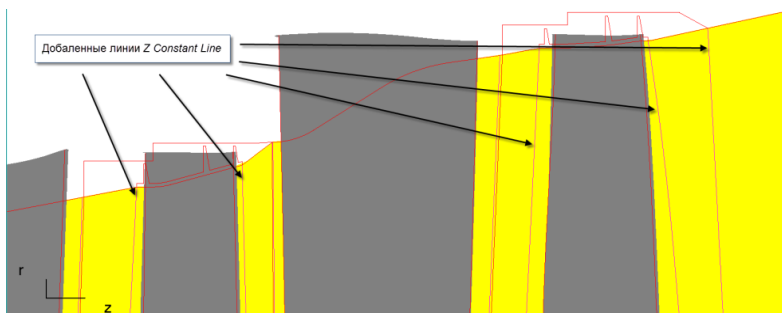
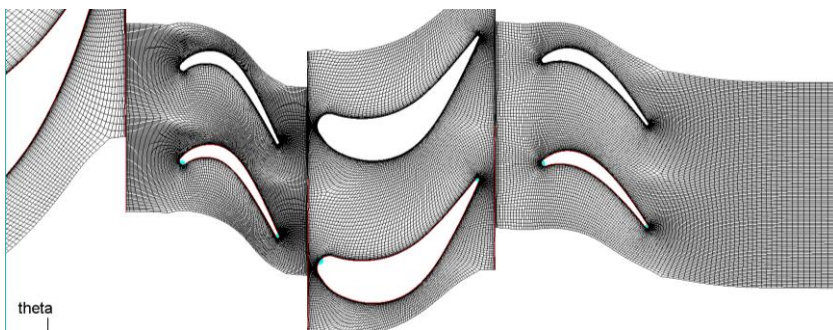
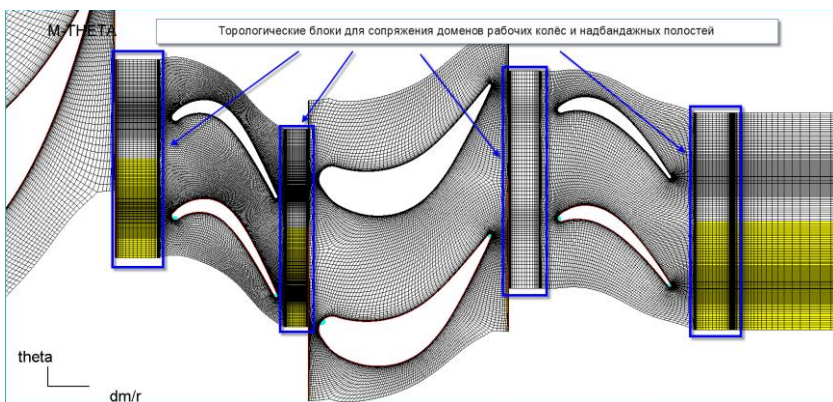


Рис. 2.26. *Z Constant Line*, которые необходимо добавить




Топология и сетка в турбомашине после использования *Start Row Wizard*



Топология и сетка в турбомашине после использования *Start Row Wizard*

Рис. 2.27. Изменение топологии и сетки в межлопаточных каналах рабочих лопаток после добавления линий *Z Constant Line*

Для добавления *Z Constant Line* в меню *Row Mesh Control* выбирается пункт *Add Z Constant Line* (рис.2.28). После этого линии автоматически привязываются к точкам на периферийном обводе, щелчком ЛКМ . Результат этого действия показан на рис. 2.27 и 2.29.

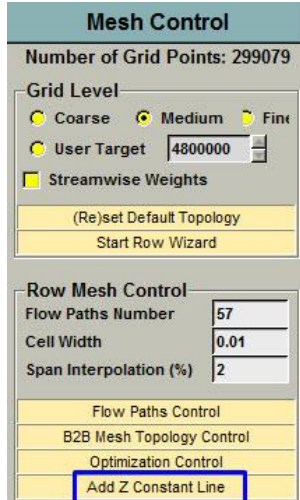


Рис.2.28. Команда *Add Z Constant Line*

Следует обратить внимание на то, что для второго рабочего колеса помимо всех описанных выше действий необходимо также добавить дополнительную линию для ограничения области выхода из надбандажной полости (рис.2.30).

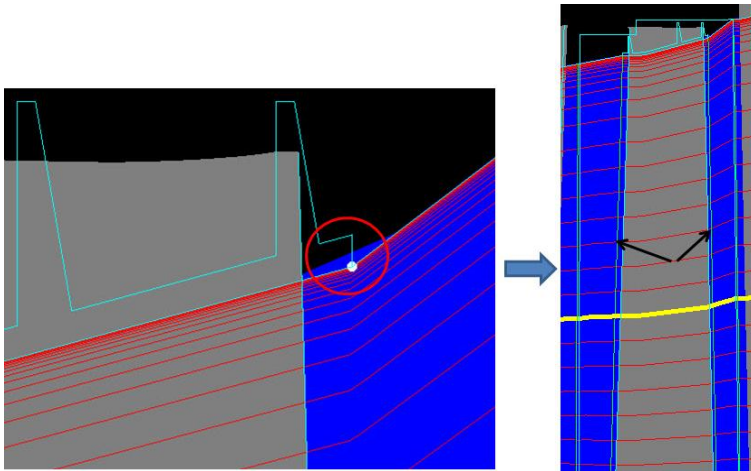



Рис.2.29. Добавление линий *Z Constant Line*

Шаг 13. Задание размеров элементов на границах надбандажных полостей. Для того, чтобы при состыковке сеток конечных элементов доменов проточной части и надбандажных полостей не возникало проблем, на данном этапе на всех границах, определяющих входы и выходы необходимо задать размеры элементов. Это можно сделать, последовательно щелкая на данных границах ПКМ  и выбирая в появляющемся меню пункт *Properties*. В результате будет открываться диалоговые окна. В окнах для линий типа *Z Constant Line* следует сделать настройки, приведенные на рис. 2.31, а для линий типа *Rotor Stator Interface (RS_Interface)* - как на рис.2.32.

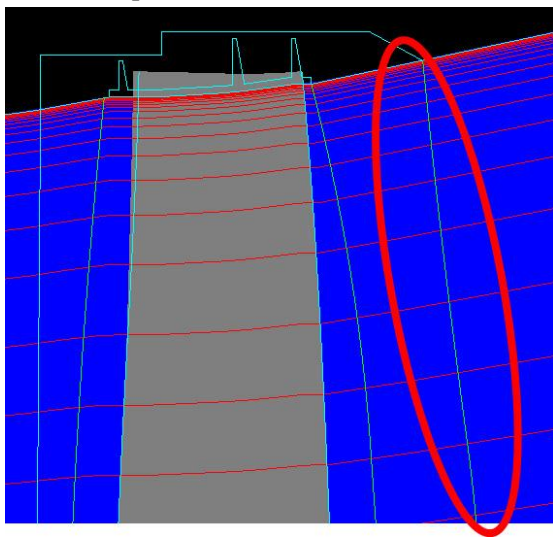


Рис.2.30. Добавление линии *Z Constant Line* на выходе из надбандажной полости

Шаг 14. Генерация пространственной сетки. Когда параметры сетки всех венцов будут описаны, необходимо сгенерировать пространственную сетку. Для этого в дереве проекта следует выбрать все венцы, нажав кнопку *Select All*. Затем нажать кнопку *Generate 3D* в верхнем правом меню окна программы.

Процесс создания сетки запускается нажатием кнопки *Start* в появившемся меню *Generation Control* (рис. 2.33). Процесс генерации может занять некоторое время, которое определяется заданными параметрами сетки и производительностью компьютера.

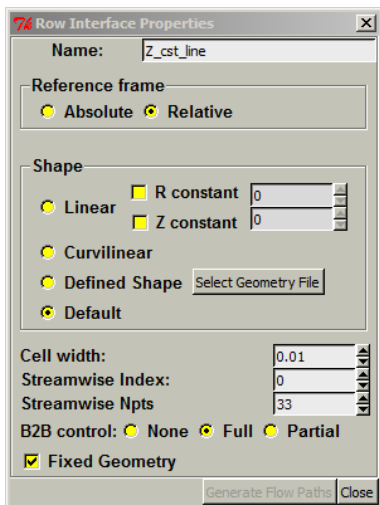


Рис.2.31. Параметры границы *Z Constant Line*

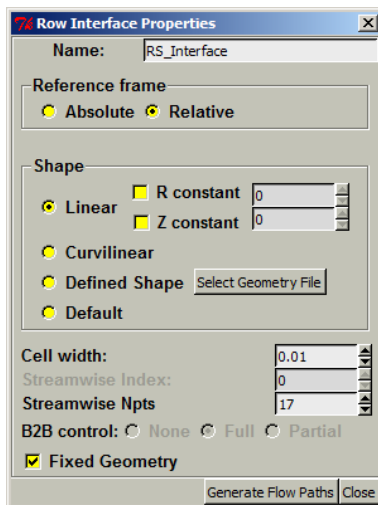


Рис.2.32. Параметры границы *Rotor Stator Interface*

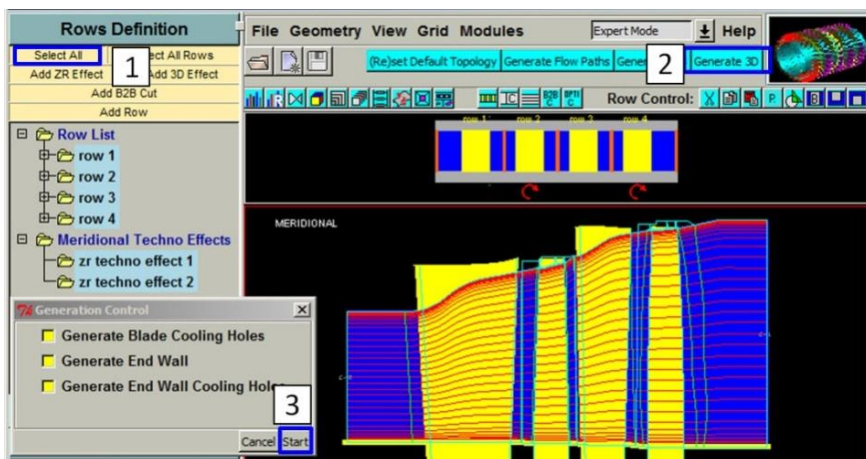


Рис. 2.33. Генерация пространственной сетки

2.1.3. Проверка качества сетки конечных элементов

После окончания процесса генерации сети появляется окно *Grid Quality Check*, изображенное на рис. 2.34, с краткой информацией о созданной сети. Данная информация включает в себя количество узлов в модели, количество негативных ячеек, количество вложенных уровней сети в модель и значения критериев качества сети (*min skewness* – минимальная скошенность, *max aspect ratio* – отношение максимального размера ячейки к минимальному размеру, *max expansion ratio* – степень расширения ячейки, и др.).

Важно, чтобы минимальная скошенности ячеек составлял не менее 15 градусов, максимальная вытянутость ячеек была не более 3000, а максимальный коэффициент изменения размера между соседними ячейками - не более 1.5. Если данные параметры существенно выходят из рекомендованных диапазонов, то необходимо выполнить коррекцию топологий и сеток в межплоточных каналах за счёт изменения формы и положения линий *Z Constant Line* или количества элементов в топологических блоках.

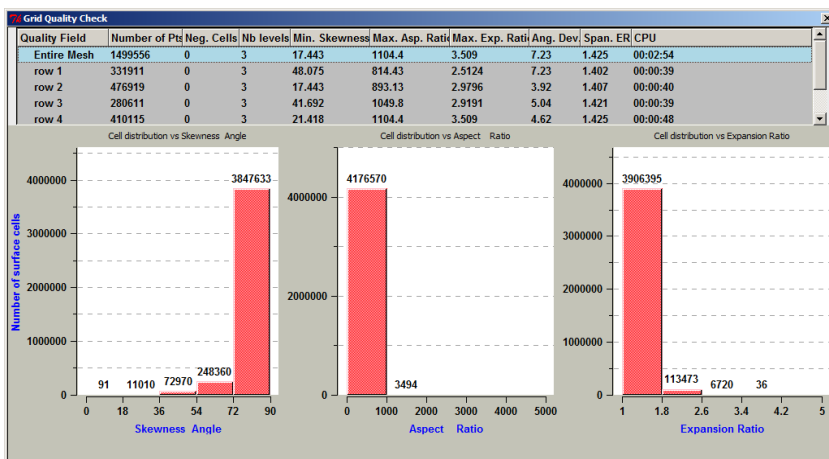


Рис. 2.34. Окно *Grid Quality Check*

Особое внимание в панели с основной информацией о необходимо уделить графе *Neg. Cells* (количество ячеек с отрицательным объемом). В данной графе не должно быть чисел отличных от нуля. В противном случае сетка будет непригодна для дальнейшего расчёта. В графе *Number of Pts.* (количество элементов) представлена информация о количестве элементов в каждом лопаточном венце и во всей сетке.

Шаг 15. Просмотр полученной сетки и ее параметров.
Просмотреть получившуюся пространственную сетку модели можно, используя команду:

ГМ → *View* → *View 3D Solid Mesh.*

После ее выполнения внешний вид окна программы поменяется и станет таким как изображено на рис. 2.35.

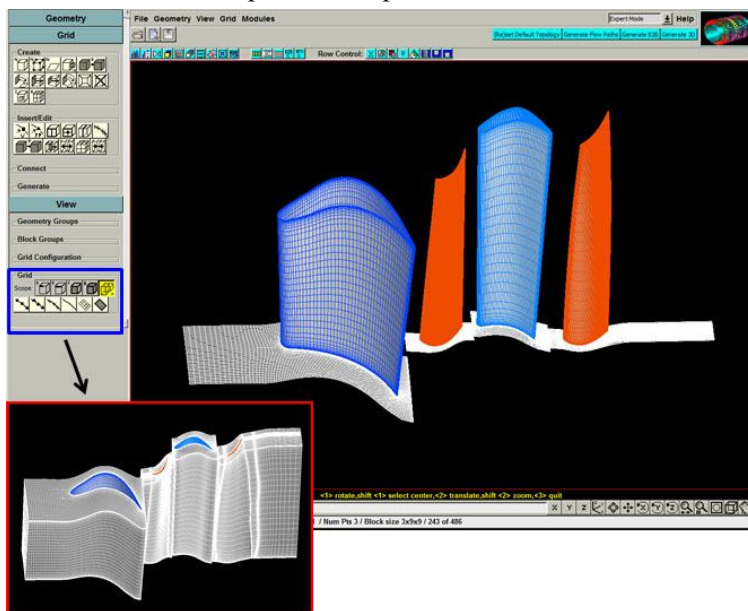



Рис. 2.35. Отображение трехмерной расчетной области

Используя кнопки во вкладке *View* → *Grid* в дереве проекта можно изменить вид отображения расчетной области.

Построенную сетку необходимо проверить на наличие негативных объемов. Для этого выделяются все элементы, и нажимается кнопка  *Negative cells* в панели под главным меню. В результате появится меню, изображенное на рис. 2.36, в котором следует нажать кнопку *Apply*. После этого появится сообщение о числе негативных объемов. Их не должно быть (т.е. в результате описанных выше действий должно появиться сообщение *No negative cells*) (рис. 2.36).

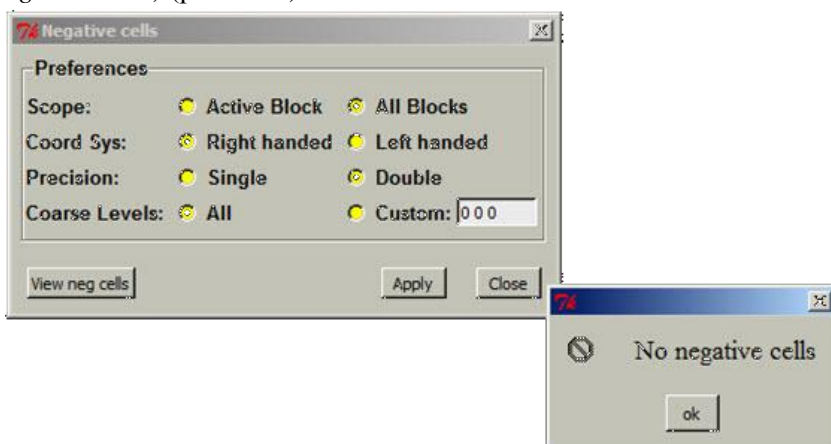



Рис. 2.36. Проверка созданной сети на наличие негативных объемов

Качество построенной сетки можно также проверить с помощью команды *Grid quality*, доступ к которой можно получить, нажав на иконку  в панели под главным меню или с помощью команды:

ГМ → *Grid* → *Grid Quality*.

Внешний вид меню *Grid Quality* показан на рис. 2.37. В нем необходимо проделать следующие манипуляции:

1. Во вкладке *Block* можно выбрать, как отдельные блоки соплового аппарата и рабочего колеса, так и всю расчетную модель, в последнем случае во вкладке *Block* нужно ввести «0».

2. Выбрать критерий качества (*Quality Criterion*). Например, *Aspect Ratio*.

3. В строке *Visualization control* выбрать средства отображения: будет ли качество отображаться в виде ячеек закрашенных в соответствующий цвет, либо в виде маркеров, либо параметр будет строиться в виде распределения по поверхности или объему.

4. Нажать кнопку *All cells*.

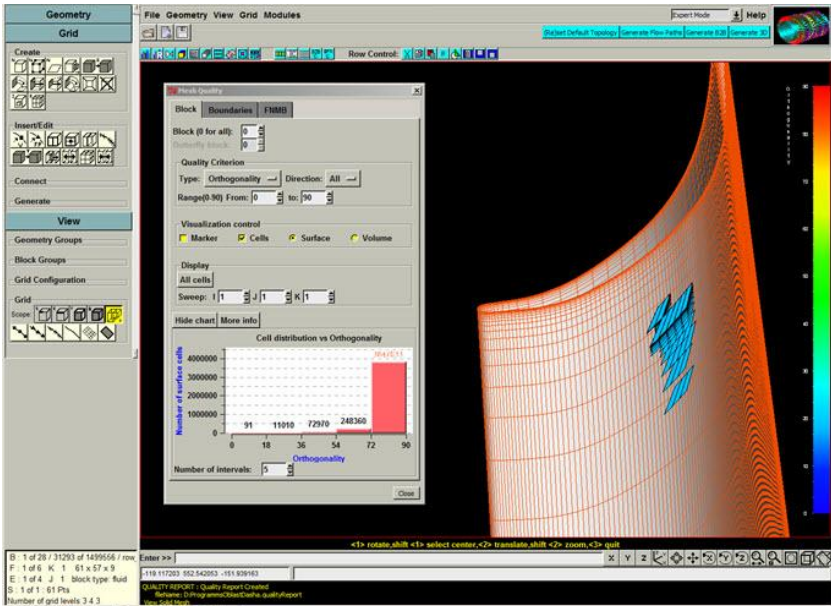



Рис. 2.37. Проверка качества сети


В результате выбранный критерий качества будет отображен в выбранном блоке. Если нажать на кнопку *Show chart*, то выбранный параметр будет отображаться в виде диаграммы.

Если щелкнуть на любом участке диаграммы ЛКМ , конечные элементы, имеющие значение параметра качества как на выделенном участке будут подсвечены в графическом окне.

Вкладка *More info* предоставляет доступ к дополнительным опциям отображения дополнительной информации о минимальных и максимальных значениях параметров качества.


2.1.4. Создание сетки конечных элементов в надбандажных полостях


После того, как сетка конечных элементов во всех лопаточных венцах настроена, сгенерирована и проверена на наличие ошибок, можно переходить к разбиению на конечные элементы надбандажных полостей.



Для этого первая полость в дереве проекта (*zr techno effect 1*) выбирается нажатием ПКМ . В появившемся меню выбирается пункт *Edit* для доступа к меню редактирования (рис.2.38).

Для описания сетки конечных элементов следует разделить меридиональное сечение надбандажной полости на четырехугольные топологические блоки.

Шаг 16. Разбиение надбандажной полости на топологические блоки. Для построения топологических блоков в притрактовой или надбандажной полости следует выполнить следующие действия:

1. В меню *Topology Control* выбирается команда  (*Insert New Block*) для добавления нового блока сетки.

2. Для того чтобы создать топологический блок нужно щелкнуть ЛКМ  на предполагаемое место сопряжения первого узла блока с границей области (рис.2.39), затем указать положение

второго узла и снова щелкнуть ЛКМ . Окончательное положение блока нужно подтвердить третьим щелчком ЛКМ .

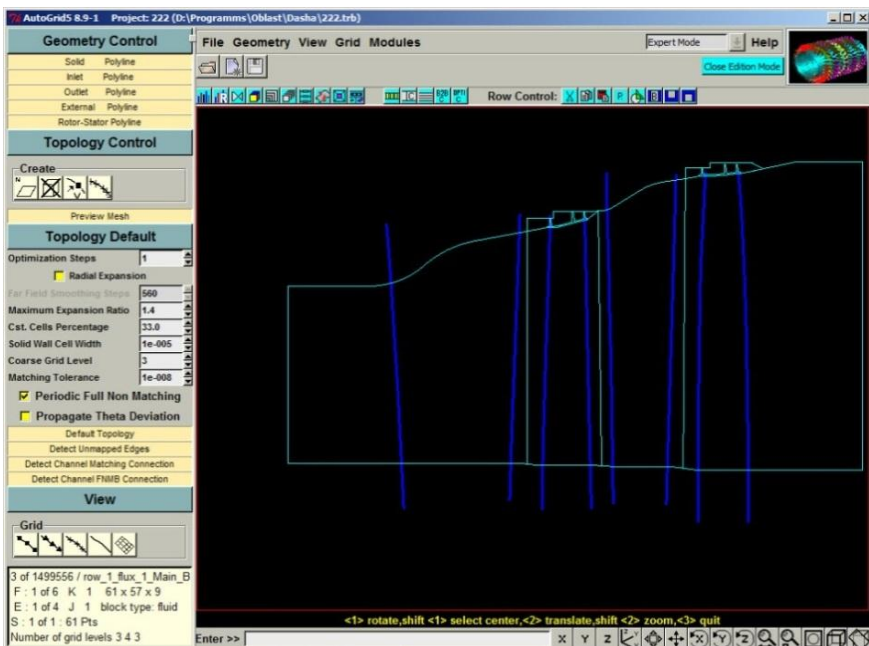



Рис. 2.38. Меню редактирования надбандажных полостей

- Узлы, образующие созданный топологический блок, можно перемещать, щелкнув по ним ЛКМ  (рис.2.40), повторный щелчок закрепит новое положение узла.

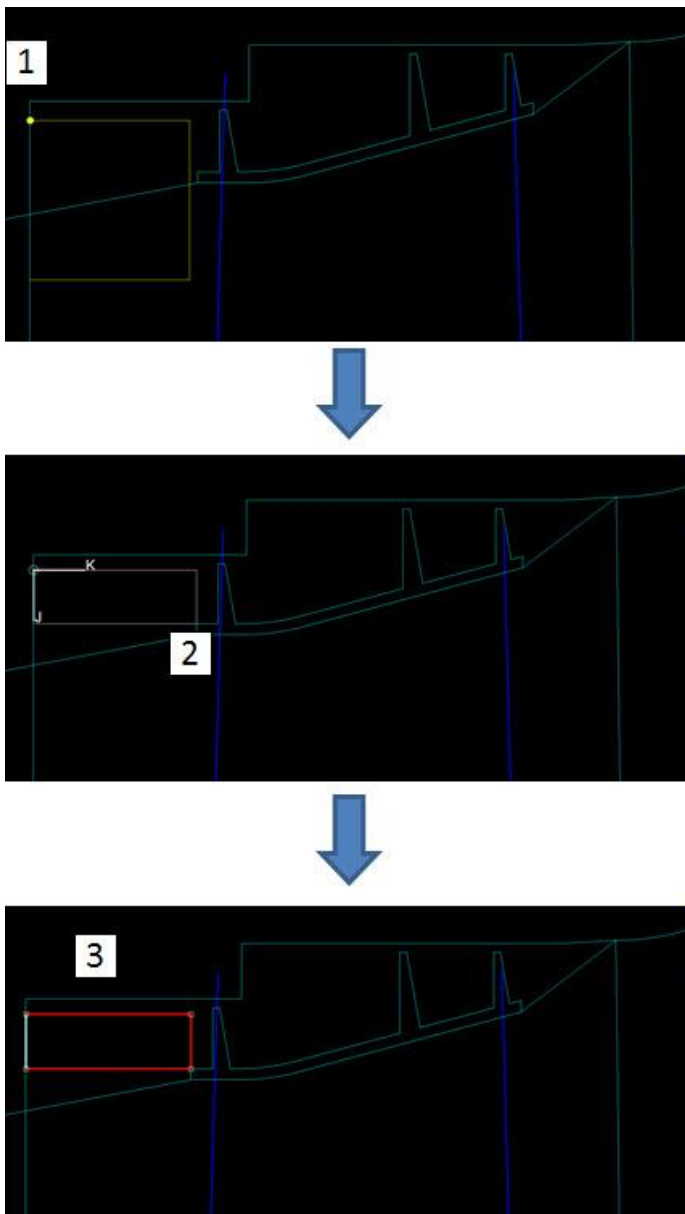


Рис.2.39. Создание топологического блока

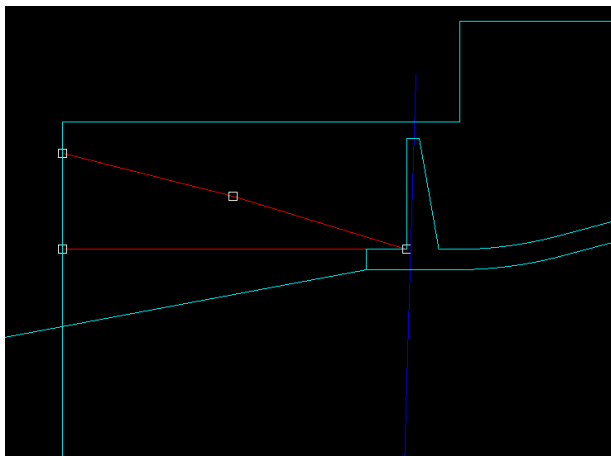






Рис. 2.40. Перемещение узлов

- Кроме того, при необходимости сопряжение топологического блока, например со сплайном, можно добавить дополнительные узлы (рис.2.41). Для этого нужно выбрать команду *Insert Vertex* () в меню *Topology Control* и щелчком ЛКМ  определить положение нового узла сначала на грани блока, а затем и на сопрягаемой грани.
- При необходимости блоки удаляются нажатием кнопки .
- При построении блоков нужно добиться, чтобы все блоки были сопряжены между собой и с границами меридионального сечения. Проверить сопряжения блоков и границ можно с помощью команды *Detect Unmapped Edges*. После ее запуска несопряженные грани будут выделены зеленым цветом, кроме того, в информационной строке появится сообщение о количестве несоответствий (рис.2.42). Выход из режима проверки сопряжения осуществляется щелчком ПКМ .

При наложении топологических блоков на меридиональный обвод притрактовой полости следует придерживаться следующих правил:

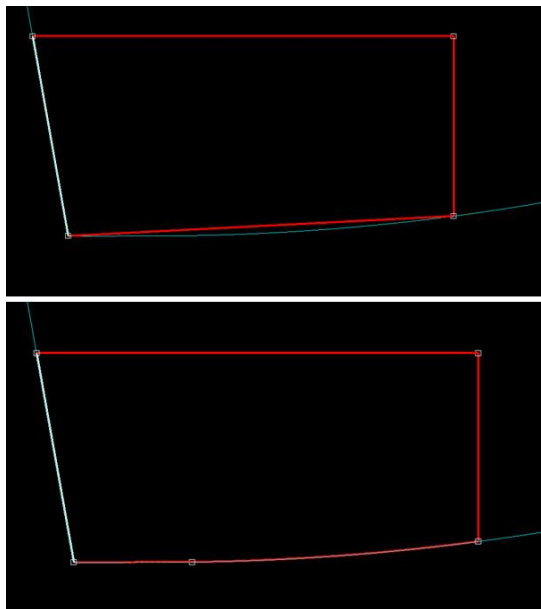


Рис.2.41. Добавление нового узла в топологический блок

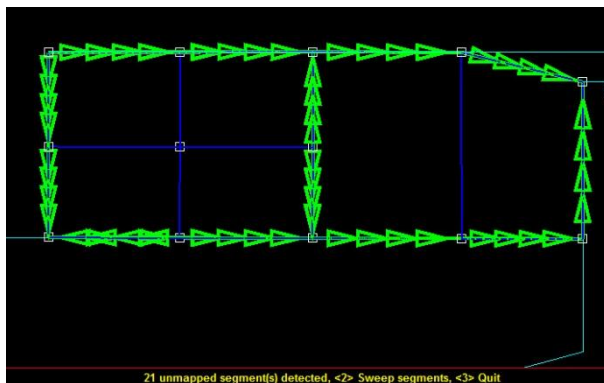


Рис.2.42. Обнаружение несопряженных граней

- Грани соседних блоков должны стыковаться по всей длине. Не допускается, чтобы одна грань была длиннее другой и более длинная грань разрывалась точкой (рис.2.43).

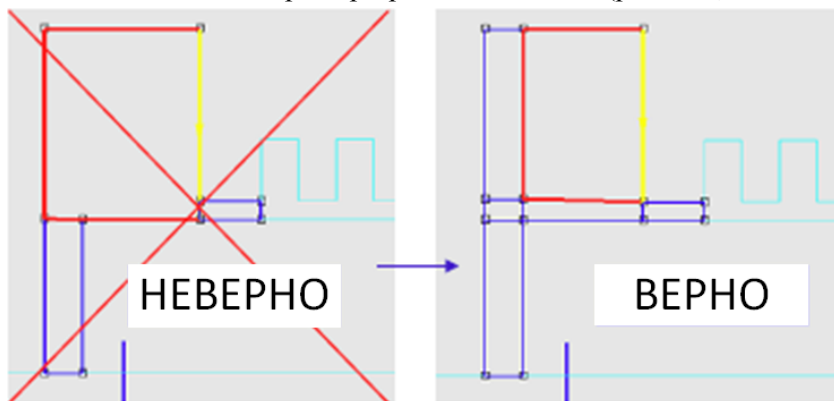


Рис.2.43. Сопряжение топологических блоков

- Блоки должны сопрягаться с поверхностью меридионального обвода только одной гранью (рис.2.44).

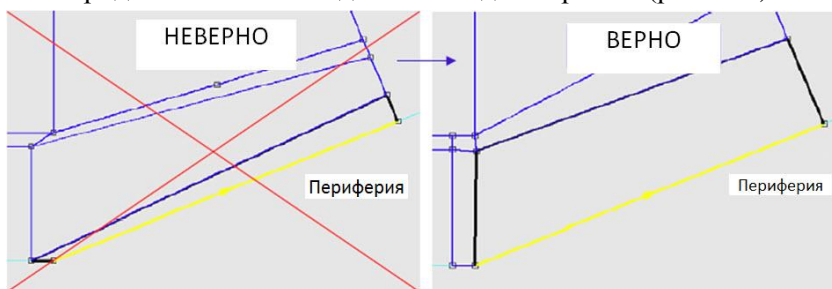
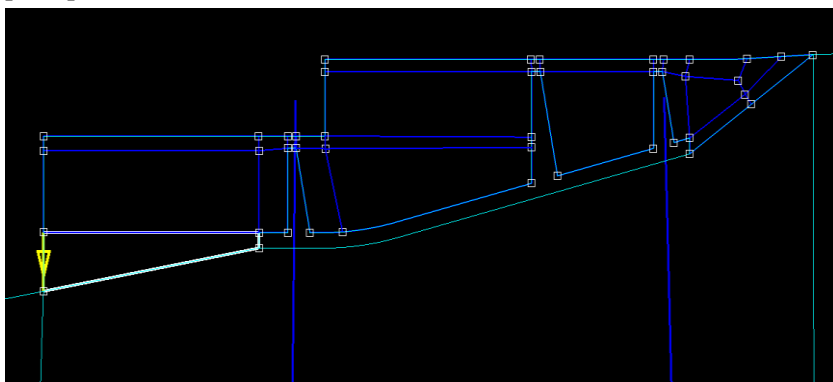


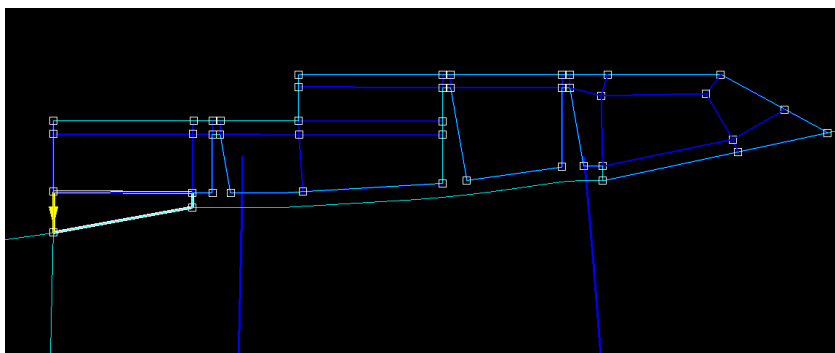
Рис. 2.44. Сопряжение блоков с границами расчетной области

Следуя приведенным выше правилам и рекомендациям, необходимо заполнить меридиональное сечение надбандажной полости топологическими блоками без разрывов. Пример заполненной полости показан на рис. 2.45,а. Аналогичные действия выполняются и для других притрактовых и надбандажных полостей. На рис. 2.45,б представлено расположение

топологических блоков в надбандажной полости второй ступени примера.



а) Для первого РК



б) Для второго РК

Рис.2.45. Пример разделения надбандажных полостей топологическими блоками

Шаг 17. Настройка параметров сетки конечных элементов надбандажной полости. На следующем этапе необходимо задать параметры сетки конечных элементов, которая будет строиться для надбандажных полостей. Для этого используется меню *Topology Default*. Там следует ввести размер элементов сетки в пункте *Solid*

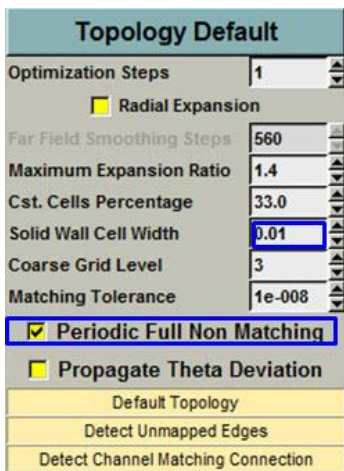


Рис.2.46. Меню параметров сетки конечных элементов



границы любого топологического блока, можно изменять тип расположения элементов вдоль этой грани (меню *Distribution*, рис. 2.48): от начала грани (*At Start*), от конца (*At End*) и т.д., либо число элементов на данной грани (меню *Set Number of Points*, рис. 2.49).

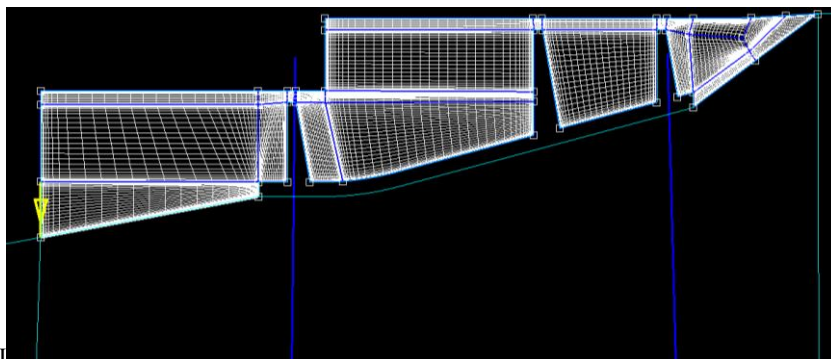


Рис.2.47. Топология сетки конечных элементов в надбандажной полости

Wall Cell Width равный *0,01*. Остальные параметры остаются без изменения (рис.2.46).

Шаг 18. Предварительный просмотр сетки надбандажной полости. Для предварительной генерации топологии необходимо запустить в меню *Topology Default* команду *Default Topology* (рис.2.46). Результат ее действия показан на рис. 2.47.

Если необходимо, полученную топологию можно отредактировать. Выбирая ПКМ

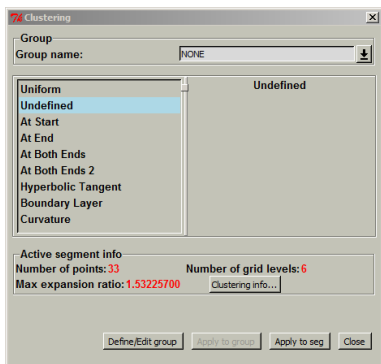


Рис. 2.48. Меню *Distribution*

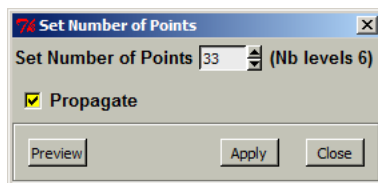


Рис. 2.49. Меню *Set Number of Points*

Если все параметры топологии удовлетворяют желаниям пользователя, меню редактирования надбандажной полости можно закрыть, нажав кнопку **Close Edition Mode**.

Описанные выше действия необходимо проделать и для оставшихся надбандажных и притраковых полостей.

Шаг 19. Генерация пространственной сетки для всей расчетной модели. Теперь, когда заданы параметры сеток не только для лопаточных венцов, но и для надбандажных полостей, необходимо снова сгенерировать пространственную сетку, нажав кнопки *Select All* и *Generate 3D*.

Качество окончательной сетки конечных элементов также необходимо контролировать с помощью появившегося окна *Grid Quality Check* (рис. 2.50). Убедившись, что все параметры сетки удовлетворяют требованиям данное описанным выше (раздел 2.1.3) меню можно закрыть.

Внешний вид окончательного варианта сетки для турбины, используемой для примера, представлен на рис. 2.51.

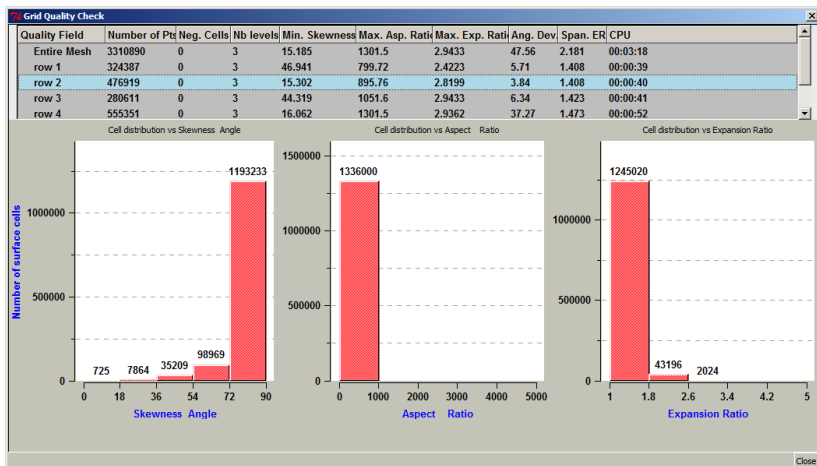


Рис. 2.50. Параметры качества окончательного варианта сетки расчетной модели турбины с притрактовыми полостями

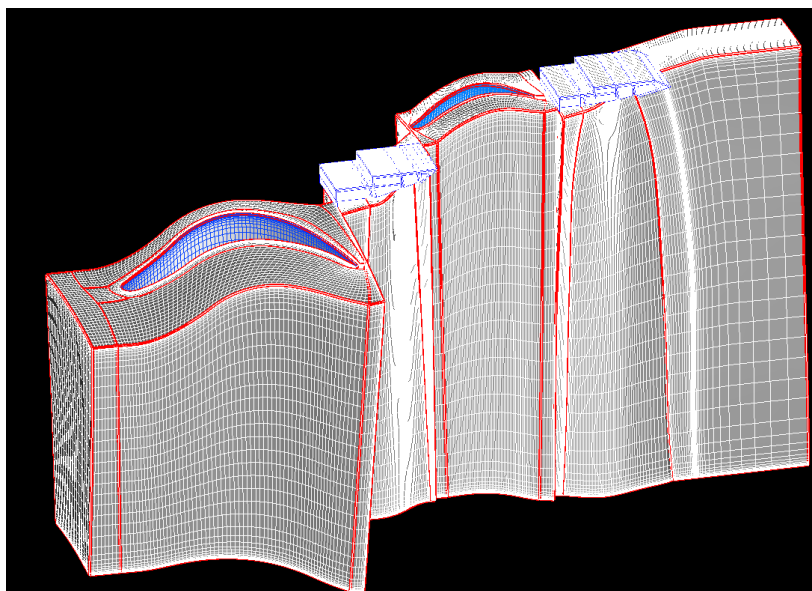


Рис. 2.51. Внешний вид сетки конечных элементов двухступенчатой осевой турбины низкого давления

2.1.5. Проверка граничных условий

Шаг 20. Проверка правильности назначения границ. При создании геометрии расчетной области и генерации сетки в турбомашине программа *AutoGrid5* автоматически присваивает всем поверхностям тот или иной тип граничного условия. Поэтому, прежде чем приступить к дальнейшей работе над моделью, необходимо проверить правильность назначения границ. Для этого необходимо выполнить команду:

ГМ → *Grid* → *Boundary Conditions*.

Меню назначения границ изображено на рис. 2.52. В нем следует проверить наличие областей модели, которые программа не смогла идентифицировать автоматически, выбрав в поле *Type* параметр *UND* (*неопределенный участок*). Если после этого выбора поле окна *Patch Selector* окажется пустым как показано на рис. 2.52 (справа), то это означает, что все границы рассматриваемой модели описаны.

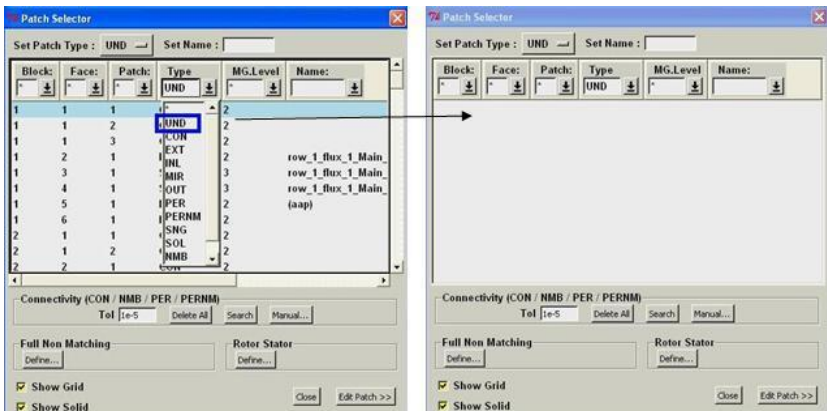


Рис. 2.52. Окно назначения граничных условий

Если такие участки имеются (рис.2.53), их обязательно необходимо описать.

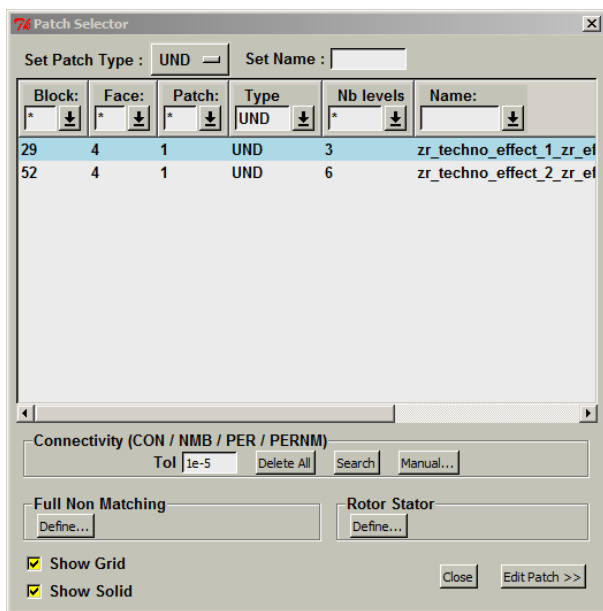


Рис. 2.53. Окно назначения граничных условий с неописанными областями

Шаг 21. Описание неопределенных участков расчетной области. Прежде чем присвоить неопределенным границам тип, следует отобразить пространственную сетку, выполнив команду:

ГМ → View → View 3D Solid Mesh.

В открытом окне *Patch Selector* (рис. 2.53) выбирается пункт *Full Non Matching/Define...* (рис. 2.54). В появившемся окне необходимо очистить список областей в *Connections list*, нажав кнопку *Delete* в нижней части окна.

Далее следует создать интерфейсы, описывающие входы и выходы надбандажных полостей. Для этого в правой рабочей области последовательным перебором выбирается поверхность, относящаяся к домену рабочей лопатки, а в левой – к надбандажной полости (рис. 2.55).

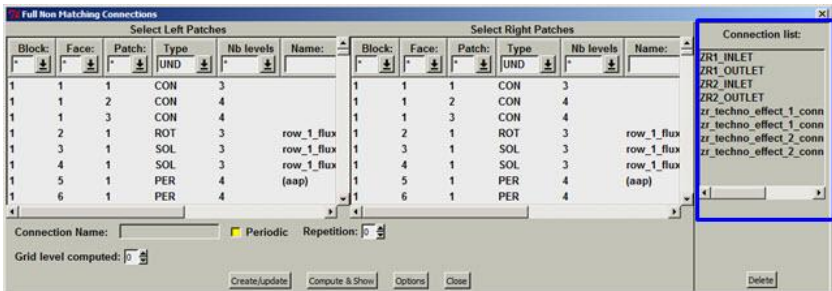


Рис. 2.54. Меню Full Non Matching Connections

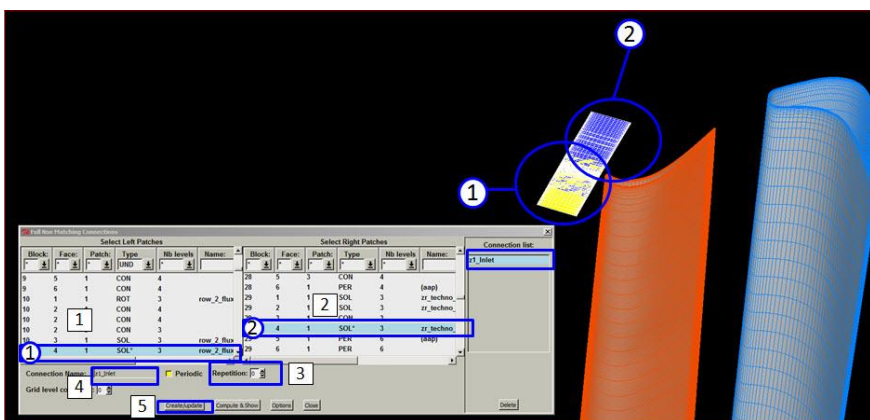


Рис. 2.55. Выбор поверхностей для интерфейса, определяющего вход в надбандажную полость

Данные поверхности сопрягаются не полностью, поэтому в пункте *Repetition* задается значение 7, оптимально описывающее сопряжение. Далее в поле *Connection Name* вводится имя, создаваемого интерфейса, например *z1_Inlet*. Его создание подтверждается нажатием кнопки *Create/update*. После выполнения описанных действий вновь созданный интерфейс появится в окне *Connection List*.

Описанные действия необходимо проделать для других интерфейсов входа/выхода. В итоге будет создано четыре новых интерфейса, которые появятся в списке *Connection List*.

После этого пользователю следует убедиться в правильности назначения граничных условий (*INL*, *OUT*, *PER*, *SOL* и т.д).

Законченная модель сохраняется с помощью команды:

ГМ → *File* → *Save Project As*.

После ее выполнения появится окно, содержащее информацию о качестве сетки записанной модели (рис. 2.56).

На этом работа в программе *AutoGrid5* закончена, и ее можно закрыть.

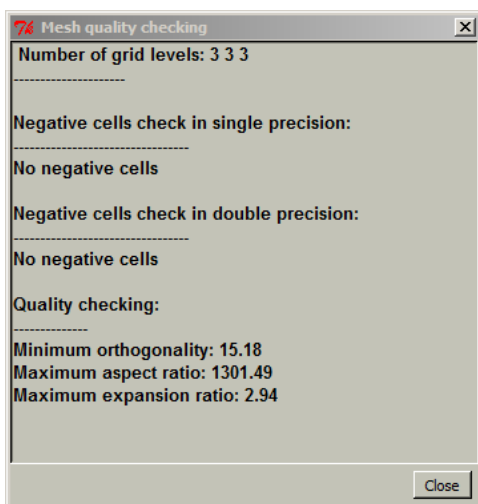


Рис. 2.56. Информация о записанном файле

2.2. Описание граничных условий и настройки решателя при исследовании течения в турбомашине

Задание числовых значений граничных условий, настройка решателя и расчет поставленной задачи в программном комплексе *NUMECA* производится в подпрограмме *FINE™/TURBO*.

2.2.1. Запуск программы FINE™/Turbo

Шаг 22. Запуск программы FINE™/TURBO. Запуск программы FINE™/Turbo осуществляется из меню «Пуск» ОС «Windows»:

Пуск → Программы → NUMECA Software → Fine89_1 → FINE.

После выполнения команды появится окно *Project Selection* (рис. 2.57). В нем следует выбрать вкладку *Create a New Project*, и с ее помощью новый проект, присвоив ему желаемое имя.

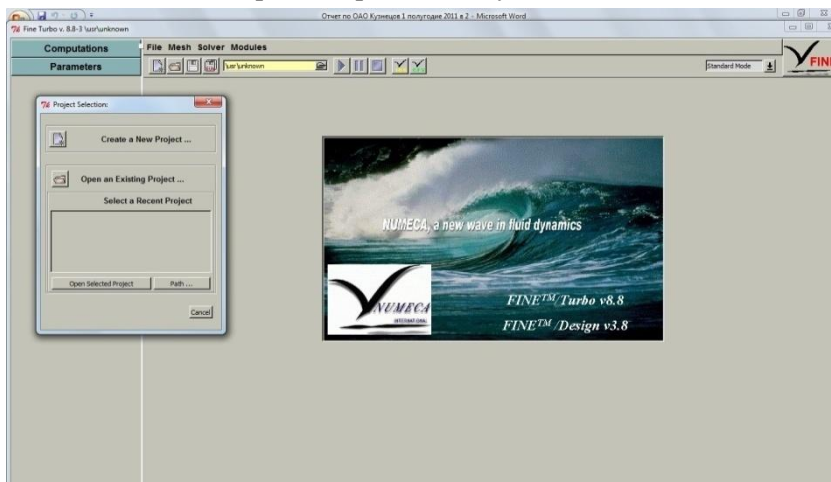


Рис. 2.57. Стартовое окно программы FINE™/Turbo

Шаг 23. Загрузка сетки.

Затем следует открыть сетку, построенную ранее в *Auto Grid5* (см. раздел 2.1.5) нажав в последующем окне кнопку *Grid File Selection*, кнопку *Open* и выбрав ранее созданный файл формата *.igg.

Шаг 24. Определение параметров проекта. После загрузки расчетной модели, появится окно *Grid Units and Project Configuration* (рис. 2.58), где нужно выбрать тип модели

(трехмерная (*3 Dimensional*) или осесимметричная (*Axisymmetric*)), систему координат (цилиндрическую (*Cylindrical*) или декартову (*Cartesian*)) и единицы измерения в которых создавалась модель (поле *Grid Units*).

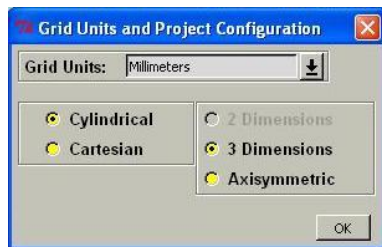


Рис. 2.58 – Окно *Grid Units and Project Configuration*

Расчетная модель осевой турбины является трехмерной. Рассчитываться она будет в цилиндрической СК. Геометрия обычно строиться в миллиметрах. В меню *Grid Units and Project Configuration* нужно сделать соответствующие настройки и нажать кнопку *OK*.

Внешний вид окна программы *FINE™/Turbo* после загрузки сеточной модели представлен на рис. 2.59. Как видно из рисунка, графический интерфейс программы состоит из дерева проектов (в левой части), главного меню (сверху) и рабочей области.

2.2.2. Задание граничных условий

Процесс задания граничных условий задачи исследования течения в турбомашине состоит из нескольких этапов. Необходимо описать свойства рабочего тела, выбрать какие параметры будут использованы в качестве граничных условий на входе и выходе, задать численные значения граничных условий, указать вращающиеся домены и т.д. Ниже последовательно для каждого шага будут приведены рекомендации и последовательность действия пользователя.

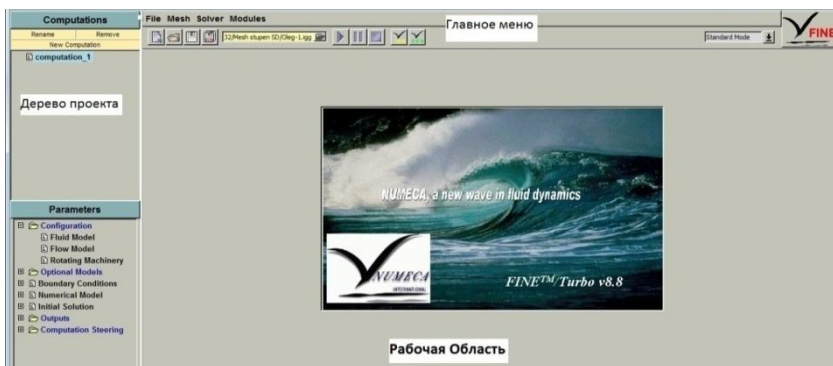


Рис. 2.59. Окно программы FINE™/Turbo после загрузки модели

Шаг 25. Описание свойств рабочего тела. Основными параметрами рабочего тела, существенно влияющими на результаты расчёта, являются теплоёмкость при постоянном давлении c_p , динамическая вязкость μ , а также газовая постоянная R или молярная масса M .

Изобарная теплоёмкость рабочего тела c_p или динамическая вязкость μ могут задаваться как постоянными значениями, так и зависящими от температуры. Данные зависимости могут задаваться как в табличном виде, так и при помощи специальных шаблонов, в виде полиномов зависимости $c_p = f(T)$ или $\mu = f(T)$. Для задания переменных свойств динамической вязкости можно использовать уравнение Сазерленда.

Рабочим телом в ТНД являются продукты сгорания. На основе анализа многочисленной литературы и опыта расчёта турбин в СГАУ и на ОАО «Кузнецов» для продуктов сгорания следует использовать следующие физические свойства:

- газовая постоянная: $R = 287,335 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$;
- зависимость изобарной теплоемкости c_p от температуры:

$$c_p = 829,2 + 0,5068 \cdot T - 0,00019254 \cdot T^2 + 0,000000027364 \cdot T^3 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$$

- зависимость динамической вязкости μ от температуры в виде уравнения Сазерленда:

$$\mu = 1,49 \cdot 10^{-5} \cdot \frac{273 + 200}{200 + T} \left(\frac{T}{273} \right)^{1,5} \frac{\text{кг}}{\text{м} \cdot \text{с}}$$

Для выбора рабочего тела и описания его физических свойств в дереве проекта под вкладкой *Parameters* следует выбрать пункт *Fluid Model*. В результате в расчетной области откроется библиотека свойств рабочих веществ (рис. 2.60). Она содержит обширную базу данных веществ с максимально возможным описанием свойств.

Однако рабочее тело со свойствами продуктов сгорания отсутствует в библиотеке и его необходимо создать вновь.

Перед тем как задавать свойства рабочего тела необходимо в программе *Excel* на основе справочных данных создать таблицу зависимости изобарной теплоемкости и вязкости от температуры потока в диапазоне от *100K* до *2100K*. Таблицы зависимостей теплоёмкости и вязкости от температуры необходимо сохранить в виде двух текстовых файлов (с разделителями табуляции) следующего вида (для теплоемкости и для вязкости):

FINE profile file

100	877.981964
200	923.077312
300	964.650228
400	1002.864896
500	1037.8855
600	1069.876224
700	1099.001252
800	1125.424768
900	1149.310956
1000	1170.824
1100	1190.128084
1200	1207.387392

1300	1222.766108
1400	1236.428416
1500	1248.5385
1600	1259.260544
1700	1268.758732
1800	1277.197248
1900	1284.740276
2000	1291.552
2100	1297.796604

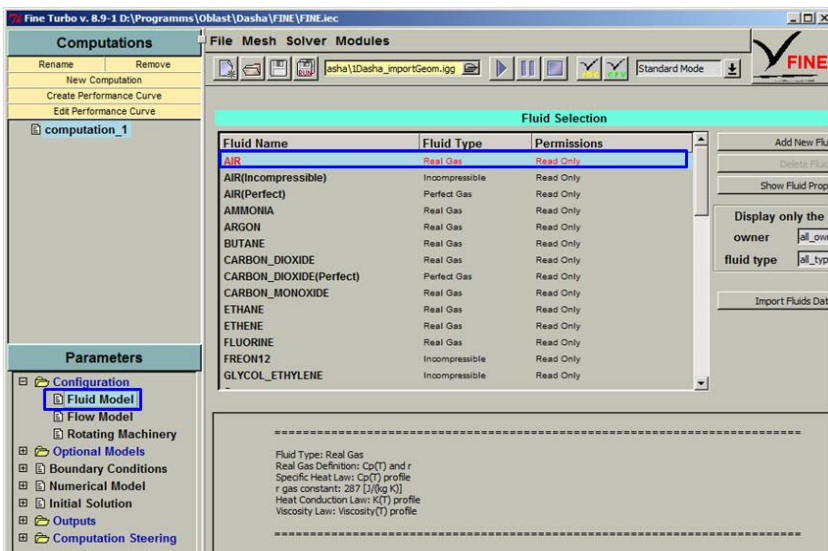


Рис. 2.60. Выбор свойств рабочего тела в меню *Fluid Model*

В первой колонке данных файлов должны быть перечислены значения температуры из указанного диапазона, во второй – соответствующие им значения теплоёмкости или вязкости.

Для задания нового рабочего тела необходимо в меню *Fluid Model* (рис. 2.60) программного комплекса *Numeca Fine Turbo* нажать на кнопку *Add New Fluid*. В появившемся окне следует указать имя нового рабочего тела, например, *Air_Products_of_Combustion*, и основные свойства, такие как сжимаемость (необходимо выделить пункт *Compressible Fluid*), а

также то, что основные свойства рабочего тела будут зависеть от температуры (выделить пункт *Real Gas*) (рис. 2.61).

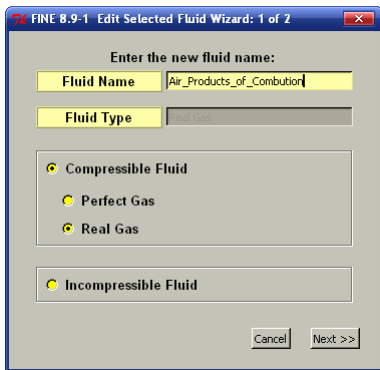


Рис. 2.61. Окно указания основных свойств материала

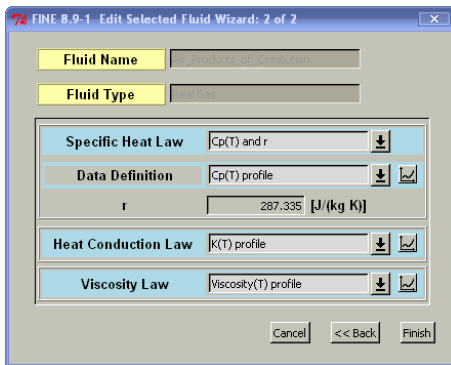


Рис. 2.62. Окно указания теплоёмкости и вязкости материала

В следующем окне (рис. 2.62) напротив пункта *Specific Heat Law* (закон изменения теплоёмкости) необходимо выбрать $C_p(T)$ and r . Данное действие назначает, что показатель адиабаты рабочего тела будет определяться полиномом $C_p(T)$ и газовой постоянно R . В поле *Data Definition* (определение данных) необходимо импортировать файл с табулированной зависимостью теплоёмкости от температуры, а в поле r ввести значение газовой постоянной: $R = 287,335 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}\cdot\text{К}}$.

В поле *Viscosity Law* необходимо провести импортирование файла с табулированной зависимостью динамической вязкости от температуры. Для добавления свойств вновь созданного рабочего тела необходимо нажать кнопку *Finish*.

После этого созданное рабочее тело появится в списке материалов. Необходимо просто его выделить, чтобы указать, что он является рабочим телом в решаемой задаче.

Шаг 26. Описание параметров задачи. На следующем этапе необходимо описать задачу, т.е. указать те физические модели, которые будут использоваться для ее решения. Для этого под

вкладкой *Parameters* следует выбрать пункт *Flow Model*. Рабочая область изменит свой вид. Ее изображение показано на рис. 2.63. В нем необходимо сделать следующие настройки:

1. В поле *Time Configuration* задается тип задачи в зависимости от учета нестационарных процессов. Решаемая задача является стационарной (т.е. поток считается установившимся и не зависящим от времени), что описывается выбором пункта *Steady*.

2. В поле *Mathematical Method* выбирается пункт *Turbulent Navier - Stokes*. Этим определяется, что течение будет исследоваться на основе решения уравнений Навье Стокса, осредненных по Рейнольдсу с применением моделей турбулентности. Возможно также решение уравнений Эйлера или системы Навье – Стокса без учета турбулентности.

3. Выбор моделей турбулентности осуществляется в пункте *Modeling of Turbulence*.

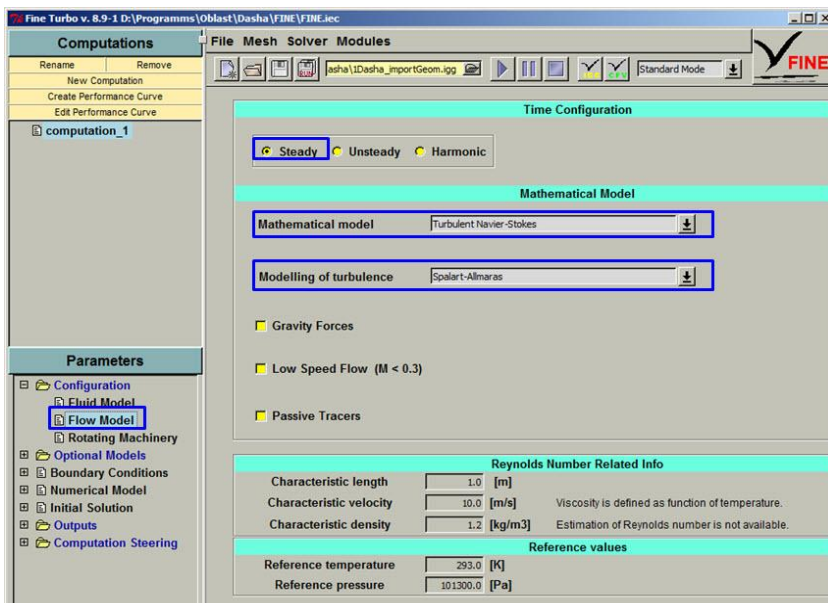


Рис. 2.63. Описание задачи в меню *Flow Model*

Анализ многочисленных публикаций показал, что для решения большинства инженерных задач, к которым относится расчёт структуры потока в ТНД, для моделирования турбулентности необходимо применение специальных математических моделей, называемых модели турбулентности. Наиболее широкое распространение для моделирования течения в турбомашинах получили три модели турбулентности:

- Однопараметрическая модель *Spalart - Allmaras*;
- Двухпараметрическая модель *k- ϵ* ;
- Двухпараметрическая модель турбулентности *SST k- ω* .

Следует отметить, что существует огромное количество публикаций, доказывающих работоспособность каждой из данных моделей. Поэтому для расчётов течения в осевых турбинах можно применять любую из вышеперечисленных моделей.

Самой «экономичной» моделью с точки зрения вычислительных ресурсов является модель турбулентности *Spalart - Allmaras*, самой «затратной» - модель турбулентности *SST k- ω* .

Шаг 27. Указание частоты вращения ротора. На следующем этапе необходимо указать скорости вращения всех венцов. Для этого под вкладкой *Parameters* следует выбрать пункт *Rotating Machinery*. Рабочая область вновь изменит свой вид. Ее изображение показано на рис. 2.64. Для неподвижных венцов (СА и НА), притрактовых и надбандажных полостей необходимо указать скорость вращения 0 (т.к. это неподвижные элементы). В рассматриваемом примере это зоны: *row 1* (СА первой ступени), *row 3* (СА второй ступени), *zr techno effect 1* и *zr techno effect 2*. Для рабочих венцов задается частота вращения ротора. В рассматриваемом примере это *row 2* (РК первой ступени) и *row 4* (РК второй ступени). Их частота вращения (в примере) равна 5300 об/мин. Скорость указывается в поле *Rotational Speed* (рис. 2.64).

Шаг 28. Задание граничных условий на границе ротор-статор. В любой лопаточной машине есть неподвижные лопаточные венцы (СА и НА) и подвижные (РК). Безусловно, вращение оказывает колоссальное влияние на структуру потока в лопаточном венце, главным образом, за счет действия инерционных сил и сил Кориолиса. Для того чтобы учесть влияние вращения на структуру потока в доменах рабочих лопаток, решение уравнения Навье-Стокса в них проходит не в стационарных СК, а во вращающихся, при этом скорость и направление вращения СК соответствуют скорости и направлению вращения ротора. Поэтому на этапе подготовки модели пользователю необходимо указывать скорость и направление вращения для вращающихся доменов.

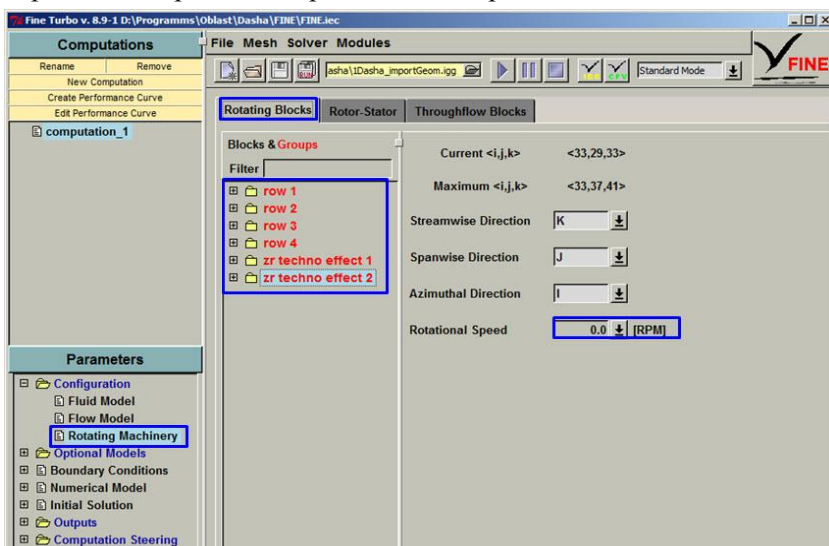


Рис. 2.64. Описание частот вращения венцов *Rotating Machinery*

Для передачи параметров между неподвижными и подвижными венцами используются так называемые интерфейсы. В действительности, процесс взаимодействия между неподвижными и подвижными лопаточными венцами является сугубо нестационарным из-за перемещения лопаток рабочего колеса

относительно лопаток сопловых аппаратов. Для моделирования данного взаимодействия с минимальным количеством допущений задачу необходимо решать в нестационарной постановке. При нестационарном решении напрямую моделируется перемещение лопаток рабочих колёс относительно лопаток солового аппарата. Главным недостатком данного подхода является существенное возрастание необходимого расчётного времени.

Для моделирования взаимодействия между подвижными и неподвижными лопаточными венцами в стационарной постановке существуют два подхода: *Frozen Rotor* (замороженный ротор) и *Mixing Plane* (плоскость смешения).

При применении интерфейсов типа *Frozen Rotor* параметры потока на выходе из предыдущего венца передаются в последующий венец без осреднения, то есть, как есть. Схематично работа данного интерфейса показана на рис. 2.65. Физически применение данного интерфейса означает то, что закрочный след от лопатки, например соплового аппарата, постоянно «попадает» в одно и то же место на лопатке рабочего колеса. Для корректной работы данного интерфейса необходимо, чтобы числа лопаток соседних венцов либо совпадали, либо являлись кратными. В программном комплексе *Numeca Fine Turbo* интерфейс, использующий подход «замороженный ротор» называется *Full Non Matching Frozen Rotor*.

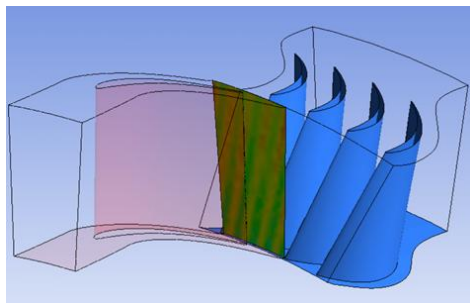


Рис. 2.65. Интерфейс типа *Frozen Rotor*

При применении интерфейсов типа *Mixing Plane* передача параметров от предыдущего лопаточного венца к последующему происходит с осреднением параметров в окружном направлении. Схематично работа данного интерфейса показана на рис. 2.66. При использовании интерфейсов данного типа не накладывается никаких ограничений на числа лопаток соседних лопаточных венцов. В программном комплексе *Numeca Fine Turbo* интерфейсов типа *Mixing Plane* несколько:

- *Conservative Coupling by Pitchwise Row*;
- *Local Conservative Coupling*;
- *Full Non Matching Mixing Plane*;
- *Non Reflecting 1D*.

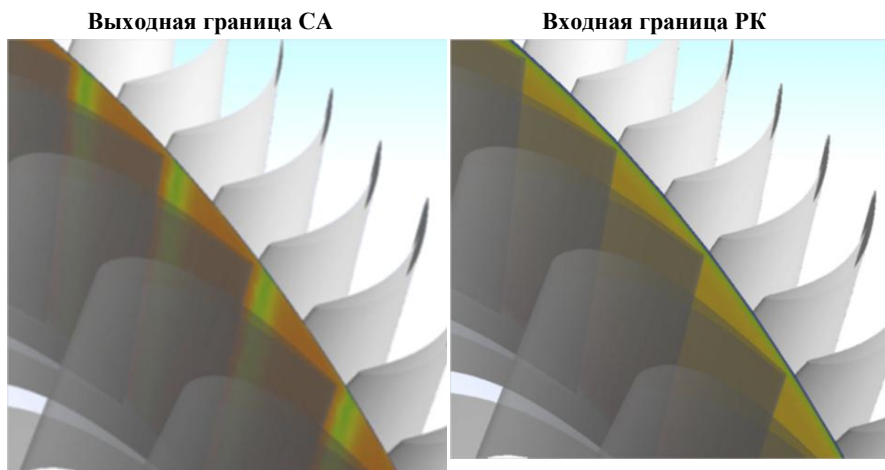


Рис. 2.66. Работа интерфейса типа *Mixing Plane*

Из данного списка наиболее предпочтителен интерфейс *Full Non Matching Mixing Plane*. Остальные интерфейсы отличаются от него наличием каких-либо дополнительных опций.

Настройка интерфейсов осуществляется в том же диалоговом окне *Rotating Machinery*. Задание этого ГУ осуществляется следующим образом (рис. 2.67).

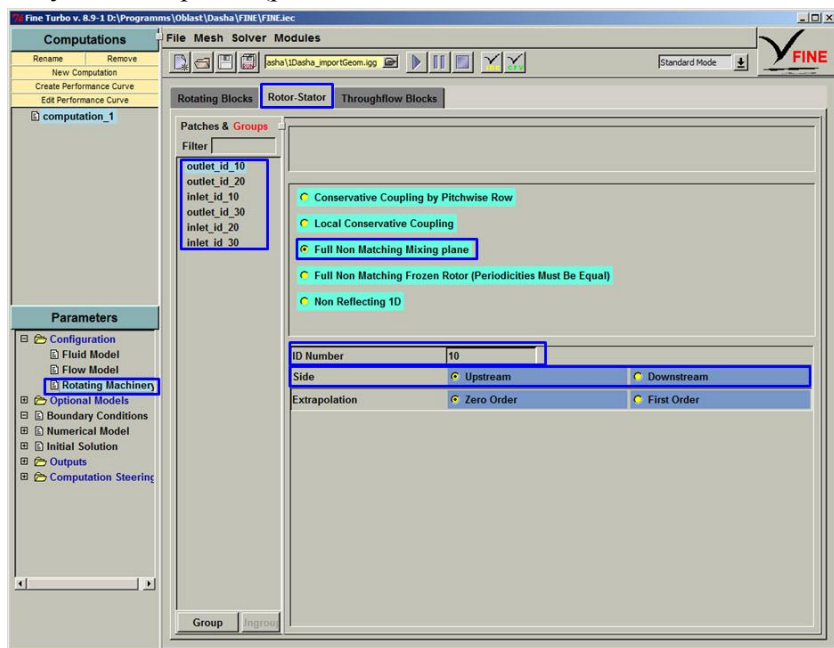


Рис. 2.67. Установка граничных условий на границе ротор-статор

1. В меню быстрого доступа *Parameters* выбирается приложение *Rotating Machinery*.
2. В данном меню выбирается вкладка *Rotor - Stator*.
3. В меню, в окне *Patches & Groups* вначале выбирается выходная граница первого домена (в примере *outlet_id_10*). В меню ее настройку следует активировать настройку *Full Non Matching Mixing Plane*. В строке *ID Number* вводится значение 10. В строке *Side*, выберется пункт *Upstream* (сечение вверху по течению относительно границы).
4. Для входного сечения (в примере *inlet_id_10*) следует произвести следующие настройки. Выбирается опция *Full Non*

Matching Mixing Plane. В строке *ID Number* вводится значение 10. Важно, чтобы значение *ID* для двух сопрягаемых границ совпадало. В строке *Side*, выберется пункт *Downstream* (сечение внизу по течению относительно границы).

5. Для всех остальных входных выходных границ следует произвести аналогичные настройки.

Шаг 29. Задание численных значений ГУ на входе/выходе.

При моделировании течения любого рабочего тела (жидкости или газа) необходимо задавать граничные условия на поверхностях, ограничивающих область течения жидкости. Условно границы расчётной области могут быть разделены на 5 больших групп (рис. 2.68):

- Вход (*inlet*) – границы, через которые происходит втекание рабочего тела в расчётную область;
- Выход (*outlet*) – границы, через которые рабочее тело преимущественно покидает расчётную область;
- Стенки (*wall*) – границы, которые являются поверхностями твёрдых тел, формирующих зону течения;
- Границы-интерфейсы – те границы, через которые поток взаимодействует с

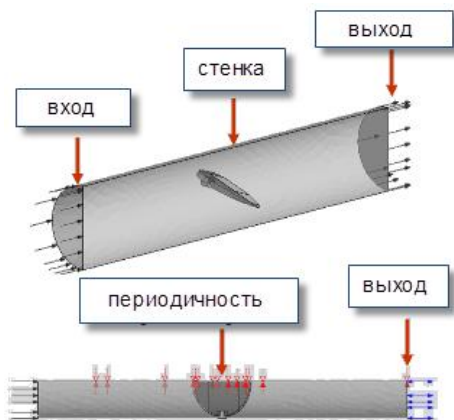


Рис. 2.68. Возможные типы граничных

с другими расчётными областями (например, интерфейс между ротором и статором), либо используются для уменьшения расчётной модели (периодичность или симметрия);

- Границы с неопределённым входом-выходом

(*opening*) – те границы,

через которые поток может как втекать в расчётную область, так и вытекать из нее. В ряде программных комплексов данные границы относятся к выходным границам.

Для расчета течения в турбомашине обычно используются следующее сочетание граничных условий:

1. На входе в расчётную область задаются параметры втекающего потока:

- полное давление p^* или расход рабочего тела G ;
- направление потока. Его можно задавать либо при помощи направляющих косинусов, либо вводом непосредственно величин углов. Стоит отметить, что данные параметры удобнее всего задавать в цилиндрической системе координат, ось которой совпадает с осью вращения турбомшины;
- полная температура T_0^* ;
- параметры, характеризующие турбулентность входящего потока. Существует много различных способов задания параметров турбулентности. Они, главным образом, зависят от выбора модели турбулентности. Так, к примеру, при использовании модели турбулентности *Spalart – Allmaras* в программном комплексе *Numeca Fine Turbo* на входе необходимо задать турбулентную вязкость μ_t .

Стоит отметить, что величины всех граничных условий могут быть заданы переменными по высоте проточной части.

2. На выходе из расчетной области необходимо задавать либо статическое давление, либо расход рабочего тела. Поскольку на выходе из турбин может иметь место остаточная закрутка потока, приводящая к градиенту давления по высоте проточной части, рекомендуется задавать статическое давление не равномерным, а подчиняющимся закону радиального равновесия (*Radial Equilibrium*).

Стоит отметить, что граничные условия на входе и выходе во многом определяют режим течения в турбине. При расчёте турбин желательно использовать следующее сочетание граничных условий – полное давление на входе в турбину и статическое давление на выходе из турбины. Также допустимо использование таких сочетаний граничных условий, как полное давление на входе – расход газа на выходе, а также расход газа на входе - статическое давление на выходе.

Настройка граничных условий и ввод их численных значений в программном комплексе *NUMECA Fine Turbo* осуществляется в меню *Boundary Conditions*.

Как отмечалось выше на входной границе необходимо задать полные давления и температуру, а также угол входа потока. Причем зачастую величины этих параметров неравномерны по сечению и заданы в виде осредненных в окружном направлении эпюр. Так на рис. 2.69...2.72 приведены эпюры распределения параметров потока на входе в ТНД, рассматриваемую в примере. Они были получены в результате *CFD* расчета предыдущих ступеней.

Для того, чтобы приведенные эпюры смогли быть импортированы в *Numeca Fine Turbo* в качестве граничных условий, их необходимо записать в виде текстовых файлов следующего вида:

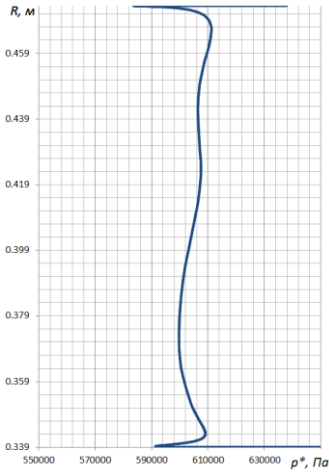


Рис. 2.69. Осредненное в окружном направлении распределение полного давления p^* по радиусу на входе в турбину

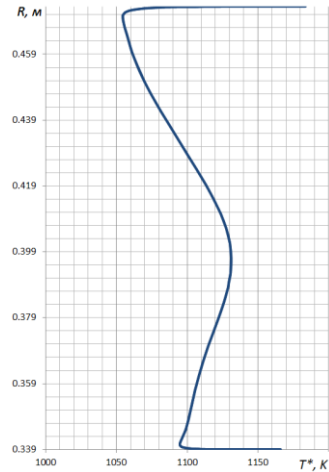


Рис. 2.70. Осредненное в окружном направлении распределение полной температуры T^* на входе в турбину

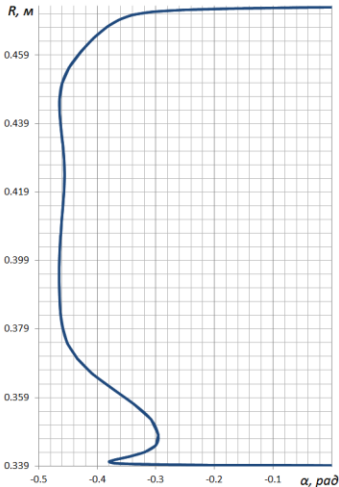


Рис. 2.71. Осредненное в окружном направлении распределение угла потока α на входе в турбину

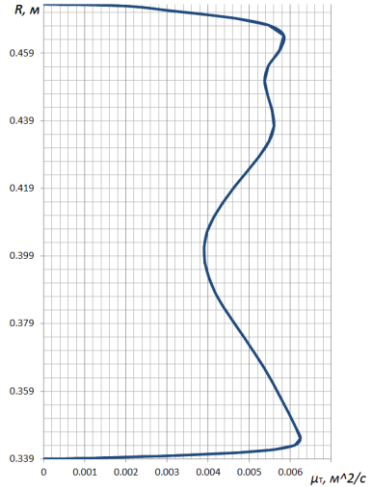


Рис. 2.72. Распределение турбулентной вязкости по радиусу на входе в турбину

FINE profile file

0.339	704700.0	
0.339001	691400.0	
0.339004	674600.0	
0.339007	656600.0	
0.339012	638500.0	
.....	0.473499	630400.0
0.4735	637900.0	

В этих файлах в первой колонке указывается значение радиуса, а во второй - соответствующее значение интересующего параметра (полного давления, полной температуры, угла, турбулентной вязкости и т.д.).

Входное граничное условие описывается во вкладке *INLET* (в верхней части рабочего окна, рис. 2.73) меню *Boundary Conditions*. В нем необходимо сделать следующие настройки.

1. Активировать опцию *Total Quantities Imposed* (Наложение полных параметров). Включение данной опции означает, что параметры потока будут определяться через полное давление и температуру.

2. Отметить опцию *Angle from Axial Direction (V extrapolated)* (угол от осевого направления). Включение данной опции означает, что направление потока на входе будет задано с помощью углов, отсчитываемых от оси турбины.

3. Задать распределение по радиусу угла, арктангенс которого определяется отношением окружной проекции скорости к осевой: $\arctg(V_t/V_z)$. Данный угол является аналогом угла α , применяемого при проектировании турбомашин. Он отсчитывается турбомашин от оси, а не от фронта.

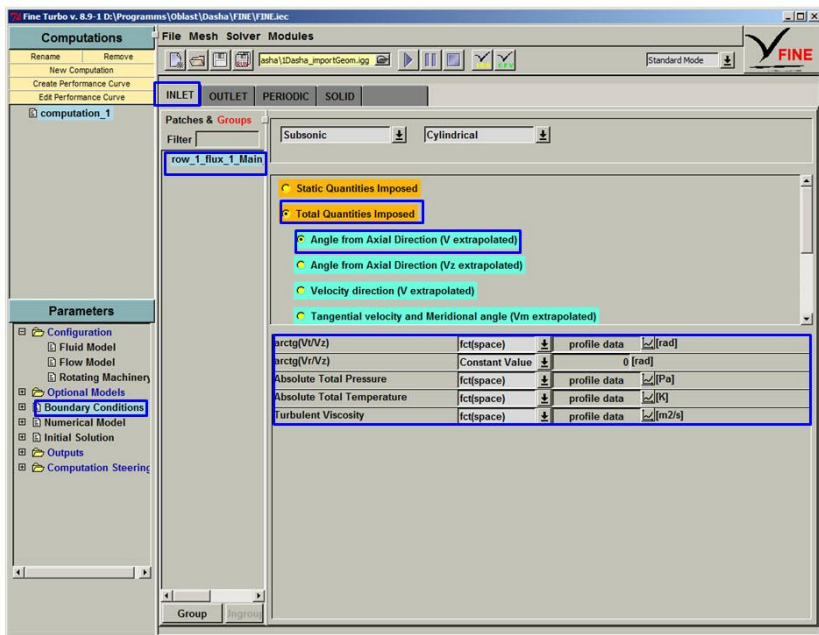




Рис. 2.73. Задание входных граничных условий (меню *Boundary Condition* вкладка *INLET*)

Как было отмечено выше, распределение данного угла по радиусу было получено при расчёте предыдущей ступени. Чтобы импортировать данную эпюру в программный комплекс *Numesa FineTurbo* необходимо:

- нажать на кнопку  в поле $\arctg(Vt/Vz)$ и из выпадающего списка выбрать пункт $fcn(space)$;
- нажать на появившуюся кнопку  в поле $\arctg(Vt/Vz)$;
- в появившемся окне *Profile Manager* (менеджер профилей) (рис. 2.74, а) нажать на кнопку *Import* и указать путь к созданному текстовому файлу с табулированной зависимостью данного угла от радиуса. После выполнения данных действий в левой части окна *Profile Manager* будет

отображено содержимое текстового файла, а в центральной части окна появится график распределения угла по радиусу;

– принять настройки, нажав кнопку *Ok*.

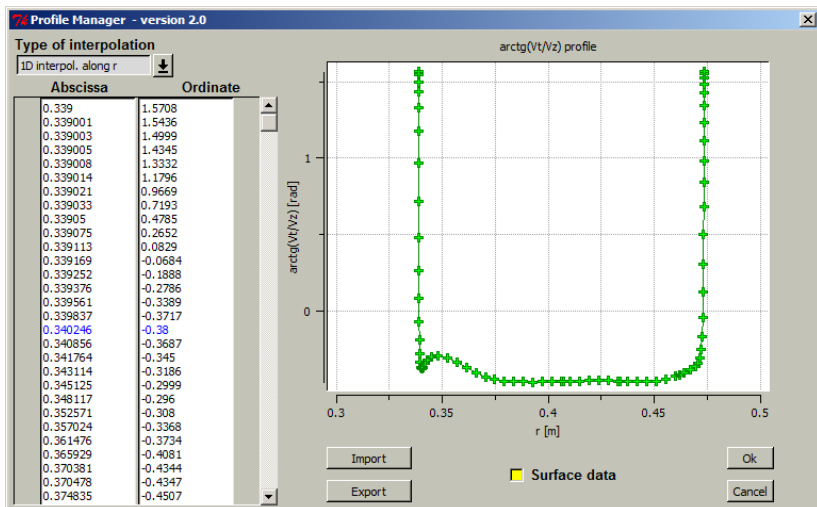
4. Задать значение угла, арктангенс которого определяется отношением радиальной проекции скорости к осевой: $\arctg(V_r/V_z)$. Данный угол является углом между касательной к проекции линии тока в меридиональной плоскости и осью турбомшины. При расчёте ТНД вводится допущение об отсутствии радиальной компоненты скорости на входе. Поэтому в поле $\arctg(V_r/V_z)$ необходимо ввести значение 0.

5. В поле *Absolute Total Pressure* (Абсолютное полное давление на входе) необходимо задать распределение полного давления по радиусу (аналогично как это делалось применительно к пункту $\arctg(V_t/V_z)$) (рис. 2.74, б).

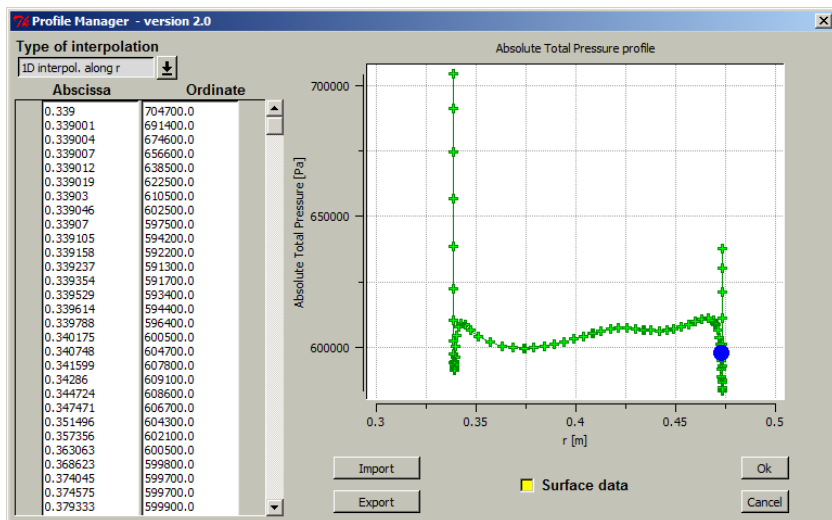
6. В поле *Absolute total Temperature* (Абсолютная полная температура) необходимо задать распределение полной температуры по радиусу (аналогично как это делалось применительно к пункту $\arctg(V_t/V_z)$) (рис. 2.75, а).

7. В поле *Turbulent Viscosity* (турбулентная вязкость) необходимо задать распределение турбулентной вязкости по радиусу (аналогично как это делалось применительно к пункту $\arctg(V_t/V_z)$) (рис. 2.75, б).

Выходное граничное условие описывается во вкладке *OUTLET* (в верхней части) меню *Boundary Conditions*. В нем необходимо сделать следующие настройки (Рис. 2.76).

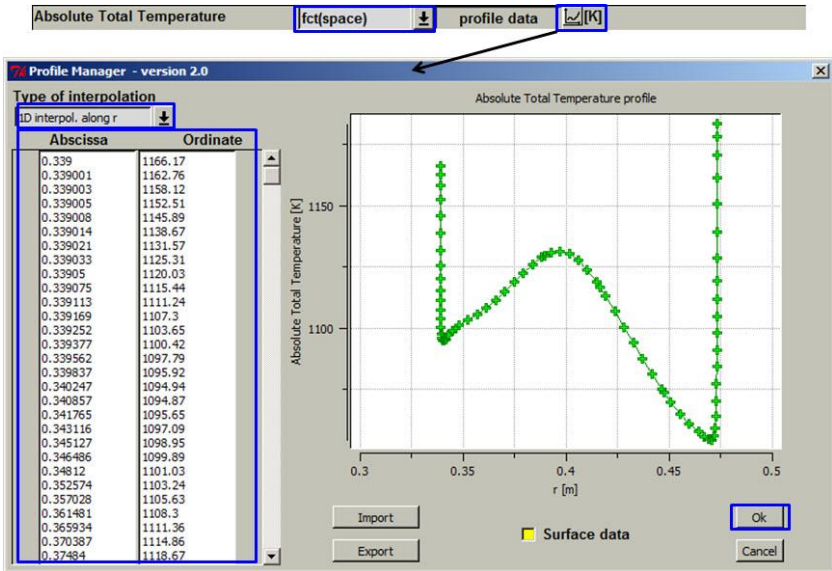


а) Эпюра изменения тангенса угла между осевым и окружным направлением

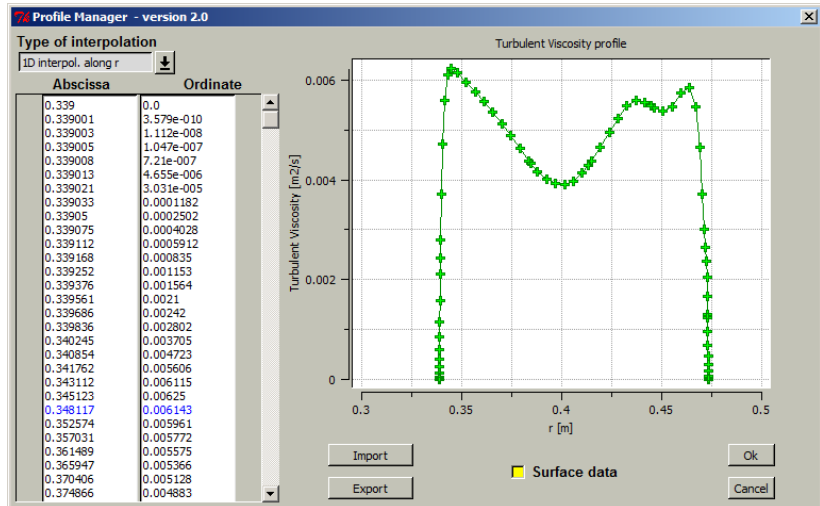


б) Эпюра изменения полного давления

Рис. 2.74. Определение эпюры изменения параметров



а) Эюра изменения полной температуры



б) Эюра изменения турбулентной вязкости

Рис. 2.75. Определение эюры изменения параметров

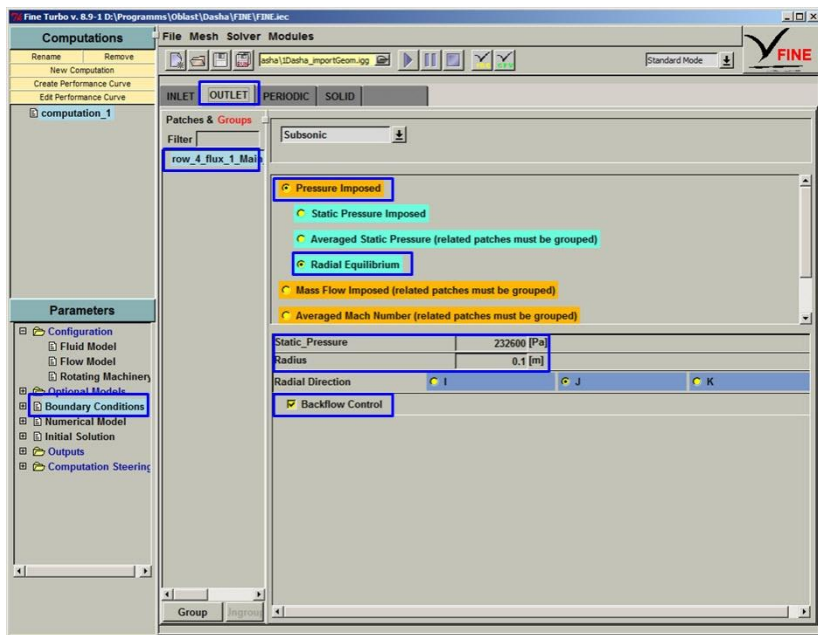


Рис. 2.76. Задание выходных граничных условий (меню *Boundary Condition* вкладка *OUTLET*)

- Нужно активировать опцию *Pressure Imposed*, что говорит о том, что на выходной границе будет задаваться статическое давление.
- Нужно активировать опцию *Radial equilibrium*, что определит, что поле статических температур будет считаться неравномерным, подчиняющимся уравнению радиального равновесия.
- Для этого типа ГУ нужно указать непосредственно значение статического давления на выходе (*Static Pressure*) (В примере имеет величину 232600 Па), указать радиус, на котором ожидается данная величина давления (*Radius*) (В примере имеет величину $0,1 \text{ м}$) и активировать опцию *Backflow Control*.

Шаг 30. Задание периодического ГУ. Граничное условие периодичности задаются во вкладке *PERIODIC* (в верхней части) меню *Boundary Conditions* (Рис. 2.77). В данной вкладке тип периодического условия выбирается автоматически и зависит от типа сетки (совпадают ли узлы на периодической границе или нет). В большинстве случаев никаких настроек в этом меню не требуется.

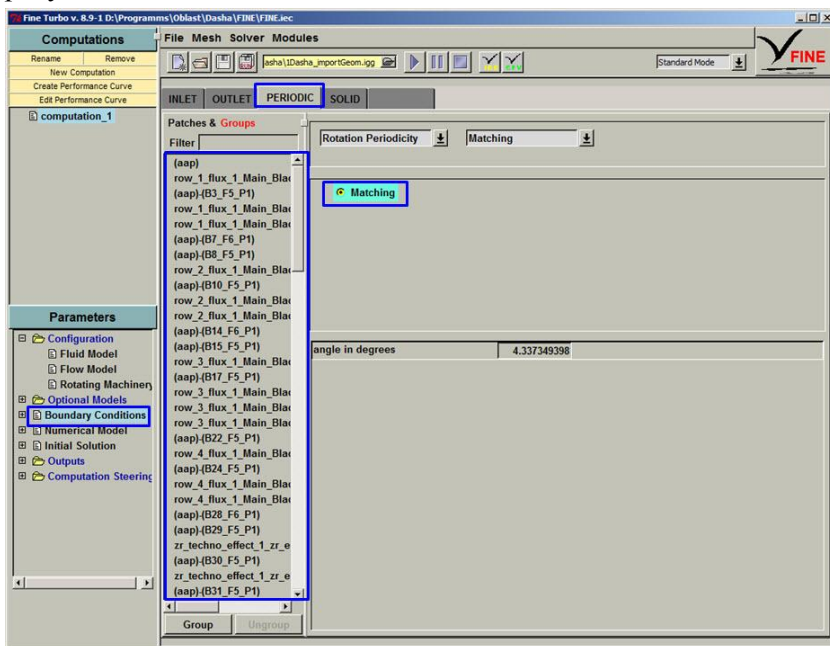


Рис. 2.77. Задание периодических граничных условий (меню *Boundary Condition* вкладка *PERIODIC*)

Шаг 31. Задание ГУ для стенок. Граничные условия для стенок канала задаются во вкладке *SOLID* (в верхней части) меню *Boundary Conditions* (Рис. 2.78). В нем необходимо сделать следующие настройки:

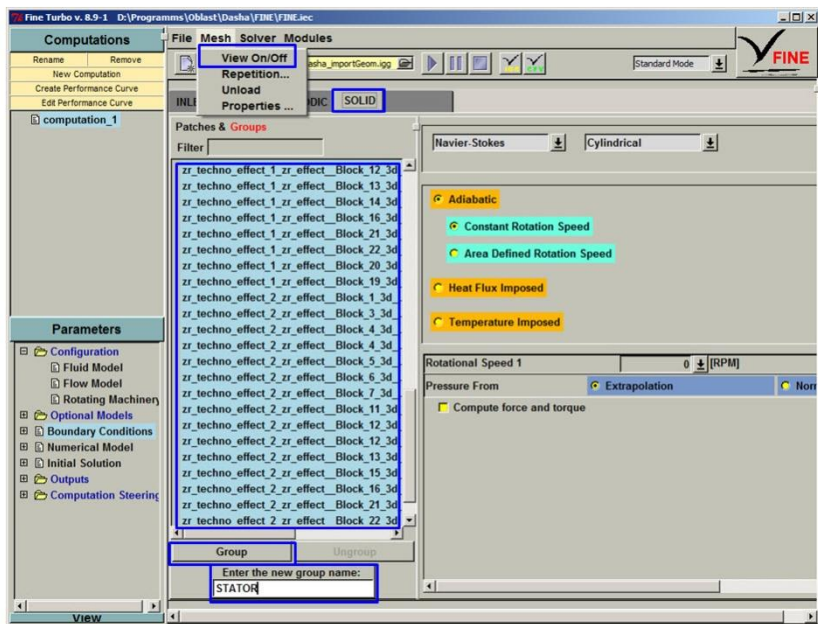


Рис. 2.77. Задание граничных условий на тело лопатки (меню *Boundary Condition* вкладка *SOLID*)

- Выделить все поверхности, относящиеся к статору, т.е. неподвижные поверхности, нажать клавишу *Group* в нижней части окна (рис. 2.78) для объединения этих поверхностей в одну группу и задать имя для группы, например, *STATOR*. Для наглядности и удобства выбора поверхностей можно открыть окно визуализации сетки с помощью команды (рис. 2.79):

ГМ → *Mesh* → *View On/Off*

- Аналогично необходимо объединить все вращающиеся поверхность в группу под именем *ROTOR*.
- Далее в списке выбрать группу *STATOR*. Для нее выбрать опцию *Adiabatic Constant* → *Rotation Speed* и ввести

величину 0 , что означает, что указанные стенки неподвижны.

- В списке выбрать группу *ROTOR*. Для нее необходимо выбрать опцию *Adiabatic Constant* → *Rotation Speed* и ввести величину 5300 , что означает, что указанные стенки вращаются вместе с ротором с указанной частотой вращения. Кроме того, необходимо активировать опцию *Compute force and torque*.

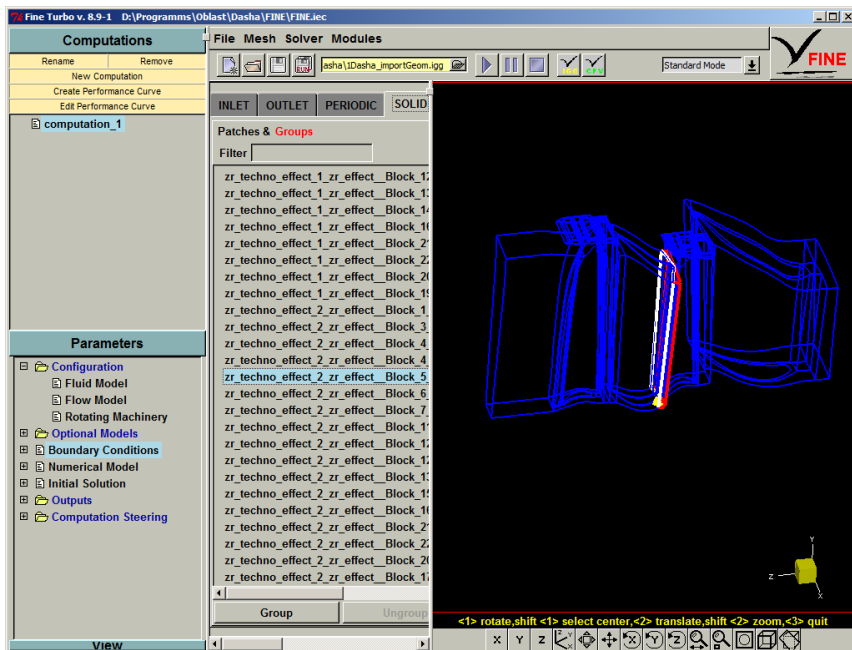


Рис. 2.78. Окно визуализации сетки конечных элементов

2.2.3. Настройка параметров решателя

Шаг 32. Настройка параметров решателя. Настройка параметров решателя осуществляется во вкладке *Parameters*, находящейся в дереве проекта. Основная часть настроек выполняется в меню *Numerical Model*, изображенном на рис. 2.79.

Решатель программы *NUMECA* производит решение на вложенных сетках. То есть программа кроме сетки, созданной в *AutoGrid5*, которая обозначается *0 0 0* (нулевой уровень), строит еще несколько уровней сетки, полученных путем закругления исходной. То есть первый уровень закругления (*1 1 1*) представляет собой сетку число элементов в каждом направлении уменьшено вдвое за счет объединения ячеек. Второй уровень (*2 2 2*) закругляет сетку вдвое, но относительно первого уровня и т.д.

Решение на вложенных сетках позволяет улучшить устойчивость решения, поскольку решение на грубой сетке хотя и проигрывает в точности, но существенно устойчивее. Поля, получаемые в таком случае хотя и отличаются от реальных, но достаточно близки к ним. Поэтому, если их использовать в качестве инициализации при решении на качественной сетке, решение будет устойчивее и быстрее сойдется.

По этой причине первоначальный расчет целесообразно проводить на уровне *2 2 2* с целью проверки адекватности сформированной модели и установленных настроек. Поскольку рассматриваемая модель уже отработана, был выбран уровень *0 0 0*.

По этой причине в меню *Numerical Model* необходимо сделать следующие настройки (рис. 2.79):

- в поле *CFL number* выбирается величина числа Куранта – 3;
- в строке *Current grid level* (текущий уровень сетки) задается значение уровня сети *0 0 0*;
- в строке *Number of Grid(s)* количество вложенных сеток (3).
- опция *Coarse grid initialization* должна быть активирована .

На следующем этапе нужно провести инициализацию – назначить значения переменных в расчетной области на первой итерации. Для этого в дереве проекта под вкладкой *Parameters*

следует выбрать пункт *Initial Solution*. В результате рабочая область окна программы примет вид, изображенный на рис. 2.80.

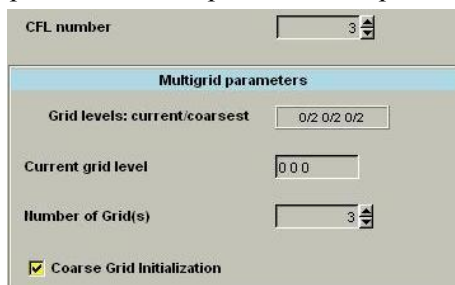


Рис. 2.79. Меню *Numerical Model*

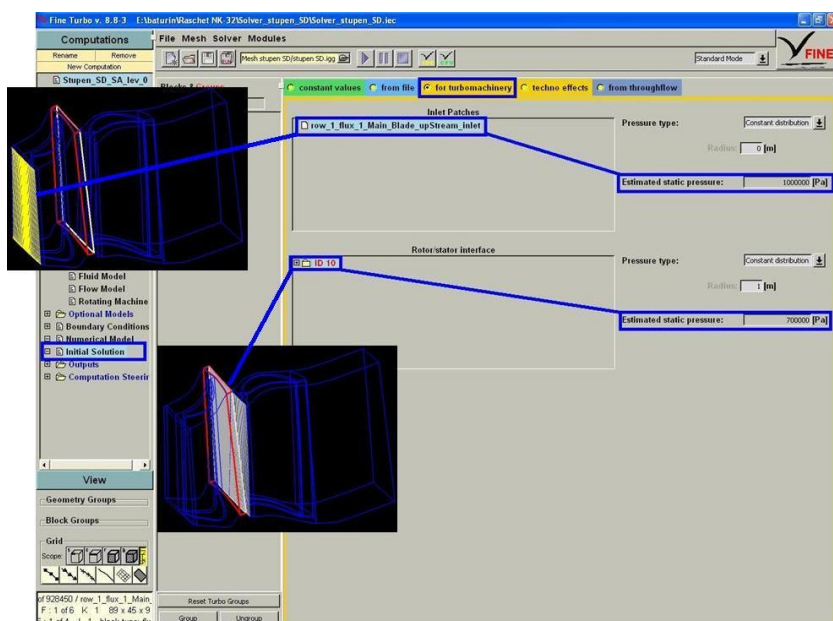


Рис. 2.80. Меню *Initial Solution*

В нем необходимо активировать опцию *for Turbomachinery*, задать приблизительно ожидаемое статическое давление на входе в ступень и на интерфейсе ротор/статор. Для этого на странице приложения следует выбрать соответствующую границу и ввести в

верхнем поле *Estimated static pressure* значение давления (в примере 1000000) для входа в ступень, в нижнем поле *Estimated static pressure* значение давления (в примере 700000) для границы перехода от статора к ротору (рис. 2.80).

Шаг 33. Настройка выводимых параметров. В меню *Outputs* (рис. 2.81), находящемся в дереве проекта под вкладкой *Parameters* производится настройка параметров, которые необходимо рассчитать и передать в постпроцессор для обработки. Для этого делаются следующие настройки:

- в подпункте *Computed Variables* в списке, который появится в рабочем окне, галочками отмечаются переменные, которые необходимо рассчитать при решении задачи;
- в подпункте *Surface Averaged Variables* в списке, который появится в рабочем окне, галочками отмечаются переменные, интегральные значения которых необходимо рассчитать на границах блоков. Там же указывается и тип осреднения по площади сечения (*Area*) или расходу (*Mass*);
- в подпункте *Azimuthal Averaged Variables*, в списке, который появится в рабочем окне галочками, отмечаются переменные, интегральные значения которых необходимо рассчитать в окружном направлении.

На рис. 2.81 указаны все параметры, которые необходимо отметить галочками при моделировании турбины.

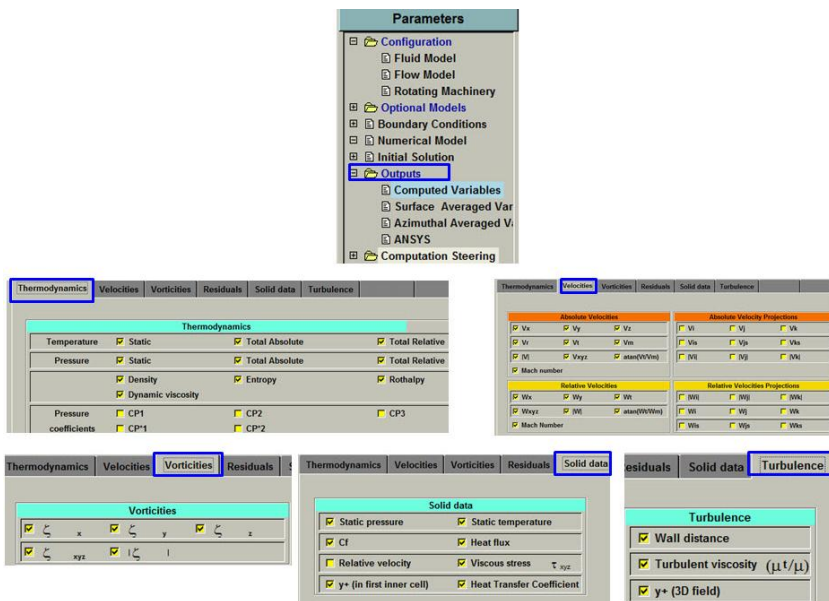


Рис. 2.81. Меню *Outputs*

Шаг 34. Настройка числа итераций и критериев схождения задачи.

Для определения числа итераций в дереве проекта под вкладкой *Parameters* следует выбрать пункт *Computation Steering* → *Control Variables*. В результате рабочая область окна программы примет вид, изображенный на рис.2.82. В нем в строке *Maximum number of Iterations* вводится максимальное число итераций, после которых расчет будет остановлен, если не будет достигнуто условие сходимости (например, 400).

В поле *Convergence Criteria* указывается критерий сходимости, при достижении которого расчет будет остановлен. Данная величина указывает показатель степени значения невязки. Например, величина $-6,0$ говорит о том, что задача будет считаться сошедшейся, если невязки ниже 10^{-6} . Здесь следует отметить, что в качестве критерия сходимости может быть использована неизменность невязок по итерациям. Неизменность невязок говорит

о том, что достигнуто предельное решение и снижение невязок возможно только за счет улучшения качества сетки.

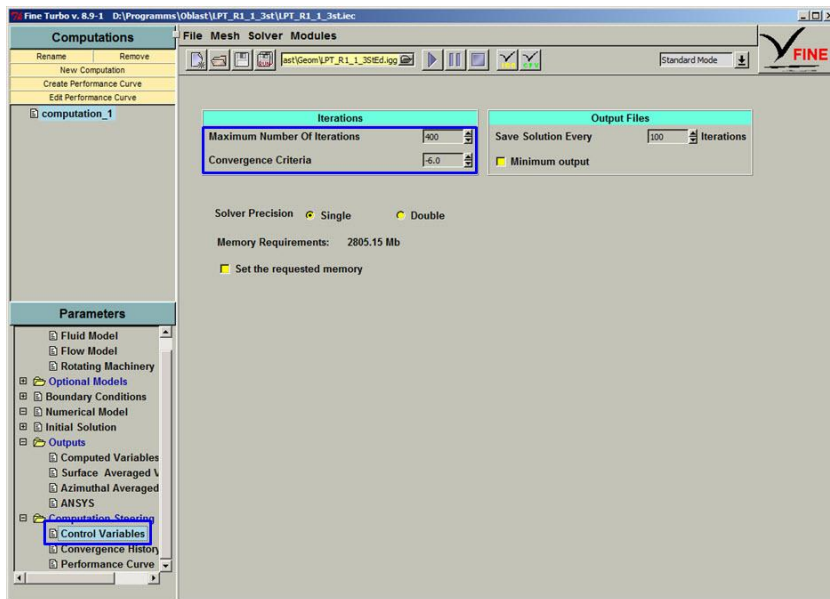


Рис. 2.82. Определение числа итераций и критерия сходимости в меню *Control Variables*

2.2.4. Сохранение проекта и запись его на суперкомпьютер

После того, как определены граничные условия и заданы настройки решателя, необходимо выполнить сохранение проекта и произвести его копирование на суперкомпьютер «Сергей Королёв».

Шаг 35. Сохранение проекта. Для того чтобы выполнить сохранение проекта необходимо выполнить команду

ГМ → *Mesh* → *Save As*

В появившемся окне (рис. 2.83) необходимо с помощью проводника выбрать директорию, в которую будет выполнено сохранение проекта (в данном случае это *D:\SuperComp*), а в окне

Имя Файла ввести название проекта (в данном примере *Turbomachine_Paralel*). После чего следует нажать на кнопку Сохранить.

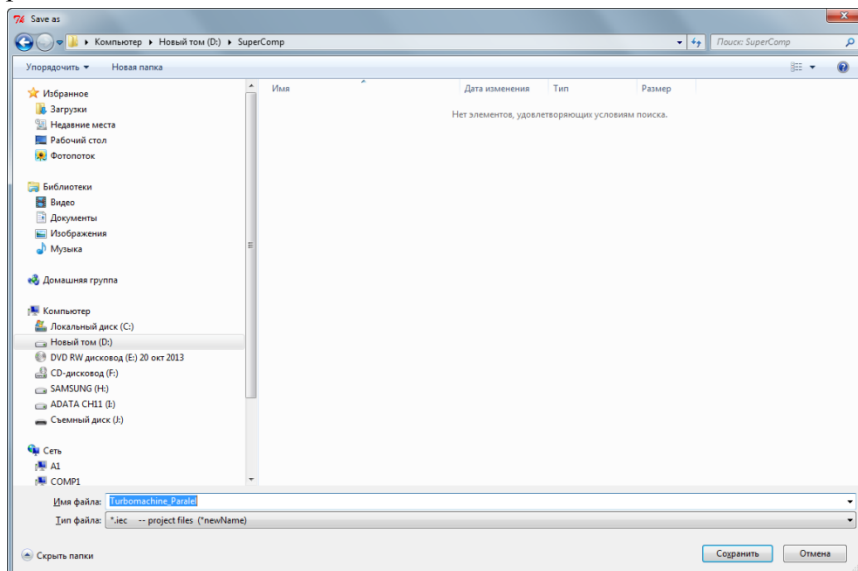


Рис. 2.83. Окно сохранения проекта

В результате в директории *D:\SuperComp* будет создана папка проекта *Turbomachine_Paralel*. В данной папке (рис. 2.84) содержится сам файл проекта *Turbomachine_Paralel.iec*, папка с сеткой проекта *_mesh*, а также папка *Turbomachine_Paralel_computation_1* с данными по расчётной точке *computation_1*, для которой были заданы все граничные условия и определены настройки решателя. Данная информация содержится в текстовом файле *Turbomachine_Paralel_computation_1.run*, находящимся в папке *Turbomachine_Paralel_computation_1*.





	_mesh	29.10.2013 15:28	Папка с файлами	
	Turbomachine_Paralel_computation_1	29.10.2013 15:29	Папка с файлами	
	Turbomachine_Paralel.iec	29.10.2013 15:28	Файл "IEC"	361 КБ

Рис. 2.84. Содержимое папки сохранённого проекта

Шаг 36. Копирование проекта на суперкомпьютер «Сергей Королёв». Для копирования проекта на суперкомпьютер необходимо запустить программу *WinSCP* с помощью команды

Пуск → Программы → WinSCP → WinSCP

Рабочее окно программы *WinSCP* (рис. 2.85) состоит из двух окон. В левом окне отображаются файлы и папки, располагающиеся на локальном компьютере. В правом окне отображается домашняя директория пользователя на суперкомпьютере. Как правило, она имеет имя */home/имя_пользователя* (например, */home/popov*). Навигация по окнам программы *WinSCP* ничем не отличается от работы со стандартным «Проводником» Windows. Для того чтобы открыть нужную папку *WinSCP*, необходимо дважды щёлкнуть по ней левой кнопкой мышки. Перейти на уровень выше возможно с помощью кнопки .

Чтобы скопировать папку с проектом *Turbomachine_Paralel* с локального компьютера на суперкомпьютер с помощью программы *WinSCP*, необходимо в левом окне *WinSCP* открыть рабочую директорию на локальном компьютере (в данном примере *D:\SuperComp*), а в правом – рабочую директорию на суперкомпьютере (в данном случае, */home/popov*). После этого следует нажать левой кнопкой мышки на папку с проектом *Turbomachine_Paralel* в левом окне (*D:\SuperComp*) и, не отпуская её, перетащить данную папку в правое окно (*/home/popov*).

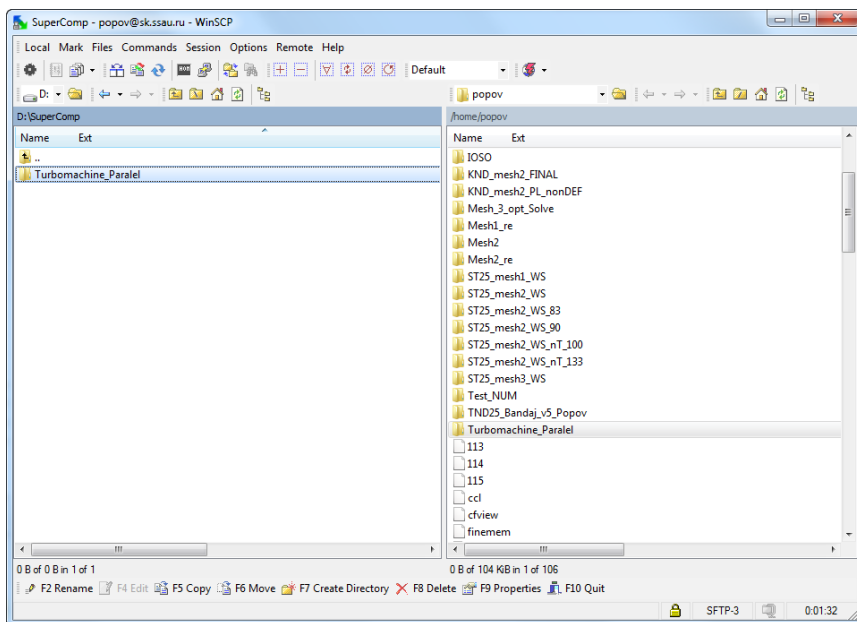


Рис. 2.85. Рабочее окно программы WinSCP

2.3. Подготовка численной модели для исследования рабочего процесса в турбомашине с использованием графического режима на суперкомпьютере «Сергей Королёв»

Подготовка расчётной модели (построение геометрии и сетки расчётной области, а также определение граничных условий и настройка параметров решателя) с использованием графического режима на суперкомпьютере «Сергей Королёв» также выполняется в программных комплексах *AutoGrid™* и *FINE™/Turbo*. Алгоритм подготовки расчётной модели с использованием суперкомпьютера полностью соответствует алгоритму подготовки модели на локальном компьютере, подробно описанному в пунктах 2.1 и 2.2 данного методического пособия. Отличается лишь процедура запуска данных программных комплексов.

Стоит отметить, что перед началом подготовки проекта на суперкомпьютере, необходимо скопировать файлы исходных данных (геометрия лопаток, меридиональные обводы, профиля параметров на входе в турбину) в рабочую директорию на суперкомпьютере с помощью программы *WinSCP*. Копирование файлов с помощью программы *WinSCP* описано на шаге 36 пункта 2.2 данного методического пособия.

Для запуска программного комплекса *FINE™/Turbo* с использованием графического режима на суперкомпьютере необходимо вначале создать командный файл запуска, а затем запустить данный командный файл при помощи программы *PuTTY* совместно с программой *Xming*.

Шаг 37. Создание командного файла для запуска программы *FINE™/Turbo* в графическом режиме на суперкомпьютере

Для создания командного файла необходимо:

1. Запустить программу *WinSCP* на локальном компьютере при помощи команды

Пуск → Программы → WinSCP → WinSCP

2. Кликнуть правой кнопкой мышки по свободному месту в правом окне (соответствующему рабочей директории пользователя на суперкомпьютере, см. шаг 36) программы *WinSCP*. В выпадающих меню вначале выбрать пункт *New*, затем *File* (рис. 2.86).
3. В появившемся окне (рис. 2.87) ввести имя файла, например, *FineTurbo.pbs*. Нажать на кнопку *Ok*. В результате на экране появится окно (рис. 2.88), в которое необходимо ввести содержимое файла – непосредственно команду запуска в текстовом виде.

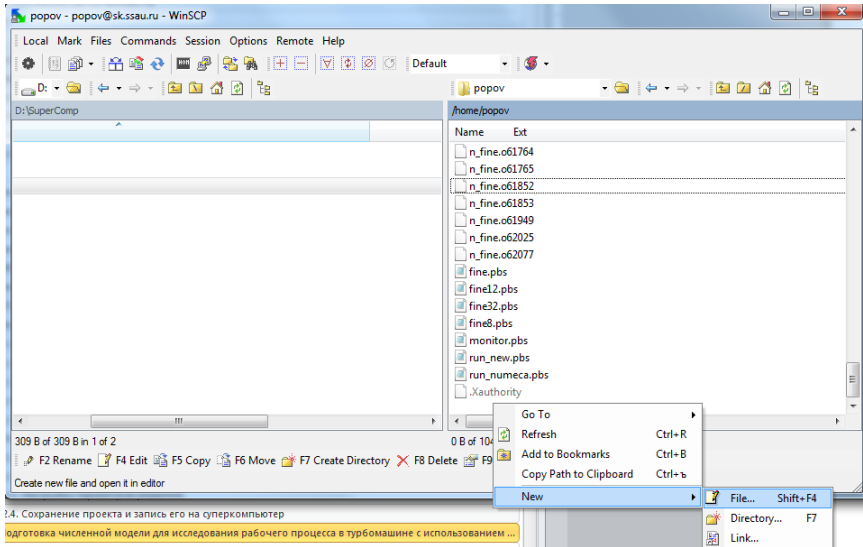


Рис. 2.86. Меню создания нового файла

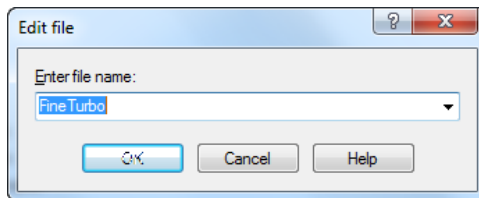


Рис. 2.87. Окно имени файла

Для запуска программы *FINE™/Turbo* в графическом режиме на суперкомпьютере на нодах (расчетный узел) с восемью процессорами и памятью *12Гб* необходимо ввести следующие команды:

```
#!/bin/bash
#
#PBS -N n_fine
#PBS -q batch
#PBS -l nodes=1:ppn=1
#PBS -l walltime=48:00:00
```

```
#PBS -m ae
#PBS -X
#PBS -V
cd $PBS_O_WORKDIR
#
/home/COMMON/numeca/bin/fine810_2
```

Для запуска программы *FINE™/Turbo* в графическом режиме на суперкомпьютере на нодах с двенадцатью процессорами и памятью *24Гб* необходимо ввести следующие команды:

```
#!/bin/bash
#
#PBS -N n_fine
#PBS -q batch
#PBS -l nodes=1:ppn=1:mem
#PBS -l walltime=48:00:00
#PBS -m ae
#PBS -X
#PBS -V
cd $PBS_O_WORKDIR
#
/home/COMMON/numeca/bin/fine810_2
```

Для запуска программы *FINE™/Turbo* в графическом режиме на суперкомпьютере на нодах с двенадцатью процессорами и памятью *96Гб* необходимо ввести следующие команды:


```
#!/bin/bash
#
#PBS -N n_fine
#PBS -q batch
#PBS -l nodes=1:ppn=1:bigmem
#PBS -l walltime=48:00:00
```

```
#PBS -m ae
#PBS -X
#PBS -V
cd $PBS_O_WORKDIR
#
/home/COMMON/numeca/bin/fine810_2
```

Для запуска программы *FINE™/Turbo* в графическом режиме на суперкомпьютере на нодах с шестнадцатью процессорами и памятью 32Гб необходимо ввести следующие команды:

```
#!/bin/bash
#
#PBS -N n_fine
#PBS -q batch
#PBS -l nodes=1:ppn=1:mem32
#PBS -l walltime=48:00:00
#PBS -m ae
#PBS -X
#PBS -V
cd $PBS_O_WORKDIR
#
/home/COMMON/numeca/bin/fine810_2
```

Для работы в графическом режиме рекомендуется использовать ноды с двенадцатью процессорами и памятью 96Гб, а также с шестнадцатью процессорами и памятью 32Гб.

4. Сохранить файл при помощи кнопки  в окне содержания файла. Закрыть данное окно.
В результате в рабочей директории будет создан командный файл *FineTurbo.pbs* (рис. 2.89).

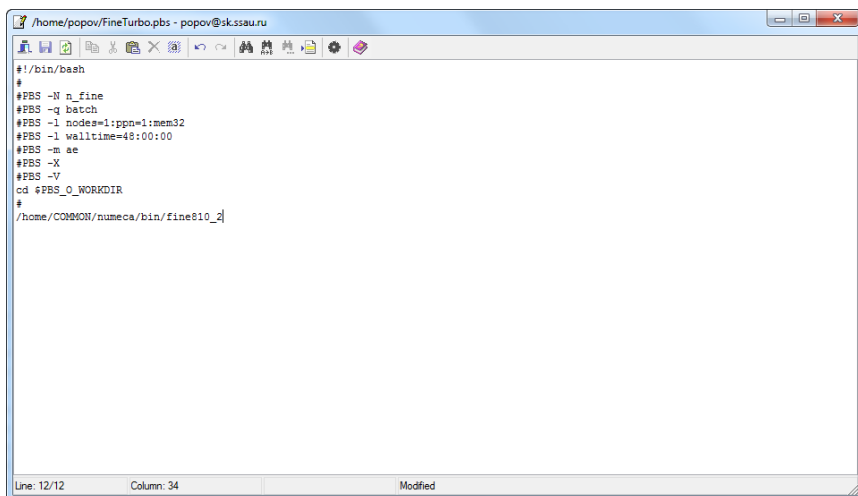


Рис. 2.88. Окно содержания файла

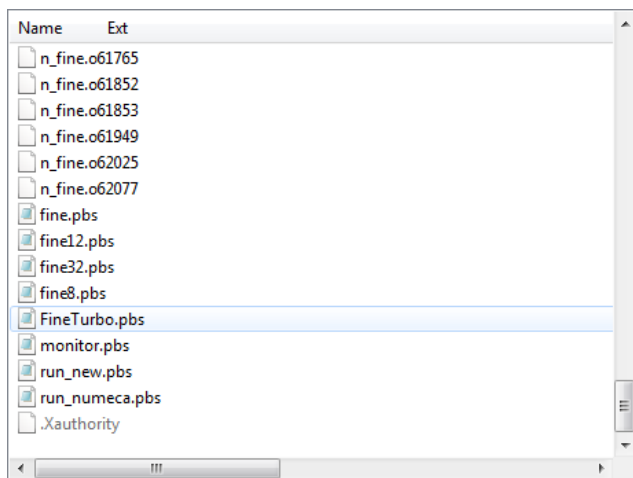


Рис. 2.89. Созданный командный файл запуска в рабочей директории на суперкомпьютере

Шаг 38. Запуск командного файла с помощью программы *PuTTY*.

Для запуска созданного командного файла необходимо:

1. Запустить программу *PuTTY* на локальном компьютере

В окне программы *PuTTY* ввести имя пользователя и пароль (рис. 2.90).

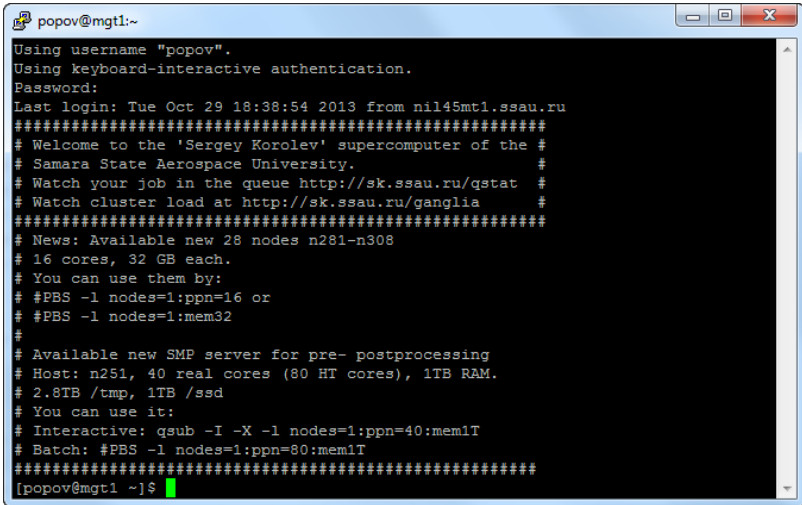


Рис. 2.90. Рабочее окно программы *PuTTY*

2. Загрузить библиотеки программного комплекса *NUMECA* с команды

module load numeca

Данную команду необходимо вводить в командной строке программы *PuTTY* (рис. 2.91)..

3. Запустить командный файл при помощи команды

qsub <имя файла>.

В данном примере данная команда будет иметь вид *qsub FineTurbo.pbs* (рис. 2.92).

```
popov@mgt1:~
Using keyboard-interactive authentication.
Password:
Last login: Tue Oct 29 21:42:03 2013 from nil45mt1.ssau.ru
#####
# Welcome to the 'Sergey Korolev' supercomputer of the #
# Samara State Aerospace University. #
# Watch your job in the queue http://sk.ssau.ru/qstat #
# Watch cluster load at http://sk.ssau.ru/ganglia #
#####
# News: Available new 28 nodes n281-n308
# 16 cores, 32 GB each.
# You can use them by:
# #PBS -l nodes=1:ppn=16 or
# #PBS -l nodes=1:mem32
#
# Available new SMP server for pre- postprocessing
# Host: n251, 40 real cores (80 HT cores), 1TB RAM.
# 2.8TB /tmp, 1TB /ssd
# You can use it:
# Interactive: qsub -I -X -l nodes=1:ppn=40:mem1T
# Batch: #PBS -l nodes=1:ppn=80:mem1T
#####
[popov@mgt1 ~]$ module load numeca
[popov@mgt1 ~]$ █
```

Рис. 2.91. Команда module load numeca

```
popov@mgt1:~
Last login: Tue Oct 29 21:42:03 2013 from nil45mt1.ssau.ru
#####
# Welcome to the 'Sergey Korolev' supercomputer of the #
# Samara State Aerospace University. #
# Watch your job in the queue http://sk.ssau.ru/qstat #
# Watch cluster load at http://sk.ssau.ru/ganglia #
#####
# News: Available new 28 nodes n281-n308
# 16 cores, 32 GB each.
# You can use them by:
# #PBS -l nodes=1:ppn=16 or
# #PBS -l nodes=1:mem32
#
# Available new SMP server for pre- postprocessing
# Host: n251, 40 real cores (80 HT cores), 1TB RAM.
# 2.8TB /tmp, 1TB /ssd
# You can use it:
# Interactive: qsub -I -X -l nodes=1:ppn=40:mem1T
# Batch: #PBS -l nodes=1:ppn=80:mem1T
#####
[popov@mgt1 ~]$ module load numeca
[popov@mgt1 ~]$ qsub FineTurbo.pbs
62210.mgt1
[popov@mgt1 ~]$ █
```

Рис. 2.92. Запуск командного файла с помощью команды qsub

Шаг 39. Запуск программы *Xming*

Программа *Xming* используется в качестве оболочки при работе в графическом режиме. Для запуска программы *Xming* необходимо на локальном компьютере выполнить команду

Пуск → *Программы* → *Xming* → *Xming*

В результате выполнения шагов 37, 38 и 39 на экране локального компьютера появится окно программного комплекса *FINE™/Turbo*, запущенного в графическом режиме на суперкомпьютере «Сергей Королёв» (рис. 2.93). Как видно, интерфейс программного комплекса *FINE™/Turbo*, запущенного на суперкомпьютере, ничем не отличается от интерфейса программного комплекса *FINE™/Turbo* на локальном компьютере.

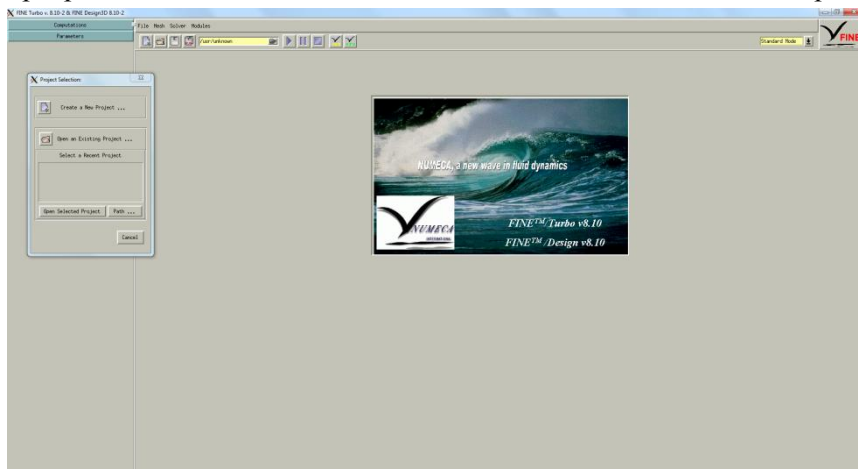


Рис. 2.93. Окно программного комплекса FINE™/Turbo, запущенного в графическом режиме на суперкомпьютере «Сергей Королёв»

Шаг 40. Запуск модуля *AutoGrid™* в графическом режиме на суперкомпьютере «Сергей Королёв»

Для запуска модуля *AutoGrid™* в графическом режиме на суперкомпьютере «Сергей Королёв» необходимо вначале запустить

в графическом режиме программный комплекс выполнить шаги 37, 38 и 39. После в окне программного комплекса *FINE™/Turbo*, запущенного в графическом режиме на суперкомпьютере, выполнить команду

ГМ → *Modules* → *AutoGrid5*

В результате на экране локального компьютера появится окно модуля *AutoGrid™*, запущенного в графическом режиме не суперкомпьютере «Сергей Королёв» (рис. 2.94). Как видно, интерфейс модуля *AutoGrid™*, запущенного на суперкомпьютере, ничем не отличается от интерфейса модуля *AutoGrid™* на локальном компьютере.

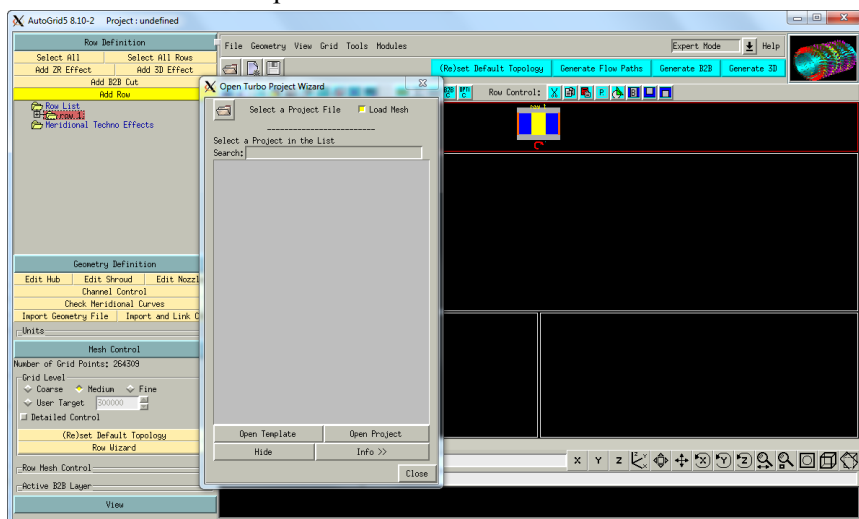


Рис. 2.94. Окно программного комплекса *FINE™/Turbo*, запущенного в графическом режиме на суперкомпьютере «Сергей Королёв»

Соответственно, после запуска программных комплексов *AutoGrid™* и *FINE™/Turbo* в графическом режиме на суперкомпьютере для подготовки расчётной модели необходимо выполнить шаги 2 – 21 и 23 – 35 данного методического пособия.

Ещё раз стоит отметить, что алгоритм подготовки расчётной модели с использованием графического режима на суперкомпьютере ничем не отличается от алгоритма подготовки расчётной модели на локальном компьютере.

Шаг 36 (копирование проекта на суперкомпьютер) при подготовке расчётной модели в графическом режиме на суперкомпьютере выполнять нет необходимости, поскольку проект автоматически будет сохранён в рабочую директорию пользователя на суперкомпьютере на шаге 35.

3. РАСЧЁТ ЧИСЛЕННОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА В ТУРБОМАШИНЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РЕСУРСОВ СУПЕРКОМПЬЮТЕРА «СЕРГЕЙ КОРОЛЕВ»

Как было отмечено выше, наиболее эффективно использовать ресурсы суперкомпьютера «Сергей Королёв» на стадии расчёта численной модели. Выполнять расчёт численной модели на суперкомпьютере «Сергей Королёв» возможно двумя способами. Первый способ подразумевает запуск расчёта «с командной строки», то есть без использования графического режима. Второй способ – с использованием графического режима. У каждого из этих способов есть свои достоинства и недостатки. Первый способ (запуск «с командной строки») является более универсальным и позволяет производить распараллеливание задачи до 128 ядер (максимально возможное количество, определяемое имеющейся лицензией у СГАУ). Вместе с тем, данный способ является довольно сложным. Второй способ (запуск с использованием графического режима) является довольно простым и быстрым, но позволяет проводить распараллеливание задача только в рамках одного нода (максимум на 16 ядер). Вместе с тем, алгоритм запуска задачи любым из двух способов является универсальным и состоит из двух шагов. Первый шаг – подготовка задачи и её разделение, второй шаг – запуск задачи на расчёт.

3.1. Расчёт численной модели с помощью командной строки

Шаг 41. Подготовка к расчёту *run* – файлов расчёту. Как отмечалось на шаге 35 (сохранение проекта), все настройки расчётной модели (информация о сетке, граничные условия, настройки решателя и т.д.) содержатся в *run* – файле. Имена *run* – файлов соответствуют названию проекта и названию настраиваемой в проекте расчётной точке. Например, созданный в данном примере был сохранён под именем *Turbomachine_Paralel*. В данном проекте был настроен расчёт под именем *computation_1*. Следовательно, такой расчётной точке соответствует *run* – файл с именем *Turbomachine_Paralel_computation_1.run*. Данный *run* – файл содержится внутри одноимённой папки *Turbomachine_Paralel_computation_1*, которая, в свою очередь, находится внутри папки всего проекта *Turbomachine_Paralel*. Сама папка проекта находится в рабочей директории пользователя на суперкомпьютере. В данном примере это */home/popov*. Таким образом, полный путь к *run* – файлу расчётной модели в данном примере

/home/popov/Turbomachine_Paralel/Turbomachine_Paralel_computation_1/Turbomachine_Paralel_computation_1.run

Для того чтобы выполнить редактирование *run* – файла расчётной модели необходимо:

1. Запустить программу *WinSCP* на локальном компьютере при помощи команды

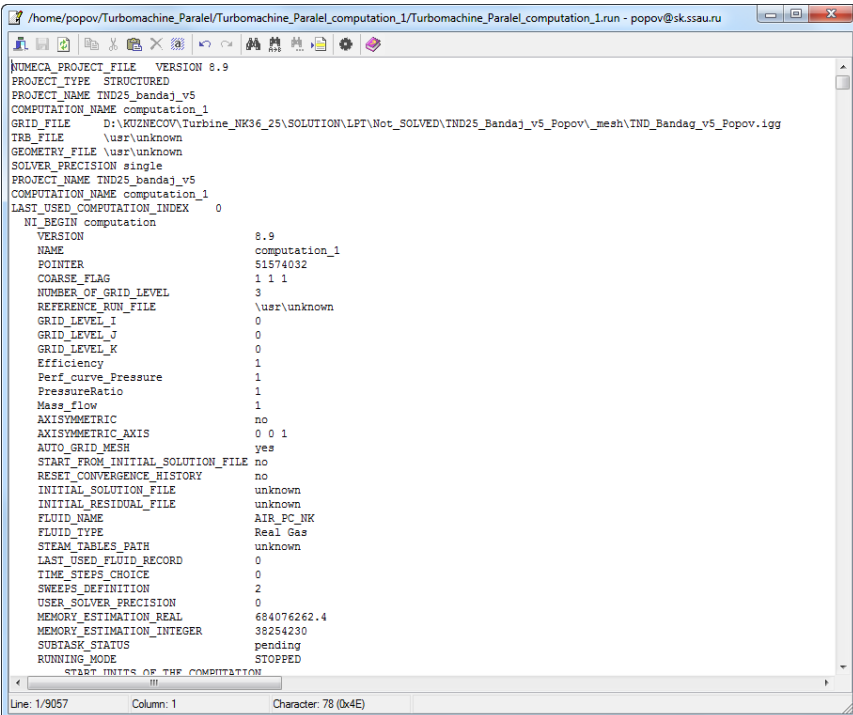
Пуск → Программы → WinSCP → WinSCP

2. Открыть *run* – файл расчётной модели на суперкомпьютере (правое окно *WinSCP*). Полный путь к *run* – файлу имеет следующий вид:

/home/popov/Turbomachine_Paralel/Turbomachine_Paralel_computation_1/Turbomachine_Paralel_computation_1.run


Для открытия папок и файлов в программном комплексе *WinSCP* необходимо дважды кликнуть по ним левой кнопкой мышки.

В результате в окне редактирования (рис. 3.1) откроется необходимый *run* – файл.



```
NUMECA_PROJECT_FILE VERSION 8.9
PROJECT_TYPE STRUCTURED
PROJECT_NAME IND25_bandaJ_v5
COMPUTATION_NAME computation_1
GRID_FILE D:\KUZNECOV\Turbine_NK36_25\SOLUTION\LPT\Not_SOLVED\IND25_BandaJ_v5_Popov\mesh\TND_BandaJ_v5_Popov.igg
TRB_FILE \usr\unknown
GEOMETRY_FILE \usr\unknown
SOLVER_PRECISION single
PROJECT_NAME IND25_bandaJ_v5
COMPUTATION_NAME computation_1
LAST_USED_COMPUTATION_INDEX 0
NI_BEGIN computation
VERSION 8.9
NAME computation_1
POINTER 51574032
COARSE_FLAG 1 1 1
NUMBER_OF_GRID_LEVEL 3
REFERENCE_RUN_FILE \usr\unknown
GRID_LEVEL_I 0
GRID_LEVEL_J 0
GRID_LEVEL_K 0
Efficiency 1
Perf_curve_Pressure 1
PressureRatio 1
Mass_flow 1
AXISYMMETRIC no
AXISYMMETRIC_AXIS 0 0 1
AUTO_GRID_MESH yes
START_FROM_INITIAL_SOLUTION_FILE no
RESET_CONVERGENCE_HISTORY no
INITIAL_SOLUTION_FILE unknown
INITIAL_RESIDUAL_FILE unknown
FLUID_NAME AIR_PC_NK
FLUID_TYPE Real Gas
STEAM_TABLES_PATH unknown
LAST_USED_FLUID_RECORD 0
TIME_STEPS_CHOICE 0
SWEEPS_DEFINITION 2
USER_SOLVER_PRECISION 0
MEMORY_ESTIMATION_REAL 684076262.4
MEMORY_ESTIMATION_INTEGER 38254230
SUBTASK_STATUS pending
RUNNING_MODE STOPPED
START UNITS OF THE COMBINATION
III
Line: 1/9057 Column: 1 Character: 78 (0x4E)
```

Рис. 3.1. Окно редактирования файла в программе *WinSCP*

3. В открытом файле необходимо заменить все символы «\» на символы «/». Выполнить данную операцию возможно с использованием команды «найти и заменить». Вызвать данную команду можно с помощью кнопки  главного меню редактора файлов программы *WinSCP*.

4. Заменить строку библиотек с «*C:\NUMECA_SOFTWARE\Fine89_1\bin\THERMO_BALAK*» на «*/usr/numeca/fine89_3/COMMON/THERMO_BALAK*».
5. В пятой строке *run* – файла необходимо указать путь к сетке в директории на суперкомпьютере. Папка с сеткой *_mesh* лежит внутри скопированной папки проекта *Turbomachine_Paralel*. Соответственно, путь к файлу сетки на суперкомпьютере имеет вид */home/popov/Turbomachine_Paralel/_mesh*, а пятая строка *run* - файла должна иметь выглядеть следующим образом:

GRID_FILE /home/popov/Turbomachine_Paralel/_mesh /TND_Bandag_v5_Popov.igg

На этом подготовка файла расчётной модели к запуску расчёта на суперкомпьютере закончена. На следующем шаге необходимо выполнить распараллеливание задачи.

Шаг 45. Распараллеливание задачи.

Перед запуском расчёта в программном комплексе *NUMECA* необходимо провести её распараллеливание. В результате данной операции создаётся специальный файл, в котором указываются имена процессов, на которых будет производиться расчёт.

Для распараллеливания задачи необходимо

1. Запустить программу *PuTTY* на локальном компьютере

Пуск → Программы → PuTTY → PuTTY

В окне программы *PuTTY* ввести имя пользователя и пароль.

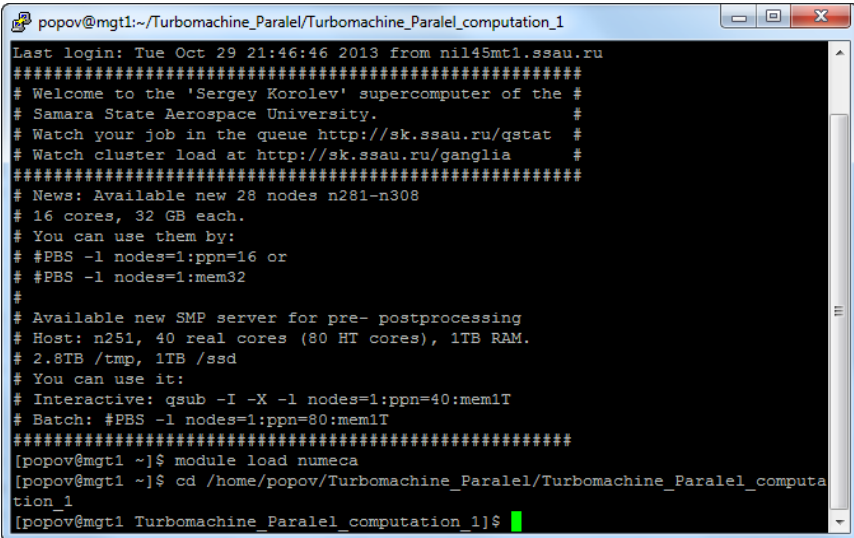
2. В программе *PuTTY* перейти в папку, в которой лежит *run*-файл решаемой задачи. Данная процедура выполняется при помощи следующей команды:

cd <путь к файлу на суперкомпьютере>

В данном примере эта команда будет иметь следующий вид:

```
cd /home/popov/Turbomachine_Paralel/Turbomachine_
Paralel_computation_1
```

После этого поменяется вид приглашения операционной системы в программе *PuTTY* с [popov@mgt1 ~] на [popov@mgt1 Turbomachine_Paralel_computation_1] (рис.3.2).



```
popov@mgt1:~/Turbomachine_Paralel/Turbomachine_Paralel_computation_1
Last login: Tue Oct 29 21:46:46 2013 from nil45mt1.ssau.ru
#####
# Welcome to the 'Sergey Korolev' supercomputer of the #
# Samara State Aerospace University. #
# Watch your job in the queue http://sk.ssau.ru/qstat #
# Watch cluster load at http://sk.ssau.ru/ganglia #
#####
# News: Available new 28 nodes n281-n308
# 16 cores, 32 GB each.
# You can use them by:
# #PBS -l nodes=1:ppn=16 or
# #PBS -l nodes=1:mem32
#
# Available new SMP server for pre- postprocessing
# Host: n251, 40 real cores (80 HT cores), 1TB RAM.
# 2.8TB /tmp, 1TB /ssd
# You can use it:
# Interactive: qsub -I -X -l nodes=1:ppn=40:mem1T
# Batch: #PBS -l nodes=1:ppn=80:mem1T
#####
[popov@mgt1 ~]$ module load numeca
[popov@mgt1 ~]$ cd /home/popov/Turbomachine_Paralel/Turbomachine_Paralel_computa
tion_1
[popov@mgt1 Turbomachine_Paralel_computation_1]$
```

Рис. 3.2. Смена приглашения в окне программы *PuTTY*

3. Выполнить распараллеливание задачи. На данном этапе уже необходимо принять решение, на каких узлах будет выполняться расчёт.

При распараллеливании задачи необходимо учитывать следующие рекомендации:

- 1) Для расчётов использовать только однотипные узлы.
- 2) Желательно использовать ноды с двенадцатью процессорами и памятью 96Гб или с шестнадцатью процессорами и памятью 32Гб.

- 3) Оптимально, чтобы на один процессор приходилось около 300 тысяч элементов расчётной сетки. Распараллеливание выполняется с помощью следующей команды:

```
fine810_2 -batch -partition 0.8 -parallel <имя run-файла.run>  
<количество нодов> n1 <кол-во процессоров-1 на 1 ноде>  
n<кол-во процессоров на 2 ноде> ... n i <кол-во процессоров  
на i-ом ноде> -print
```

В данном примере предполагается выполнение расчёта на двух нодах с двенадцатью процессорами и памятью 96Гб. Поэтому команда для распараллеливания будет иметь следующий вид:

```
fine810_2 -batch -partition 0.8 -parallel  
Turbomachine_Paralel_computation_1.run 2 n1 11 n2 12 -print
```

В результате выполнения данной команды задача будет распараллелена, а в рабочей папке появится два файла с расширением **.p4pg* и **.batch* (рис. 3.3). В данных файлах содержится информация о выполненном распараллеливании, которая будет использована при запуске задачи.

После этого можно приступить непосредственно к запуску задачи на расчёт.

Шаг 46. Запуск задачи на расчёт. Запуск задачи на расчёт производится с помощью *pbs*-файла. Данный файл необходимо создавать в папке с *run* - файлом (в данном примере */home/popov/Turbomachine_Paralel/Turbomachine_Paralel_computation_1*). Содержание *pbs* файла следующее:

```
#!/bin/bash  
#  
#PBS -N <имя задачи (как она будет отображаться в очереди)>  
#PBS -l nodes=<кол-во нодов>:ppn=<кол-во процессоров в нодах>  
#PBS -l walltime=<максимальное время счёта>
```

```
#PBS -l software=Solver
```

```
cd $PBS_O_WORKDIR
```

```
module load openmpi-1.4.5 numeca
```

```
euranusTurbo_parallel810_2 <имя_рун-файла>.run -np <суммарное  
количество процессов> -hostfile $PBS_NODEFILE -batch -par -print > logfile
```

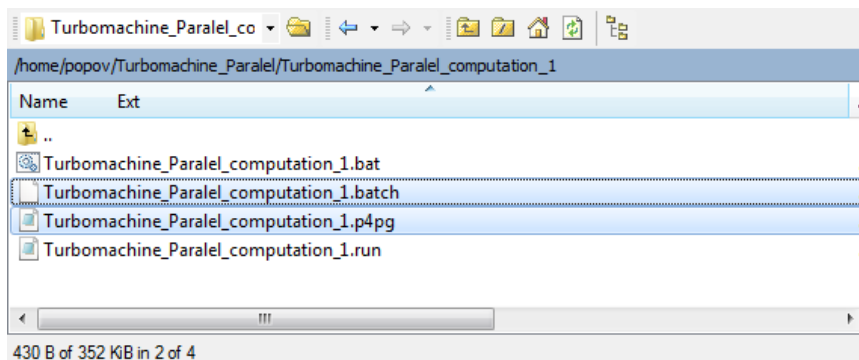


Рис. 3.3. Файлы с разрешением .p4pg и .batch

В данном примере запуск задачи производится на двух нодах с двенадцатью процессорами и памятью 96Гб. Поэтому, содержание *pbs* – должно быть следующее:

```
#!/bin/bash
```

```
#
```

```
#PBS -N Turbomachine_Paralel_computation_1
```

```
#PBS -l nodes2:ppn=12:bigmem
```

```
#PBS -l walltime=12:00:00
```

```
#PBS -l software=Solver
```

```
cd $PBS_O_WORKDIR
```

```
module load openmpi-1.4.5 numeca
```

```
euranusTurbo_parallel810_2 Turbomachine_Paralel_computation_1.run -np 24 -  
hostfile $PBS_NODEFILE -batch -par -print > logfile
```

Подробно процесс создания командных *pbs* – файлов в программе *WinSCP* описан на шаге 37 данного методического

пособия. Название файла может быть любым. В данном примере это *run_new3.pbs*.

Для запуска на расчёт задачи с помощью созданного *pbs*-файла в программе *PuTTY* необходимо выполнить следующую команду:

```
qsub <имя созданного pbs-файла>.pbs
```

В данном примере:

```
qsub run_new3.pbs
```

После начала расчёта в рабочей директории будет создано порядка 30 различных файлов (рисунок 3.4), однако, следует обратить внимание на 2 файла со следующими именами: *logfile* и *<имя задачи>.res* (в данном примере *Turbomachine_Paralel_computation_1.res*).

В *logfile* отображается информация в тестовом виде о ходе решения (рисунок 3.5). Аналогичная информация отображается в окне *Task Manager* при запуске задачи на локальном компьютере. В свою очередь *res*-файл в процессе расчёта может быть сохранён на рабочий компьютер и загружен в программу *Numeca Monitor* (рисунок 3.6) для отображения информации о ходе решения в графическом виде (невязки, интегральные параметры).

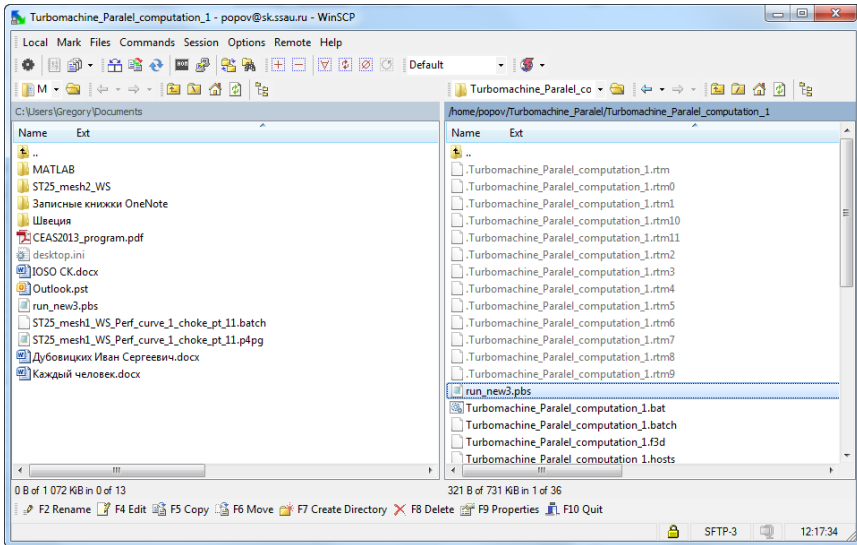


Рис. 3.4. Рабочая директория после запуска задачи

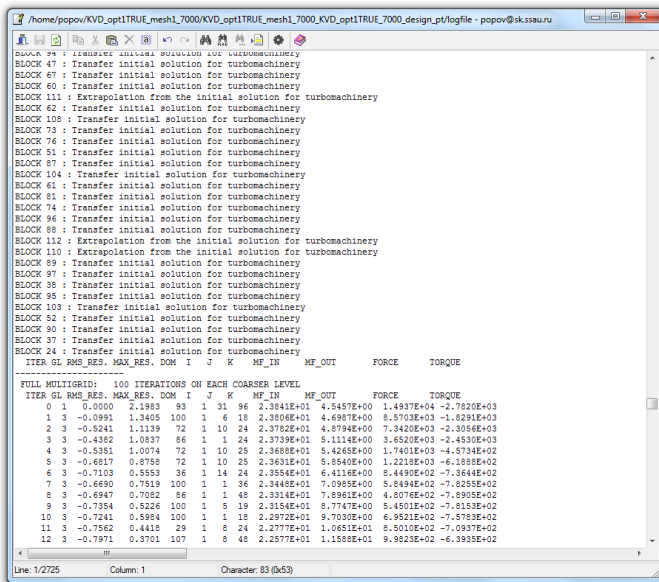


Рис. 3.5. Фрагмент файла logfile

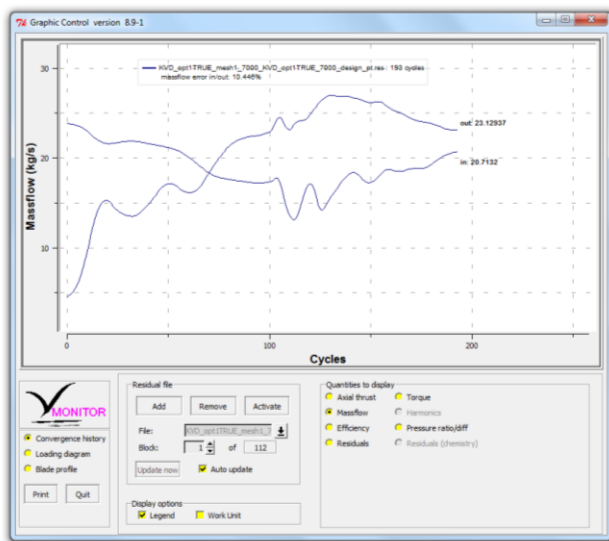


Рис. 3.6. Окно программы Monitor

После завершения процесса расчёта в рабочей директории будет создан *.mf-файл, в котором будет содержаться информация об интегральных параметрах турбомшины, а также файл с расширением *.cgns, который можно использовать для более детального анализа результатов расчёта (структуры потока, полей распределения параметров) в программе CFview.

3.2. Расчёт численной модели с помощью графического интерфейса на суперкомпьютере «Сергей Королёв»

Для запуска задачи с помощью графического режима на суперкомпьютере «Сергей Королёв» необходимо выполнить следующие шаги.

Шаг 47. Запуск в графическом режиме на суперкомпьютере «Сергей Королёв» программного комплекса FINE™/Turbo. Для проведения расчётов настоятельно рекомендуется запускать программный комплекс FINE™/Turbo в графическом режиме на

нодах с двенадцатью процессорами и памятью 96Гб или с шестнадцатью процессорами и памятью 32Гб. Процедура запуска программного комплекса *FINE™/Turbo* в графическом режиме подробно расписана на шагах 37 – 39 данного методического пособия.

Шаг 48. Открытие и пересохранение проекта в программном комплексе *FINE™/Turbo*, запущенном в графическом режиме на суперкомпьютере. Данный шаг необходим для подготовки проекта к расчёту (аналогичен шагу 41 при запуске из командной строки).

Для того чтобы открыть проект в программном комплексе *FINE™/Turbo*, запущенном в графическом режиме на суперкомпьютере, необходимо выполнить команду

ГМ →File → Open

В правой части появившегося окна *Open a project file* (рис. 3.7) необходимо указать путь к проекту на суперкомпьютере. Как было отмечено на шаге 35, файл проекта имеет расширение **.iec* и лежит в папке проекта. Соответственно, путь к нему на суперкомпьютере будет иметь следующий вид */home/popov/Turbomachine_Paralel*.левой части окна необходимо выбрать файл проекта. В данном примере это *Turbomachine_Paralel.iec*. После чего следует нажать на кнопку *OK* окна *Open a project file*.

В результате в окне программного комплекса *FINE™/Turbo* откроется проект *Turbomachine_Paralel.iec* (рис. 3.8), который до этого был сохранён на локальном компьютере.

Для пересохранения *run* – файлов необходимо выполнить команду

ГМ →File → Save All Run Files

Для пересохранения проекта необходимо выполнить команду

ГМ →File → Save

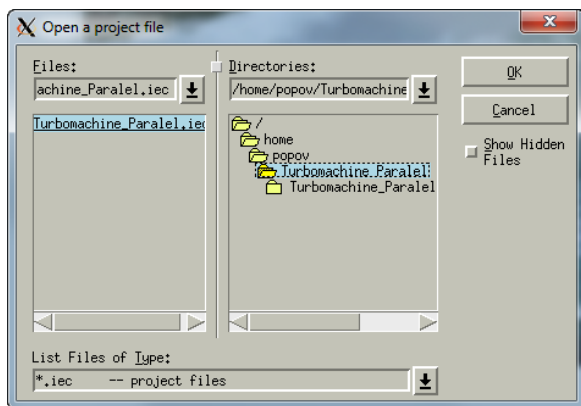


Рис. 3.7. Окно программы *Open a project file*

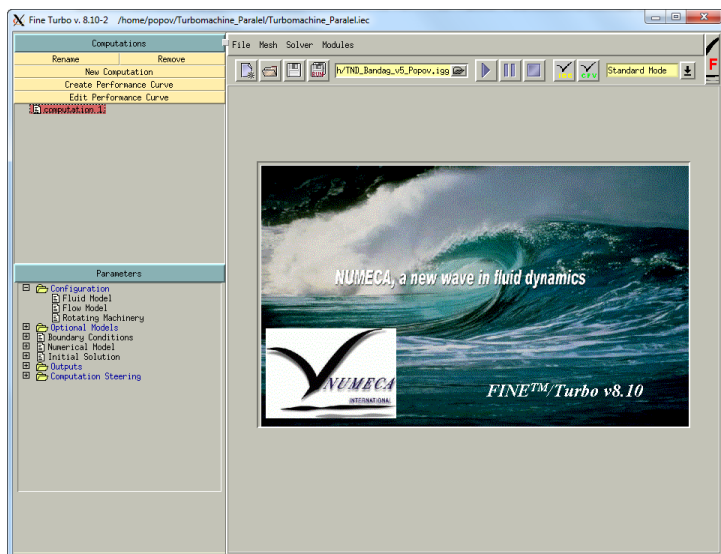


Рис. 3.8. Открытый на суперкомпьютере проект *Turbomachine_Paralel.iec*

После можно приступить к распараллеливанию задачи и запуска её на расчёт.

Шаг 49. Распараллеливание задачи. При работе в графическом режиме распараллеливание и запуск задачи выполняется в модуле *Task Manager*. Для запуска данного модуля необходимо в программном комплексе *FINE™/Turbo*, запущенном в графическом режиме на суперкомпьютере, необходимо выполнить команду

GM →Modules →Task Manager

В результате на экране появится окно модуля *Task Manager*, запущенного в графическом режиме на суперкомпьютере (рис. 3.9).

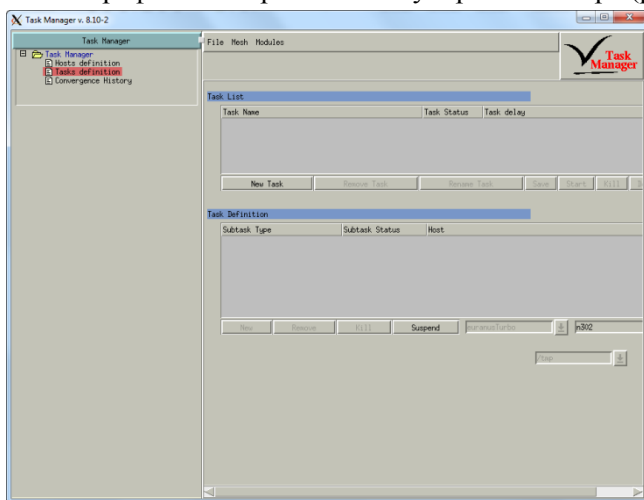
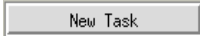


Рис. 3.9. Окно модуля *Task Manager*

Для распараллеливания и запуска задачи необходимо:

1. Нажать на кнопку *New Task* (новая задача)  в окне *Task Manager*. В результате в окне *Task List* (список задач) появится задача *task 1* (рис. 3.10).

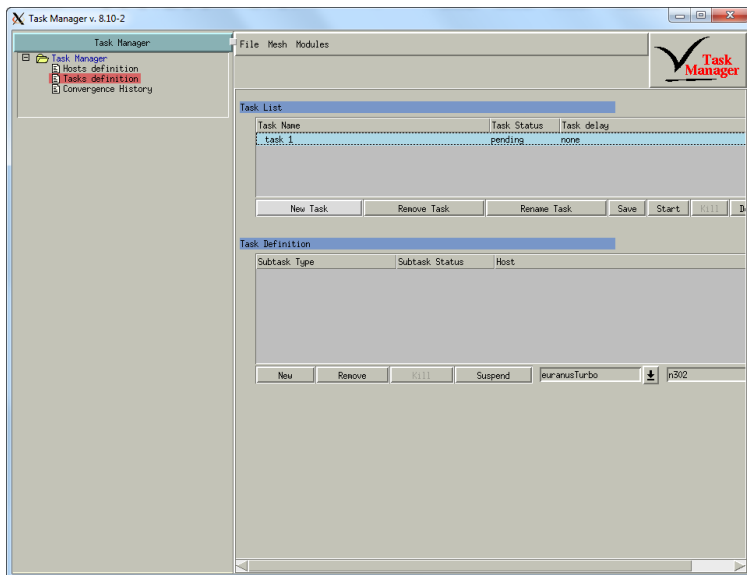




Рис. 3.10. Окно модуля Task Manager после добавления новой задачи

2. Нажать на кнопку *New* (новая подзадача)  под окном *Task Definition* (определение задачи). В результате в окне *Task Definition* появится новая подзадача *euranusTurbo*, а окно модуля *Task Manager* примет вид, показанный на (рис. 3.11).

Внизу модуля *Task Manager* появилось меню (рис. 3.12), с помощью которого выполняется подготовка задачи к распараллеливанию.

3. В меню подготовки задачи к распараллеливанию в окне *Run File* необходимо указать *run*-файл расчётной модели. Для этого необходимо нажать левой кнопкой мышки на кнопку «открыть»  справа от окна. В результате на экране появится окно *Select a run file* (выбор *run*-файла) (рис. 3.13). В правой части данного окна необходимо указать путь к *run*-файлу. В данном примере это */home/popov/Turbomachine_Paralel/Turbomachine_Paralel_co*

mputation_1, а в левой части окна указать *run*-файл. В данном примере это *Turbomachine_Parallel_computation_1.run*. Нажать на кнопку *OK*.

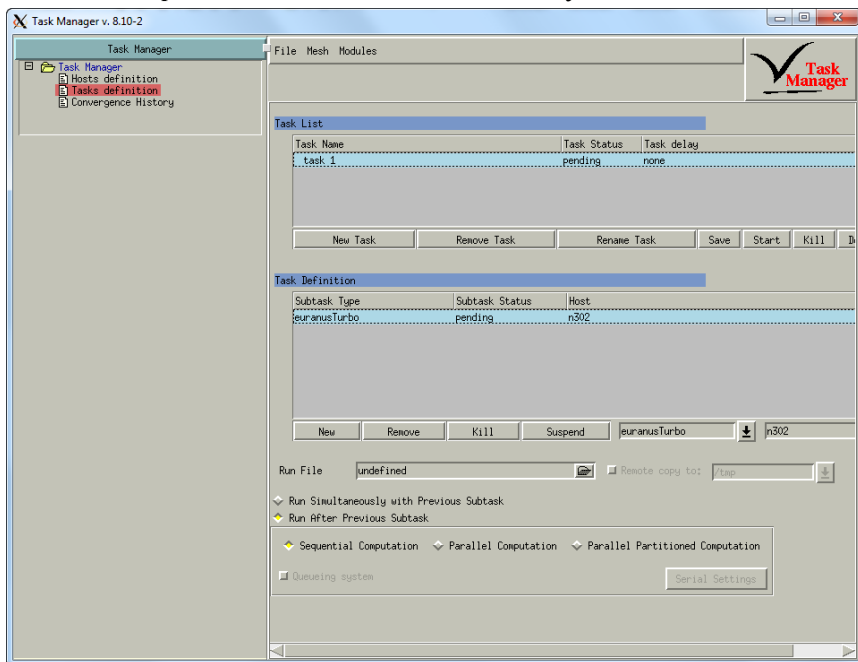


Рис. 3.11. Окно модуля *Task Manager* после добавления новой подзадачи

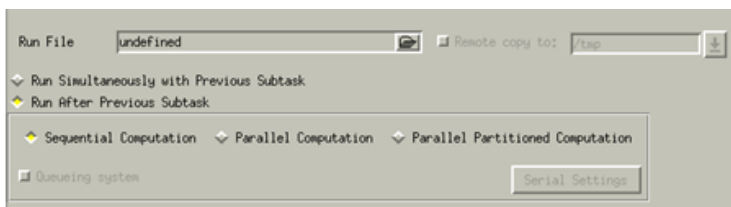


Рис. 3.12. Меню подготовки задачи к распараллеливанию

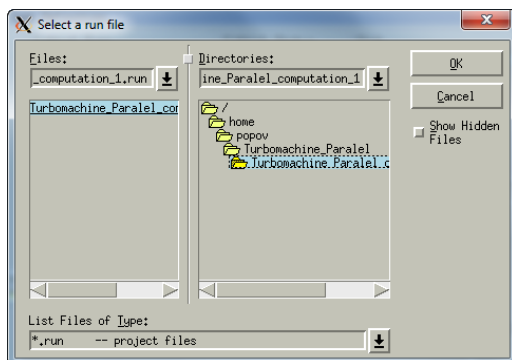


Рис. 3.13. Меню *Select a run file*

4. В меню подготовки задачи к распараллеливанию необходимо выбрать тип распараллеливания *Parallel Partitioned Computation* (рисунок 3.14).

После выполнения действий 3 и 4 меню подготовки задачи к распараллеливанию должно иметь вид, показанный на (рис. 3.15).

5. Для того чтобы приступить непосредственно к распараллеливанию задачи необходимо нажать на кнопку *Parallel Partioned Settings* (подготовка задачи к распараллеливанию) **Parallel Partioned Settings** меню подготовки задачи к распараллеливанию. В результате на экране появится меню *Flow Solver – Parallel Partioned Settings* (рис. 3.16).

В данном окне необходимо указать, на сколько процессоров будет распараллеливаться задача. Стоит помнить, что при работе в графическом режиме задача может распараллеливаться только в пределах нода, на котором запущена задача, а количество процессоров, на которое будет произведено распараллеливание должно быть на 1 меньше, чем процессоров в ноде. Так, в данном примере задача была запущена на ноде с 12 процессорами.

Следовательно, задачу нужно распараллеливать на 11 процессоров. Данная несогласованность вызвана необходимостью сохранения свободных ресурсов для управляющего процесса.

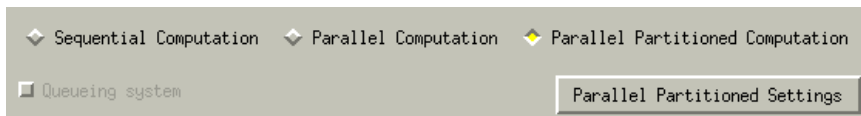


Рис. 3.14. Выбор метода распараллеливания *Parallel Partitioned Computation*

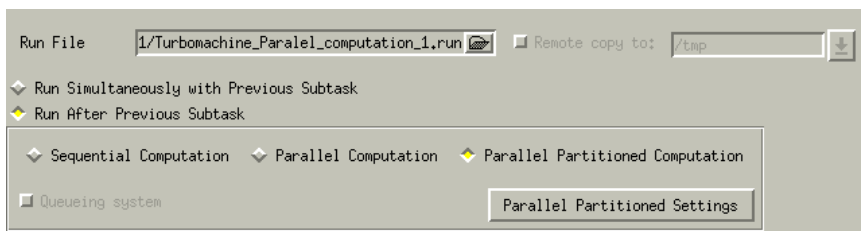


Рис. 3.15. Меню подготовки задачи к распараллеливанию после определения *run* – файла и выбора метода распараллеливания

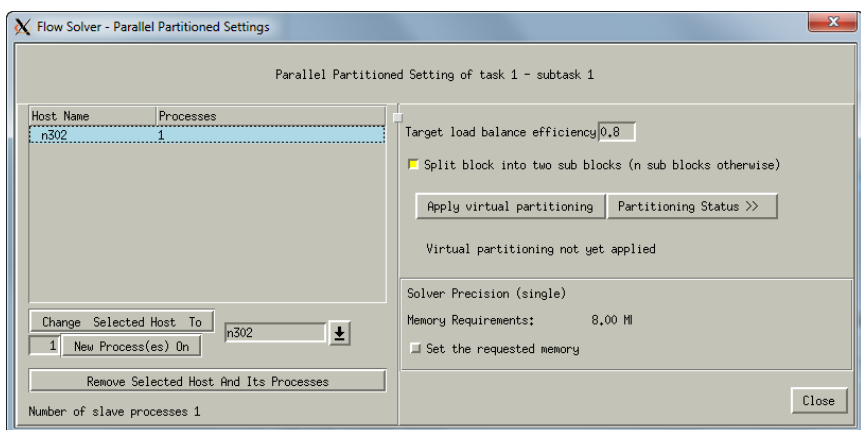
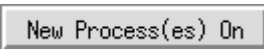


Рис. 3.16. Меню *Flow Solver – Parallel Partitioned Settings*

Добавлять процессоры необходимо при помощи кнопки *New Process(es) On* . Добавлять необходимо до тех пор, пока количество добавленных

процессоров *Number of slave process* составит 11. Также число 11 должно появиться в таблице *Host Name – Process* (рис. 3.17).

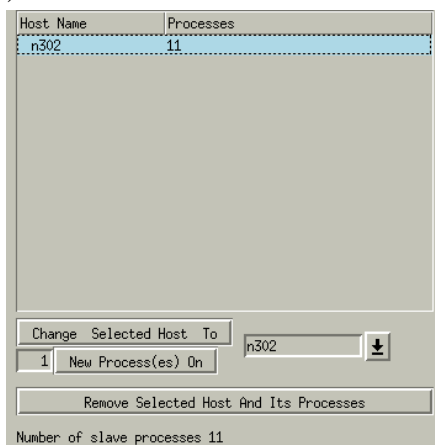


Рис. 3.17. Таблица *Host Name – Process*

Для распараллеливания задачи необходимо нажать на кнопку *Apply virtual partitioning* **Apply virtual partitioning** в окне *Flow Solver – Parallel Partitioned Settings*. В результате окно *Flow Solver – Parallel Partitioned Settings* примет вид, показанный на (рис. 3.18).

После этого меню *Flow Solver – Parallel Partitioned Settings* необходимо закрыть.

Шаг 50. Запуск задачи. Для запуска задачи на расчёт необходимо нажать на кнопку *Start* **Start** в окне модуля *Task Manager*. В результате на экране появится окно *FINE TaskManager* (рис. 3.19), в котором будет отражаться процесс решения задачи. После завершения расчёта на экран будет выведено сообщение, показанное на рис. 3.20.

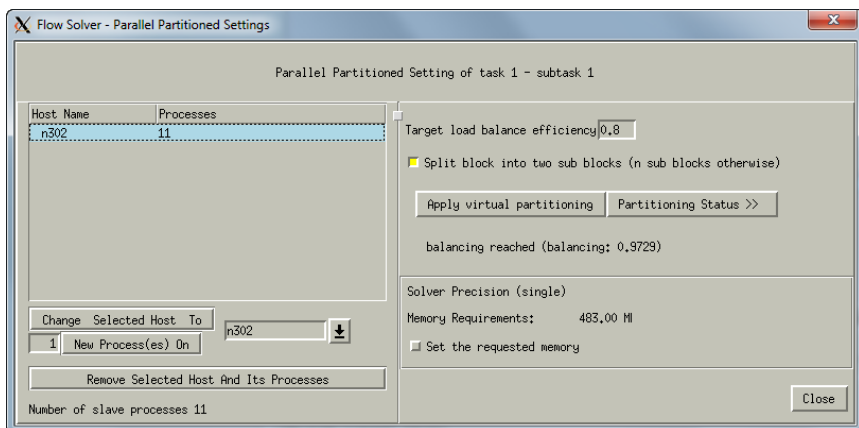


Рис. 3.18. Окно *Flow Solver – Parallel Partitioned Settings* после распараллеливания задачи

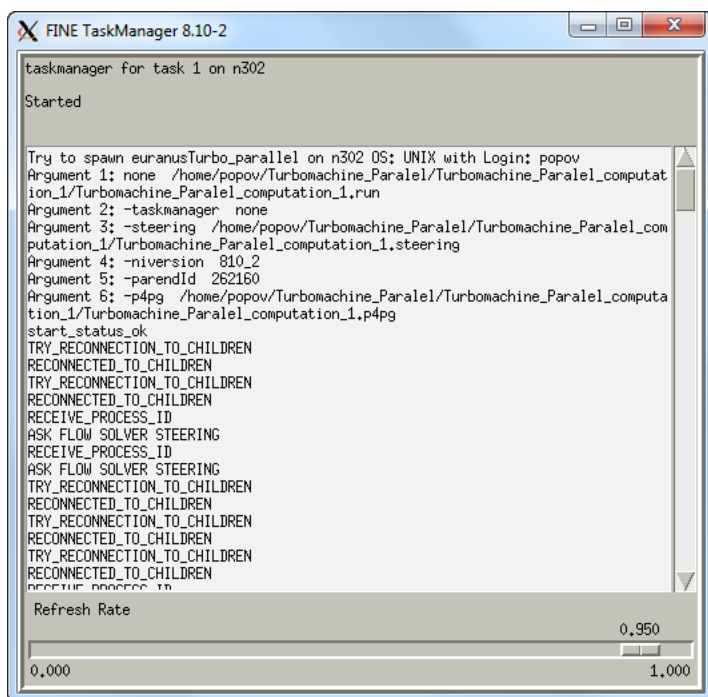


Рис. 3.19. Окно с информацией о процессе решения задачи

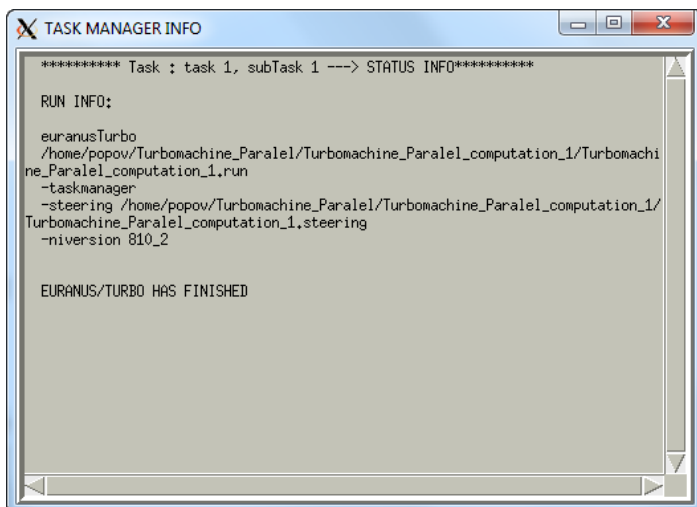


Рис. 3.20. Сообщение о завершении расчёта

4. ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ РАСЧЕТА ТЕЧЕНИЯ В ТУРБОМАШИНЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РЕСУРСОВ СУПЕРКОМПЬЮТЕРА «СЕРГЕЙ КОРОЛЕВ»

Последним этапом решения газодинамических задач с помощью *CFD* программ является обработка результатов расчета. Грамотное использование постпроцессора позволяет оценить адекватность сделанных расчетов, увидеть структуру потока и собрать исчерпывающие сведения о нем. Умение правильно и полно представить полученные результаты позволяет существенно облегчить анализ картины течения и поиск путей ее улучшения.

При обработке результатов расчёта на локальном компьютере необходимо после завершения расчётов скопировать папку с проектом на локальный компьютер при помощи программы *WinSCP*. Если обработка результатов будет выполняться с использованием суперкомпьютера, этого делать не надо.

Визуализация результатов расчета в программном комплексе *NUMECA* осуществляется в программе *CFView*. Она по своим возможностям схожа с аналогичными модулями других *CFD* программ и позволяет строить поля распределения параметров потока, векторов, линий тока, управлять отображением модели и т.п. Результаты могут быть представлены в виде графиков, текстовых файлов или интегральных значений параметров.

На локальном компьютере модуль *CFView* запускается из меню «Пуск» ОС «*Windows*»:

Пуск → Программы → NUMECA Software → Fine89_1 → CFView.

При работе в графическом режиме на суперкомпьютере модуль *CFView* запускается из окна программного комплекса *FINE™/TURBO* при помощи команды

GM → Modules → CFView

Запуск в графическом режиме программного комплекса *FINE™/TURBO* подробно описан на шагах 37 – 39 данного методического пособия.

Рабочее окно программы *CFView* приведено на (рис. 4.1). Как и в случае *FINE™/TURBO* окно программы состоит из дерева проекта (слева), главного меню (сверху) и графического окна.

Шаг 51. Загрузка файла результатов в программу *CFView*.
После загрузки программы следует прочитать файл результатов расчета с расширением **.run*, записанный в программе *FINE™/TURBO*. Загрузка файла осуществляется с помощью команды:

GM → File → Open Project.

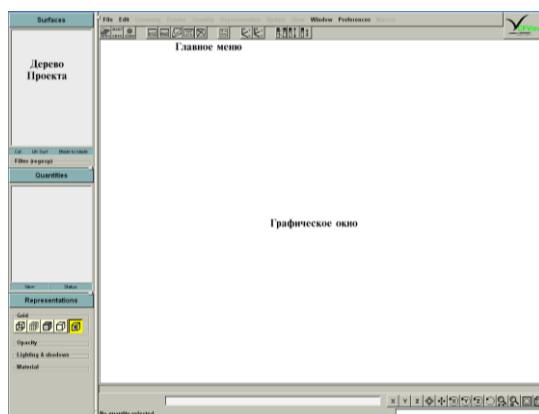



Рис. 4.1. Внешний вид окна программы *CFView*

Внешний вид окна программы после загрузки результатов расчета показан на (рис. 4.2). Обратите внимание, что в дереве проекта появились названия границ расчетной области, а ниже названия вычисленных параметров потока.

Программу *CFView* также можно запустить из программы *FINE™/TURBO* после получения решения с помощью кнопки  в главном меню. При загрузке модуля *CFView* данным способом появится окно *View Results* (рис. 4.3). Если в нем выбрать опцию *View the azimuthal averaged solution*, то модель ступени в модуле будет отображена в меридиональном виде, а параметры получившегося решения будут усреднены в окружном направлении. Если указанную настройку не выполнять, то модель ступени будет загружена в трехмерном виде, как на (рис. 4.2).

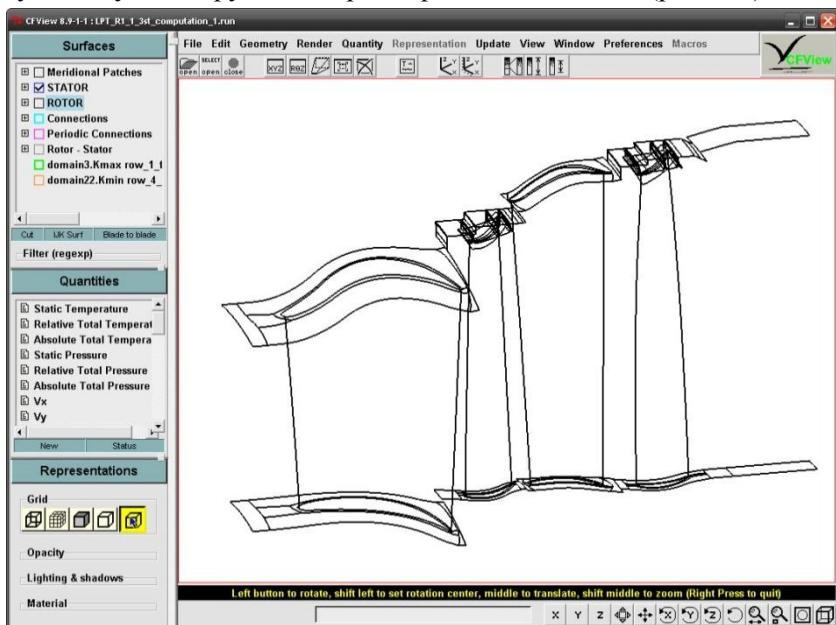


Рис. 4.2. Внешний вид окна программы *CFView* после загрузки результатов расчета

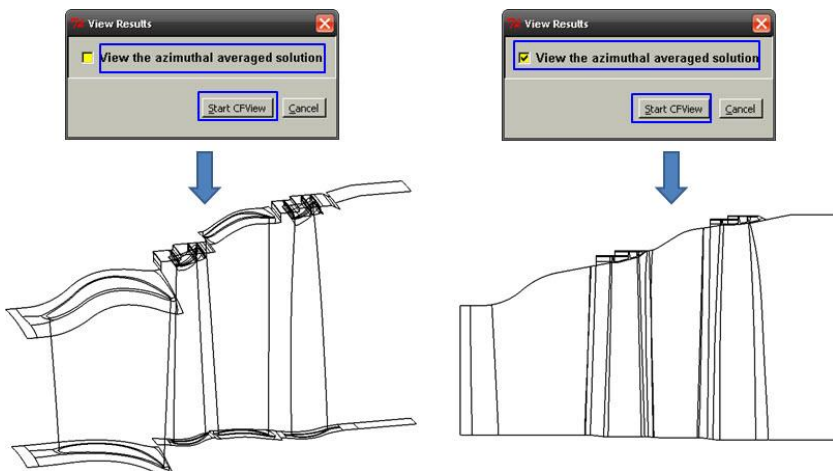


Рис. 4.3. Меню *View Results*

Шаг 52. Построение полей распределения параметров в межлопаточном канале. Для отображения найденного в результате проведенного расчета поля распределения выбранного параметра потока в окружном сечении межлопаточного канала на произвольном радиусе необходимо произвести в программе *CFView* следующие действия:

1. Строится окружное сечение межлопаточного канала, в которой будет отображаться поле изменения выбранного параметра. Для этого необходимо воспользоваться командой:

GM → *Geometry* → *Blade to Blade Surface*.

В результате ее выполнения появится меню *Blade to Blade Surface* (рис. 4.4). В нем, в поле *Surface Type* следует выбрать пункт *Blade to Blade*. Данная настройка задаст то, что будет построена окружное сечение проточной части межлопаточного канала. При этом в поле *S* будет задаваться радиальное расположение сечения. *0* – соответствует втулочному сечению, *1* – периферийному, а *0,5* – среднему.

Если в том же меню выбрать опцию *Cross Stream*, то сечение будет построено поперек межлопаточного канала (перпендикулярно оси вращения), а в поле *S* будет задаваться его положение вдоль оси вращения.

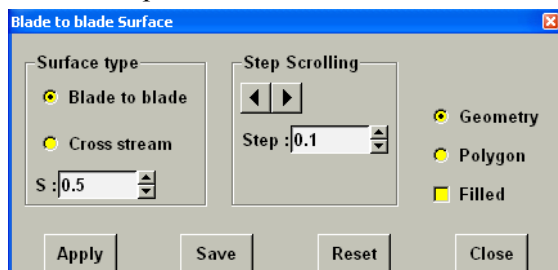




Рис. 4.4. Меню *Blade to Blade Surface*

Задав положение сечения, следует нажать кнопку *Apply*, затем *Save*.

После выполнения указанных действий в поле *Surfaces* в дереве проекта появится новый пункт *CUT1* – это созданная благодаря описанным выше манипуляциям поверхность сечения (рис. 4.5). Ей в случае необходимости можно присвоить любое удобное имя. Для этого на имени следует щелкнуть ПКМ  и выбрать в появившемся меню пункт *Rename*.

2. Для удобства дальнейших действий следует снять галочку напротив имени созданного на шаге 1 сечения (*CUT1*) двойным щелчком ЛКМ .

3. Необходимо изменить раскладку клавиатуры на английскую и нажать клавишу «*b*». Это действие погасит все элементы геометрии, имя которых помечено галочками в дереве проекта (рис. 4.6). Таким образом, из графического окна исчезнет все кроме сечения *CUT1*, выделение которого было отменено ранее. Это действие позволяет скрыть элементы, которые будут затенять поле распределения параметров и мешать его анализу.

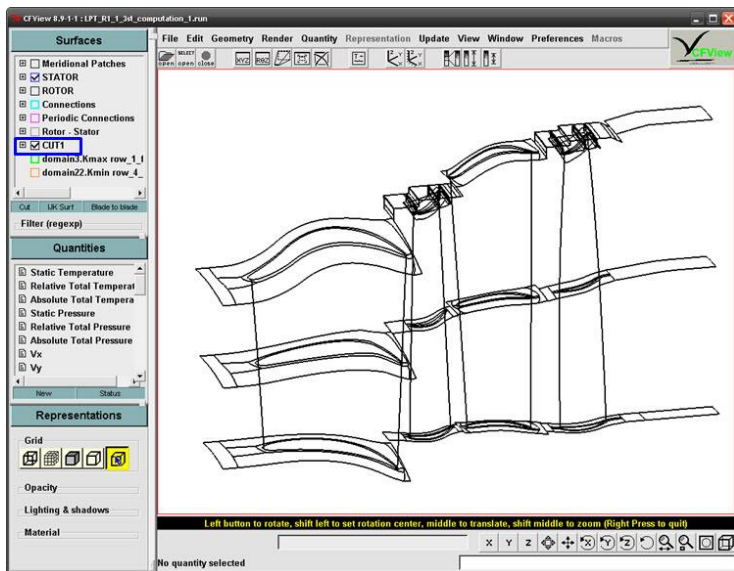


Рис. 4.5. Построение поверхности межлопаточного канала в среднем сечении лопатки

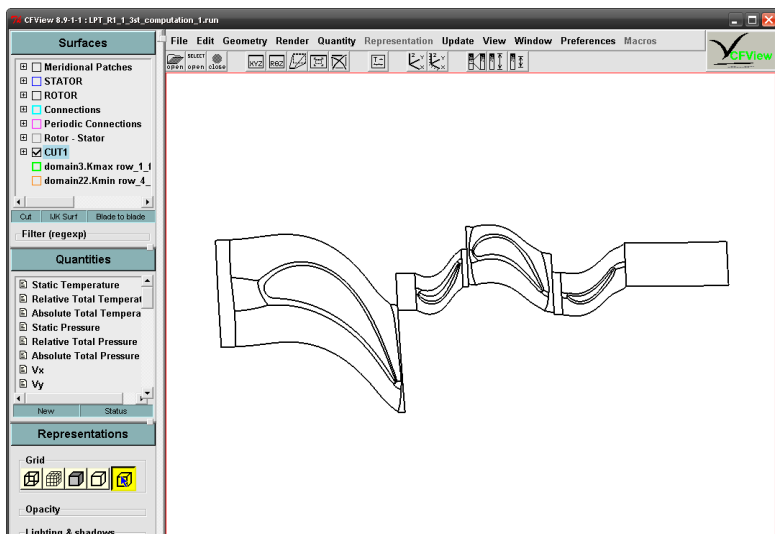




Рис. 4.6. Отображение плоскости межлопаточного канала в среднем сечении





4. Теперь необходимо выбрать сечение, на котором будет строиться поле распределения параметров. Для этого необходимо щелкнуть ПКМ  на имени созданной секущей плоскости (*CUT1*) и в появившемся меню выбрать пункт *Select*. В результате указанное сечение будет выбрано и напротив него вновь появится галочка . Выбор также можно осуществить двойным щелчком ЛКМ  на имени поверхности. Аналогичным образом необходимо снять выделение (галочки) со всех других элементов геометрии кроме интересующего сечения.

5. Для отображения поля распределения параметров следует выбрать наименование переменной в списке *Quantities* в дереве проекта. Например, для построения распределения чисел Маха в абсолютной СК нужно выбрать *Absolute Mach Number* (напротив названия появится галочка зеленого цвета). Запускается процесс построения поля с помощью команды:

FM → *Representation* → *Color Contour* → *Smooth*.

Результат ее выполнения показан на (рис. 4.7).

6. Нажатие клавиши «*b*» (раскладка клавиатуры должна быть английской). Это позволит скрыть границы блоков.

7. Для удобства восприятия информации модель в графическом окне можно развернуть таким образом, чтобы сечение, в котором строится распределение параметров, располагалось примерно параллельно экрану. Для этого можно воспользоваться группой кнопок, находящейся в нижней части окна. Например, после нажатия кнопки  движение мыши с нажатой ЛКМ  вызовет вращение модели, а движение с нажатой СКМ  – перемещение. Нажатие ЛКМ на кнопку  расположит модель таким образом, что она займет весь экран.

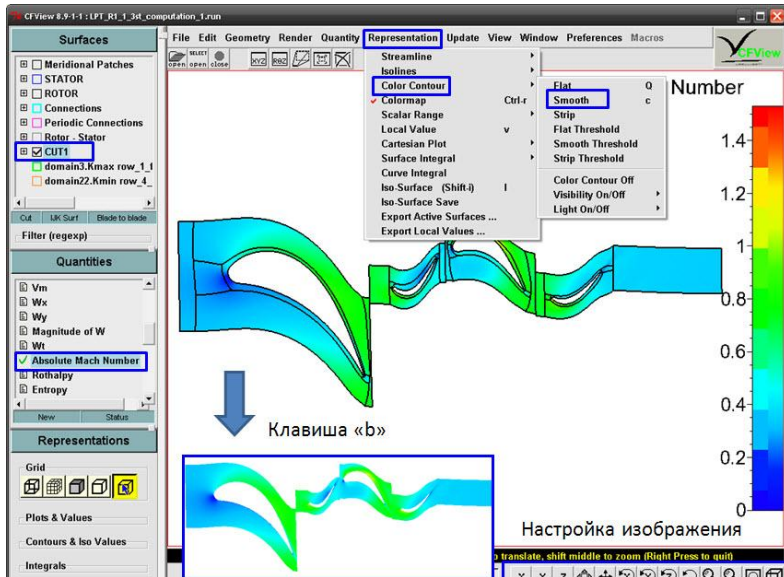


Рис. 4.7. Отображение поля распределения чисел Маха в межлопаточных каналах

Шаг 53. Построение изолиний. Для повышения информативности созданного на предыдущем шаге поля распределения параметров в межлопаточном канале можно наложить на него изображение изолиний. Для этого необходимо выполнить команду:

ГМ → Representation → isolines → isolines.

В результате появится меню *Absolute Mach Number isolines* (рис. 4.8). В нем, в поле *Value*, выбирается число равных интервалов изменения переменной, через которые будут строиться изолинии. В поле *Color* следует выбрать опцию *Uniform*. Сделанный выбор подтверждается нажатием кнопки *Apply*, затем *Close*.

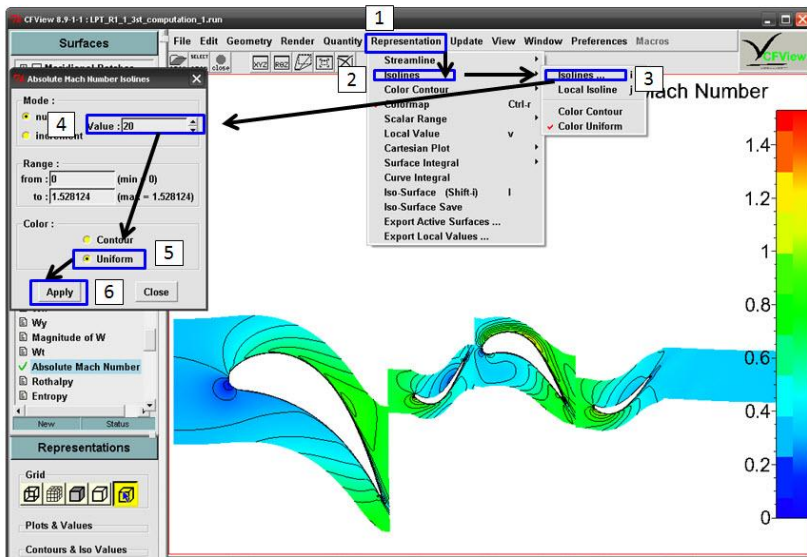


Рис. 4.8. Отображение изолиний на поле распределения чисел Маха

Используя созданную поверхность (*CUTI*) можно отобразить распределение других параметров потока в рассматриваемом сечении, например, поля давлений или температур. Прежде чем это сделать рекомендуется очистить графическое окно от предыдущего поля с помощью команды:

$GM \rightarrow Update \rightarrow Delete \rightarrow All.$

Это делается во избежание наложения полей друг на друга.

Используя последовательность, описанную выше, выбирая разные переменные в списке *Quantities* в дереве проекта можно построить поле изменения любых доступных параметров потока. В качестве иллюстрации на рис. 4.9 и 4.10 приведены поля статических давлений и температур.

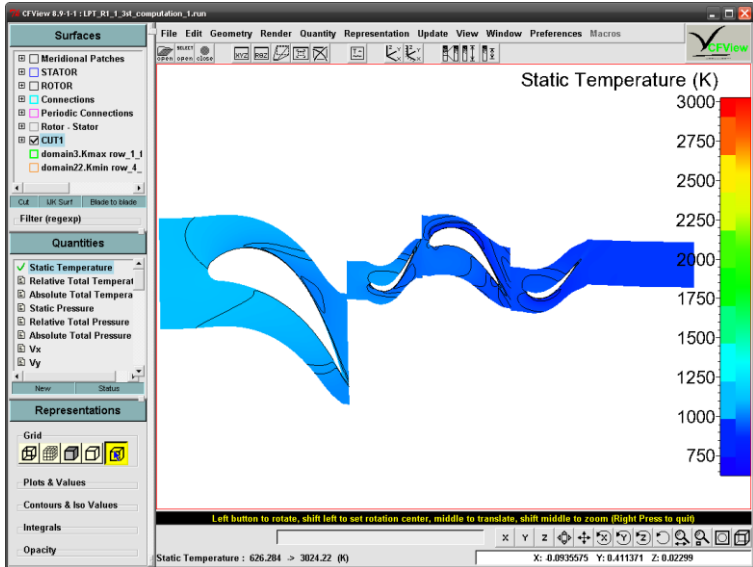


Рис. 4.9. Поле распределения статической температуры в межлопаточном канале

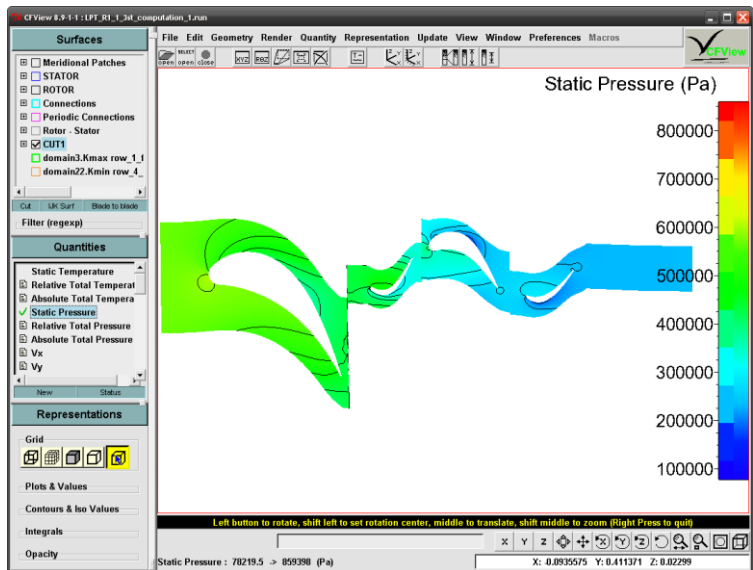


Рис. 4.10. Поле распределения статического давления в межлопаточном канале

Шаг 54. Отображение нескольких межлопаточных каналов в графическом окне. Как видно из рис. 4.7...4.10, по умолчанию в графическом окне изображается только область течения вокруг только одной лопатки. Для повышения информативности полей распределения параметров полезно визуализировать один или более межлопаточных каналов. Для этого следует воспользоваться командой:

ГМ → Geometry → Repetition Number.

После этого в нижней строке окна программы «n» следует выбрать желаемое число копий расчетных моделей в окружном направлении. Затем следует выполнить команду (рис. 4.11):

ГМ → Geometry → Repetition on/of.

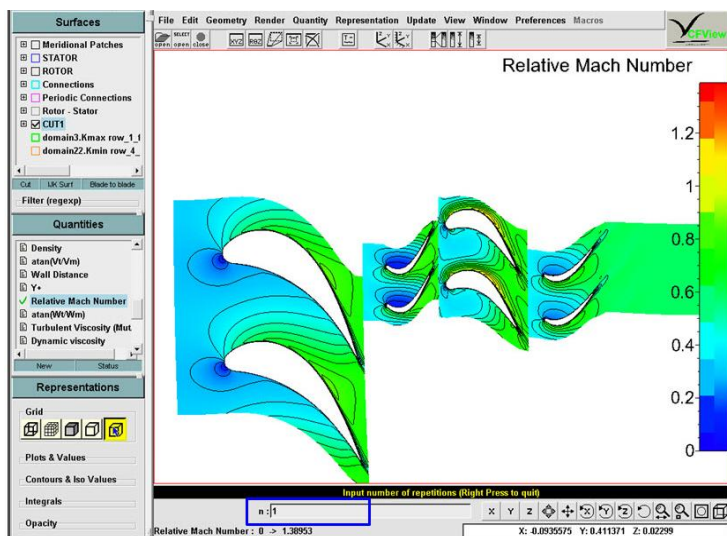


Рис. 4.11. Отображение нескольких межлопаточных каналов в графическом окне

Прежде чем приступить к построению поля векторов скоростей необходимо очистить графическое окно от предыдущих построений (если они были) с помощью команды:

ГМ → Update → Delete → All.

Построение поля векторов скоростей в некотором сечении во многом схоже с построением поля распределения параметров.

Шаг 55. Построение поля векторов скоростей. Для построения поля векторов в интересующем пользователя сечении необходимо выполнить ряд действий, описанных в предыдущем разделе, а именно создать изоповерхность в интересующем месте канала, выбрать ее для построения векторов и сделать невидимой неиспользуемую геометрию.

Затем в списке *Quantities* в дереве проекта следует выбрать относительную скорость W_{xyz} . При визуализации этого параметра, по умолчанию в межлопаточном канале соплового аппарата (неподвижного венца) будет отображаться абсолютная скорость V_{xyz} , а в канале рабочего колеса относительная W_{xyz} .

Построение распределения векторов осуществляется с помощью команды (рис. 4.12 и 4.13):

ГМ → Representation → Vector On Grid Nodes.

В случае необходимости отображение векторов можно настроить с помощью команды:

ГМ → Representation → Vector Type.

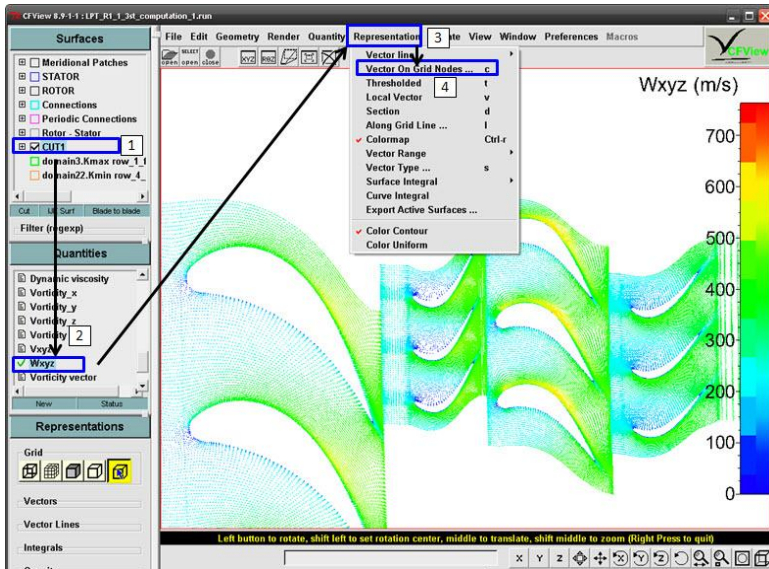


Рис. 4.12. Построение поля векторов

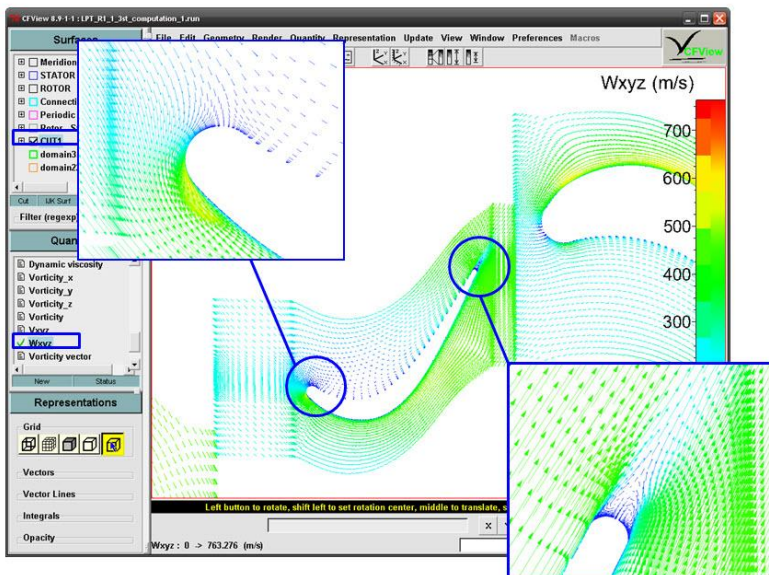


Рис. 4.13. Отображение полей распределения векторов скорости в среднем сечении ступени

В результате ее выполнения появится меню *Vector Type Editor* (рис. 4.14). В нем, в поле *Representation Type*, можно выбрать тип вектора: суммарный вектор, нормальные, тангенциальные компоненты и т.п. В поле *Arrow Shape* задается размер стрелки вектора в процентах его длины. В поле *Vector Size* выбирается размер вектора.

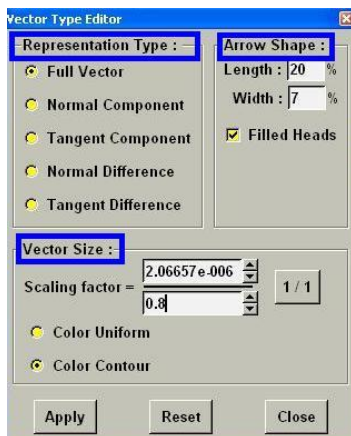


Рис. 4.14. Меню *Vector Type*

Построение графических зависимостей изменения параметров осредненных в окружном направлении по высоте проточной части осуществляется в последовательности, приведенной ниже. Построение будет вестись на примере графиков изменения полного давления и полной температуры по высоте лопатки на выходе из ступени.

Шаг 56. Построение графиков распределения параметров потока.

1. Расчетную модель необходимо отобразить таким образом, чтобы в графическом окне изображалось ее усредненное меридиональное сечение. Это осуществляется с помощью команды (рис. 4.15):

ГМ → Window → Compute & Open Pitch Average.

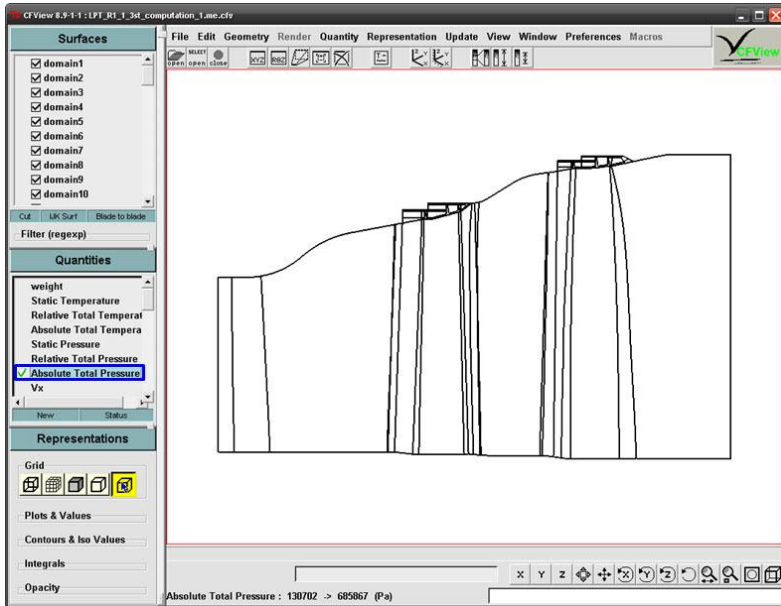



Рис. 4.15. Меридиональный вид расчетной модели

2. В списке *Quantities* в дереве проекта следует выбрать параметр, график осредненного в окружном направлении распределения значения которого будет строиться (в рассматриваемом примере это полная температура *Absolute Total Pressure*).

3. Для построения графика следует запустить команду:


ГМ→Representation → Cartesian Plot → Along Section.

Данная команда позволяет получить график изменения выбранного параметра по высоте, вдоль секущей линии, пересекающей тракт сверху вниз, тем самым, указывая интересующую область на расчетной модели. Секущую прямую можно задать, как по координатам, в информационном окне в

нижней части рабочего поля (рис. 4.16), так и указав положения конечных точек мышью. Для этого нужно щелкнуть ЛКМ  на начальной точке и, не отпуская кнопки, довести мышь до конечной точки.

После задания точек в правой части графического окна появится интересующий пользователя график (рис. 4.17)

В примере следует построить секущую линию вблизи выходной границы (рис. 4.16). Остальные интересующие графики строятся по аналогии.

4. Изменить размер окна графика можно с использованием кнопок для управления размерами  расположенные в верхней части рабочего поля (рис. 4.17).

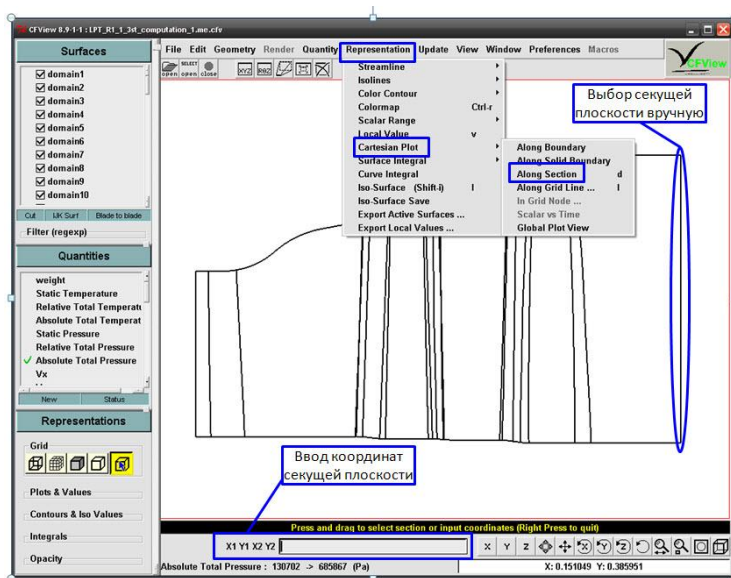


Рис. 4.16. Построение секущей линии, вдоль которой будет строиться графическая зависимость изменения параметра потока

5. По умолчанию на оси абсцисс графика отображается относительная высота канала *Normalized Arc Length* (она задается в

долях единицы). При необходимости переменную, откладываемую вдоль горизонтальной оси можно поменять (рис. 4.18) в следующей последовательности:

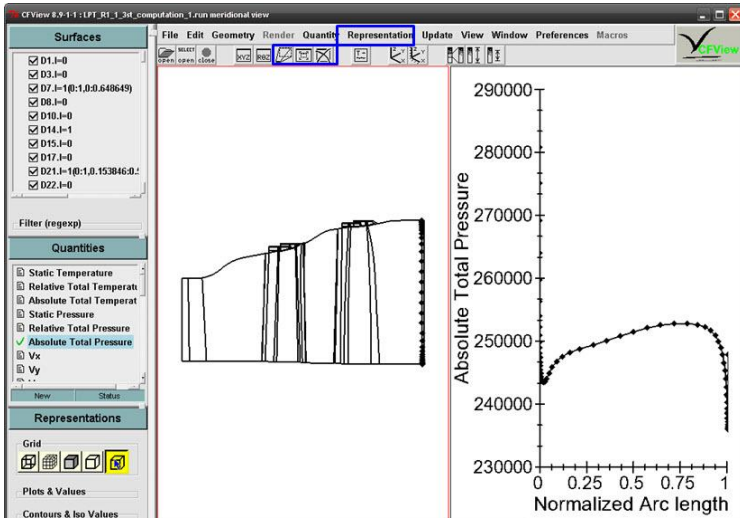




Рис. 4.17. Результат построения графика изменения полного давления по высоте лопатки на выходе из ступени

- Щелкнуть ЛКМ  на требуемой оси графика.
- Вызвать меню свойств оси щелчком ПКМ .
- В появившемся меню выбрать новую переменную, которая будет откладываться вдоль оси (*X, Y, Arc Length, Norm Arc Length, Quantity*).

Шаг 57. Экспорт графиков в текстовые файлы. Полученная графическая зависимость может быть экспортирована в виде текстового файла с расширением *.dat для дальнейшего построения графиков в других программах или, например, для сравнения результатов расчета с экспериментальными данными или результатами, полученными в других программах.

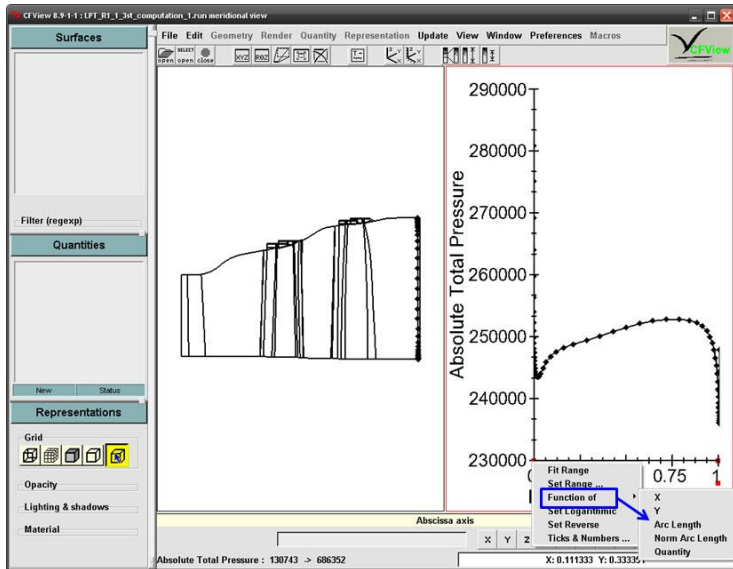


Рис. 4.18. Изменение параметра оси

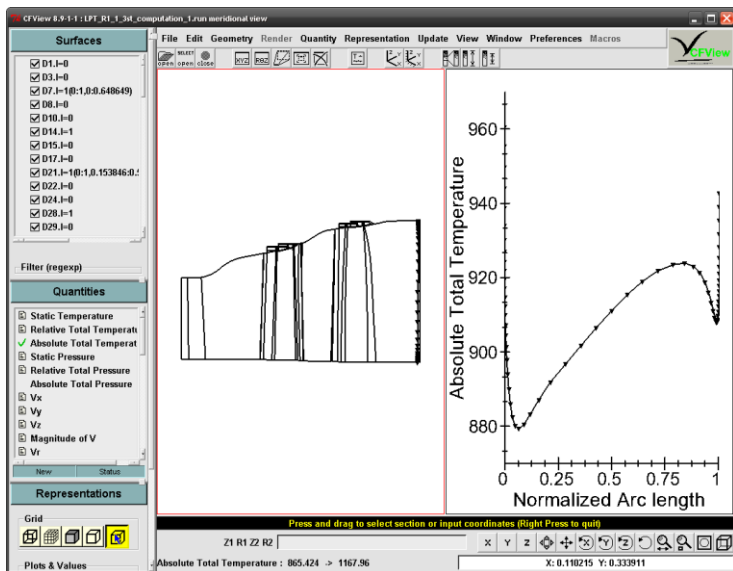




Рис. 4.19. Результат построения графика изменения полной температуры по высоте лопатки на выходе из ступени

Для экспорта данных необходимо выполнить следующие действия (рис. 4.20):

- Выбрать графическую зависимость щелчком ЛКМ 
- Вызвать меню свойств графика щелчком ПКМ 
- В появившемся меню выбрать команду *Export to File*.

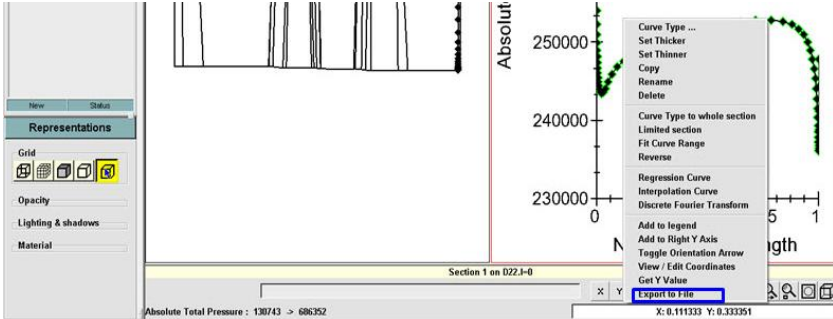


Рис. 4.20. Экспорт графика изменения параметра

Шаг 58. Определение интегральных параметров потока. Для определения интегральных значений переменных (например, полной температуры, статической температуры, полного давления, статического давления, расхода) в интересующих сечениях проточной части турбомшины необходимо выполнить следующие действия (рис. 4.21).

1. Отобразить трехмерное изображение расчетной модели в графическом окне, либо загрузить ее.

2. В дереве проектов следует выбрать интересующую границу или сечение проточной части, численные значения параметров потока в которых пользователь желает вычислить. Например, выходную границу расчетной области domain22.Kmin row_4_flux_1_Main_Blade_downStream_outlet. Она должна быть помечена галочкой . Выделение остальных элементов необходимо снять.

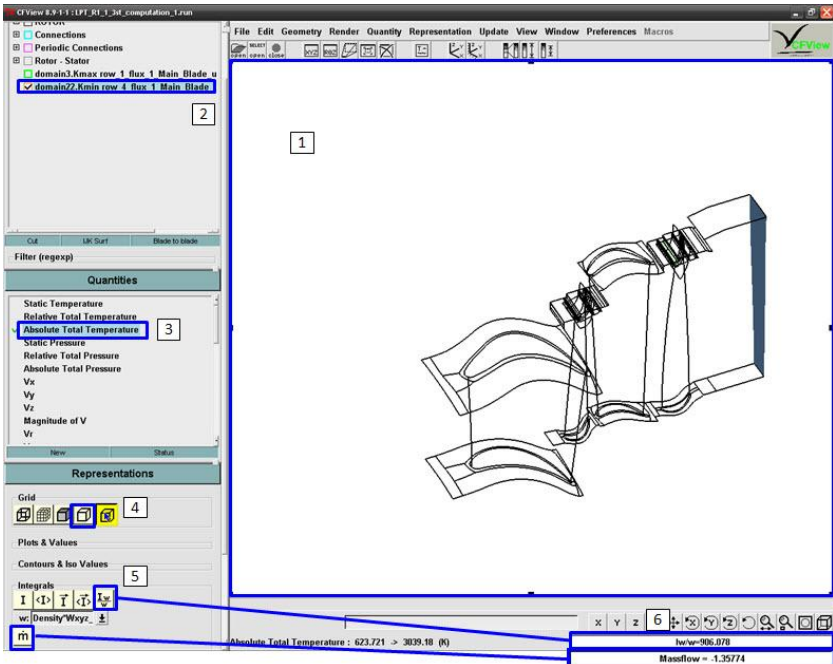






Рис. 4.21. Вычисление интегральных значений параметров потока

Для исключения ошибок можно посветить выбранную границу, нажав на иконку  во вкладке *Grid* меню *Representations*.

3. Во вкладке *Quantities*, находящейся в дереве проекта следует выбрать вычисляемый параметр потока, например *Absolute Total Temperature* – полную температуру.


4. Во вкладке *Integrals*, находящейся в дереве проекта следует нажать кнопку . Она дает команду на вычисление интегрального параметра, осредненного по расходу. Также при необходимости параметр можно усреднить по площади сечения с помощью кнопки .

После выполнения описанных действий в информационном окне, расположенном под рабочим полем, будет выведено численное значение выбранного параметра.

Для вычисления величины расхода рабочего тела через выбранное сечение во вкладке *Integrals*, находящейся в дереве проекта следует нажать кнопку .


Шаг 59. Построение линий тока. Построение линий тока осуществляется в следующей последовательности:

1. В графическом окне необходимо отобразить изображение турбомшины, если это еще не было сделано ранее.

2. Для повышения информативности следует погасить все элементы геометрии, кроме лопатки рассматриваемого венца и втулочной поверхности. Их следует выделить цветом с помощью кнопки  (рис. 4.22).

3. В дереве проекта нужно выбрать входную поверхность венца `domain3.Kmax row_1_flux_1_Main_Blade_upStream_inlet`, либо любую поверхность, откуда будут начинаться линии тока.

4. Во вкладке *Quantities*, находящейся в дереве проекта следует выбрать параметр V_{xyz} .

5. Во вкладке *Vector Lines*, находящейся в нижней части дерева проекта следует нажать кнопку  (*Vector Lines Parameters*), для выбора параметров векторной линии.

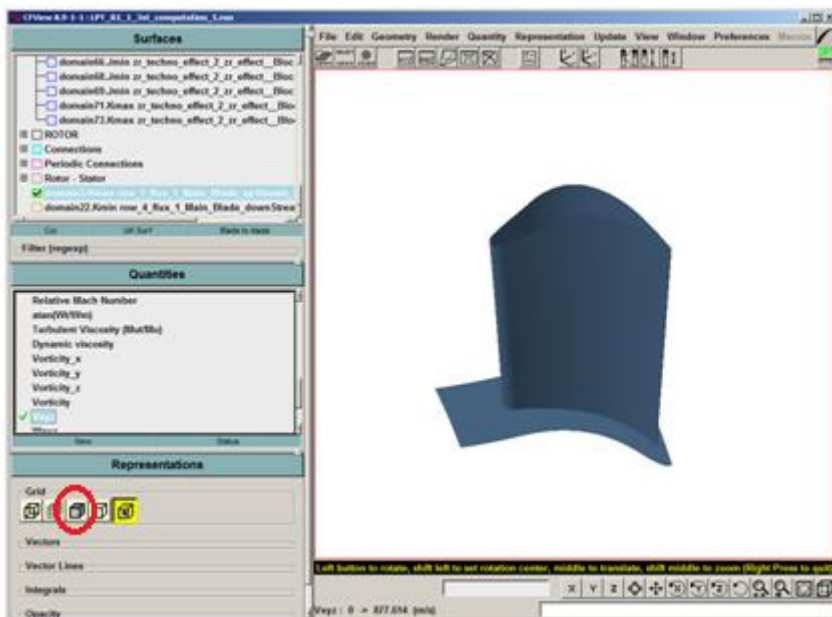



Рис. 4.22. Модель лопаточного венца, подготовленная для отображения линий тока

6. В появившемся меню *Vector Lines Parameters*, в поле *Color* следует выбрать пункт *Velocity*, остальные настройки нужно оставить по умолчанию. Сделанные настройки подтверждаются нажатием кнопок *Apply*, затем *Close*(рис. 4.23).

7. Нужно нажать на кнопку  (*Vector Lines from Grid Line*) во вкладке *Vector Lines*, данная команда позволяет построить векторные линии по линиям сети в зависимости от ее осей (i или j).

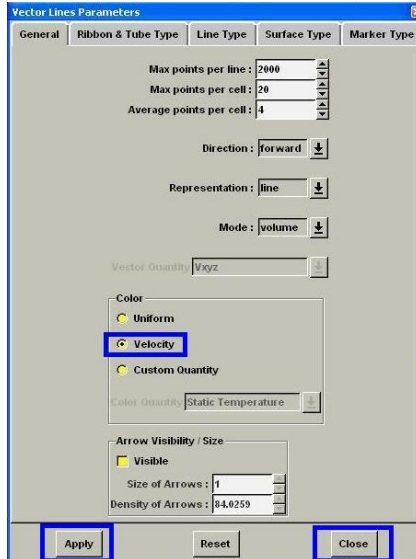


Рис. 4.23. Окно *Vector Lines Parameters*

8. В появившемся окне *V_{xyz} vector lines along grid line*, в поле *index* выбор параметра *i* или *j* (координатные оси сети) определяет направление распространения векторных линий, если выбрать индекс *i* векторные линии будут отображаться вдоль сеточных линий по высоте лопатки (рис. 4.24). При выборе индекса *j* отображение векторных линий происходит вдоль сеточных линий по ширине межлопаточного канала (рис. 4.25). Меняя значения параметра *i* и *j* в окне ввода поля *index*, в пределах ограниченным максимальным значением, после нажатия кнопки *Apply* можно отобразить в графическом окне линии тока (рис. 4.26).

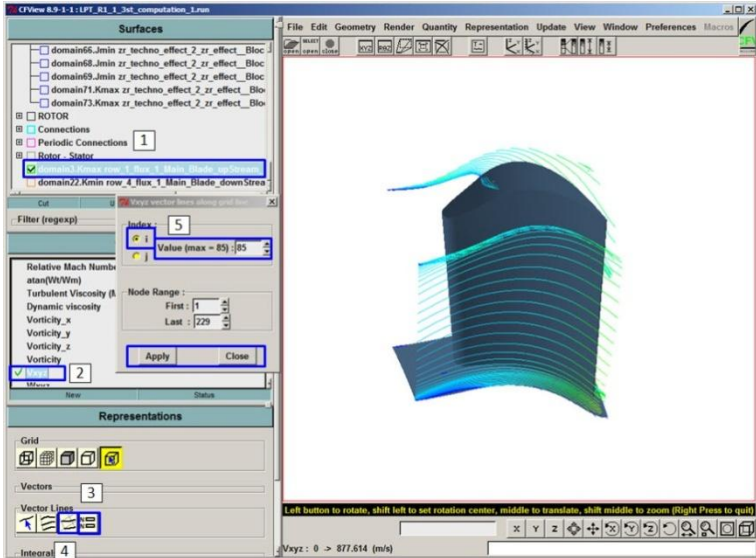


Рис. 4.24. Отображение векторных линий вдоль сеточных линий по высоте лопатки направление i

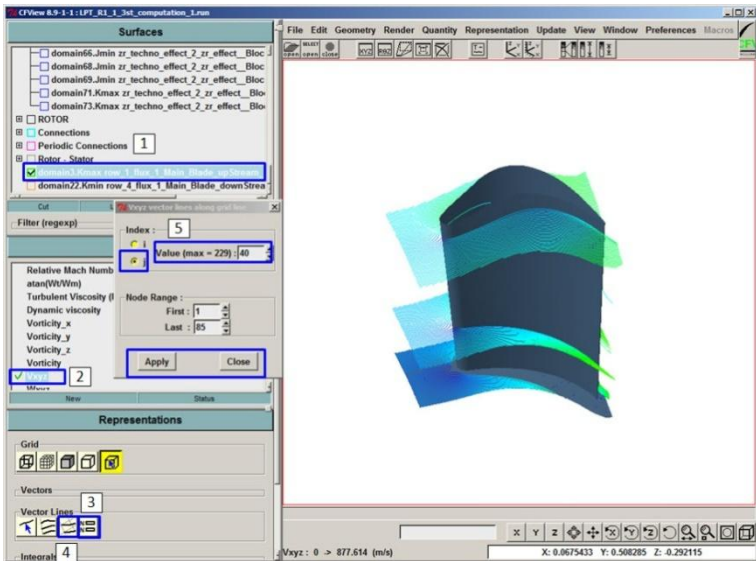


Рис. 4.25. Отображение векторных линий вдоль сеточных линий по ширине межлопаточного канала направление j

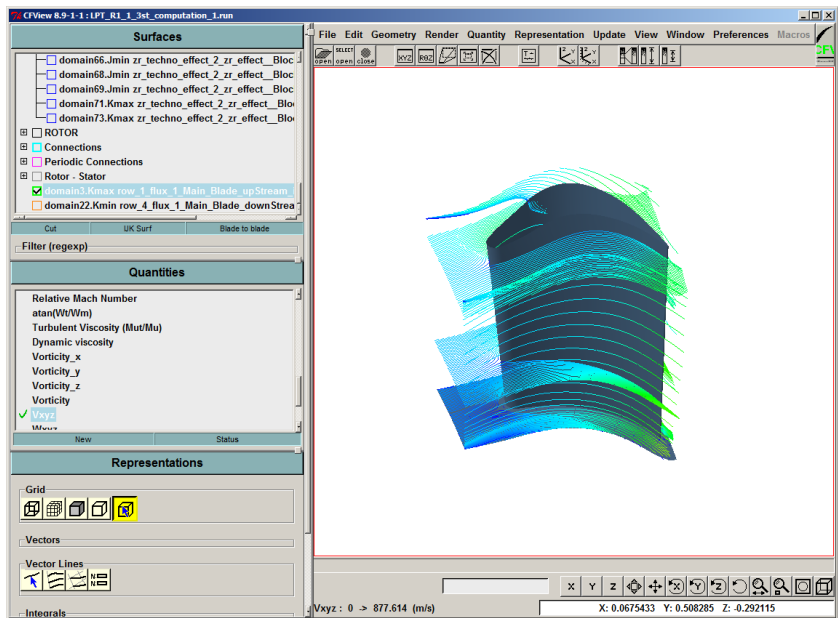


Рис. 4.26. Линии тока в СА ТНД

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 *Андерсон, Д.* Вычислительная гидромеханика и теплообмен [Текст]. В 2-х томах/ *Д. Андерсон, Дж. Таннехил, Р. Плетчер.* – М.: Мир, 1990.- 384с.
- 2 *Патанкар, С.* Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости [Текст]/ *С. Патанкар.* – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 150с.
- 3 *Рейнольдс А. Дж.* Турбулентные течения в инженерных приложениях: Пер. с англ. – М.: Энергия, 1979. – 408 с.
- 4 Турбулентность. Принципы и применение. Под ред. *У. Фроста и Т. Моудлена.* – М.: Мир, 1980. – 220с.
- 5 *Флетчер, К.* Вычислительные методы в динамике жидкостей [Текст]. В 2-х томах/*К. Флетчер.* – М.: Мир, 1991. – 1056с.
- 6 *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.
- 7 *Холщевников, К. В.* Теория и расчет авиационных лопаточных машин [Текст]/*К. В. Холщевников, О. Н. Емин, В. Т. Митрохин.* – М.: Машиностроение, 1986. – 432с.
- 8 *Jarpike D., Baines N. C., Introduction to Turbomachinery [Текст]. Concept NRECETIInc.*
- 9 <http://www.numeca-ru.com>[электронный ресурс].
- 10 <http://www.numeca.com/>[электронный ресурс].