

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)»

**ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОЧЕГО
ПРОЦЕССА СВОБОДНОЙ ТУРБИНЫ
СОВМЕСТНО С ТУРБИНОЙ НИЗКОГО
ДАВЛЕНИЯ, ПЕРЕХОДНЫМ КАНАЛОМ И
ВЫХОДНЫМ УСТРОЙСТВОМ**

Электронное учебное пособие

САМАРА
2013

УДК СГАУ: 621.438.001.2(075)+004.9(0.75)

ББК 39.55

М 545

Авторы-составители: **Батурич Олег Витальевич**
Горячкин Евгений Сергеевич
Колмакова Дарья Алексеевна
Попов Григорий Михайлович
Леденев Александр Иванович

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

Численное моделирование рабочего процесса свободной турбины совместно с турбинами низкого давления, переходным каналом и выходным устройством [Электронный ресурс]: электрон. учеб. пособие / О.В. Батурич, Е.С. Горячкин Д.А. Колмакова, Г.М. Попов, А.И. Леденев; Минобрнауки России, Самар. гос. аэрокосм. ун-т им. С.П. Королева (нац. исслед. ун-т). – Электрон. текстовые и граф. дан. (6,8 Мбайт). – Самара, 2013. – 1 эл. опт. диск (CD-ROM).

Учебное пособие содержит подробное описание технологии расчетного исследования рабочего процесса в многокаскадной осевой неохлаждаемой турбине совместно с переходными каналами и выходными устройствами с использованием современного *CFD* - программного комплекса *NUMECA*, основанного на решении уравнений Навье - Стокса. Подробно описаны процесс подготовки исходных данных, создания расчетной модели, создания сетки конечных элементов в автоматизированном режиме, наложение граничных условий, проведения расчета и обработки его результатов.

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

© Самарский государственный
аэрокосмический университет, 2013

ОГЛАВЛЕНИЕ

ОСНОВНЫЕ УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ	5
ВВЕДЕНИЕ	8
1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ И ФОРМИРОВАНИЕ ИСХОДНЫХ ДАННЫХ ДЛЯ РАСЧЕТА	10
1.1. Исходные данные для численного моделирования рабочих процессов турбин совместно с переходными каналами и выходными устройствами	10
1.2. Формирование блока исходных данных для моделирования рабочего процесса в турбомашине в программном комплексе <i>NUMECA FINE Turbo</i>	13
1.2.1. Создание геометрии описывающей меридиональные обводы проточной части	13
1.2.2. Создание геометрии описывающей поверхности лопаток	15
2. ТЕХНОЛОГИЯ РАСЧЕТНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА В НЕОХЛАЖДАЕМОЙ МНОГОСТУПЕНЧАТОЙ ОСЕВОЙ ТУРБИНЕ СОВМЕСТНО С ТУРБИНАМИ ДРУГИХ КАСКАДОВ И ПЕРЕХОДНЫМИ КАНАЛАМИ В ПРОГРАММНОМ КОМПЛЕКСЕ <i>NUMECA</i>	19
2.1. Формирование сетки конечных элементов расчетной модели многоступенчатой осевой турбины	21
2.1.1. Загрузка геометрии лопаток и описание их основных параметров	22
2.1.2. Построение сетки конечных элементов	34
2.1.3. Проверка качества сетки конечных элементов	45
2.1.4. Создание сетки конечных элементов в притрактовых полосах	49
2.1.5. Проверка граничных условий	56
2.2. Описание граничных условий и настройки решателя при исследовании течения многокаскадной турбины с переходными каналами с использованием <i>CAE</i> пакета <i>NUMECA</i>	61
2.2.1. Запуск программы <i>FINE™ Turbo</i>	61
2.2.2. Задание граничных условий	63
2.2.3. Настройка параметров решателя	83
2.2.4. Запуск итерационного расчета	87
2.3. Обработка результатов расчета в программном комплексе	87

NUMECA

2.3.1. Построение расчетных картин распределения параметров трехмерного потока	90
2.3.2. Построение векторов скоростей	98
2.3.3. Построение графических зависимостей изменения параметров осредненных в окружном направлении по высоте проточной части	100
2.3.4. Определение интегральных параметров потока в характерных сечениях	103
2.3.5. Построения линий тока	105
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	109

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

*	—	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>ω</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>СТ</i>	—	свободная турбина;
<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

Сегодня численное моделирование рабочего процесса в турбине является неотъемлемой составляющей процесса ее проектирования и доводки. Это связано с тем, что прогресс численных методов газовой динамики и возможностей вычислительной техники позволили проводить поверочные расчеты турбин с минимальными допущениями, чем повысили их достоверность. Результаты, полученные таким образом, мало отличаются от получаемых в эксперименте количественно, а вычисленные тенденции изменения параметров, характеризующих работу турбин, в зависимости от режимных и геометрических параметров отличаются от реальных с точностью до погрешности эксперимента.

Таким образом, современные численные методы хотя и не позволяют со 100% достоверностью рассчитать параметры турбины, но позволяют точно предсказать, как изменится ее рабочий процесс при изменении любого параметра. Данное обстоятельство позволяет в относительно короткие сроки рассмотреть некие варианты модернизации исходной конструкции, и гарантировано найти такие, которые обещают максимальное улучшение свойств изделия, не прибегая к дорогим экспериментам. Это в свою очередь сокращает потребное число испытания при создании изделия, время доводки и ее стоимость, что повышает ее конкурентоспособность.

Очевидно, что численные методы газовой динамики и методы их практического применения должны развиваться таким образом, чтобы повысить их количественную точность. Одна из причин недостаточной достоверности результатов является неопределенность исходных данных. Зачастую инженер при моделировании считает, что параметры на входе в турбину равномерны, хотя на самом деле они таковыми не являются. Поля параметров на входе в турбину могут иметь значительную нестационарность, окружную и радиальную неравномерность и игнорирование данного факта может привести к существенным искажениям в расчете.

Однако проблема заключается в том, что поля параметров зачастую неизвестны и зависят от большого числа факторов и трудно прогнозируемы.

Выходом из данной ситуации может быть моделирование интересующей турбины совместно со смежными узлами. То есть турбину необходимо моделировать не обособлено, а вместе с узлами находящимися выше и ниже по течению, другими турбинами, переходными и выходными каналами, компрессорами и камерой сгорания. В этом случае поля параметров на ее входе, хотя и не будут 100% достоверны, но будут максимально приближены к реальным, что должно повысить достоверность исходных данных и соответственно точность расчета.

Представленное методическое пособие содержит подробное описание технологии расчетного исследования рабочего процесса в многокаскадной осевой неохлаждаемой турбине совместно с переходными каналами и выходными устройствами с использованием современного *CFD* - программного комплекса *NUMECA*, основанного на решении уравнений Навье - Стокса.

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 ЗАДАЧ И ФОРМИРОВАНИЕ ИСХОДНЫХ ДАННЫХ ДЛЯ РАСЧЕТА

1.1. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ ДЛЯ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ РАБОЧИХ ПРОЦЕССОВ ТУРБИН СОВМЕСТНО С ПЕРЕХОДНЫМИ КАНАЛАМИ И ВЫХОДНЫМИ УСТРОЙСТВАМИ

Для численного моделирования рабочего процесса свободной турбины совместно с ТНД, переходными и выходными каналами необходимо иметь следующие данные:

- точный чертеж меридионального сечения проточной части турбин с каналами в масштабе 1:1;
- геометрию (таблицу координат в нескольких контрольных сечениях) всех лопаточных венцов входящих в исследуемые турбины;
- числа лопаток всех венцов;
- величины радиальных зазоров над торцами лопаток и в лабиринтных уплотнениях;
- параметры рабочего процесса на входе в первую по потоку турбину (полные давление и температура потока, а также направление потока с учетом неравномерности по высоте проточной части)
- статическое давление на выходе из интересующей системы;
- ожидаемый расход рабочего тела;
- частоты вращения роторов.

В качестве иллюстрации ниже приводится технология численного моделирования рабочего процесса двухступенчатой осевой СТ совместно с одноступенчатой ТНД двигателя *НК36СТ-32* и переходным каналом между ними (рис. 1.1). Основные параметры рабочего процесса данных турбин приведены в табл. 1.1.

Рассматриваемые турбины расположены непосредственно за турбинами ВД и СД, что обуславливает наличие существенной окружной и радиальной неравномерности параметров на ее входе. По этой причине приведенная ниже методика содержит приемы учета данной неравномерности, а также подходы к моделированию течения в притрактных полостях и утечек в радиальных зазорах через надбандажные полости.

Таблица 1.1

Основные параметры рабочего процесса ТНД и СТ

Параметр	Значение
Число лопаток СА ТНД, z_{ca} , шт	30
Число лопаток РК ТНД, z_{pk} , шт	91
Число лопаток СА первой ступени СТ, z_{ca} , шт	68
Число лопаток РК первой ступени СТ, z_{pk} , шт	104
Число лопаток СА второй ступени СТ, z_{ca} , шт	70
Число лопаток РК второй ступени СТ, z_{pk} , шт	104
Частота вращения ротора $n_{но}$, об/мин	6100
Частота вращения ротора $n_{см}$, об/мин	5500
Осредненное полное давление на входе в СА ТНД, p_c^* , Па	582000
Осредненная полная температура на входе в СА ТНД, T_c^* , К	1076,0
Осредненный угол входа потока в СА ТНД, α , град	65
Статическое давление на выходе, Па	102500

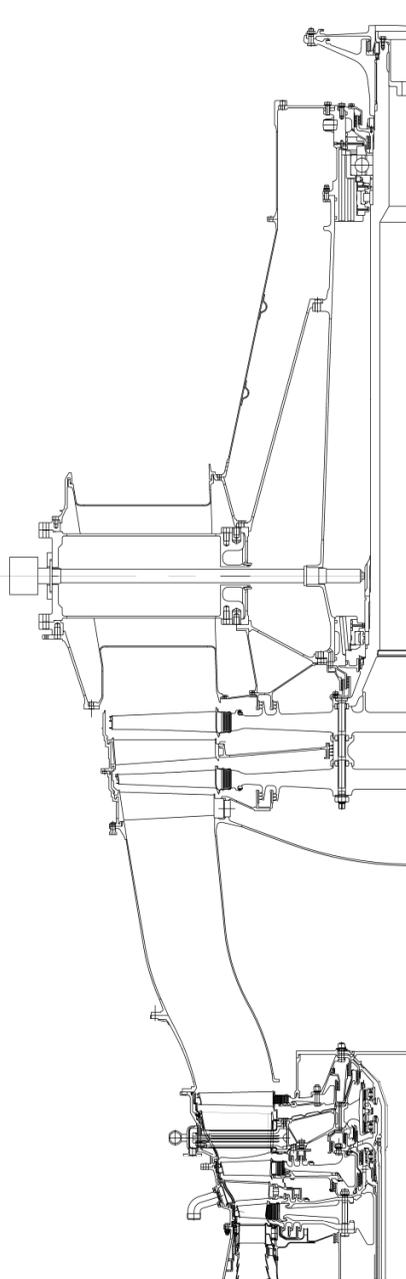


Рис. 1.1. Проточная часть многокаскадной турбины

1.2. ФОРМИРОВАНИЕ БЛОКА ИСХОДНЫХ ДАННЫХ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА В ТУРБОМАШИНЕ В ПРОГРАММНОМ КОМПЛЕКСЕ *NUMECA FINE|TURBO*

Для создания математической модели течения в многокаскадной турбине с переходными и выхлопными каналами на первом этапе необходимо построить геометрию расчетной области течения рабочего тела в тракте двигателя и межлопаточных каналах турбин.

Исходные данные для построения расчетной области создаются на базе геометрии рассматриваемых турбин, представленных в виде чертежа или *3D CAD* модели. Необходимо знать форму меридионального сечения проточной части и формы пера всех лопаток.

Геометрия, описывающая область течения, может быть задана двумя способами: первый способ построение на базе *CAD* файлов, полученных в формате *IGES*, *Parasolid*, *CATIA V5* и т.д. Второй способ - загрузка файла во внутреннем формате *NUMECA* - **.geomTurbo*. 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.

1.2.1. Создание геометрии описывающей меридиональные обводы проточной части

На рис. 1.2 представлена геометрия меридиональных обводов расчетной области, построенная на основе фрагмента чертежа *НК 36СТ-32*. Радиальные границы расчетной области устанавливаются по цилиндрическим поверхностям втулочного (*hub*) и периферийного (*shroud*) обводов.

Осевая протяженность расчетной области не имеет физического ограничения, поэтому границы входа и выхода устанавливаются условно границами *inlet* (на входе) и *outlet* (на выходе). При этом расстояние блоков входа и выхода определяется интенсивностью процессов, происходящих до или после венца. В случае возможности наличия отрывного течения вблизи выходной границы ее необходимо отодвинуть, чтобы расчетная область смогла охватить крупный вихрь.

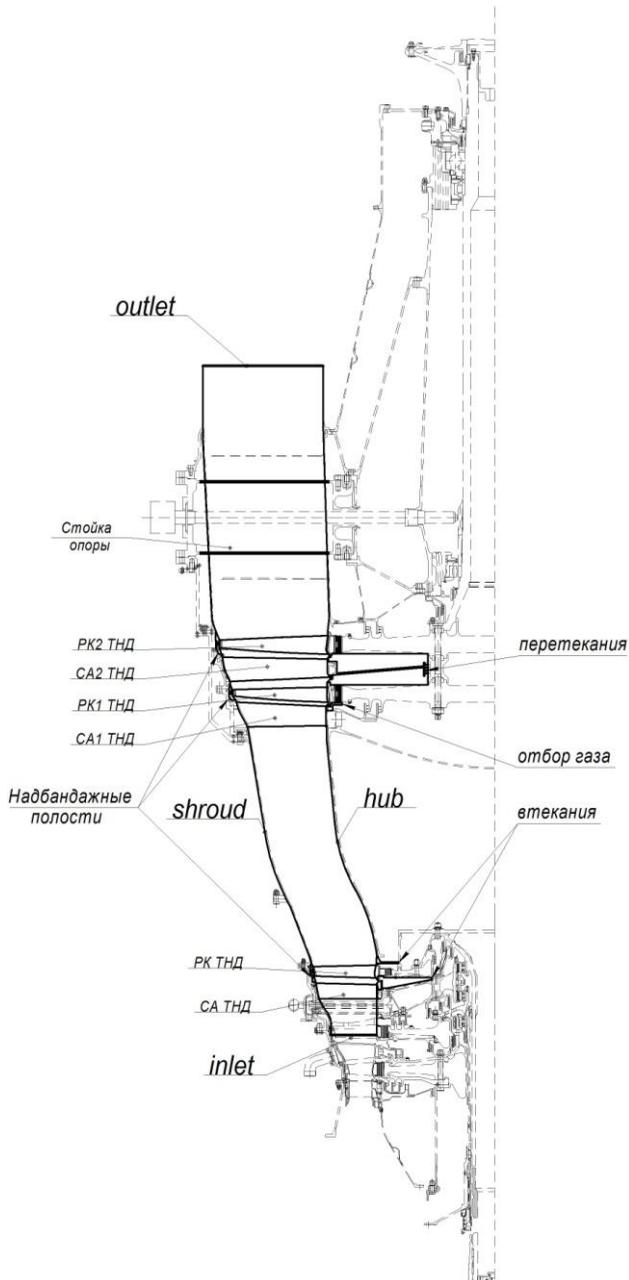


Рис. 1.2. Геометрия меридиональных обводов рассматриваемой области, выделенная из чертежа ТНД и СТ

Приемлемая величина осевой протяженности входного и выходного участков расчетной области обычно принимается равной одной...двум ширинам лопаточного венца.

Шаг 1. На этом этапе в *CAD* системе необходимо создать набор линий, описывающих геометрию меридиональных обводов расчетной области. Чертеж меридиональных обводов, использованный в примере, показан на рис. 1.3.

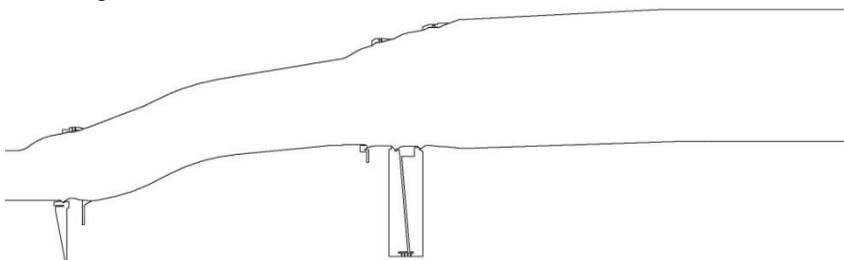
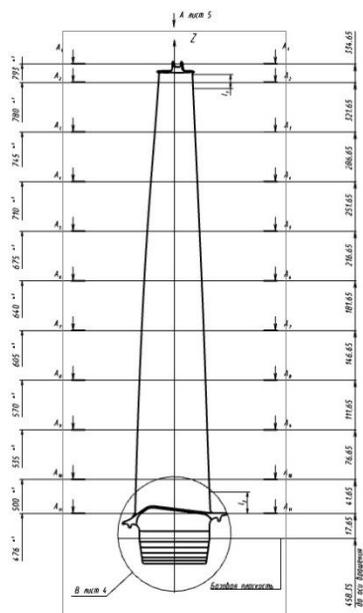


Рис. 1.3. Геометрия расчетной области, использованная в примере

Для дальнейшей передачи в программу автоматизированного построения пространственной сетки *AutoGrid*, созданную геометрию необходимо сохранить в формате *.igs*.

1.2.2. Создание геометрии описывающей поверхности лопаток

Геометрия лопаток на чертеже обычно представляется в виде таблицы координат профиля в нескольких контрольных сечениях (рис. 1.4). На ее основе можно создать в *CAD* программе *3D* модель пера и затем прочитывать его в *Nurmesa*. Другой способ передачи информации о геометрии лопатки в программу численного моделирования течения заключается в том, чтобы с помощью специализированной программы преобразовать таблицу координат в текстовый файл, на основании которого может быть сформирована геометрия расчетной области и сетка конечных элементов. Примером такой специализированной программы является программа *Profiler*, разработанная на кафедре ТДЛА СГАУ.



A1-A1			
Xc	Yc	Xк	Yк
16,0512	19,0758	14,9705	19,5970
14,9213	16,6525	13,7812	17,2765
13,7697	14,2393	12,5576	14,9738
12,5912	11,8392	11,2994	12,6899
11,3809	9,4549	10,0064	10,4255
10,1339	7,0897	8,6786	8,1812
8,8454	4,7468	7,3160	5,9580
7,5109	2,4298	5,9182	3,7567
6,1258	0,1427	4,4855	1,5780
4,6861	-2,1104	3,0176	-0,5771
3,1878	-4,3249	1,5146	-2,7080
1,6272	-6,4960	-0,0235	-4,8136
0,0010	-8,6184	-1,5963	-6,8934
-1,6937	-10,6864	-3,1972	-8,9517
-3,4595	-12,6941	-4,8157	-10,9962
-5,2984	-14,6349	-6,4437	-13,0332
-7,2086	-16,5059	-8,1173	-15,0326
-9,1498	-18,3447	-9,9053	-16,9298
-11,1904	-20,0685	-11,8655	-18,6473
-13,5977	-21,1957	-14,0337	-20,0917

Рис. 1.4. Чертеж рабочей лопатки и фрагмент таблицы с координатами точек профилей сечения

В программу *Profiler* вводится геометрия профиля в виде таблицы координат, содержащей координаты точек спинки и корытца, а также положения центров входной и выходной окружностей. Подобным образом обычно геометрия профиля обычно описывается на рабочих чертежах (рис. 1.4). Поэтому всю необходимую информацию можно взять оттуда. Введенные данные программа *Profiler* преобразовывает в формат, который может быть воспринят программой *AutoGrid* в которой будет осуществляться построение геометрии расчетной области и разбиение ее сеткой конечных элементов.

Основную часть окна программы *Profiler* (рис. 1.5) занимает таблица для ввода координат сечений лопатки. Помещая курсор на нужное поле можно ввести таблицу сечений (высота h , радиусы входной R и выходной r кромок, координаты их центров) и таблицу координат сечений (X , $Y_{сн}$, $Y_{кор}$), взяв данные с чертежа. При необходимости можно добавить еще одно сечение кнопкой  или убрать лишнее кнопкой . Также в верхней части окна программы можно ввести смещение локальной СК относи-

тельно ГСК по трем координатам и поворотом на угол, а также при необходимости инвертировать оси локальной СК (*inv X*, *inv Y*). Для визуального контроля правильности введенных точек можно выполнять отрисовку профилей, нажимая кнопку . При этом в правой части окна будет отрисован профиль с номером, указанным в поле слева от кнопки. Сохранение в формате *.geomturbo осуществляется кнопкой .

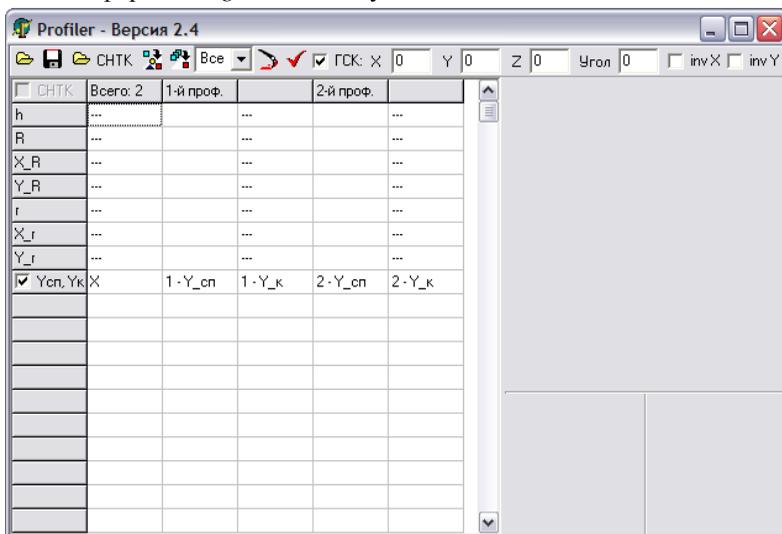


Рис. 1.5. Окно программы Profiler

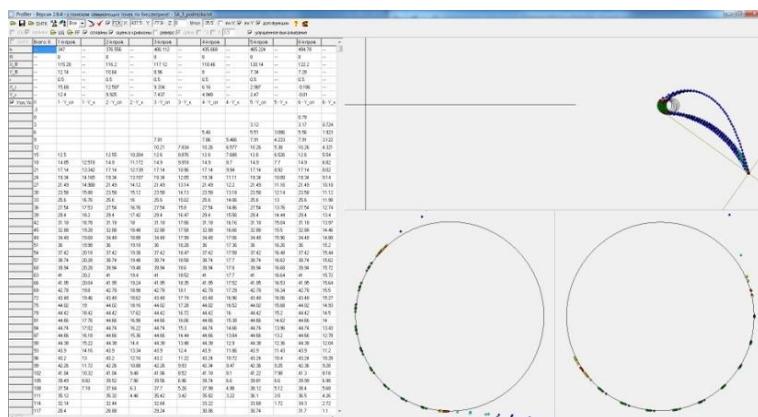


Рис. 1.6. Окно программы Profiler после прорисовки профилей лопатки СА

Шаг 2. Занести данные с чертежа сопловой лопатки ТНД в программу *Profiler*. Сделать отрисовку профиля с помощью кнопки , проверить правильность введенных данных.

Шаг 3. Следующим этапом необходимо экспортировать файл в формат *AutoGrid* - *.*geomturbo*, нажав кнопку . В появившемся диалоговом окне следует ввести имя файла и формат «файлы *Numeca* (*.*geomturbo*)» нажать кнопку «*Сохранить*».

Шаг 4. Аналогично выполняется создание файла исходных данных для остальных лопаток всех турбин, находящихся в интересующей пользователя области.

Например для турбины, приведенной в качестве примера необходимо создать семь файлов с расширением *.*geomturbo*, содержащих информацию о двух венцах (СА и РК) ступени ТНД, четырех венцах СТ и стойке опоры, пригодных для непосредственного импорта в *AutoGrid*.

На этом подготовительный этап закончен. Можно приступить непосредственно к созданию расчетной модели в *NUMECA AutoGrid*.

2. ТЕХНОЛОГИЯ РАСЧЕТНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА В НЕОХЛАЖДАЕМОЙ МНОГОСТУПЕНЧАТОЙ ОСЕВОЙ ТУРБИНЕ СОВМЕСТНО С ТУРБИНАМИ ДРУГИХ КАСКАДОВ И ПЕРЕХОДНЫМИ КАНАЛАМИ В ПРОГРАММНОМ КОМПЛЕКСЕ *NUMECA*

Построение интересующей исследователя расчетной области для исследования течения в многокаскадной турбине с переходными и выхлопными каналами осуществляется в модуле *AutoGrid*. Он предназначен для создания качественных конечно-элементных 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.

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* необ-

ходим в главное меню (ГМ) программы *IGG/FINE* (рис. 2.1) выбрать пункт:

ГМ → *Modules* → *AutoGrid 5*.

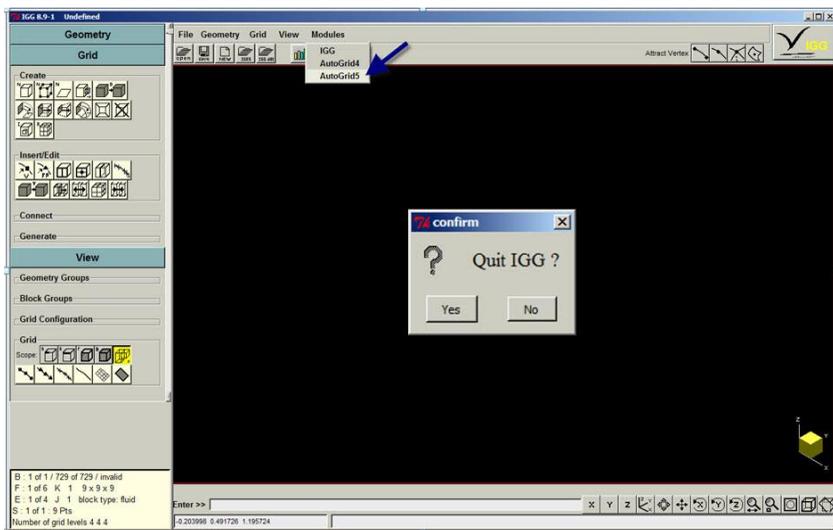


Рис. 2.1. Рабочее окно модуля *IGG*

После этого появится запрос о выходе из модуля *IGG/FINE* (рис. 2.1). Намерение выйти следует подтвердить, нажав кнопку *Yes*. В результате открывается рабочее окно модуля *AutoGrid*, приведенное на рис.2.2.

Графический пользовательский интерфейс программы *AutoGrid™ v5* 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.

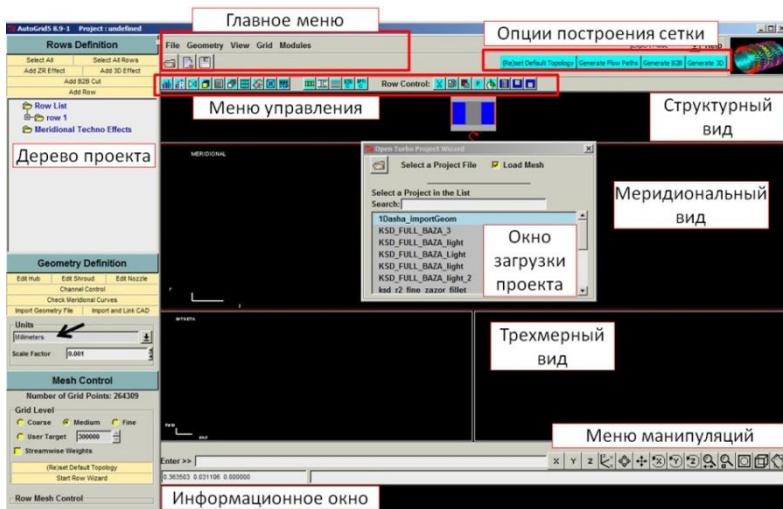


Рис. 2.2. Рабочее окно модуля *AutoGrid™ v8.x*

2.1. ФОРМИРОВАНИЕ СЕТКИ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ РАСЧЕТНОЙ МОДЕЛИ МНОГОСТУПЕНЧАТОЙ ОСЕВОЙ ТУРБИНЫ

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 обводах проточной части (ПЧ), то выполнять какие – либо действия в окне *Open Turbo Project Wizard* не требуется.

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. Для рассматриваемого случая 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*.

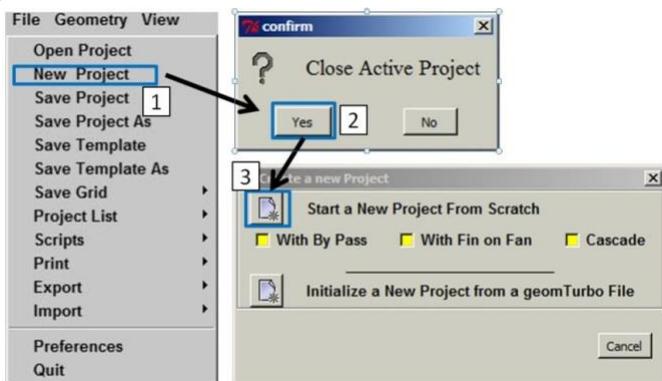


Рис. 2.3. Последовательность создания нового проекта

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.

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

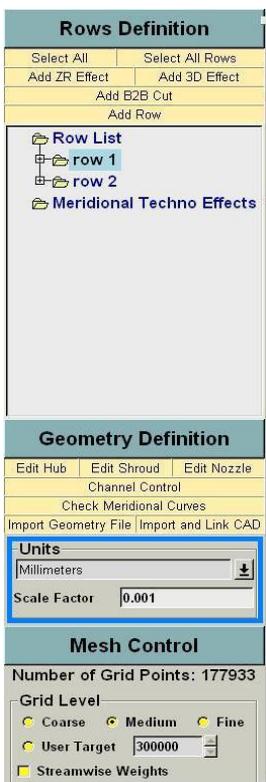


Рис. 2.4. Задание размерности геометрии

ется.

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 турбомшины 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 полным объемом, открывая доступ к некоторым необ-

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. 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.

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 размеща-

ходимым командам настройки, недоступным в стандартной конфигурации.

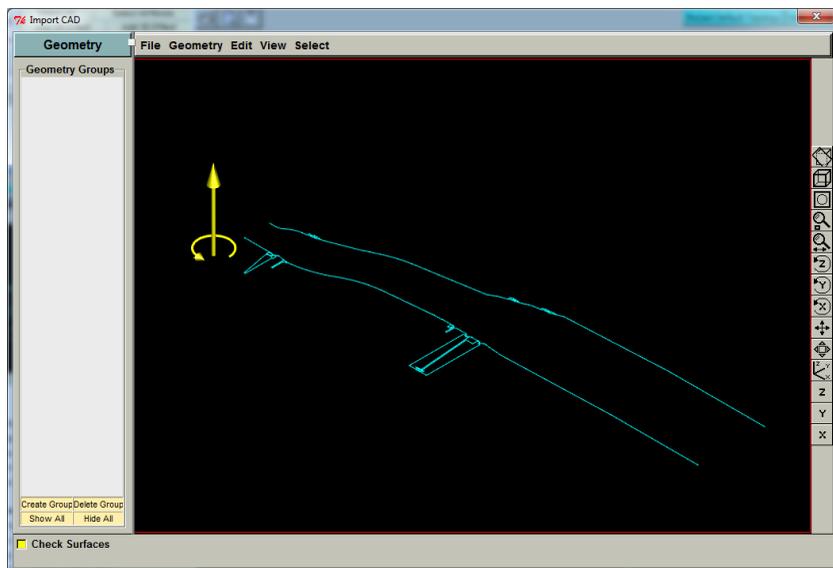


Рис. 2.5. Окно *Import CAD*

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 заранее *IGES* файлы, содержащие геометрию лопатки и меридиональные обводы, выбрав подменю *File* → *Open*. Если геометрия прочной 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.

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 (в примере, *1 0 0*). Обратите внимание на то, 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*).

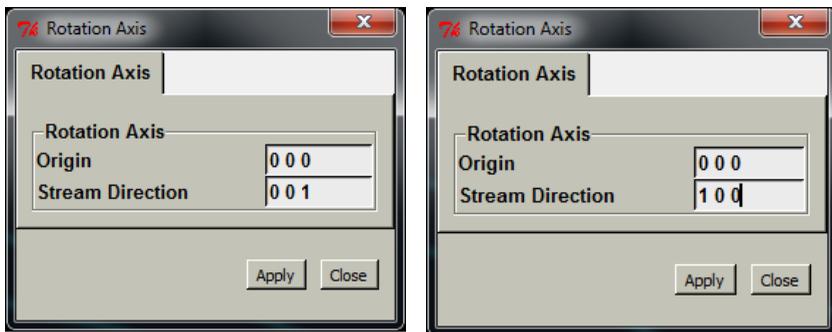


Рис.2.6. Изменение направления оси турбомшины

Шаг 6. Передача загруженной геометрии проточной части турбомшины в *AutoGrid 5*. Загруженную геометрию необходимо передать из окна *Import CAD* в модуль *AutoGrid* таким образом, чтобы программа правильно определила, 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 изменят свой цвет.

Все выделенные элементы нужно объединить 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.

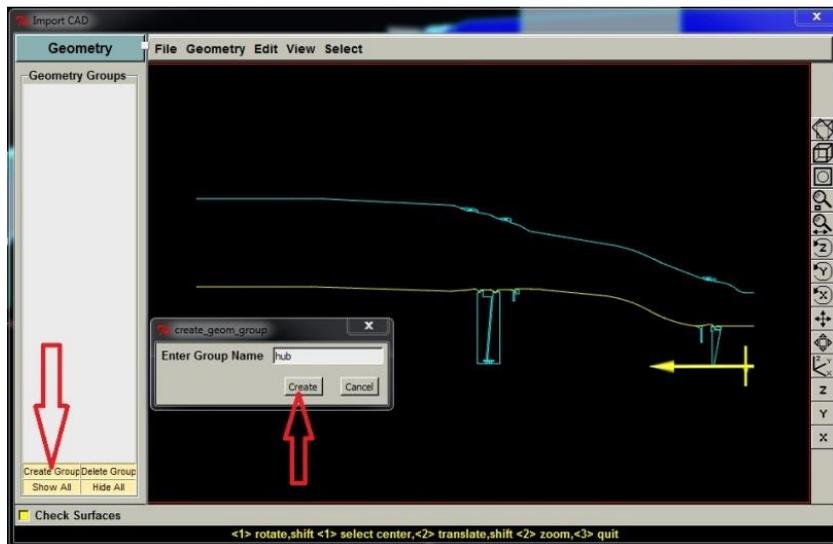


Рис.2.7. Создание группы линий

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).

2. Следующим шагом необходимо указать геометрию лопаток. Профили лопаток будут загружены с помощью созданных ранее файлов с расширением *. *geomTurbo*. Эти файлы включает всю необходимую информацию о геометрии лопатки. Необходимо отметить, что *geomTurbo* файл содержит информацию только о поверхности лопатки одного венца. Для задания геометрии венца с использованием файла *. *geomTurbo* необ-

ходимо выбрать, либо создать венец в дереве проекта с помощью команд *Row Definition* → *Row№.* или *Row Definition* → *Add Row*.

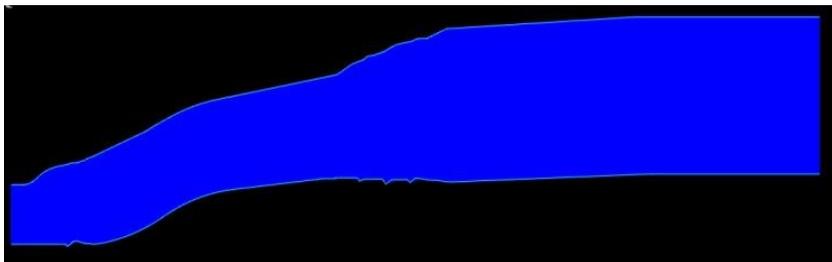


Рис. 2.8. Меридиональный профиль проточной части турбины, загруженный в модуль *AutoGrid5*

По умолчанию модель имеет один венец с именем *Row1*. При необходимости имя венца может быть изменено. Для задания геометрии венца *Row1* его необходимо выделить. Затем нужно щелкнуть ПКМ на его имени и в появившемся списке выбрать пункт *Define Geometry* (рис. 2.9). В появившемся диалоговом окне следует выбрать имя файла с расширением **.geomTurbo*, содержащего координаты профиля нужной лопатки. В графическом окне появится очертания лопатки. Для того, чтобы загрузить профиль следующей лопатки необходимо добавить новый венец в проект с помощью кнопки *Add Row* в дереве проекта.

Затем следует выбрать новый венец и загрузить его профиль лопатки аналогично тому, как это было сделано для первого венца. Появятся очертания новой лопатки. Процесс нужно повторять до тех пор, пока не будут загружены все лопатки, всех турбин в рассматриваемой расчетной области.

3. В случае если лопатки получились короткими (втулочное и периферийное сечение лопатки должны гарантировано выходить за пределы меридиональных обводов проточной части), их необходимо расширить.

Для этого необходимо в дереве проекта развернуть список соответствующей лопатки, нажав на кнопку  рядом с названием лопатки.

Затем необходимо нужно щелкнуть ПКМ на вкладке *Main Blade* и воспользоваться командой *Expand Geometry* (рис. 2.10).

Затем во вкладке *Hub Treatment* необходимо оставить значение по умолчанию *Expand*. Во вкладке *Expansion Factor* необходимо поставить

отношение на которое необходимо удлинить лопатку (в примере 0,2) и нажать кнопку *Apply*.

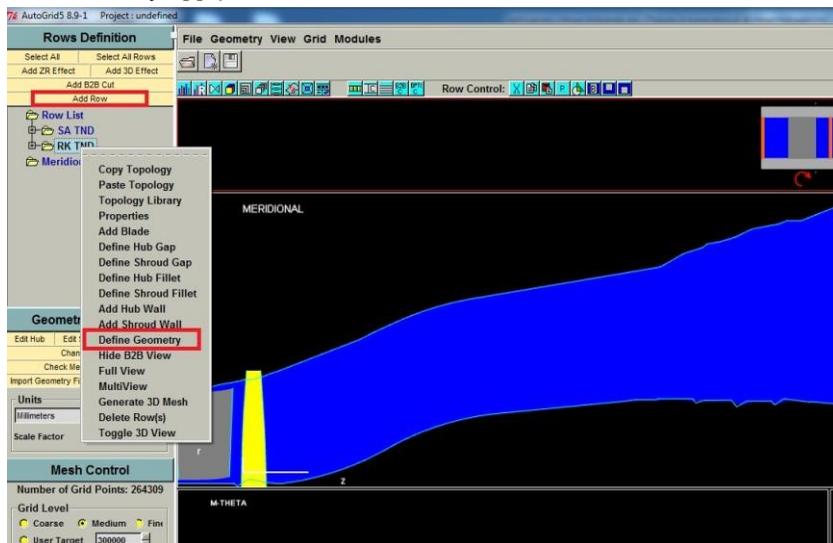


Рис. 2.9. Определение геометрии лопаток

Аналогичную операцию необходимо при необходимости проделать для всех ЛВ ТНД, СТ и стойки опоры.

После выполнения указанных манипуляций в рабочем окне *AutoGrid5* появится проточная часть ТНД с условным изображением лопаток (рис. 2.11). После этого окно *Import CAD* можно закрыть.

Шаг 7. Добавление надбандажных полостей рабочих колес и притрактовых полостей. Турбины в рассматриваемом примере имеют бандажные полки, которые для уменьшения потерь помещены в специальные полости (надбандажные). Из рис. 1.1 также видно, что проточная часть турбин имеет значительные объемы присоединенные к проточной части. В частности в СТ это полость под СА второй ступени. Такие полости называются притрактовыми. Они оказывают заметное влияние на рабочий процесс турбины и смежных узлов, и при его анализе данные явления следует обязательно учитывать.

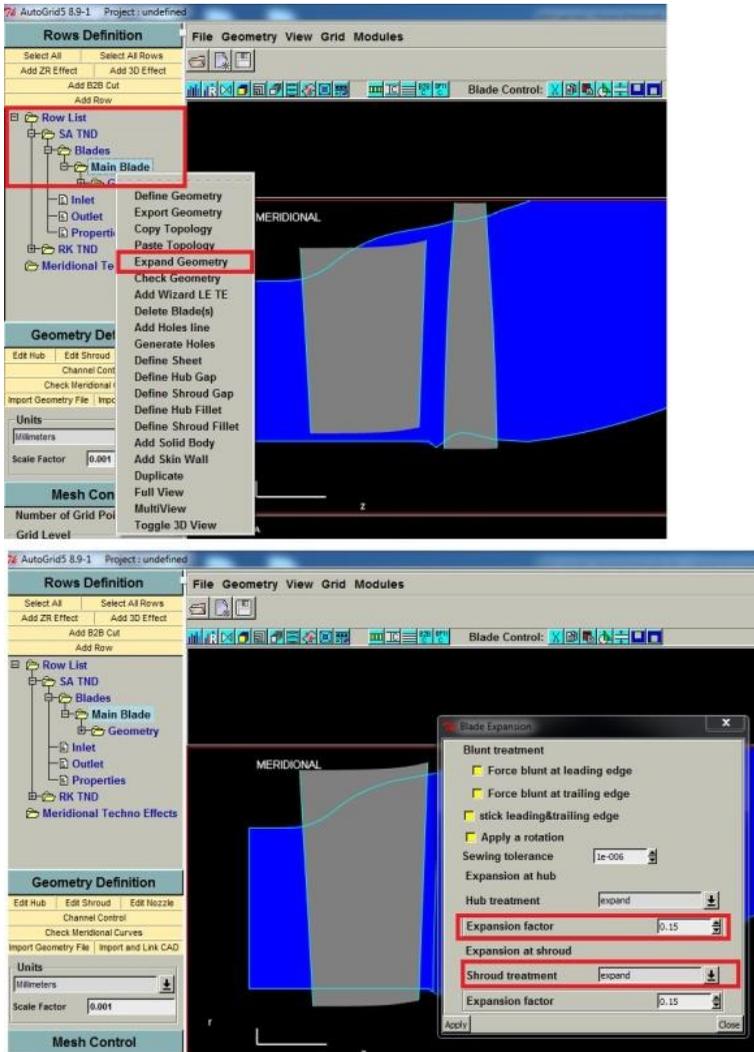


Рис. 2.10. Определение геометрии лопаток

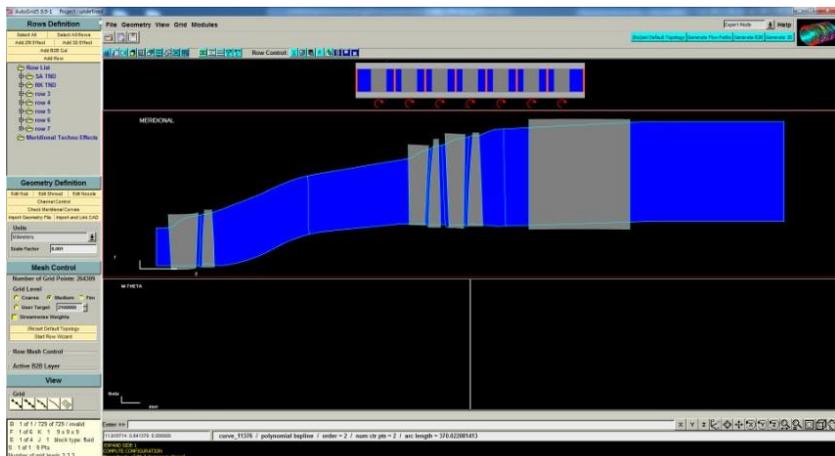


Рис. 2.11. Загруженная геометрия лопаток и меридиональных обводов

Программа *AutoGrid5* имеет специальные средства для моделирования течения в притрастовых и бандажных полостях и учета их влияния на рабочий процесс турбомашин.

Для добавления притрастовой или надбандажной полости необходимо воспользоваться командой *Add ZR Effect*, кнопка которой находится над деревом проекта. После активации команды в дереве появится соответствующий пункт (рис.2.12).

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 (притрастовой) полости. Потом щелчком ПКМ вызывается меню, в котором запускается команда *Import Meridional* (рис.2.13).

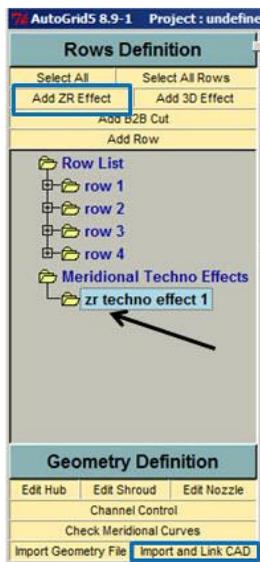


Рис.2.12. Добавление надбандажной полости в расчётную модель

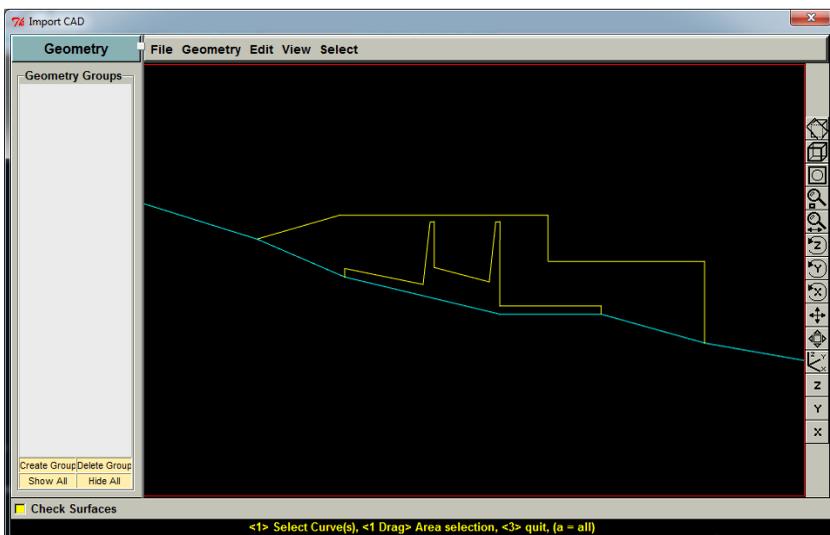


Рис.2.13. Определение границ надбандажной полости

Те же действия следует проделать и для всех надбандажных и притрактных полостей имеющихся в исследуемой турбомашине. После этого окно *Import CAD* можно закрыть. В результате в модуле *AutoGrid5* появятся формы надбандажных и притрактных полостей (рис. 2.14).

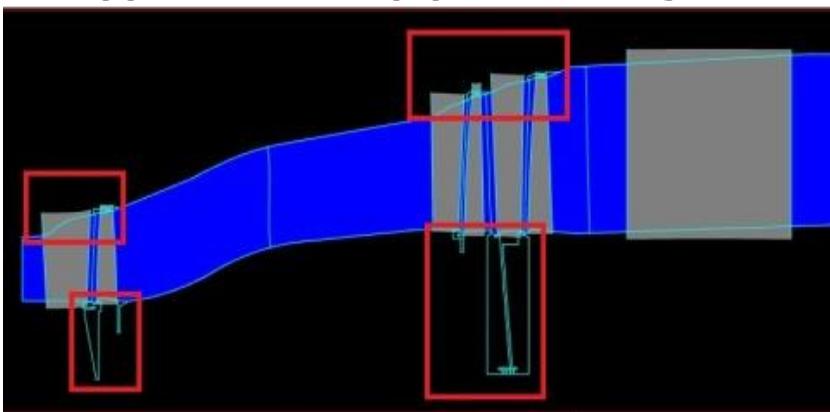


Рис.2.14. Расчетная модель ТНД и СТ с загруженными надбандажными полостями

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. 2.15).

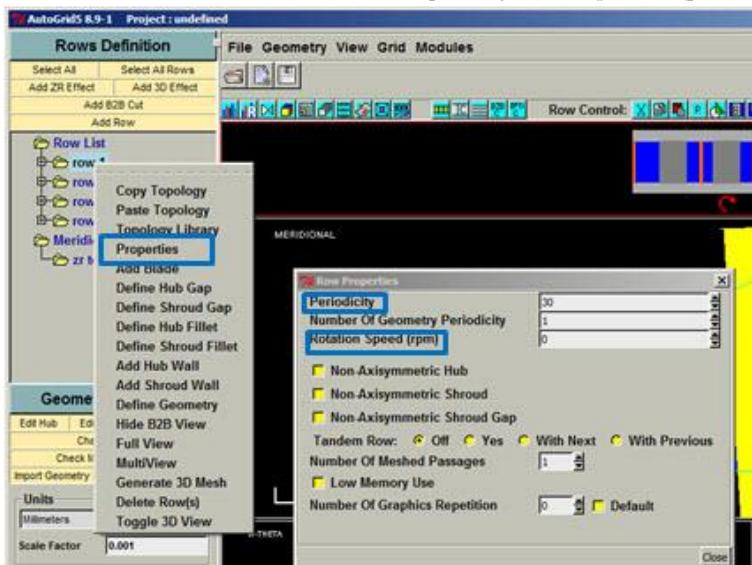


Рис. 2.15. Меню *Properties* и задание параметров сопловой лопатки

В меню *Row Properties* (рис. 2.15), в графе *Periodicity* вводится число лопаток венца (см. табл. 1.1). В строке *Rotation speed* - скорость вращения (если венец неподвижен, то необходимо ввести 0).

Аналогичные действия последовательно выполняются и со всеми другими лопаточными венцами, находящимися в рассматриваемой области. 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 час-

тоты. 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.2.16).

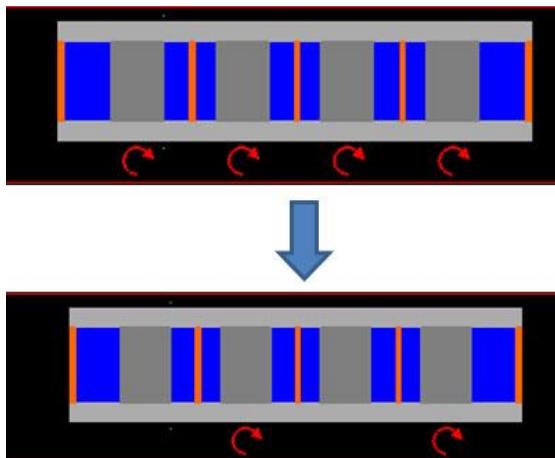


Рис.2.16. Изменение структурного вида расчетной области

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 турбомашины 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 получения 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. 2.17). Постройка сетки осуществляется в последовательности, приведенной ниже. Однако, прежде чем начать генерацию сетки конечных элементов необходимо сделать подготовительные настройки.

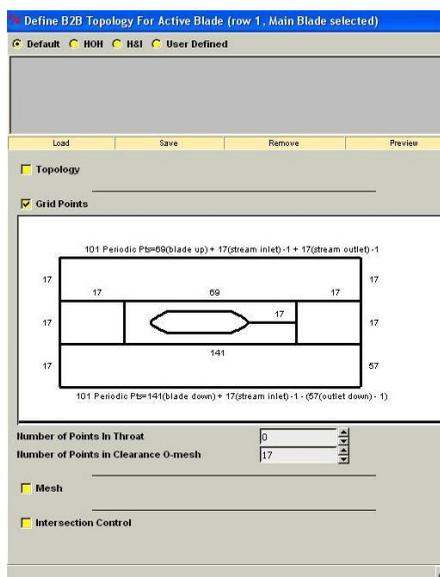


Рис. 2.17. Функция автоматического построения сетки *Row Wizard*

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. 2.18). Эта команда в первом приближении сформирует, сетку в межлопаточных каналах всех венцов. После завершения ее работы в информационном окне появится соответствующее сообщение. На рис. 2.18 представлен результат действия описанной команды.

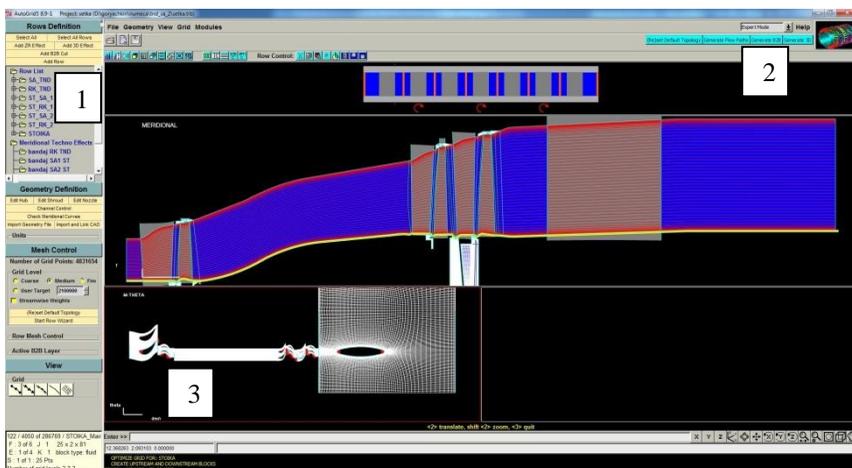


Рис. 2.18. Построение сетки в межлопаточном канале

Далее на получившейся сетке корректируется положение кромок. Для этого курсор подводится к входной (выходной) кромке (рис.2.19). 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.2.19).

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*.

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.2.20). Чтобы это осуществить следует «подцепить» верх-

нюю точку интерфейса и переместить ее с помощью ЛКМ в нужное место. При этом их желательно передвинуть дальше от рабочих лопаток в осевом направлении. При этом следует различать линии $R_s_interface$ (голубые линии на рис. 2.20 - означает границу стыка венцов между собой) и дополнительные линии Z_cst_line , создаваемые пользователем с целью изменения топологии. Пример правильной коррекции положения интерфейсов представлен на рис. 2.20.

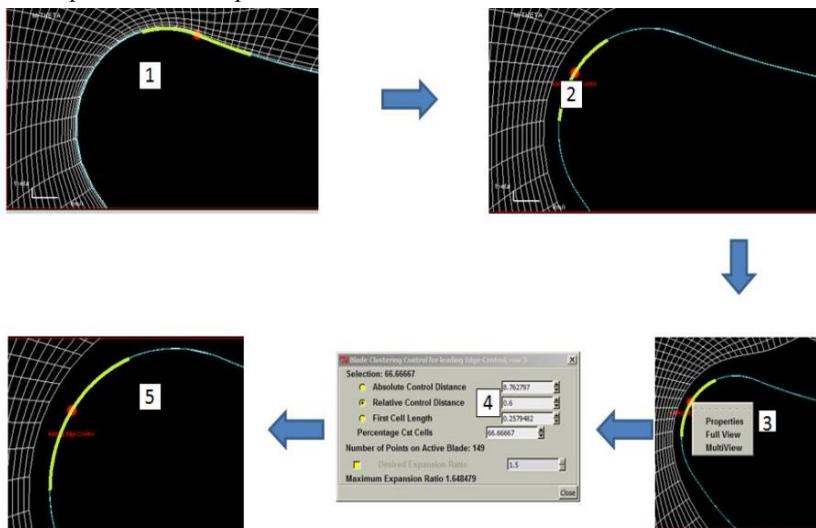


Рис.2.19. Коррекция входной кромки

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.2.21. 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. 2.21).

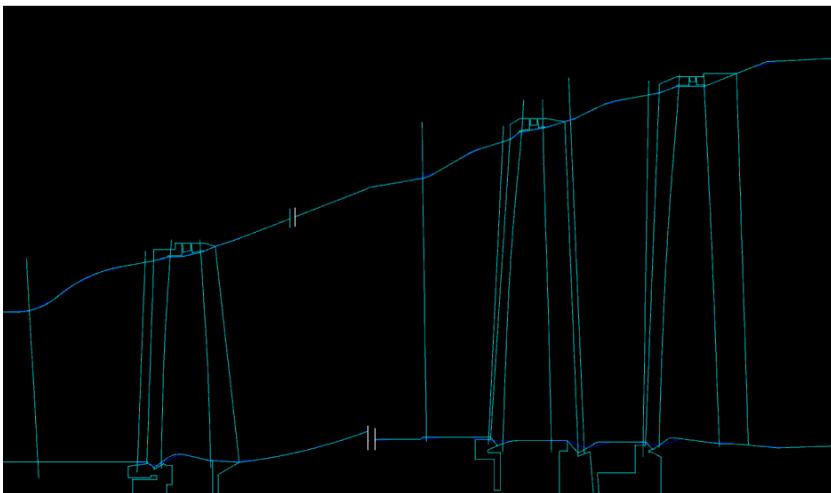


Рис.2.20. Коррекция положения интерфейсов

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. 2.21).

4. Для перехода в следующее меню, в окне *Blade row type* следует нажать *Next* (5 на рис. 2.21).

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. 2.21).

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 радиаль-

ные зазоры отсутствуют. Влияние радиусов галтелей в рассматриваемом примере не учитывается. По этой причине при настройке параметров сетки CA 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. 2.21).

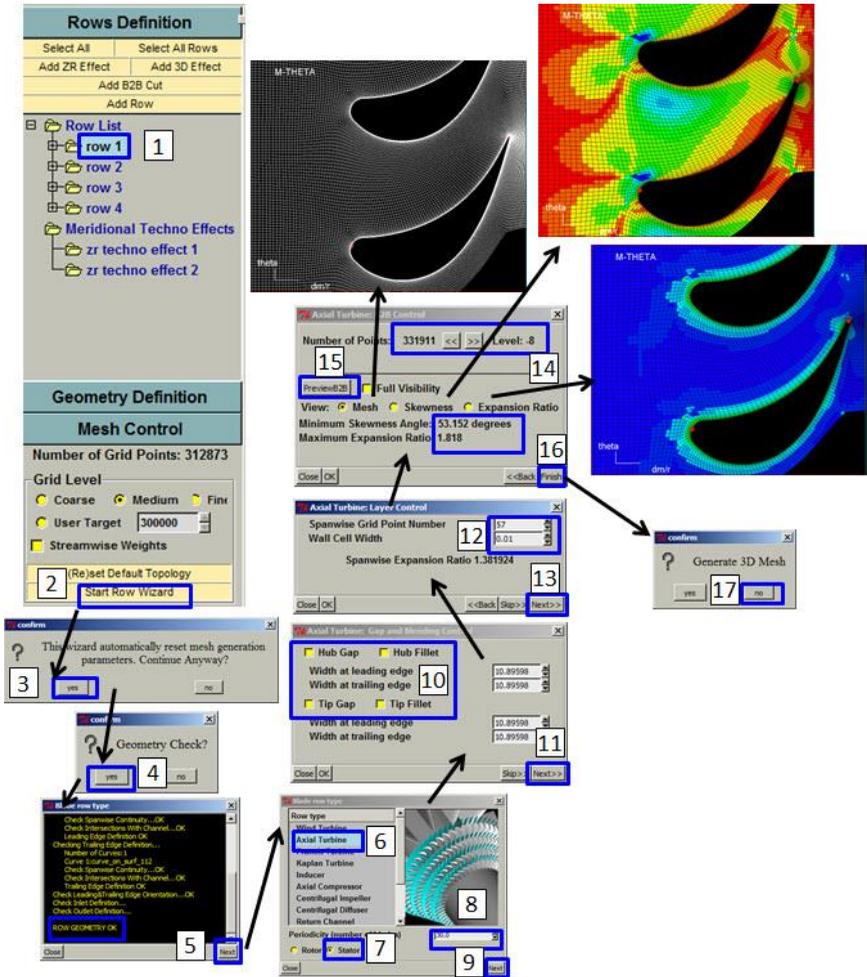


Рис. 2.21. Алгоритм построения конечно-элементной сетки соплового аппарата с помощью *Row Wizard*

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 -73). В строке *Wall Cell Width* вводится размер пристеночной ячейки (в примере - 0,003). Настройки подтверждаются нажатием кнопки *Next* (12 и 13 на рис. 2.21).

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). Используя 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.

Используя кнопку *Preview B2B* (15 на рис. 2.21) 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 этой 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. 2.22).

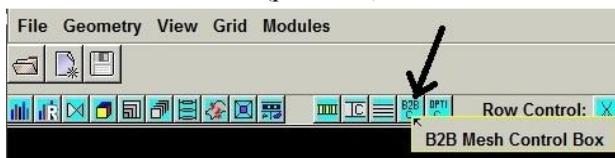


Рис. 2.22. Положение кнопки *B2B Mesh Control Box*

В появившееся меню (рис. 2.17) следует выбрать опцию *Gird Points* и открыть доступ к меню, позволяющему вручную указать число элементов на границах блоков. Для того, чтобы использовать встроенные сетки, количество элементов должно быть кратным выражению $4n+1$, где n – целое число. Варьируя ими можно добиться приемлемого качества сетки. В частности числом элементов вдоль O - подслоя можно улучшить скошенность ячеек (стрелка на рис. 2.17).

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. 2.21). От этого действия следует отказаться, 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. 2.23).

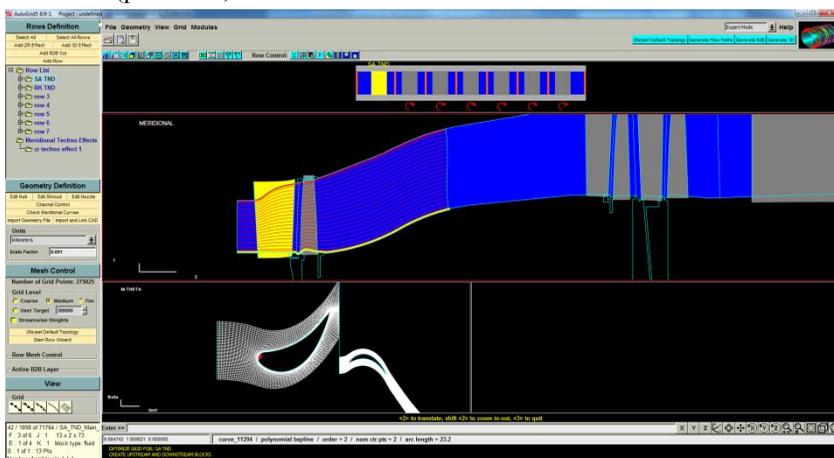


Рис. 2.23. Внешний вид окна программы *AutoGrid* после генерации сетки в первом венце

Аналогично сетка конечных элементов строится для межлопаточного канала рабочей лопатки и всех последующих ЛВ.

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*. Вновь образованные линии не позволяют выполнить корректное согласование доменов лопаточных венцов и протрактных и надбандажных полостей. По этой причине *Z Constant Line* 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. 2.25). Цель данного действия состоит в том, чтобы топология сетки изменилась так, как это показано на рис. 2.26.

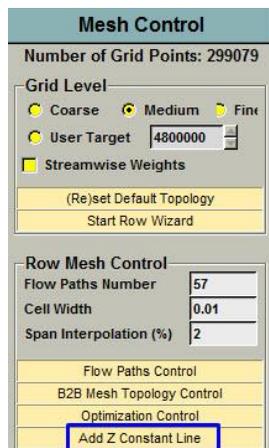


Рис. 2.24. Команда Add Z Constant Line

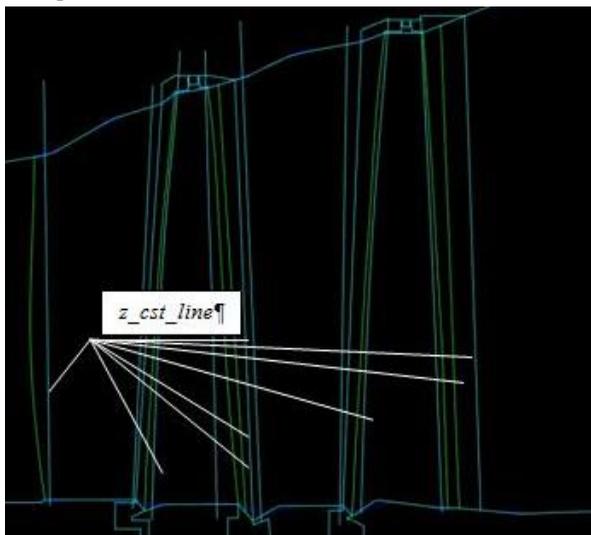
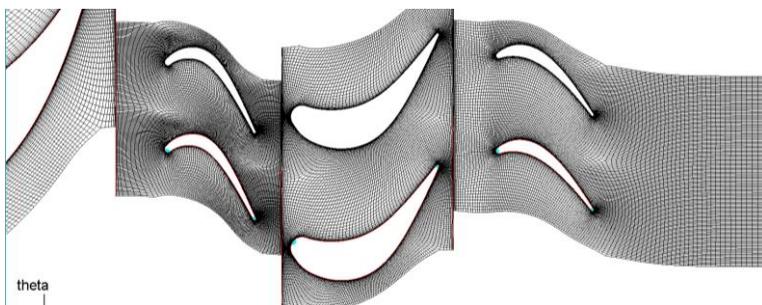
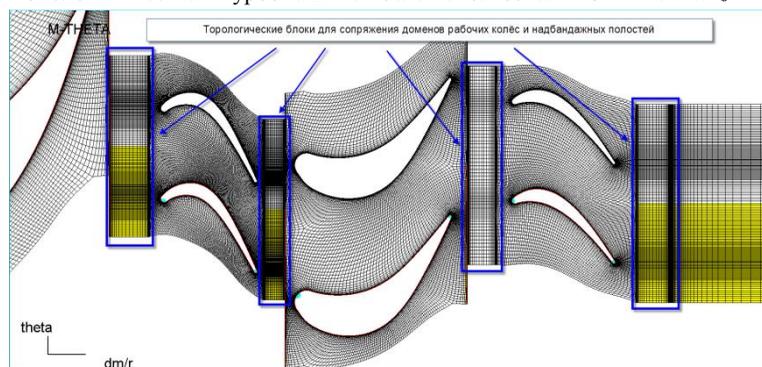


Рис. 2.25. Z Constant Line, которые необходимо добавить



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



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

Рис. 2.26. 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.2.24). После этого линии автоматически привязываются к точкам на периферийном обводе, щелчком ЛКМ. Результат этого действия показан на рис. 2.27.

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. 2.28, а для линий типа *Rotor Stator Interface (RS_Interface)* - как на рис.2.29.

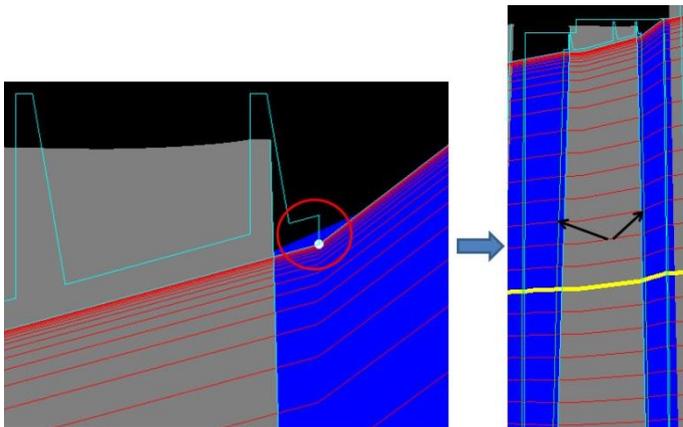


Рис.2.27. Добавление линий Z Constant Line

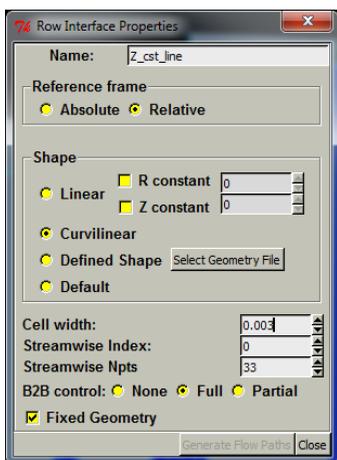


Рис.2.28. Параметры границы Z Constant Line

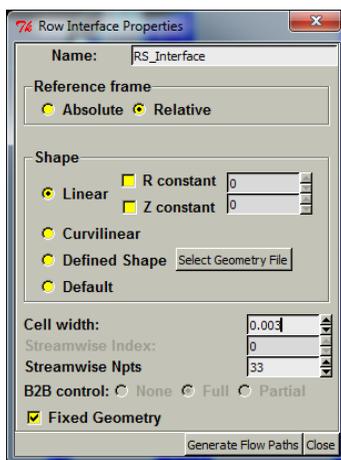


Рис.2.29. Параметры границы Rotor Stator Interface

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 запускается нажатием кнопки *Start* в поя-

вившемся меню *Generation Control* (рис. 2.30). Процесс генерации может занять некоторое время, которое определяется заданными параметрами сетки и производительностью компьютера.

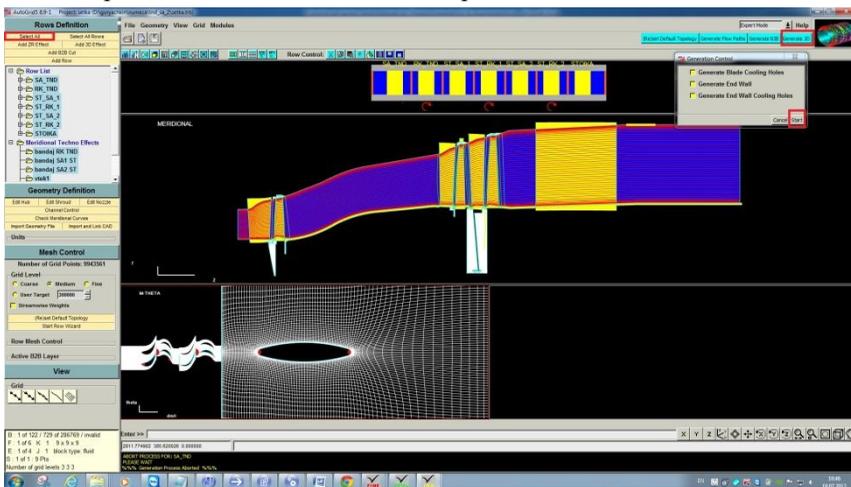


Рис. 2.30. Генерация пространственной сетки

2.1.3. Проверка качества сетки конечных элементов

После окончания процесса генерации сети появляется окно *Grid Quality Check*, изображенное на рис. 2.31, 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 межлопаточных каналах за счёт изменения формы и положения линий *Z Constant Line* или количества элементов в топологических блоках.

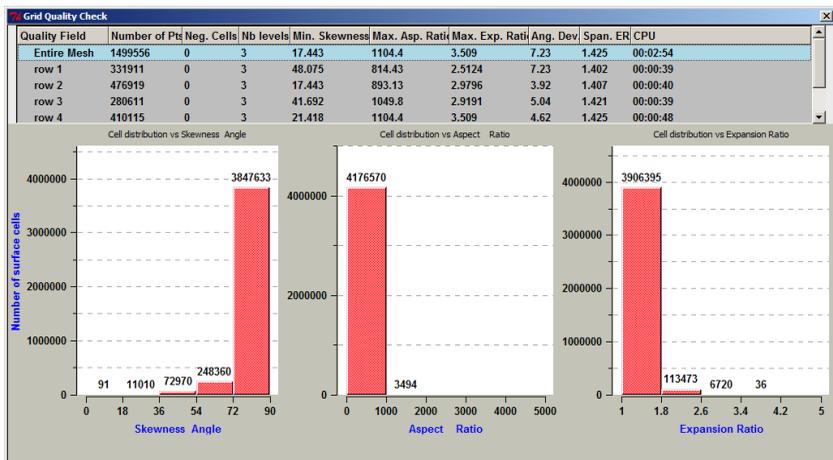


Рис. 2.31. Окно *Grid Quality Check*

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:

GM → *View* → *View 3D Solid Mesh.*

После ее выполнения внешний вид окна программы поменяется и станет таким как изображено на рис. 2.32.

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. 2.33, 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. 2.33).

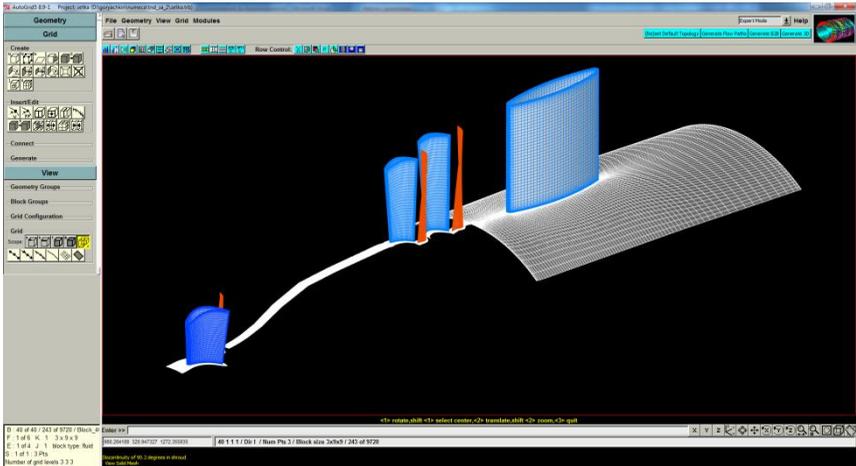


Рис. 2.32. Отображение трехмерной расчетной области

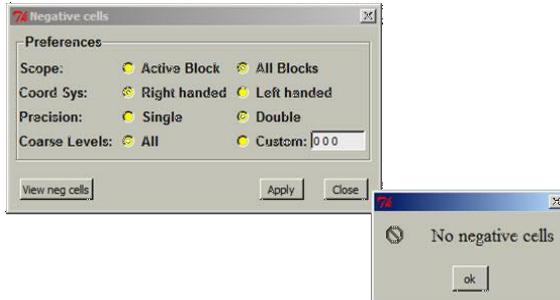


Рис. 2.33. Проверка созданной сетки на наличие негативных объемов

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:

FM → *Grid* → *Grid Quality*.

Внешний вид меню *Grid Quality* показан на рис. 2.34. 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*.

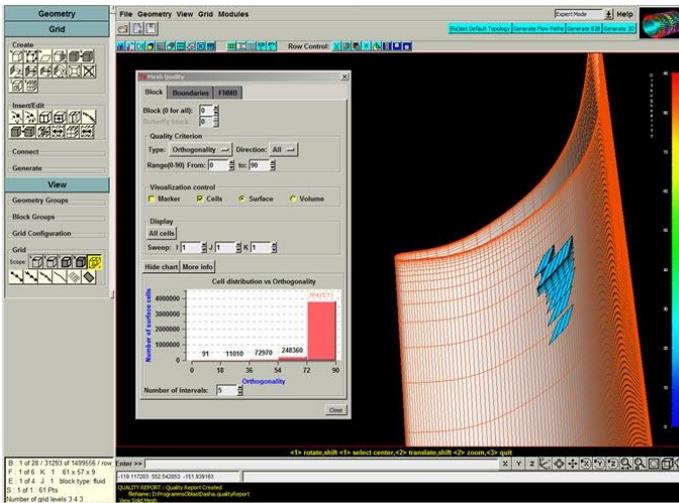


Рис. 2.34. Проверка качества сетки конечных элементов

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 притрактных 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.2.35).

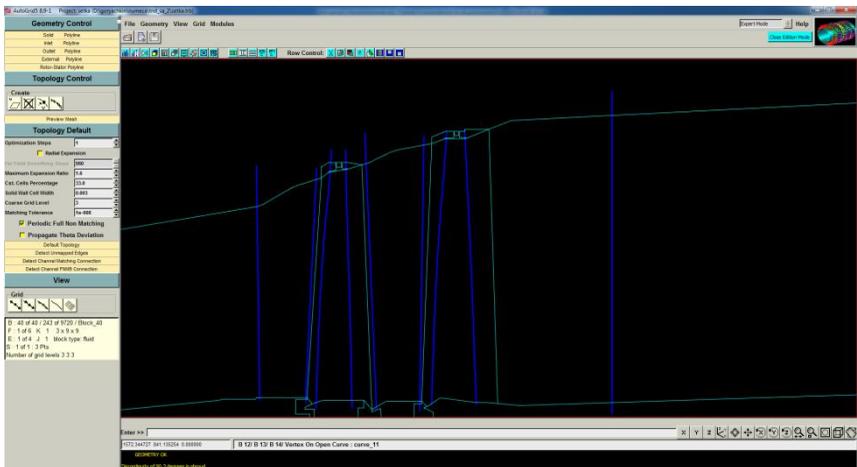


Рис. 2.35. Меню редактирования надбандажных полостей

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

Шаг 16. Разбиение надбандажной полости на топологические блоки. Для построения топологических блоков в притрактной 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.2.36), затем указать положение второго узла и снова щелкнуть ЛКМ. Окончательное положение блока нужно подтвердить третьим щелчком ЛКМ.

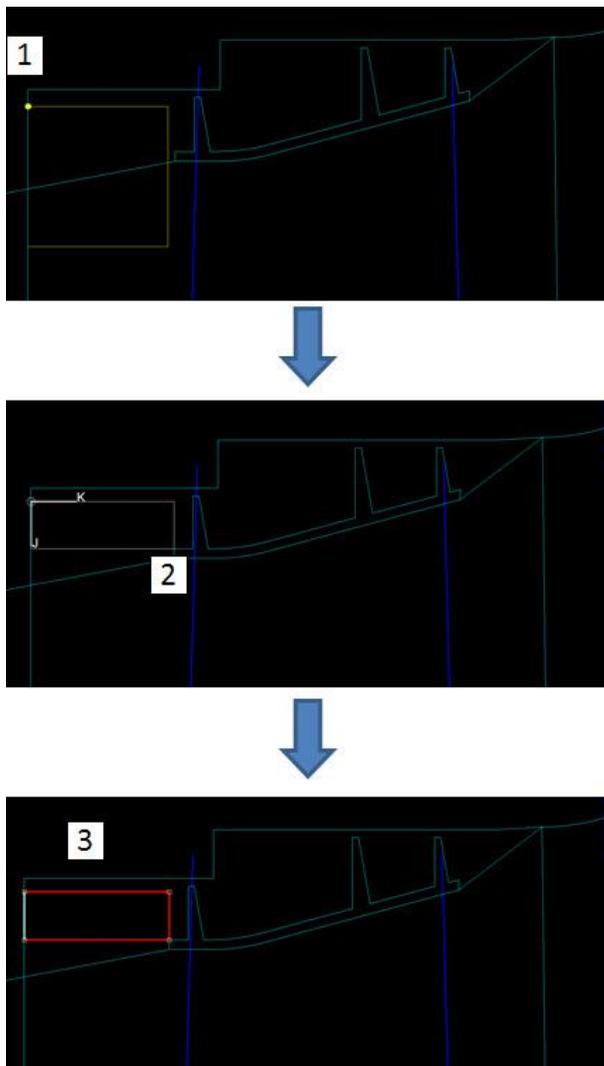


Рис.2.36. Создание топологического блока

Узлы, образующие созданный топологический блок, можно перемещать, щелкнув по ним ЛКМ (рис.2.37), повторный щелчок закрепит новое положение узла.

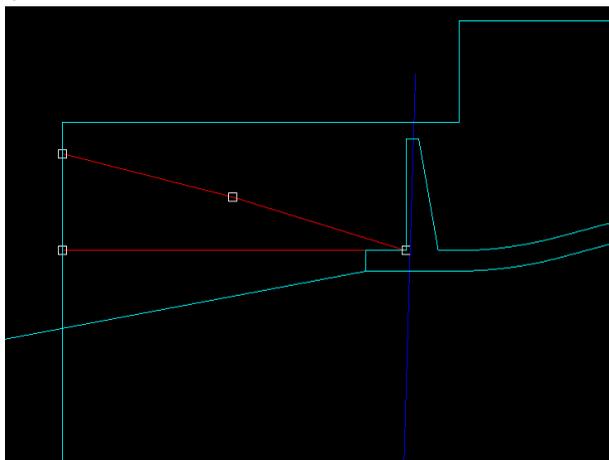


Рис. 2.37. Перемещение узлов

Кроме того, при необходимости сопряжение топологического блока, например со сплайном, можно добавить дополнительные узлы (рис.2.38).

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 несопадений (рис.2.39). Выход из режима проверки сопряжения осуществляется щелчком ПКМ.

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

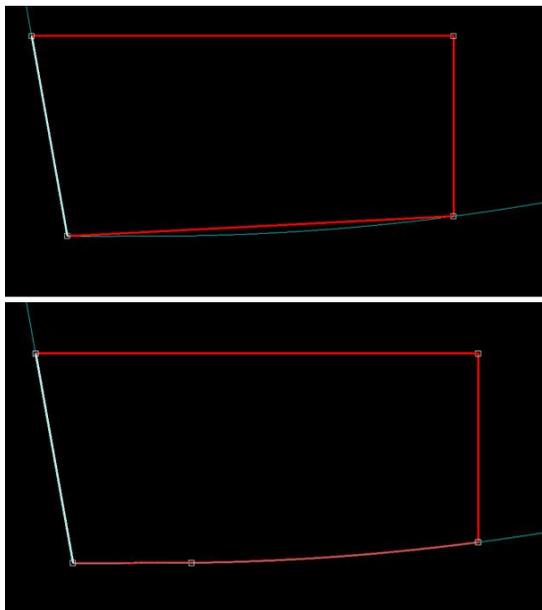


Рис.2.38. Добавление нового узла в топологический блок

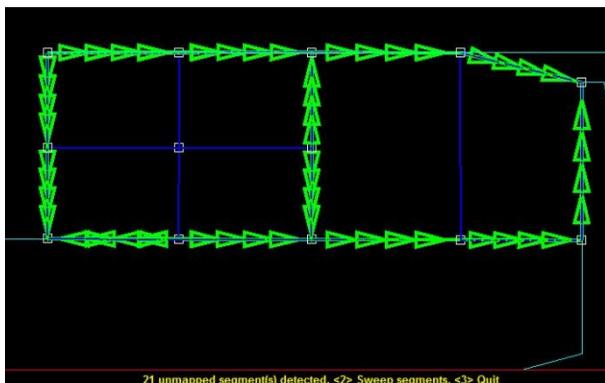


Рис.2.39. Обнаружение несопряженных граней

Грани соседних блоков должны стыковаться по всей длине. Не допускается, чтобы одна грань была длиннее другой и более длинная грань разрывалась точкой (рис.2.40).

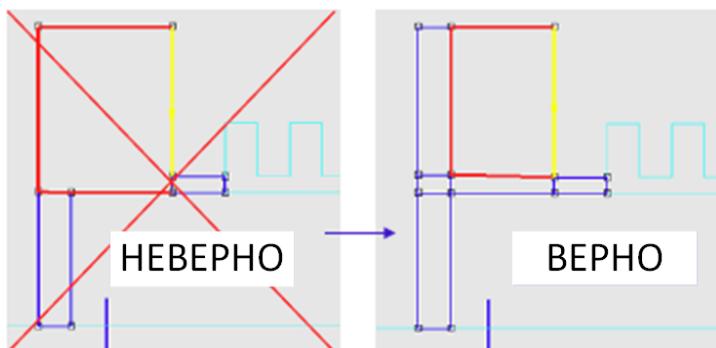


Рис.2.40. Сопряжение топологических блоков

Блоки должны сопрягаться с поверхностью меридионального обвода только одной гранью (рис.2.41).

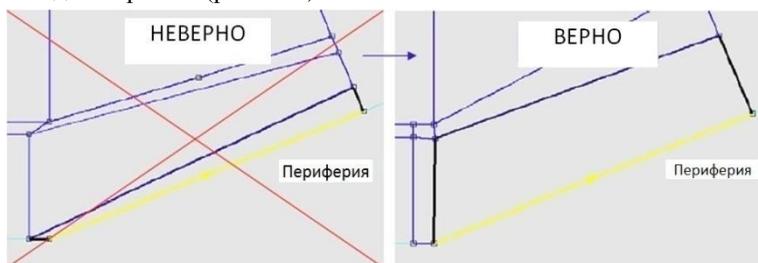
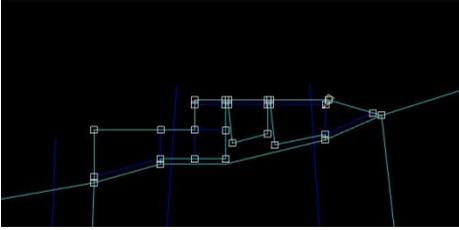


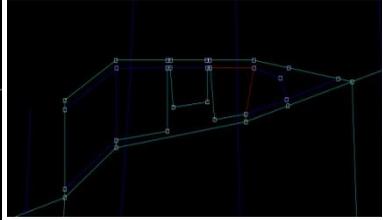
Рис. 2.41. Сопряжение блоков с границами расчетной области

Следуя приведенным выше правилам и рекомендациям, необходимо заполнить меридиональное сечение надбандажной полости топологическими блоками без разрывов. Пример заполненной полости показан на рис. 2.42,а. Аналогичные действия выполняются и для других притрактовых и надбандажных полостей. На рис. 2.42,б представлено расположение топологических блоков в надбандажной полости второй ступени СТ в примере.

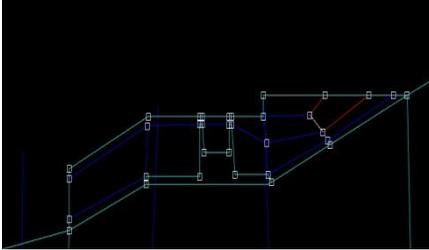
Шаг 17. Настройка параметров сетки конечных элементов надбандажной полости. На следующем этапе необходимо задать параметры сетки конечных элементов, которая будет строиться для надбандажных полостей. Для этого используется меню *Topology Default*. Там следует ввести размер элементов сетки в пункте *Solid Wall Cell Width* равный 0,003. Остальные параметры остаются без изменения (рис.2.43).



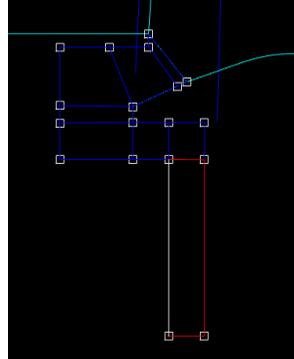
а) Для РК ТНД



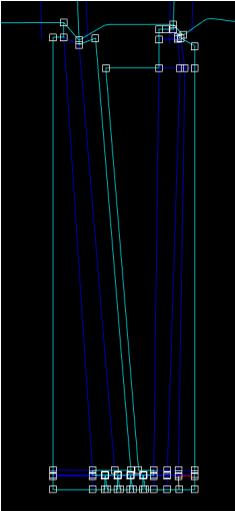
б) Для первого РК СТ



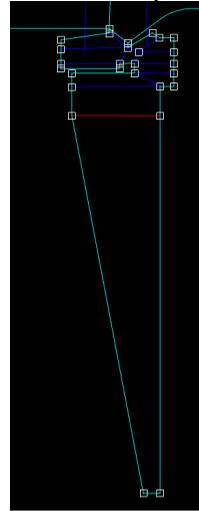
в) Для второго РК СТ



г) Для ветвления в тракт ТНД



д) Для лабиринтного уплотнения СТ



е) Для отбора из тракта ТНД

Рис.2.42. Пример разделения притрактовых полостей топологическими блоками

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. 2.44.

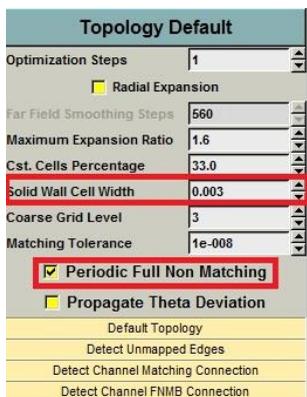


Рис.2.43. Меню параметров сетки конечных элементов

Если необходимо, полученную топологию можно отредактировать. Выбирая ПКМ грани любого топологического блока, можно изменять тип расположения элементов вдоль этой грани (меню *Distribution*, рис. 2.45): от начала грани (*At Start*), от конца (*At End*) и т.д., либо число элементов на данной грани (меню *Set Number of Points*, рис. 2.46).

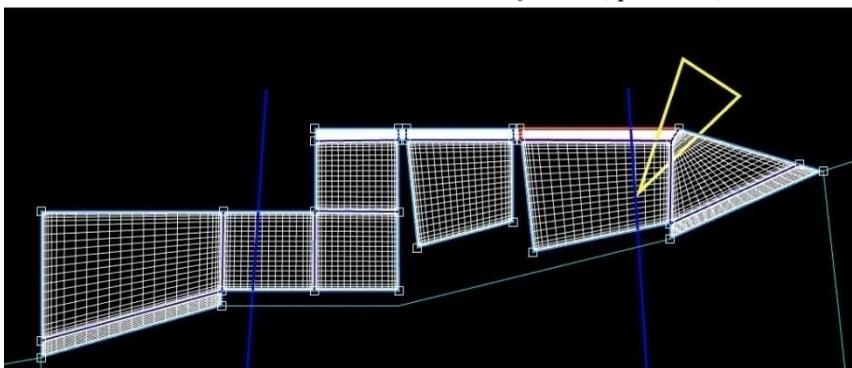


Рис.2.44. Топология сетки конечных элементов в надбандажной полости

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.

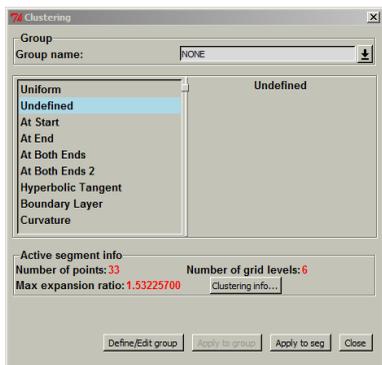


Рис. 2.45. Меню Distribution

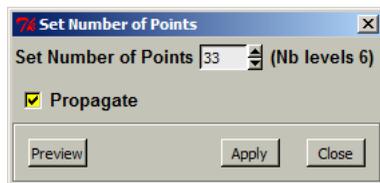


Рис. 2.46. Меню Set Number of Points

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. 2.47). 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. 2.48.

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 приступать к дальнейшей работе над моделью, необходимо проверить правильность назначения границ. Для этого необходимо выполнить команду:

ГМ → *Grid* → *Boundary Conditions*.

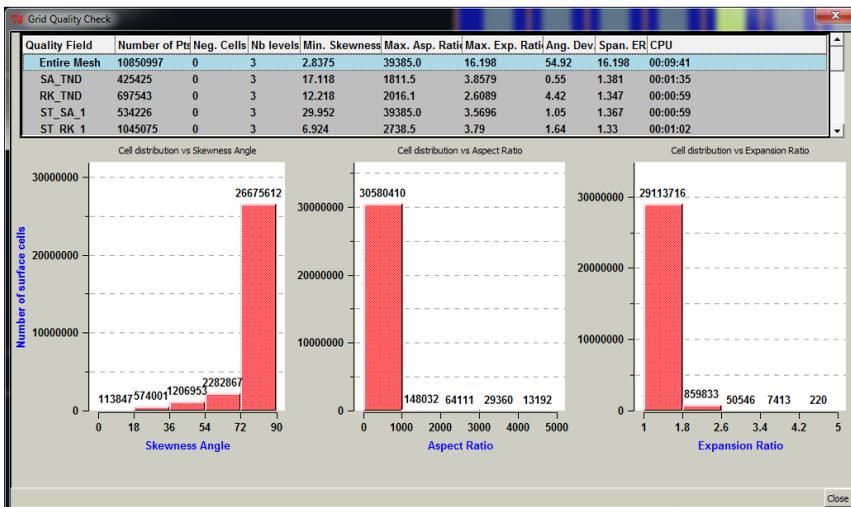


Рис. 2.47. Параметры качества окончательного варианта сетки расчетной модели турбины с притрактовыми полостями

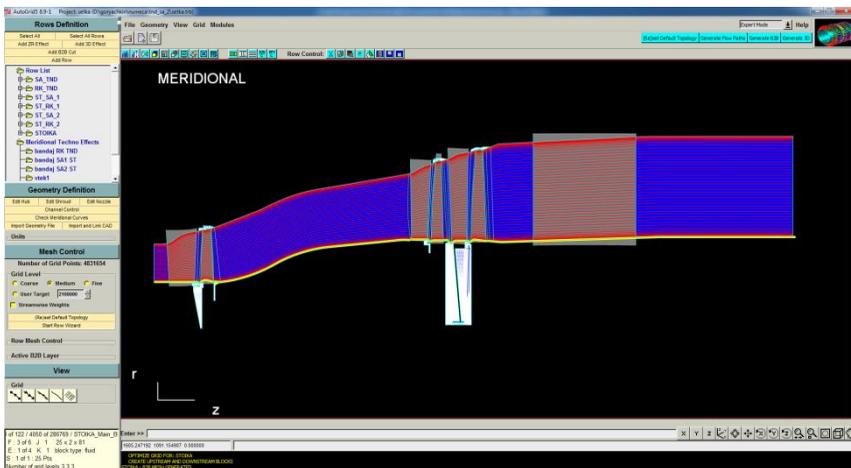


Рис. 2.48. Внешний вид сетки конечных элементов использованной в расчете

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* ока-

жется пустым как показано на рис. 2.49 (справа), то это означает, что все границы рассматриваемой модели описаны.

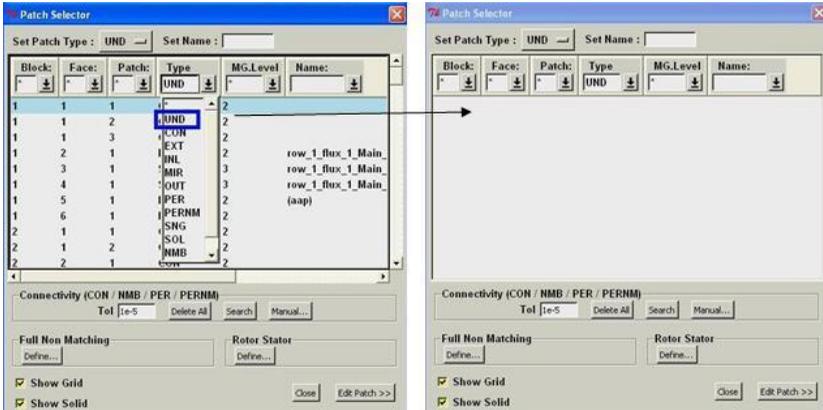


Рис. 2.49. Окно назначения граничных условий

Если такие участки имеются (рис.2.50), их обязательно необходимо описать.

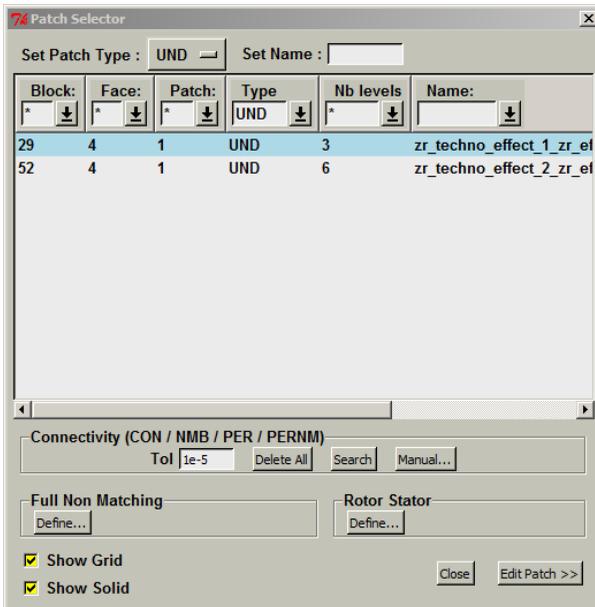


Рис. 2.50. Окно назначения граничных условий с неописанными областями

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. 2.50) выбирается пункт *Full Non Matching/Define...* (рис. 2.51). 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. 2.52).

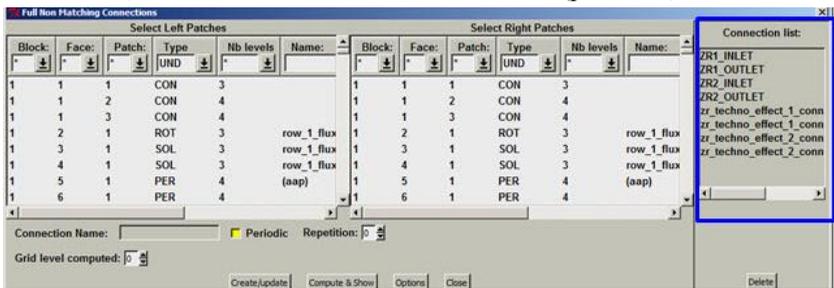


Рис. 2.51. Меню *Full Non Matching Connections*

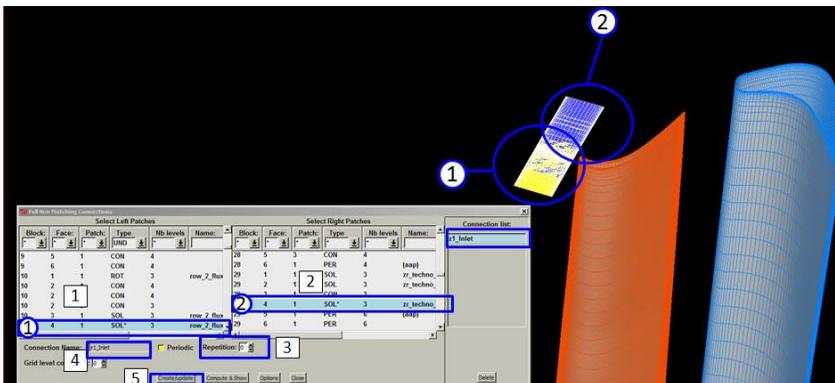


Рис. 2.52. Выбор поверхностей для интерфейса, определяющего вход в надбандажную полость

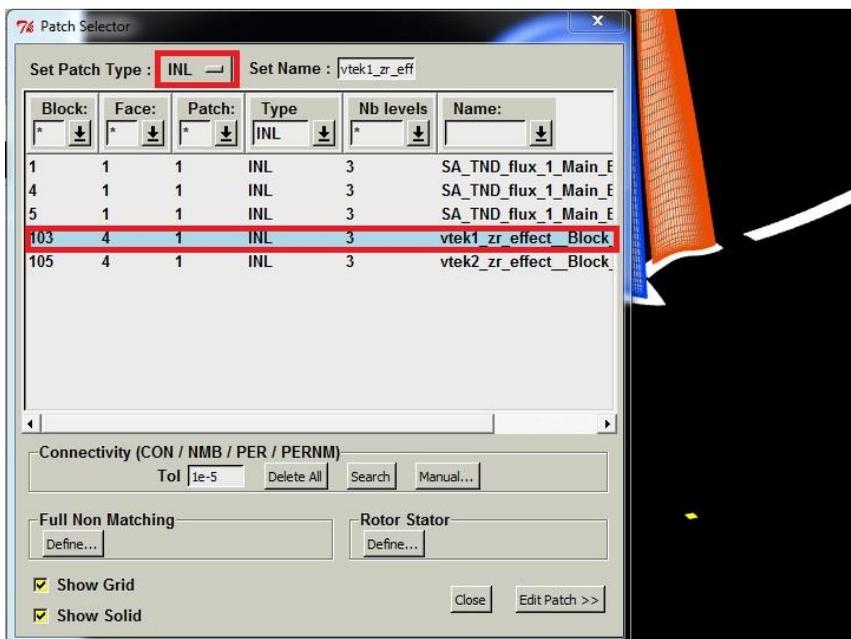


Рис. 2.53. Назначение входных границ

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.).

Для поверхностей, через которые будет осуществляться втекание и утечки рабочего тела из тракта необходимо задать, что они являются границами входа (*INL*) или выхода (*OUT*).

Для этого в окне *Patch Selector* необходимо выбрать поверхность, соответствующую входной границе. В списке *Set Patch Type* необходимо указать *INL*.

Аналогичные действия необходимо проделать и для остальных поверхностей являющихся входными (установить тип *INL*) и выходными (указать тип *OUT*) поверхностей.

Законченная модель сохраняется с помощью команды:

GM → File → Save Project As.

После ее выполнения появится окно, содержащее информацию о качестве сетки записанной модели.

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

2.2. ОПИСАНИЕ ГРАНИЧНЫХ УСЛОВИЙ И НАСТРОЙКИ РЕШАТЕЛЯ ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ ТЕЧЕНИЯ МНОГОКАСКАДНОЙ ТУРБИНЫ С ПЕРЕХОДНЫМИ КАНАЛАМИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ САЕ ПАКЕТА NUMECA

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. 2.54). В нем следует выбрать вкладку *Create a New Project*, и с ее помощью новый проект, присвоив ему желаемое имя.

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.



Рис. 2.53. Стартовое окно программы *FINE™/Turbo*

Шаг 24. Определение параметров проекта. После загрузки расчетной модели, появится окно *Grid Units and Project Configuration* (рис. 2.54), 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. 2.54. 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. 2.55. Как видно из рисунка, графический интерфейс программы состоит из дерева проектов (в левой части), главного меню (сверху) и рабочей области.

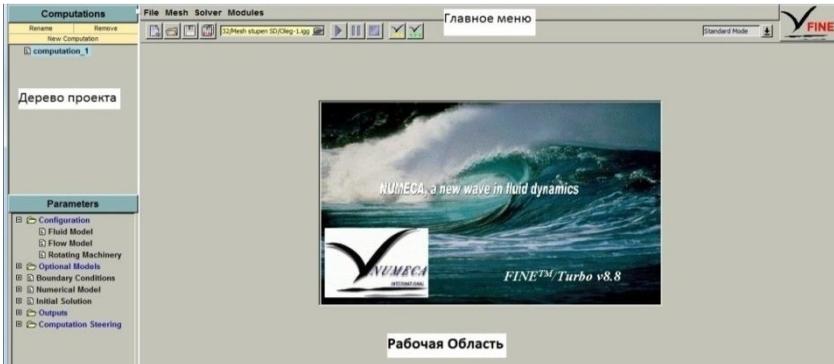


Рис. 2.55. Окно программы FINE™ Turbo после загрузки модели

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.

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, 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 Сатерленда.

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 Сатерленда:

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

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. 2.56). Она содержит обширную базу данных веществ с максимально возможным описанием свойств.

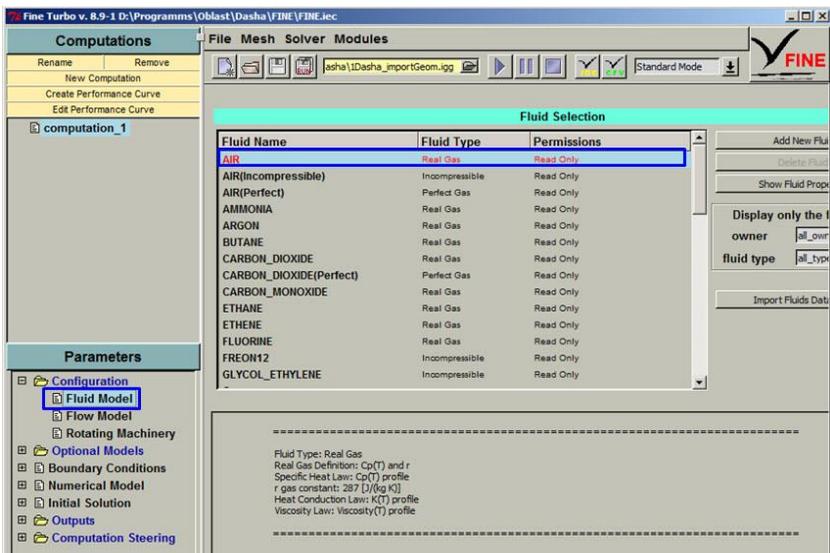


Рис. 2.56. Выбор свойств рабочего тела в меню *Fluid Model*

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):

<i>FINE profile file</i>	
<i>100</i>	<i>877.981964</i>
<i>200</i>	<i>923.077312</i>
<i>300</i>	<i>964.650228</i>
<i>400</i>	<i>1002.864896</i>
<i>500</i>	<i>1037.8855</i>
<i>600</i>	<i>1069.876224</i>
<i>700</i>	<i>1099.001252</i>
<i>800</i>	<i>1125.424768</i>
<i>900</i>	<i>1149.310956</i>
<i>1000</i>	<i>1170.824</i>
<i>1100</i>	<i>1190.128084</i>
<i>1200</i>	<i>1207.387392</i>
<i>1300</i>	<i>1222.766108</i>
<i>1400</i>	<i>1236.428416</i>
<i>1500</i>	<i>1248.5385</i>
<i>1600</i>	<i>1259.260544</i>
<i>1700</i>	<i>1268.758732</i>
<i>1800</i>	<i>1277.197248</i>
<i>1900</i>	<i>1284.740276</i>
<i>2000</i>	<i>1291.552</i>
<i>2100</i>	<i>1297.796604</i>

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. 2.56) 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. 2.57).

В следующем окне (рис. 2.58) напротив пункта *Specific Heat Law* (закон изменения теплоёмкости) необходимо выбрать *Cp(T) and r*. Данное действие назначает, что показатель адиабаты рабочего тела будет определяться полиномом *Cp(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: $R = 287,335 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}\cdot\text{К}}$.

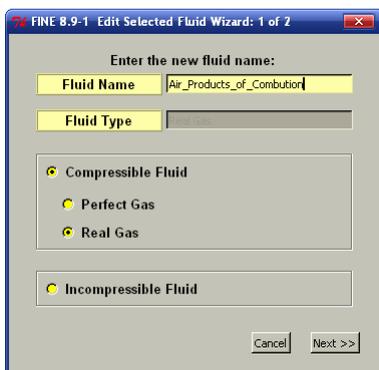


Рис. 2.57. Окно указания основных свойств материала

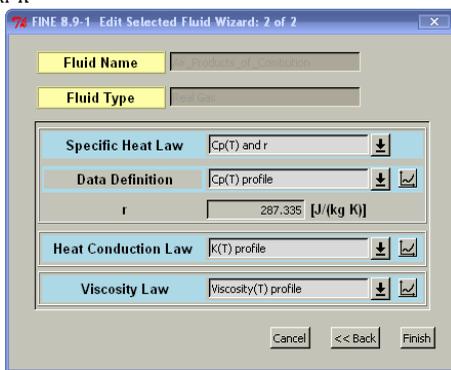


Рис. 2.58. Окно указания теплоёмкости и вязкости материала

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. 2.59. В нем необходимо сделать следующие настройки:

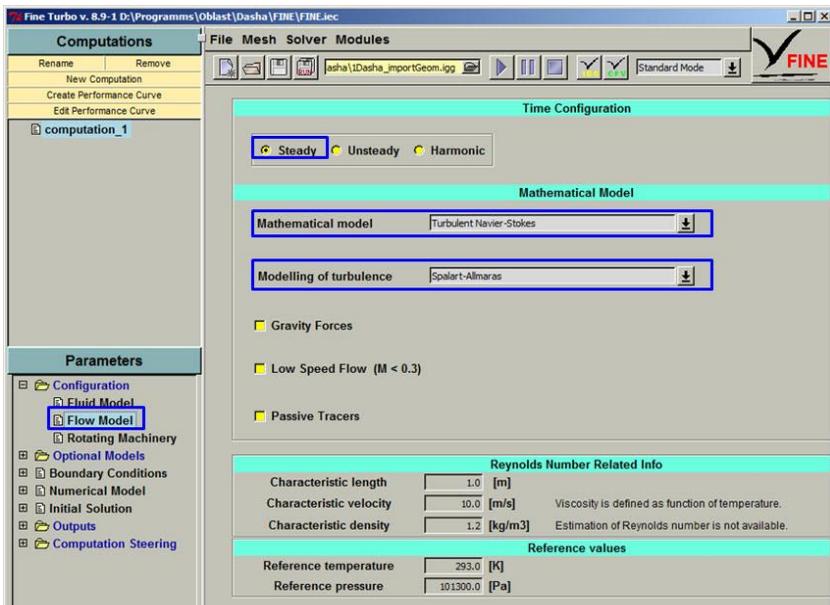


Рис. 2.59. Описание задачи в меню *Flow Model*

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*.

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 турбу-

лентностями. 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 «экономной» 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. 2.60. Для неподвижных венцов (СА и НА) и притрактовых и надбандажных полосей необходимо указать скорость вращения θ (т.к. это неподвижные элементы). В рассматриваемом примере это зоны: *row 1* (СА первой ступени), *row 3* (СА второй ступени), *row 5* (СА третьей ступени), *row 7* (стойка), притрактовые полости. Для рабочих венцов задается частота вращения ротора. В рассматриваемом примере это *row 2* (ПК первой ступени) и *row 4* (ПК второй ступени), *row 6* (ПК третьей ступени), надбандажные полости. Скорость указывается в поле *Rotational Speed* (рис. 2.60).

Шаг 28. Задание граничных условий на границе ротор-статор. В любой лопаточной машине есть неподвижные лопаточные венцы (СА и НА) и подвижные (ПК). 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 задавать скорость и направление вращения для вращающихся доменов.

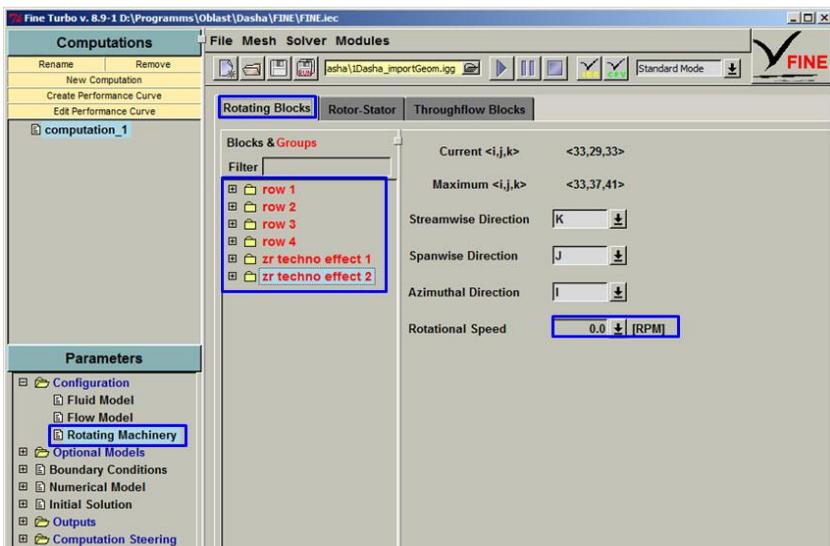


Рис. 2.60. Описание частот вращения венцов *Rotating Machinery*

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 смещения).

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. 2.61. Физически применение данного интерфейса означает то,

что закрочный след от лопатки, например, СА, 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* интрефейс, использующий подход «замороженный ротор» называется *Full Non Matching Frozen Rotor*.

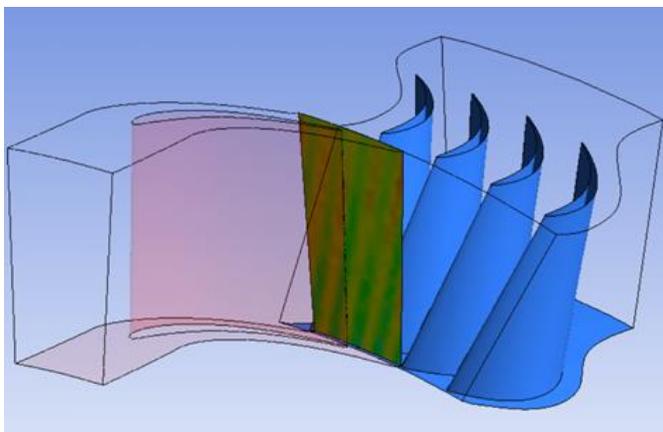


Рис. 2.61. Интерфейс типа *Frozen Rotor*

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. 2.62. 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*.

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

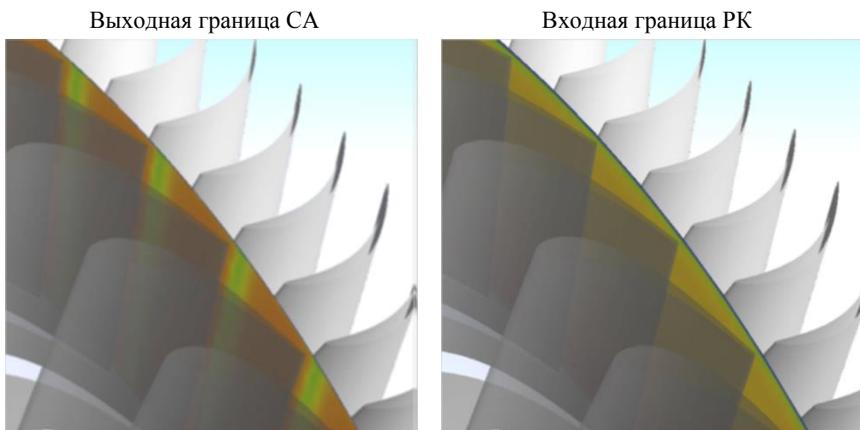


Рис. 2.62. Работа интерфейса *Mixing Plane*

Настройка интерфейсов осуществляется в том же диалоговом окне *Rotating Machinery*. Задание этого ГУ осуществляется следующим образом (рис. 2.63).

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 вверх 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 вниз по течению относительно границы).

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

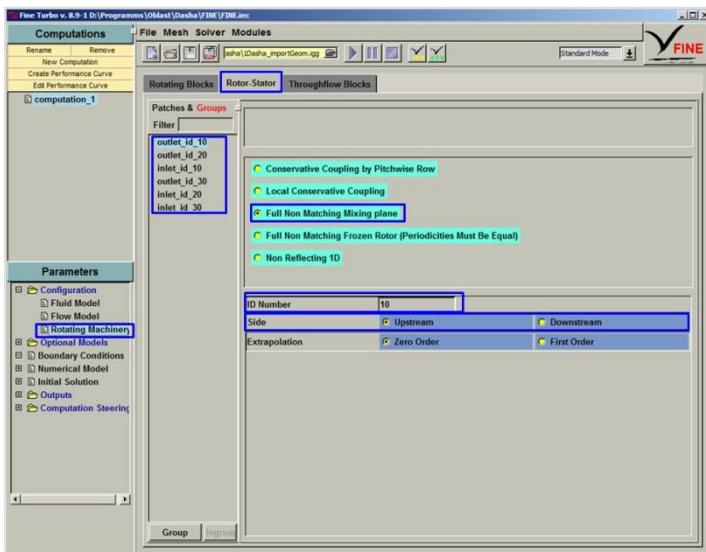


Рис. 2.63. Установка граничных условий на границе ротор-статор

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. 2.64):

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*) – гра-

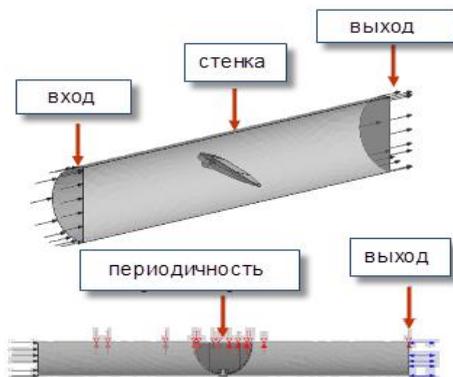


Рис. 2.64. Возможные типы граничных условий

ницы, которые являются поверхностями твёрдых тел, формирующих зону течения;

Границы-интерфейсы – те границы, через которые поток взаимодействует 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 границам-выходам.

Для расчета течения в турбомашинах 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 турбомашин;
- 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 расчётной 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 на выходе, а также расход 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. 2.65...2.68 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 *Numeca Fine Turbo* в качестве граничных условий, их необходимо записать в виде текстовых файлов следующего вида:

```
FINE profile file
0.339704700.0
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. 2.65) меню *Boundary Conditions*. В нем необходимо сделать следующие настройки.

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

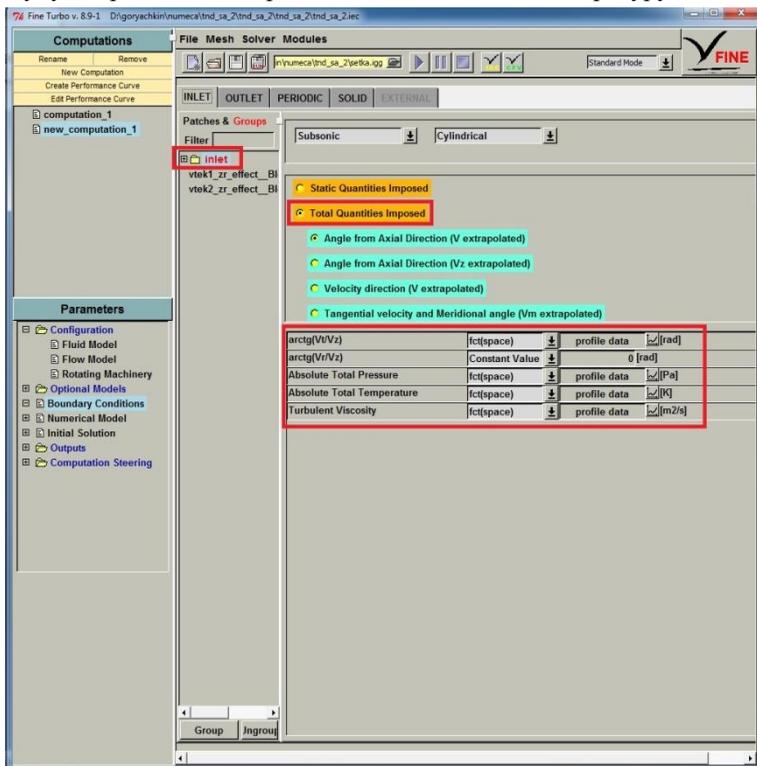


Рис. 2.65. Задание входных граничных условий (меню *Boundary Condition* вкладка *INLET*)

2. Отметить опцию \otimes *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.

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

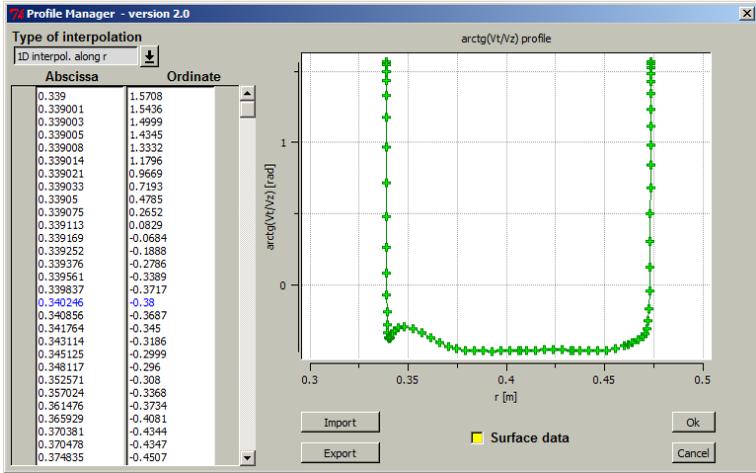
- нажать на кнопку  в поле $\arctg(Vt/Vz)$ и из выпадающего списка выбрать пункт *fct (space)*;
- нажать на появившуюся кнопку  в поле $\arctg(Vt/Vz)$;
- в появившемся окне *Profile Manager* (менеджер профилей) (рис. 2.66, а) нажать на кнопку *Import* и указать путь к созданному текстовому файлу с табулированной 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: $\arctg(Vr/Vz)$. Данный угол является углом между касательной к проекции линии тока в меридиональной плоскости и осью турбомашины. При расчёте ТНД вводится допущение об отсутствии радиальной компоненты скорости на входе. Поэтому в поле $\arctg(Vr/Vz)$ необходимо ввести значение θ .

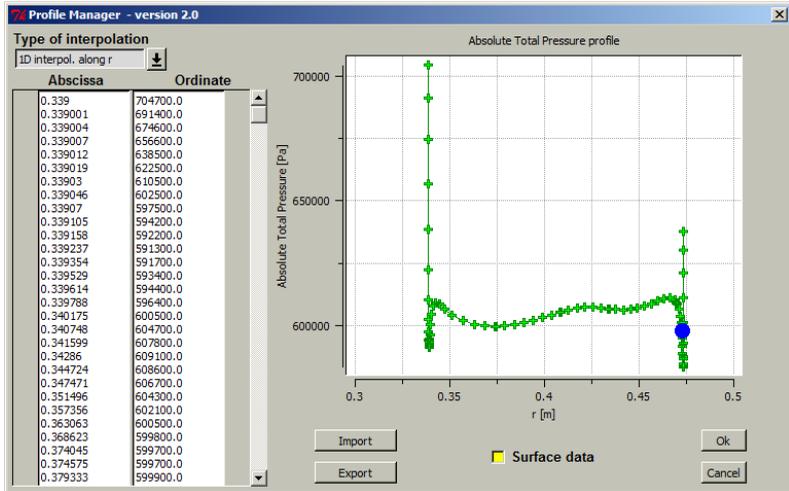
5. В поле *Absolute Total Pressure* (Абсолютное полное давление на входе) необходимо задать распределение полного давления по радиусу (аналогично как это делалось применительно к пункту $\arctg(Vt/Vz)$) (рис. 2.66, б).

6. В поле *Absolute total Temperature* (Абсолютная полная температура) необходимо задать распределение полной температуры по радиусу (аналогично как это делалось применительно к пункту $\arctg(Vt/Vz)$) (рис. 2.67, а).

7. В поле *Turbulent Viscosity* (турбулентная вязкость) необходимо задать распределение турбулентной вязкости по радиусу (аналогично как это делалось применительно к пункту $\arctg(Vt/Vz)$) (рис. 2.67, б).

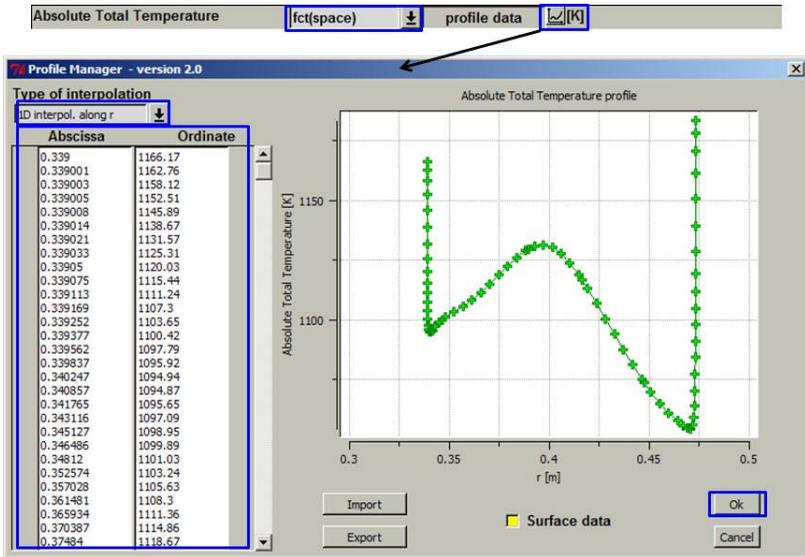


а) Эюра изменения тангенса угла между осевым и окружным направлением

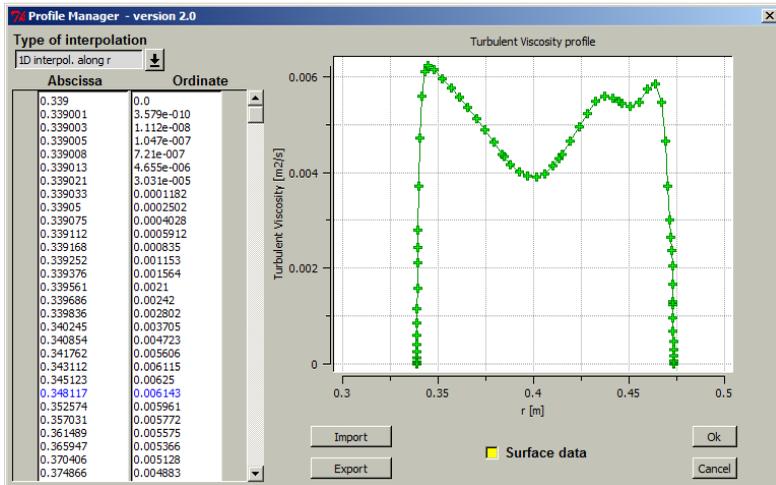


б) Эюра изменения полного давления

Рис. 2.66. Определение эюры изменения параметров



а) Эпюра изменения полной температуры



б) Эпюра изменения турбулентной вязкости

Рис. 2.67. Определение эпюры изменения параметров

Следующим шагом необходимо задать граничные условия для втекающих.

Для этого во вкладке *INLET* необходимо выбрать имя втекания (в примере *vtek1_zr_effect*). Выбрать тип граничного условия *Mass Flow imposed*, в поле *mass-flow* ввести значение массового расхода, в поле *static temperature* ввести значение статической температуры.

Аналогично необходимо задать параметры на входе для других втеканий.

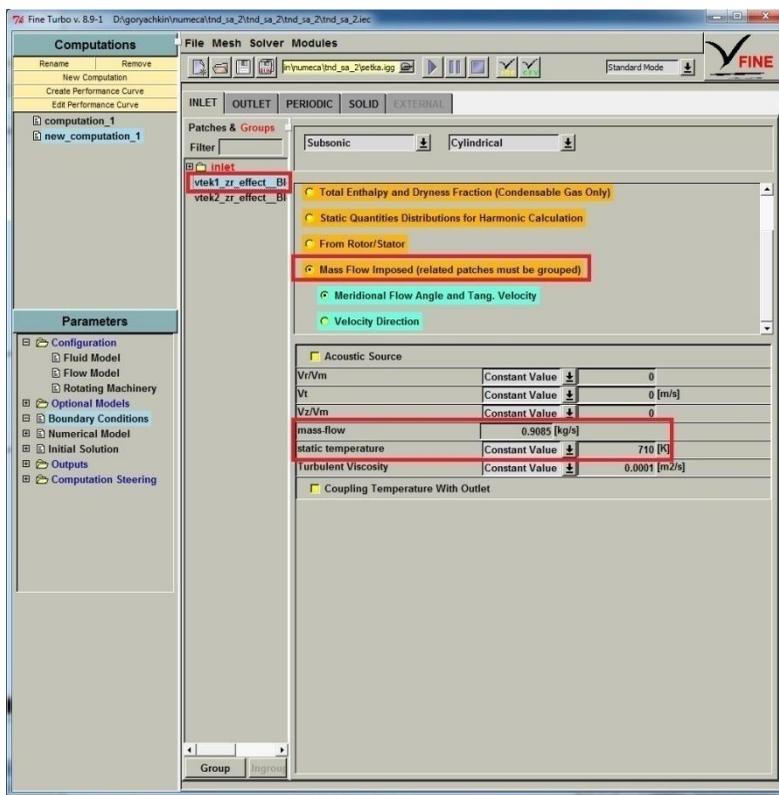


Рис. 2.68. Задание граничных условий для втеканий

Выходное граничное условие описывается во вкладке *OUTLET* (в верхней части) меню *Boundary Conditions*. В нем необходимо сделать следующие настройки (Рис. 2.69).

- Нужно активировать опцию *Pressure Imposed*, что говорит о том, что на выходной границе будет задаваться статическое давление.

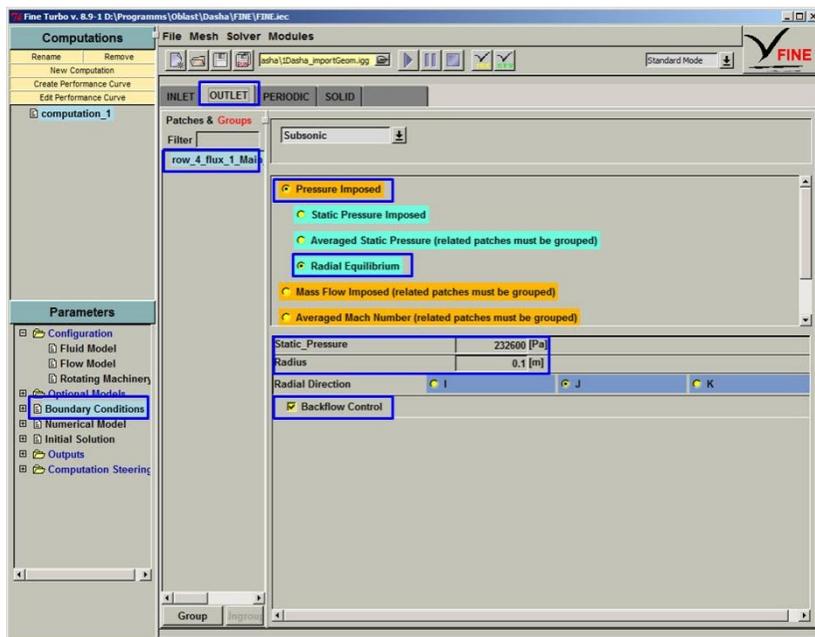


Рис. 2.69. Задание выходных граничных условий (меню *Boundary Condition* вкладка *OUTLET*)

- 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 102500 Па), указать радиус, на котором ожидается данная величина давления (*Radius*) (В примере имеет величину $0,4985 \text{ м}$) и активировать опцию *Backflow Control*.

Шаг 30. Задание периодического ГУ. Граничное условие периодичности задаются во вкладке *PERIODIC* (в верхней части) меню *Boundary Conditions* (рис. 2.70). 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.

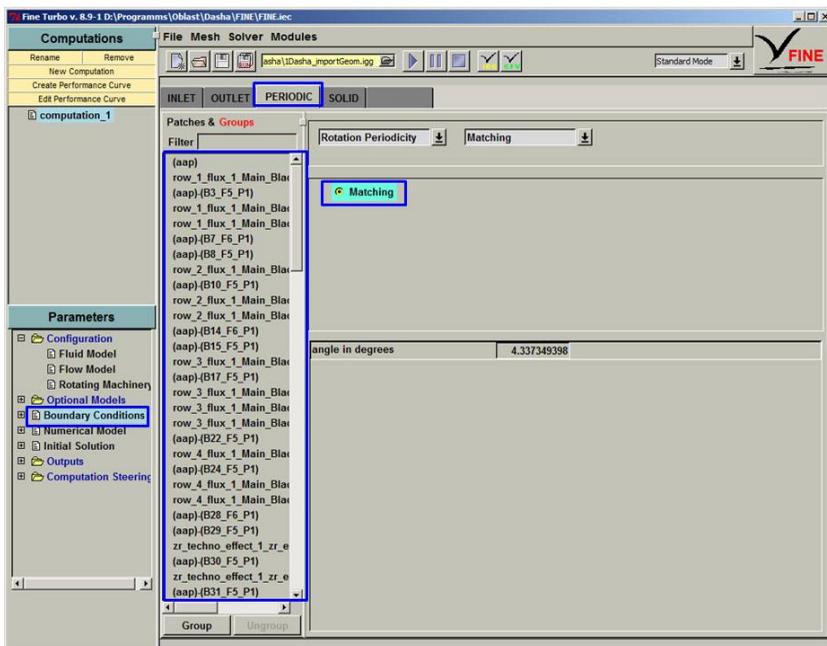


Рис. 2.70. Задание периодических граничных условий (меню *Boundary Condition* вкладка *PERIODIC*)

Шаг 31. Задание ГУ для стенок. Граничные условия для стенок канала задаются во вкладке *SOLID* (в верхней части) меню *Boundary Conditions* (Рис. 2.71). В нем необходимо сделать следующие настройки:

Выделить все поверхности, относящиеся к статору, т.е. неподвижные поверхности, нажать клавишу *Group* в нижней части окна (рис. 2.71) 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 2.72):

GM → *Mesh* → *View On/Off*

Аналогично необходимо объединить все вращающиеся поверхность в группу под именем *ROTOR*.

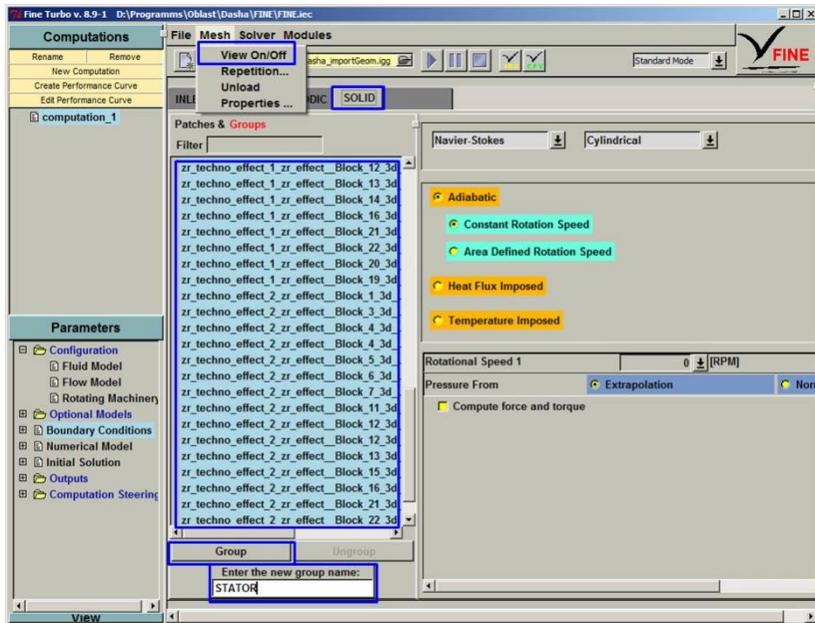


Рис. 2.71. Задание граничных условий на тело лопатки (меню *Boundary Condition* вкладка *SOLID*)

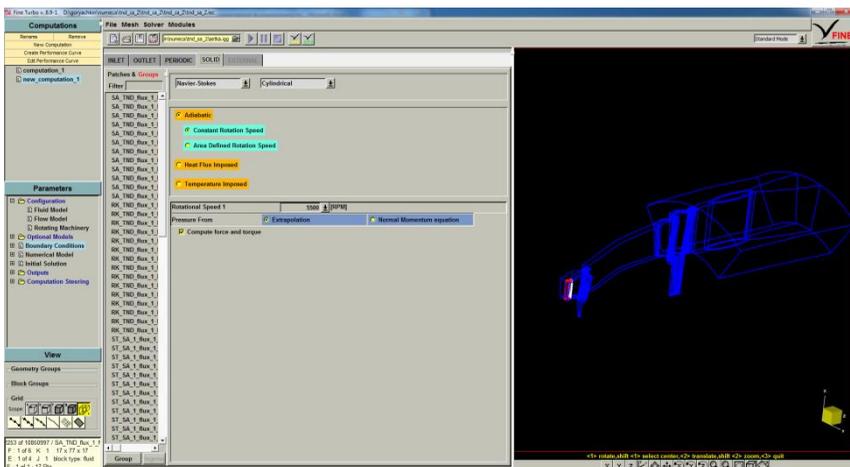


Рис. 2.72. Окно визуализации сетки конечных элементов

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 частоты вращения, что означает, что указанные стенки вращаются вместе с ротором с указанной частотой вращения. Кроме того, необходимо активировать опцию *Compute force and torque*.

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. 2.73.

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 соседних 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

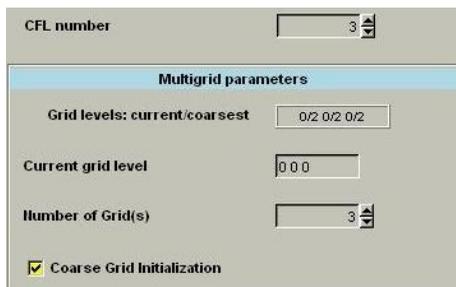


Рис. 2.73. Меню *Numerical Model*

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 целе-

сообразно 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. 2.73):

- в поле *CFL number* вбирается 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. 2.74.

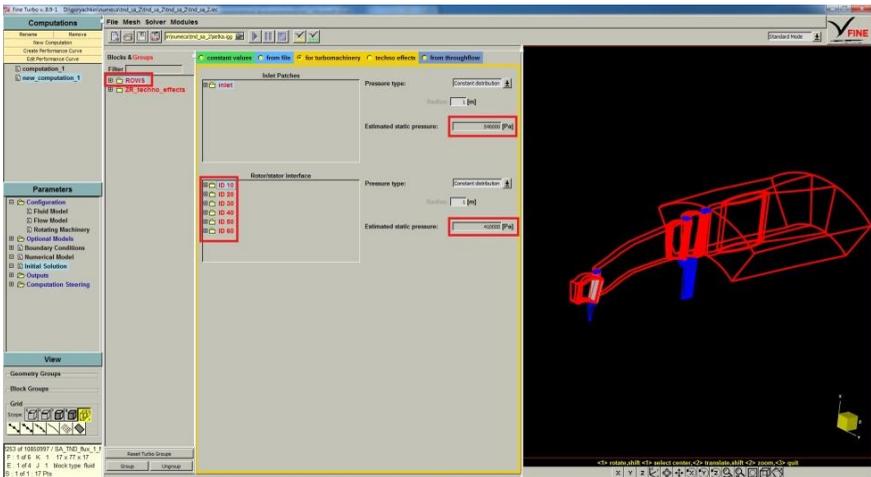


Рис. 2.74. Меню *Initial Solution*

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 540000) для входа в ступень, в

нижнем поле *Estimated static pressure* значение давления (в примере 410000) для границы перехода от статора к ротору (рис. 2.74).

На остальных интерфейсах также необходимо указать предполагаемое значение статического давления.

Шаг 33. Настройка выводимых параметров. В меню *Outputs* (рис. 2.75), находящемся в дереве проекта под вкладкой *Parameters* производится настройка параметров, которые необходимо рассчитать и передать в постпроцессор для обработки. Для этого делаются следующие настройки:

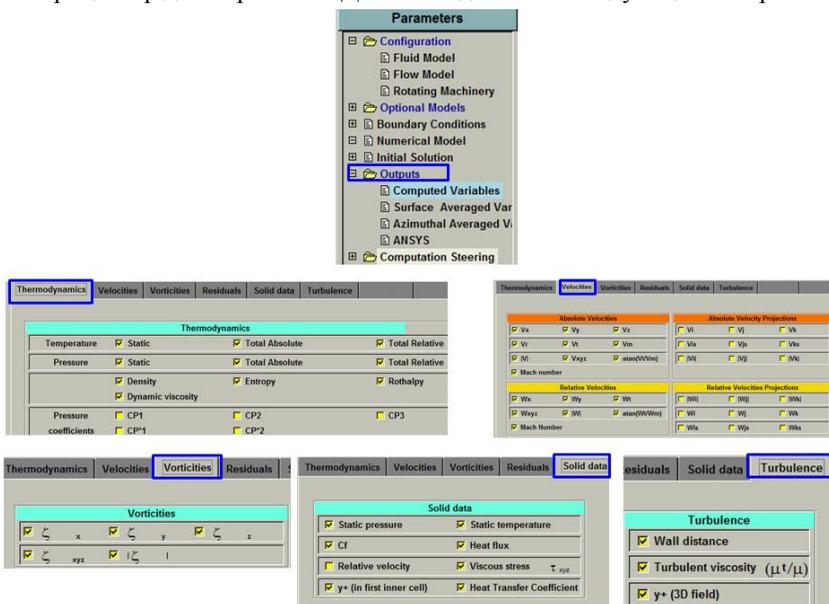


Рис. 2.75. Меню *Outputs*

- 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. 2.75 указаны все параметры, которые необходимо отметить галочками при моделировании турбины.

Шаг 34. Задание числа итераций и указания критериев сходимости.

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.2.76. 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).

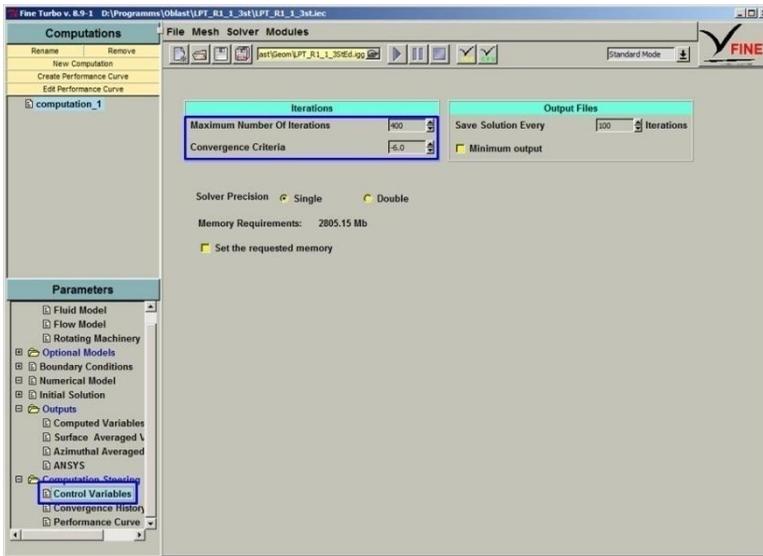


Рис. 2.76. Определение числа итераций и критерия сходимости в меню *Control Variables*

В поле *Convergence Criteria* указывается критерий сходимости, при достижении которого расчет будет остановлен. Данная величина представляет собой значение степени. Например, величина $-6,0$ говорит о том, что задача будет считаться сошедшейся, если невязки не превысят 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.

2.2.4. Запуск итерационного расчета

Шаг 35. Запуск расчета. После определения всех необходимых граничных условий и настройки решателя может быть запущен процесс решения. Это делается нажатием на кнопку  в верхней части рабочего окна *Fine*. Решение может быть остановлено в любой момент с помощью кнопки .

Для контроля процесса решения в процессе целесообразно вывести на экран меню *Convergence History*, в котором будут отражаться значения основных параметров (глобальная невязка, расход на входе и на выходе, КПД, перепад давления, осевая сила, момент) рассчитываемых в ходе решения, как в виде динамически изменяющихся значений в правом верхнем окне в зависимости от итераций, так и в виде динамически меняющегося графика.

Вызвать его можно в дереве проекта нажав под вкладкой *Parameters* пункт *Computation Steering* → *Convergence History* (рис. 2.77).

После завершения расчета, результаты следует сохранить с помощью команды:

GM → *File* → *Save*.

На этом работа в программе *FINE™/Turbo* закончена и ее можно закрыть.

2.3. ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ РАСЧЕТА В ПРОГРАММНОМ КОМПЛЕКСЕ *NUMECA*

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.

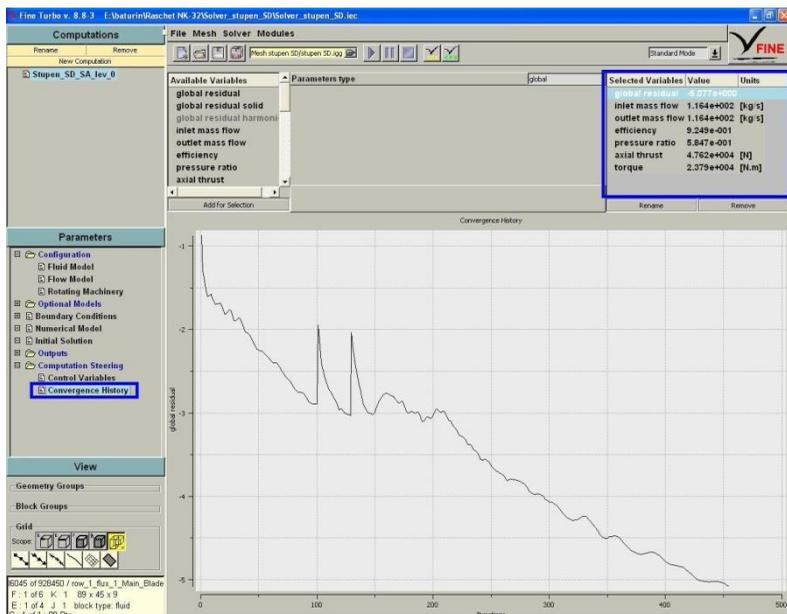


Рис. 2.77. Визуализация процесса решения

Визуализация результатов расчета в программном комплексе *NUMECA* осуществляется в подпрограмме *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.

Модуль *CFView* запускается из меню «Пуск» ОС «Windows»:

Пуск → Программы → NUMECA Software → Fine89_1 → CFView.

Рабочее окно программы *CFView* приведено на рис. 2.78. Как и в случае *FINE™/TURBO* окно программы состоит из дерева проекта (слева), главного меню (сверху) и графического окна.

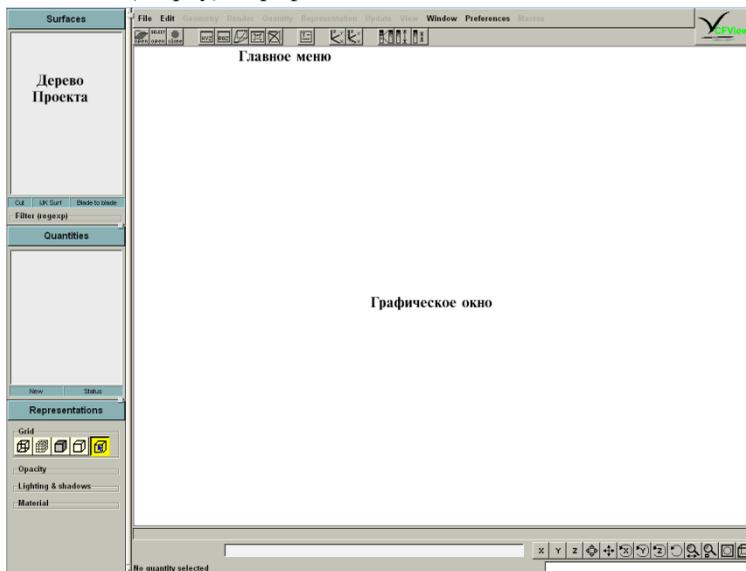


Рис. 2.78. Внешний вид окна программы *CFView*

Шаг 36. 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:

ГМ → *File* → *Open Project*.

Внешний вид окна программы после загрузки результатов расчета показан на рис. 2.79. 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. 2.80). 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 осреднены в окружном направлении. Если указанную настройку не выполнять, то модель ступени будет загружена в трехмерном виде, как на рис. 2.79.

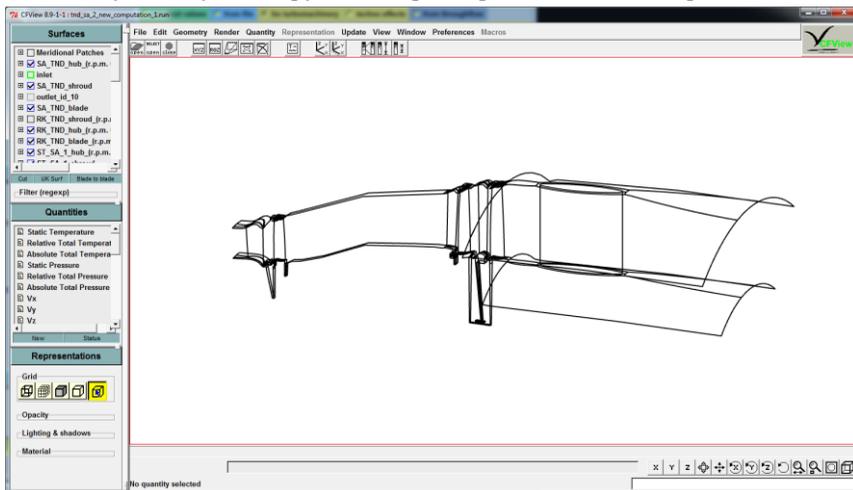


Рис. 2.79. Внешний вид окна программы *CFView* после загрузки результатов расчета

2.3.1. Построение расчетных картин распределения параметров трехмерного потока

Шаг 37. Построение полей распределения параметров в межлопаточном канале. Для построения 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*.

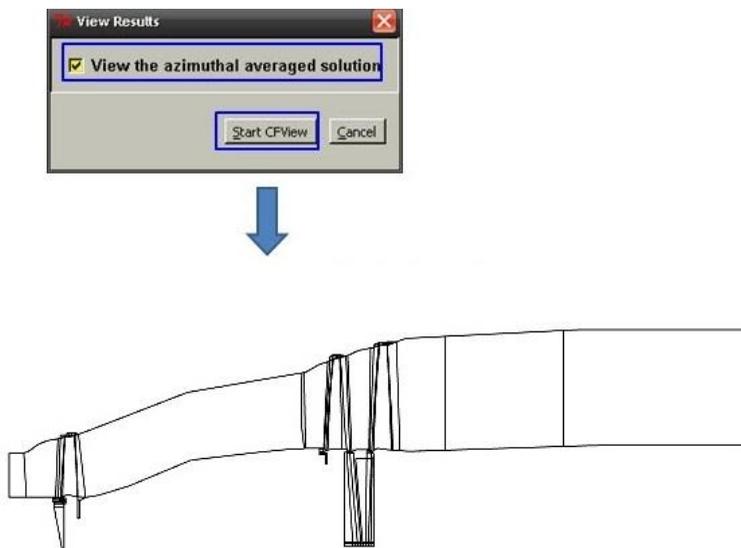


Рис. 2.80. Меню *View Results*

В результате ее выполнения появится меню *Blade to Blade Surface* (рис. 2.81). 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.

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

После выполнения указанных действий в поле *Surfaces* в дереве проекта появится вкладка *CUT1* – это созданная благодаря описанным выше манипуляциям поверхность сечения (рис. 2.81). 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.

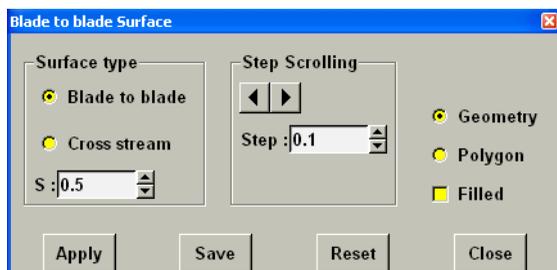


Рис. 2.81. Меню *Blade to Blade Surface*

3. Необходимо изменить раскладку клавиатуры на английскую и нажать клавишу «b» на ней. Это действие погасит все элементы геометрии, имя которых помечено галочками в дереве проекта (рис. 2.82). 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.

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:

GM → *Representation* → *Color Contour* → *Smoth.*

Результат ее выполнения показан на рис. 2.84.

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

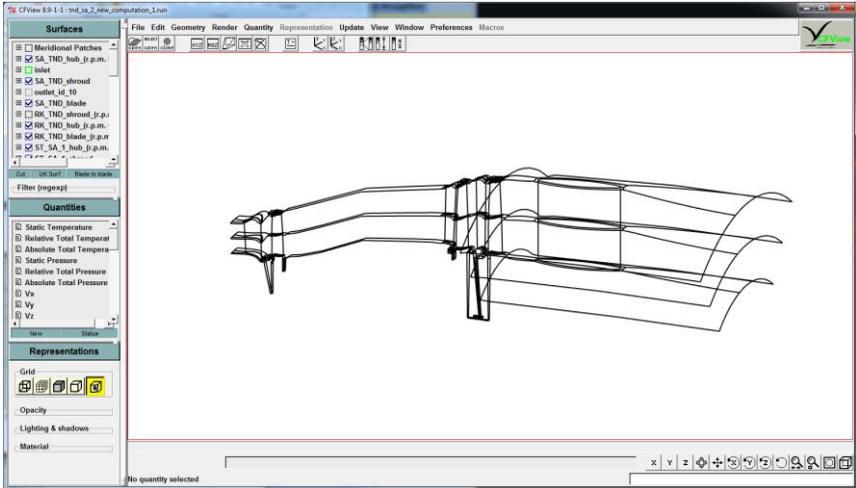


Рис. 2.82. Построение поверхности межлопаточного канала в среднем сечении лопатки

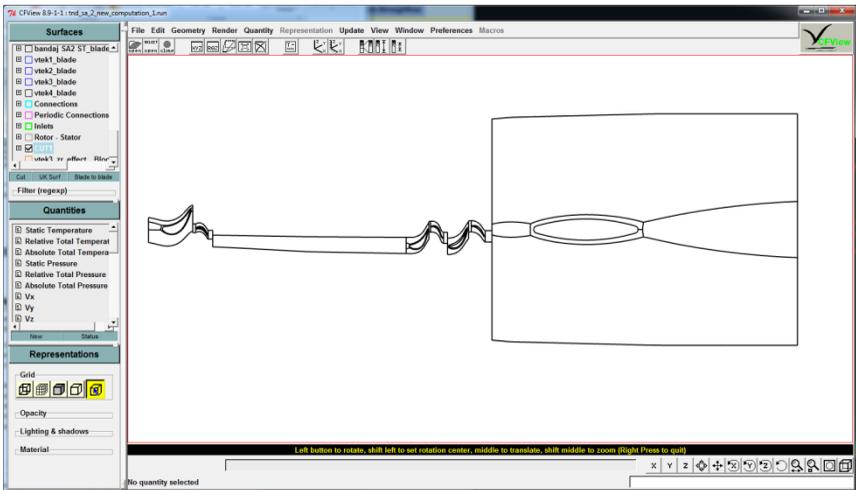


Рис. 2.83. Отображение плоскости межлопаточного канала в среднем сечении

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.

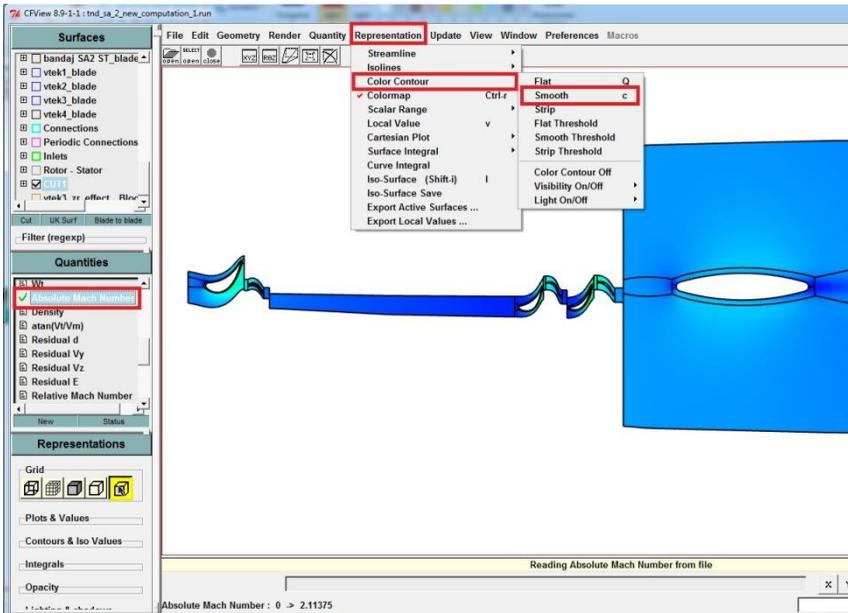


Рис. 2.84. Отображение поля распределения чисел Маха в межлопаточных каналах

Шаг 38. 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:

$GM \rightarrow Representation \rightarrow isolines \rightarrow isolines.$

В результате появится меню *Absolute Mach Number isolines* (рис. 2.85). 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*.

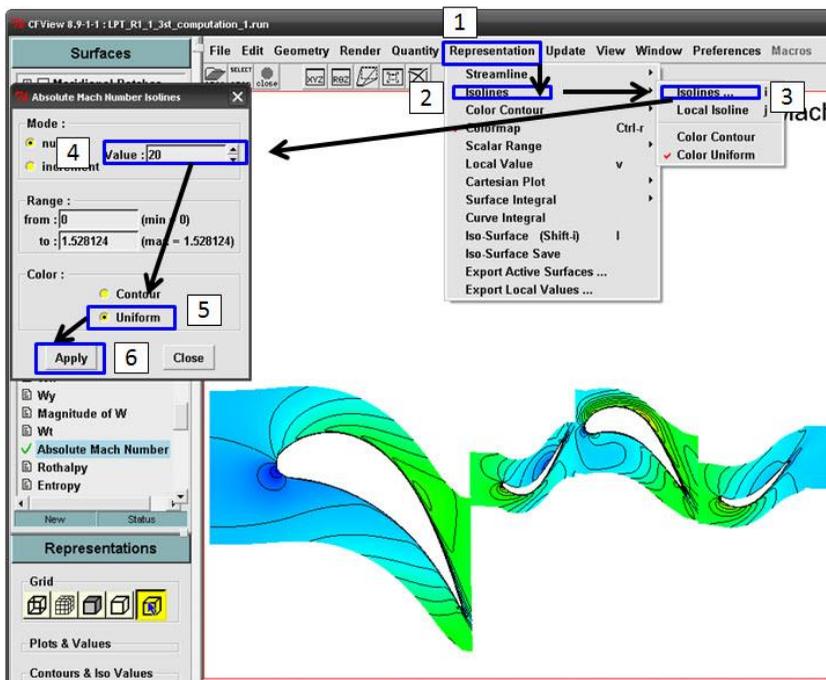


Рис. 2.85. Отображение изолиний на поле распределения чисел Маха

Используя ту же самую турбоповерхность (*CUTI*) можно построить изменение других параметров 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 вычисленных параметров. В качестве иллюстрации на рис. 2.86 и 2.87 приведены поля статических давлений и температур.

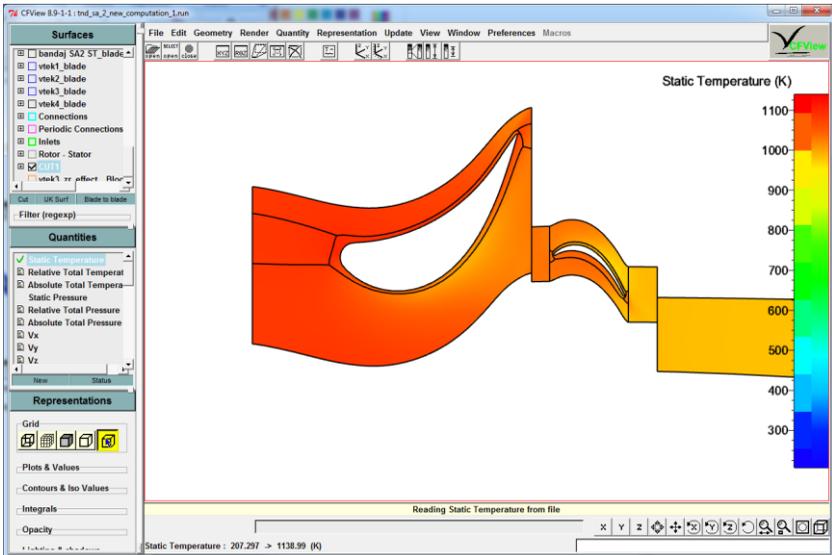


Рис. 2.86. Поле распределения статической температуры в межлопаточном канале

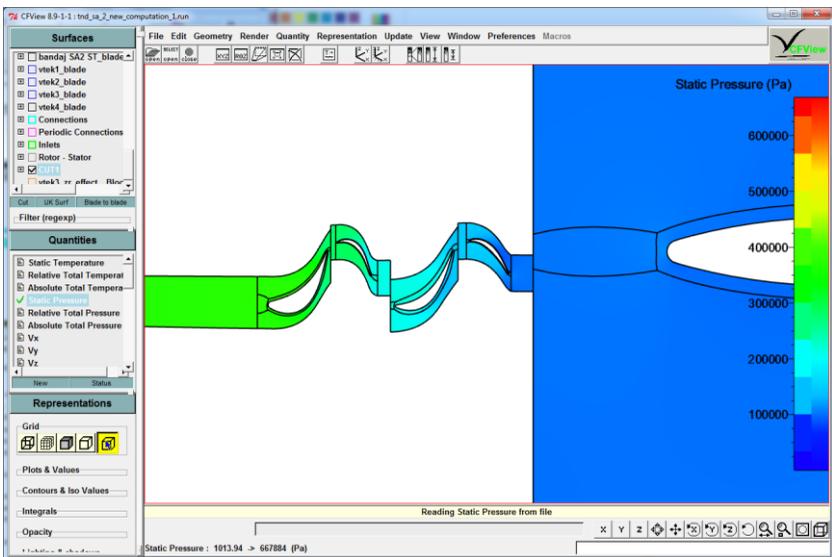


Рис. 2.87. Поле распределения статического давления в межлопаточном канале

Шаг 39. Отображение нескольких межлопаточных каналов в графическом окне. Как видно из рис. 2.82...2.87, 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. 2.88):

ГМ → Geometry → Repetition on/of.

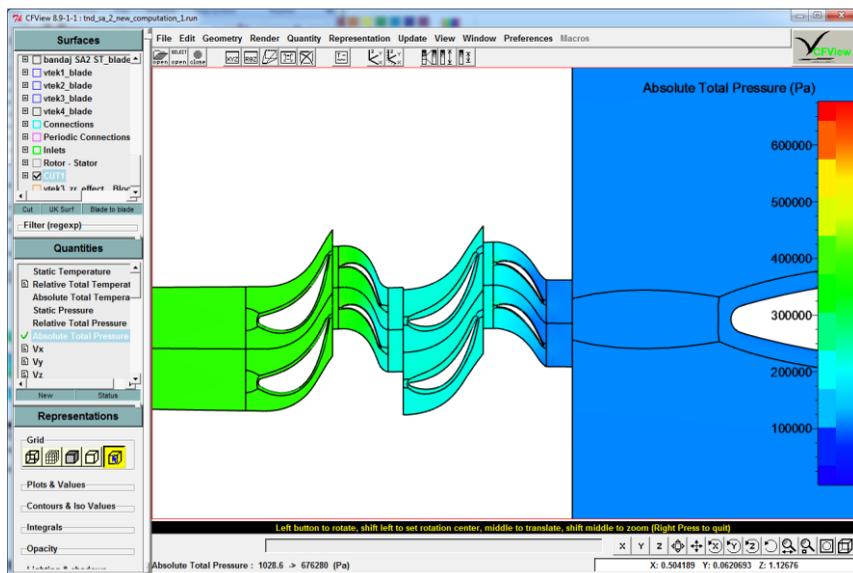


Рис. 2.88. Отображение нескольких межлопаточных каналов в графическом окне

2.3.2. Построение векторов скоростей

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

GM → Update → Delete → All.

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

Шаг 40. Построение поля векторов скоростей. Для построения поля векторов в интересующем пользователя сечении необходимо выполнить ряд действий, описанных в предыдущем разделе, а именно создать турбоповерхность в необходимом 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. 2.89 и 2.90):

GM → Representation → Vector On Grid Nodes.

В случае необходимости отображение векторов можно настроить с помощью команды:

GM → Representation → Vector Type.

В результате ее выполнения появится меню *Vector Type Editor* (рис. 2.91). В нем, в поле *Representation Type*, можно выбрать тип вектора: полный 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.

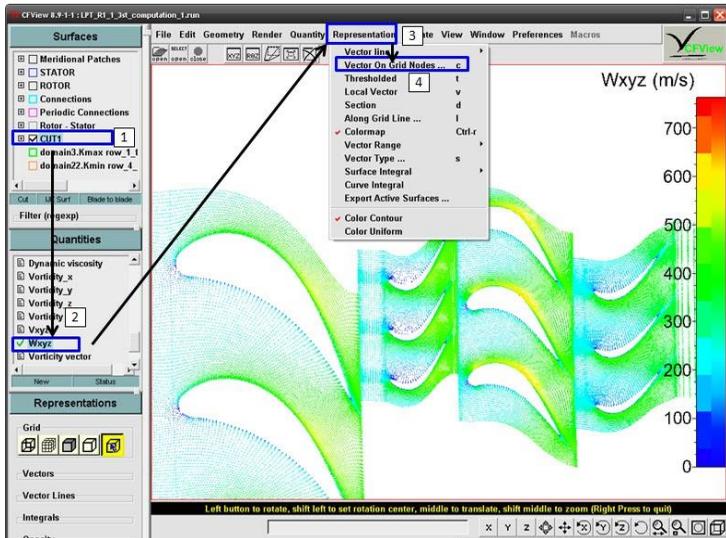


Рис. 2.89. Построение поля векторов

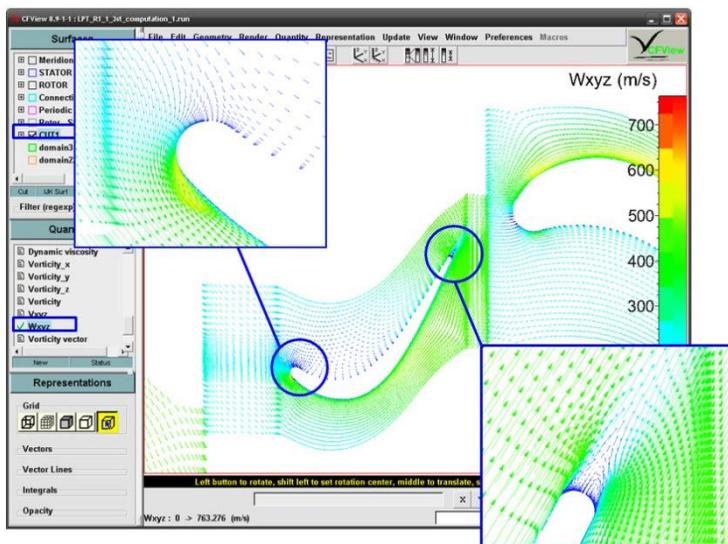


Рис. 2.90. Отображение полей распределения векторов скорости в среднем сечении ступени

2.3.3. Построение графических зависимостей изменения параметров осредненных в окружном направлении по высоте проточной части

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 41. Построение графических зависимостей.

1. Расчетную модель необходимо отобразить таким образом, чтобы в графическом окне изображалось ее меридиональное сечение. Это делается с помощью команды (рис. 2.92):

FM → Window → Compute & Open Pitch Average.

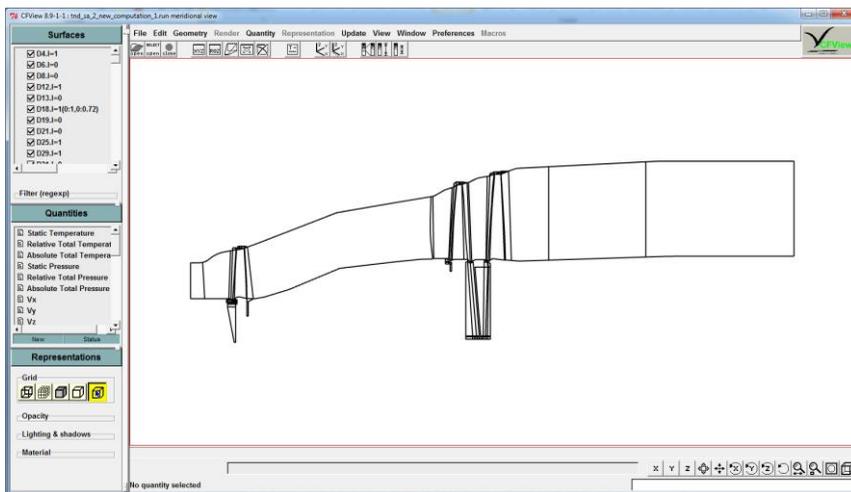


Рис. 2.92. Меридиональный вид расчетной модели

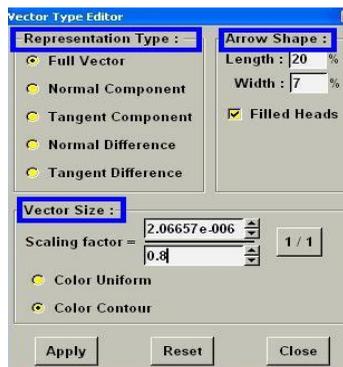


Рис. 2.91. Меню Vector Type

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

3. Для построения графика следует запустить команду:

GM → *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. 2.93), 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. 2.94)

В примере следует построить секущую линию вблизи выходной границы (рис. 2.93). 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. 2.94).

5. По умолчанию график построен вдоль относительной высоты канала *Normalized Arc Length* (она задается в долях единицы). При необходимости переменную, откладываемую вдоль горизонтальной оси можно поменять (рис. 2.95) в следующей последовательности:

- 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*).

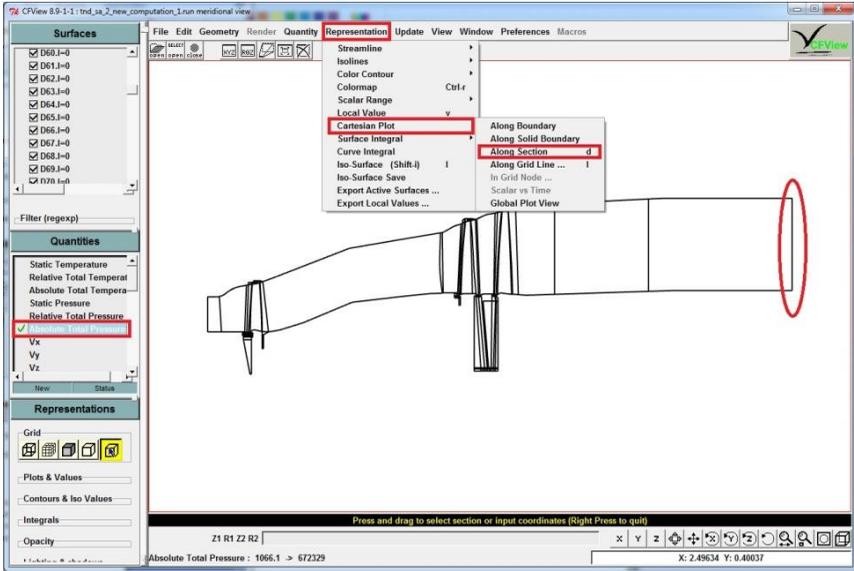


Рис. 2.93. Построение сечущей линии, вдоль которой будет строиться графическая зависимость изменения параметра потока

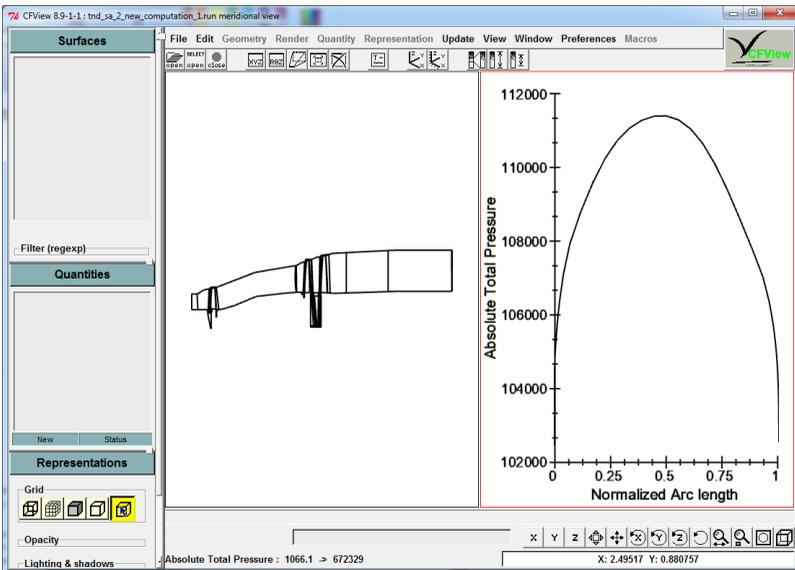


Рис. 2.94. Результат построения графика изменения полного давления по высоте лопатки на выходе из ступени

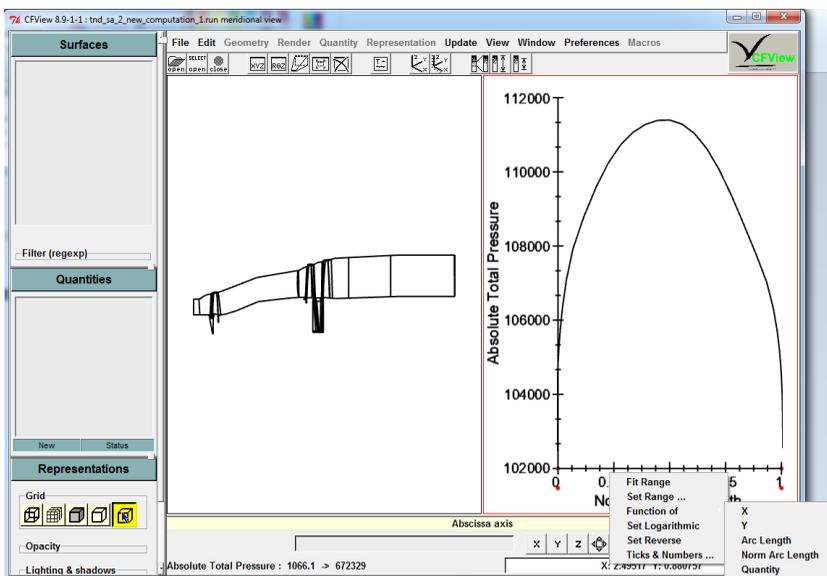


Рис. 2.95. Изменение параметра оси

Шаг 42. 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 и, например, сравнения результатов расчета с экспериментальными данными или результатами, полученными в других программах.

Для экспорта данных необходимо выполнить следующие действия (рис. 2.96):

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

2.3.4. Определение интегральных параметров потока в характерных сечениях

Шаг 43. Определение интегральных параметров потока. Для определения интегральных значений переменных (например, полной температуры, статической температуры, полного давления, статического давления, расхода) в некоторых сечениях проточной части турбомшины необходимо выполнить следующие действия (рис. 2.97).

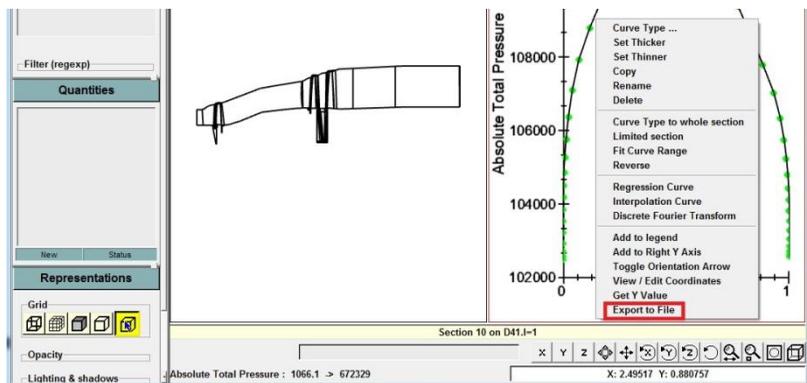


Рис. 2.96. Экспорт графика изменения параметра

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.

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 осреднять по площади сечения с помощью кнопки .

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

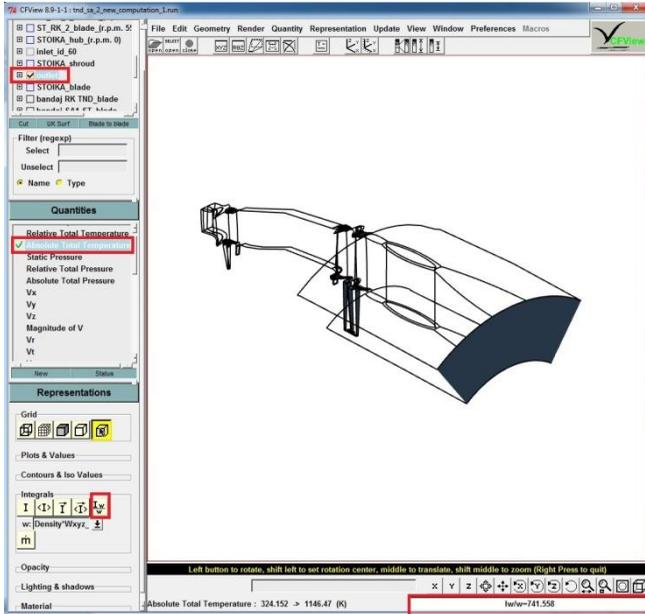


Рис. 2.97. Вычисление интегральных значений параметров потока

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

2.3.5. Построения линий тока

Шаг 44. 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 (рис. 2.98).

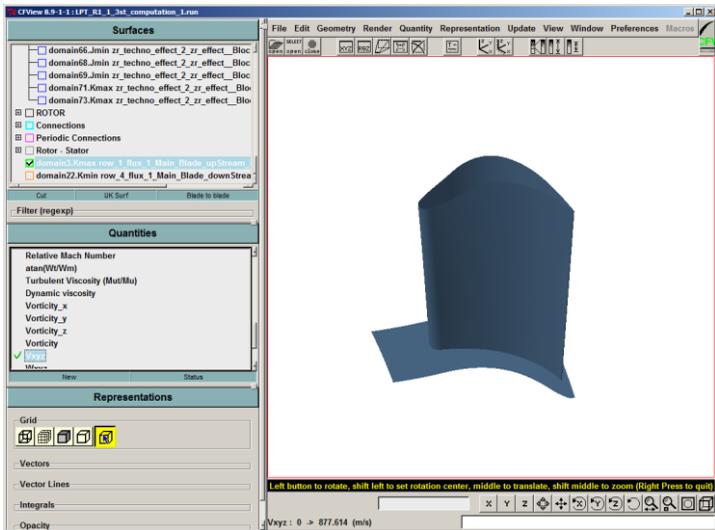


Рис. 2.98. Модель лопаточного венца, подготовленная для отображения линий тока

3. В дереве проекта нужно выбрать входную поверхность венца **domain3.Kmax row 1_flux_1_Main**, либо любую поверхность, откуда будут начинаться линии тока.

4. Во вкладке *Quantities*, находящейся в дереве проекта следует выбрать параметр *Vxyz*.

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

6. В появившемся меню *Vector Lines Parameters*, в поле *Color* следует

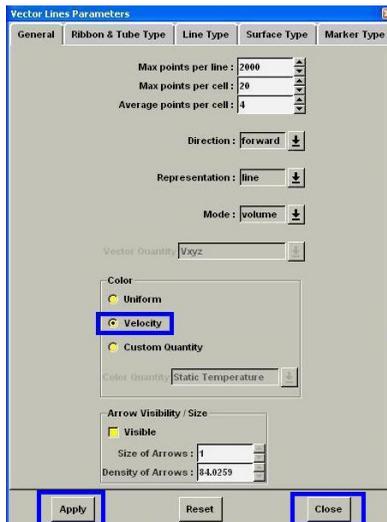


Рис. 2.99. Окно *Vector Lines Parameters*

выбрать пункт *Velocity*, остальные настройки нужно оставить по умолчанию. Сделанные настройки подтверждаются нажатием кнопок *Apply*, затем *Close*(рис. 2.99).

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*).

8. В появившемся окне *Vxyz vector lines along grid line*, в поле *index* выбор параметра *i* или *j* (координатные оси сети) определяет направление распространение векторных линий, если выбрать индекс *i* векторные линии будут отображаться вдоль сеточных линий по высоте лопатки (рис. 2.100). При выборе индекса *j* отображение векторных линий происходит вдоль сеточных линий по ширине межлопаточного канала (рис. 2.104). 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. 2.105).

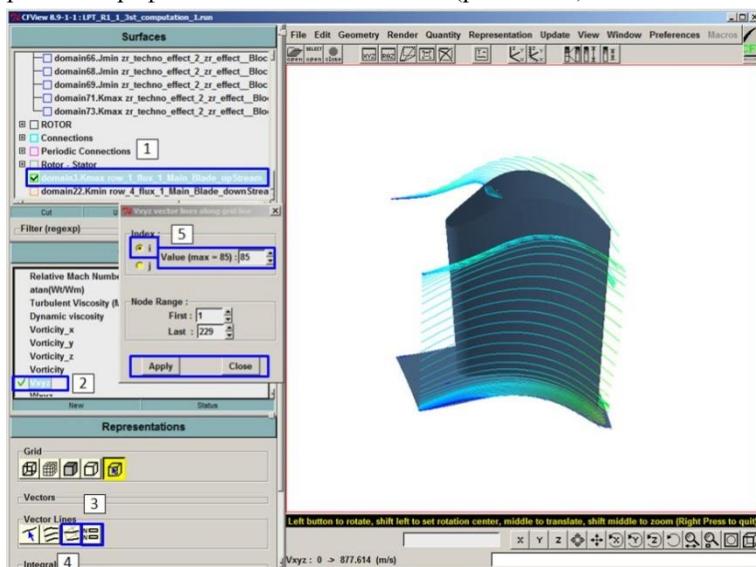


Рис. 2.100. Отображение векторных линий вдоль сеточных линий по высоте лопатки направление *i*

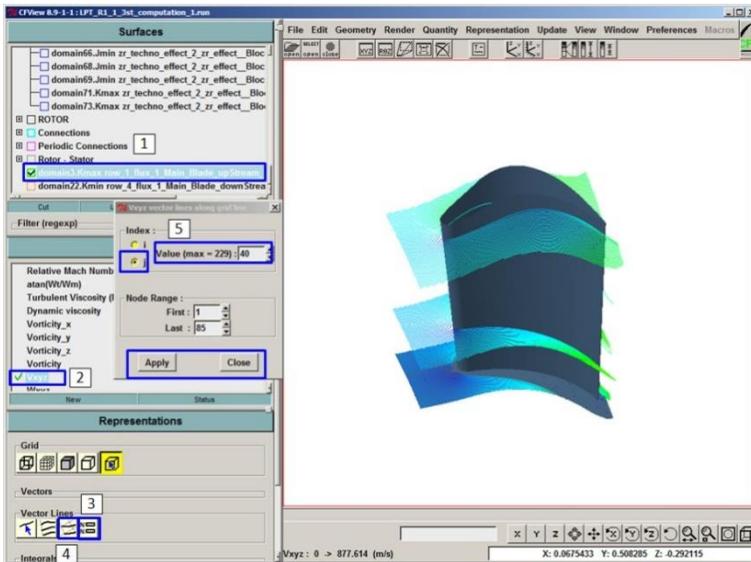


Рис. 2.101. Отображение векторных линий вдоль сеточных линий по ширине межлопаточного канала направление j

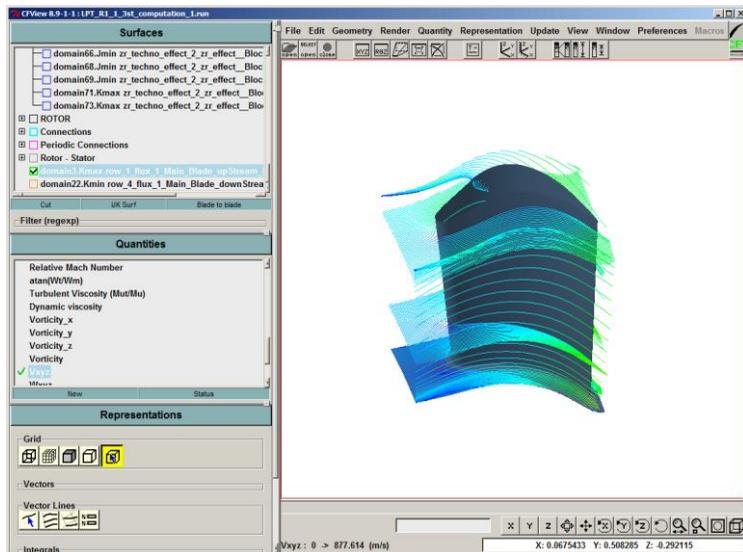


Рис. 2.102. Линии тока в СА ТНД

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 *Jarjike D., Vaines N.C., Introduction to Turbomachinery [Текст]. Concept NRECETIInc.*
- 9 <http://www.numeca-ru.com>[электронный ресурс].
- 10 <http://www.numeca.com>[электронный ресурс].