

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

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

Формирование численных моделей потока в предкамерных турбинах турбонасосных агрегатов ЖРД в ANSYS CFX

Электронное учебное пособие

Работа выполнена по мероприятию блока 2 «Развитие и повышение эффективности научно-инновационной деятельности» и блока 3 «Развитие информационной научно-образовательной среды и инфраструктуры» Программы развития СГАУ на 2009 – 2018 годы по проекту «Разработка технологии и методического обеспечения для создания виртуального жидкостного ракетного двигателя (ЖРД)»
Соглашение № 2/11 от 03 июня 2013 г.

С А М А Р А
2013

УДК 621.438.001.2

Ф 79

Авторы: Сулинов Александр Васильевич,
Шаблий Леонид Сергеевич,
Никонова Екатерина Алексеевна,
Кузнецов Александр Владимирович

Редакторская обработка : М.В. Половинщикова

Компьютерная верстка: М.В. Половинщикова

Доверстка: М.В. Половинщикова

Формирование численных моделей потоков в предкамерных турбинах турбонасосного агрегата ЖРД в ANSYS CFX [Электронный ресурс] : электрон. учеб. пособие / А.В. Сулинов, Л.С. Шаблий, Е.А. Никонова, А.В. Кузнецов; М-во образования и науки РФ, Самар. гос. аэрокосм. ун-т им. С. П. Королева (нац. исслед. ун-т). - Электрон. текстовые и граф. дан. (3,1 Мбайт). - Самара, 2013. – 1 эл. опт. диск (CD-ROM).

В учебном пособии описаны основные приемы работы с программным комплексом ANSYS для моделирования рабочих процессов одноступенчатых и двухступенчатых предкамерных осевых турбин турбонасосных агрегатов жидкостных ракетных двигателей: построение геометрической модели, наложение расчётной сетки, создание расчётной модели, её решение и анализ результатов.

Предназначено для подготовки специалистов, обучающихся по специальности 160302 «Ракетные двигатели» (ГОС-2), изучающих дисциплину «Моделирование рабочих процессов РД» в 6 семестре, для специалистов направления подготовки 160700.65 «Проектирование авиационных и ракетных двигателей» (ФГОС-3), изучающих дисциплину «Моделирование потоков в лопаточных машинах» в 7 семестре, для магистрантов по направлению 160700.68 «Двигатели летательных аппаратов», изучающих дисциплину «Исследование рабочего процесса ракетных двигателей и энергетических установок» в А-семестре.

Подготовлено на кафедре теории двигателей летательных аппаратов.

© Самарский государственный
аэрокосмический университет, 2013

Содержание

| | |
|---|----|
| Введение | 4 |
| 1 CFD-моделирование одноступенчатой предкамерной осевой турбины | 6 |
| 1.1 Создание геометрической модели одноступенчатой турбины | 6 |
| 1.2 Создание сеточной модели одноступенчатой турбины | 14 |
| 1.3 Создание расчётной модели | 18 |
| 1.4 Поиск решения..... | 25 |
| 1.5 Анализ результатов расчёта одноступенчатой турбины..... | 29 |
| 2 CFD-моделирование двухступенчатой предкамерной осевой турбины | 37 |
| 2.1 Создание геометрической модели двухступенчатой турбины..... | 37 |
| 2.2 Создание сеточной модели двухступенчатой турбины | 47 |
| 2.3 Создание расчётной модели двухступенчатой турбины..... | 53 |
| 2.4 Поиск решения..... | 61 |
| 2.5 Анализ результатов расчёта двухступенчатой турбины..... | 64 |
| Библиографический список..... | 79 |

Введение

В настоящее время вычислительная гидрогазодинамика (Computational Fluid Dynamics – CFD) становится всё более популярным инженерным инструментом. Это обусловлено такими её качествами, как формальная простота постановки задачи и независимость методики её решения от рабочего процесса исследуемого узла; освоив методику решения простых задач, инженер может переходить к более сложным, реалистичным задачам, повысив квалификацию в области нового способа задания граничных условий или параметров счёта.

В методических указаниях приведены рекомендации для практического освоения CFD-пакета ANSYS/CFX на примере расчётов одноступенчатой и двухступенчатой предкамерных осевых турбин турбонасосного агрегата (ТНА) жидкостного ракетного двигателя (ЖРД).

Процесс расчёта турбины каждого типа состоит из пяти основных этапов.

1. **Создание геометрической модели (CAD-модели) проточной части турбины.** В методических указаниях рассмотрены два варианта создания геометрической модели:
 - для одноступенчатой предкамерной турбины создание геометрической модели выполняется в трёхмерной постановке в системе CAD-моделирования ANSYS Design Modeler, встроенной в систему ANSYS Workbench;
 - для двухступенчатой предкамерной турбины создание геометрической модели выполняется в программе Solid Edge с последующим экспортом в ANSYS через универсальный формат IGES.
2. **Создание сеточной модели проточной части турбины** на базе геометрической модели. В данном пособии описано разбиение твёрдотельной 3D-модели на ячейки с помощью сеткогенератора ANSYS Meshing. Однако существуют специализированные сеткогенераторы для создания расчётных сеток для турбомашин, например ANSYS Turbo Grid[2].
3. **Создание расчётной модели** из сеточной путём наложения условий моделирования исследуемых процессов. Условия моделирования - это параметры рабочего тела, участвующего в

расчёте, параметры движения или условие неподвижности расчётных зон, наличие специальных моделей протекающих процессов: турбулентности, многофазности, многокомпонентности - если есть необходимость в моделировании тех или иных процессов. Кроме того, чтобы задача стала определенной, нужно наложить *граничные условия*: параметры потока на входах и выходах из всех расчётных зон. Кроме граничных условий требуется ещё и задание начальных параметров в каждой ячейке внутри расчётной области. Это так называемые *начальные условия*.

4. **Поиск решения.** На данном этапе производится отыскание таких значений параметров в каждой ячейке расчётной сетки, чтобы вся расчётная зона имела максимально верные уравнения потоков. В начальный момент решения этих уравнений, скорее всего, не выполняются, потому что начальные условия задаются с большой погрешностью. Методами численного решения уравнений, система находит параметры, при которых все уравнения выполняются. Такое решение называется *сошедшимся*.
5. **Анализ результатов расчёта.** «Сырым» результатом расчёта является сетка, в которой найдено сошедшееся решение. Естественно для удобного анализа результаты представляют в виде графиков, цветных полей распределения параметров или векторных картин, линий тока, изоповерхностей параметров, числовых значений параметров в заданных областях.

Далее каждый этап описан подробно на примере расчётоводноступенчатой и двухступенчатой предкамерных осевых турбин ТНА ЖРД. Аналогичный расчёт автономной одноступенчатой турбины описан в [3], а шнекоцентробежного насоса – в [4].

1 CFD-моделирование одноступенчатой предкамерной осевой турбины

1.1 Создание геометрической модели одноступенчатой турбины

Для CAD-моделирования одноступенчатой предкамерной осевой турбины необходимы исходные данные, отражающие полную геометрическую форму проточной части, которые были получены в результате проектного расчёта турбины[1]. На рисунке 1.1 представлены геометрические параметры проточной части исследуемой турбины: меридионального сечения, а также профилей проточной части соплового аппарата (СА) и рабочего колеса (РК).

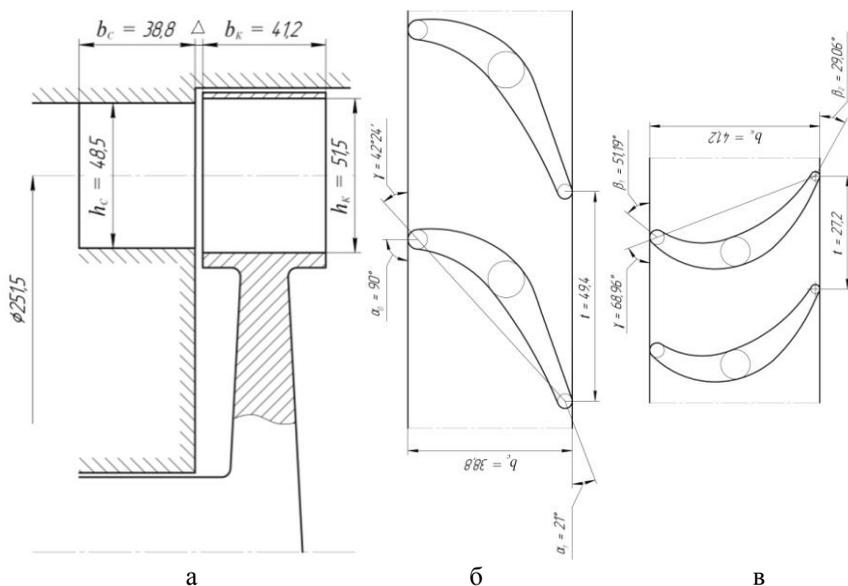


Рисунок 1.1 - Схема исследуемой турбины и геометрические параметры её проточной части:

а - меридиональное сечение, б –решетка профилей СА, в - решетка профилей РК

В таблице 1.1 приведены основные геометрические параметры исследуемой турбины.

Таблица 1.1 -Геометрические параметры одноступенчатой турбины

| № | Наименование параметра | Обозначение | Размерность | Значение параметра |
|--------------------|---|---------------|-------------|--------------------|
| 1.Сопловой аппарат | | | | |
| 1.1. | Высота лопатки СА во входном сечении | h_{CA0} | мм | 48,5 |
| 1.2. | Высота СА в выходном сечении | h_{CA1} | мм | 48,5 |
| 1.3. | Ширина решетки лопаток СА | b_{CA} | мм | 38,8 |
| 1.4. | Угол установки профиля лопатки в решетке СА | γ_{CA} | град | 42,4 |
| 1.5. | Шаг решетки СА | t_{CA} | мм | 49,4 |
| 1.6. | Число лопаток СА | z_{CA} | - | 16 |
| 2. Рабочее колесо | | | | |
| 2.1. | Высота лопатки РК во входном сечении | h_{PK1} | мм | 51,5 |
| 2.2. | Высота лопатки РК в выходном сечении | h_{PK2} | мм | 51,5 |
| 2.3. | Ширина решетки лопаток РК | b_{PK} | мм | 41,2 |
| 2.4. | Угол установки профиля лопатки в решетке РК | γ_{PK} | град | 67 |
| 2.5. | Шаг решетки РК | t_{PK} | мм | 27,2 |
| 2.6. | Число лопаток РК | z_{PK} | - | 29 |
| 3. Общие размеры | | | | |
| 3.1 | Средний диаметр | D_{cp} | мм | 252 |
| 3.2 | Зазор между СА и РК | Δ | мм | 2 |

Создание геометрической модели выполняется в системе CAD-моделирования ANSYS Design Modeler, встроенной в систему ANSYS Workbench.

Шаг 1. Запуск ANSYS Workbench из меню программ:

Пуск → Программы → ANSYS 14.5 → Workbench

Шаг 2. Добавить в пустой проект Workbench систему газодинамического анализа *Fluid Flow (CFX)*, вытянув её на белое поле проекта из левого списка (рисунок 1.2).

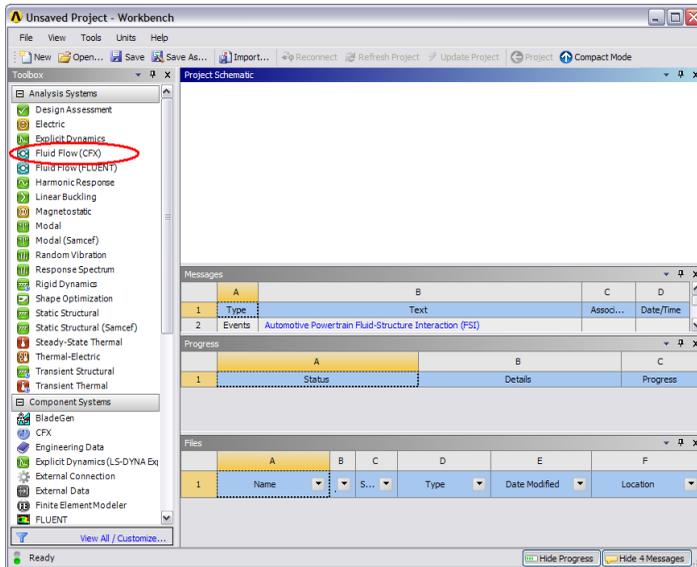
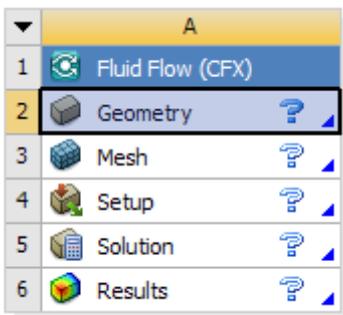


Рисунок 1.2 - Окно ANSYS Workbench при запуске

Шаг 3. Запустить систему CAD-моделирования, дважды щелкнув на блоке *Geometry* (рисунок 1.3). При этом откроется Design Modeler, в первом окне которого (рисунок 1.4) нужно выбрать в качестве единиц измерения длины миллиметры.



Fluid Flow (CFX)

Рисунок 1.3 - Система газодинамического анализа *FluidFlow (CFX)*

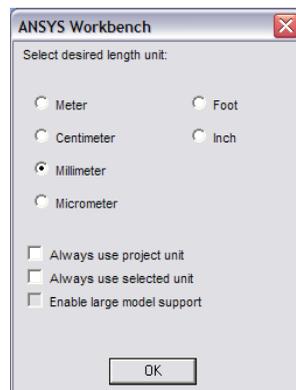


Рисунок 1.4 - Выбор единиц измерения DesignModeler

Шаг4. Создать кольцевой канал СА с параметрами, представленными на рисунке 1.5, в режиме добавления замороженного тела (Add Frozen). Create→Primitives→Bend. Ширина канала СА складывается из ширины решетки канала СА $b_{СА}$ и половины межосевого зазора $\Delta/2$. В дальнейшем, при построении канала РК, в его ширине добавляется оставшаяся половина осевого зазора. Таким образом, поверхность разделения проточной части турбины на неподвижную зону СА и подвижную зону РК проходит посередине осевого зазора.

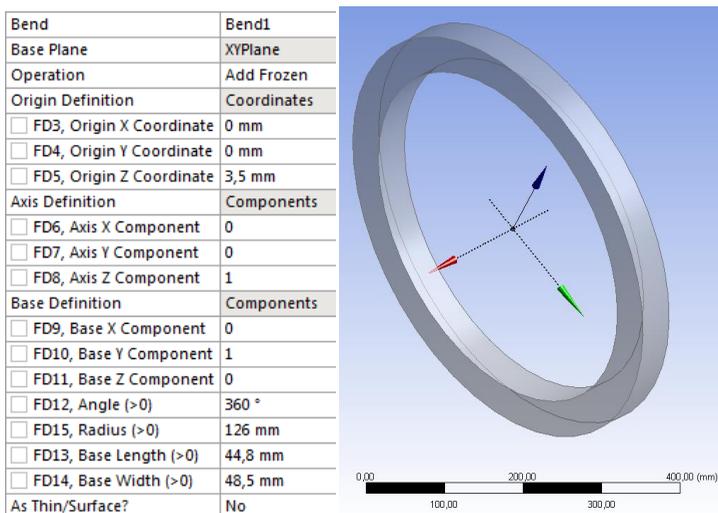


Рисунок 1.5 -Добавление канала СА в режиме AddFrozen

Следующие несколько шагов направлены на обрезку кольцевого канала СА в окружном направлении с целью создания канала вокруг лишь одной лопатки СА.

Шаг5.Перейти в плоскостьXY, щелкнув по ней правой кнопкой мыши в списке дерева проекта и выбрать пункт  Look at («взглянуть на ...»), чтобы развернуть её в плоскость экрана.

Шаг6.Включить режим эскизирования - перейти на вкладку Sketching (в левом нижнем углу окна дерева проекта).

Шаг7. Создать замкнутый эскиз из отрезков ( Line) и дуги ( Arc by 3 Points), которая по форме должна напоминать среднюю линию лопатки лопатки (рисунок 1.6).

Шаг8. Задать размеры, используя вкладку Dimensions (рисунок 1.7). Линии эскиза, которые вследствие наложенных размерных и геометрических ограничений теряют возможность двигаться, занимая только одно определённое положение, меняют цвет с бирюзового на синий. В конце данного шага эскиз должен полностью приобрести синий цвет.

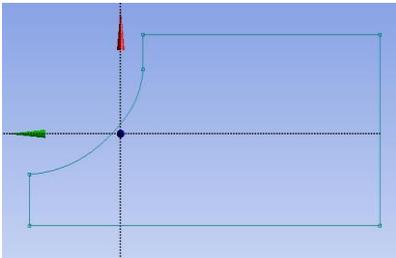


Рисунок 1.6 – Эскиз инструмента для обрезки кольцевого канала

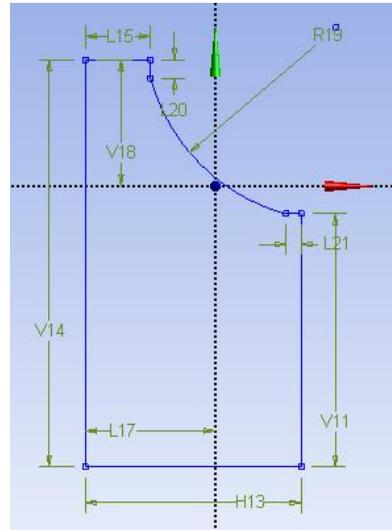


Рисунок 1.7 – Расстановка размеров

Шаг9. Построить тело-инструмент для обрезки канала СА путём вытягивания выполненного эскиза с помощью команды  Extrude (рисунок 1.8). Для того, чтобы пересекающиеся тела не объединились (в Design Modeler булевы операции объединения выполняются автоматически), вновь создаваемое тело должно быть «заморожено» (Operation ->Add Frozen).

| | |
|--|---------------|
| Extrude | Extrude1 |
| Base Object | Sketch1 |
| Operation | Add Frozen |
| Direction Vector | None (Normal) |
| Direction | Normal |
| Extent Type | Fixed |
| <input type="checkbox"/> FD1, Depth (>0) | 200 mm |
| As Thin/Surface? | No |
| Merge Topology? | Yes |

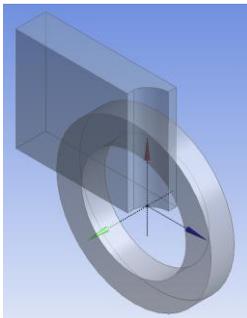


Рисунок 1.8–Построение тела-инструмента для обрезки канала

Шаг 10. Обрезать круговой канал СА с помощью булевой операции пересечения (Create→Boolean→ Intersect). При выборе тел-инструментов (Tool Bodies) нужно указать одновременно два тела, удерживая клавишу Ctrl (рисунок 1.9). Кроме того, нужно включить опцию сохранения тел-инструментов (Preserve Tool Bodies→Yes).

| | |
|-----------------------|----------------------------|
| Boolean | Boolean1 |
| Operation | Intersect |
| Tool Bodies | 2 Bodies |
| Preserve Tool Bodies? | Yes |
| Intersect Result | Intersection of All Bodies |

Рисунок 1.9 – Параметры команды обрезки канала

Шаг11. Подавить ненужное более тело цилиндрического канала. Для этого нужно правой кнопкой мыши нажать на название этого тела в конце дерева проекта (список Bodies) и в появившемся контекстном меню выбрать элемент Suppress(подавить). Таким образом, должны остаться активными только два тела – инструмент обрезки, созданный на шаге 9 и результат обрезки, созданный на шаге 10.

Шаг 12. Используя команду Create → Body Operation (рисунок 1.10), повернуть тело-инструмент вокруг оси Z на угловой шаг одного межлопаточного канала: $360/z = 360/16 = 22,5^\circ$. Для поворота в нужную сторону можно использовать знак «минус» при указании угла поворота (см. рисунок 1.10).

| | |
|-------------------------------------|--------------|
| Body Operation | BodyOp3 |
| Type | Rotate |
| Bodies | 1 |
| Preserve Bodies? | No |
| Axis Definition | Selection |
| Axis Selection | Plane Normal |
| <input type="checkbox"/> FD9, Angle | -22,5 ° |

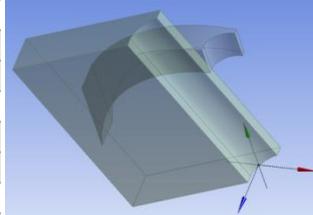


Рисунок 1.10–Поворот тела-инструмента

Шаг 13. Обрезать круговой канал СА с помощью булевой операции (Create→Boolean→Subtract), используя в качестве тела-мишени (Target Bodies) кольцевой канал СА, а в качестве тела-инструмента (Tool Bodies) - созданное на предыдущем шаге тело (рисунок 1.11).

| | |
|-----------------------|----------|
| Boolean | Boolean2 |
| Operation | Subtract |
| Target Bodies | 1 Body |
| Tool Bodies | 1 Body |
| Preserve Tool Bodies? | No |

Рисунок 1.11–Параметры команды для получения канала одной лопатки

Шаг 14. Создать новую плоскость, используя в качестве базовой плоскость XY. Для этого нажать кнопку New Plane () на панели инструментов. Выбор базовой плоскости осуществляется в три этапа: сначала нужно щелкнуть на поле значения Base Plane, чтобы появились кнопки Apply/Cancel (применить/отменить), затем выбрать нужную плоскость в дереве проекта и нажать кнопку Apply.

Шаг 15. Перейти во вновь созданную плоскость, щелкнув по ней правой кнопкой мыши в списке дерева проекта, и в ней создать эскиз сечения лопатки СА (рисунок 1.12). Затем образмерить эскиз аналогично предыдущему эскизированию. Задать ограничение касательности ( Tangent на вкладке Constraints) попарно для всех сцепленных элементов лопаточного профиля.

Шаг 16. Вытянуть лопатку командой Extrudeи обрезать канал булевой операцией Subtractаналогично шагам 9 и 12. Окончательно сформированный канал СА представлен на рисунке 1.13.Для устойчивого решения лопатка по возможности должна находиться приблизительно посередине межлопаточного канала.

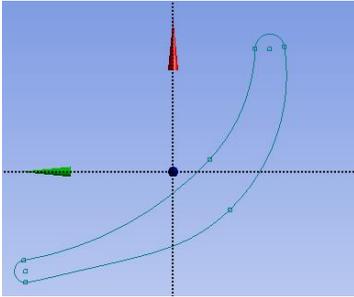


Рисунок 1.12 – Эскиз лопатки СА

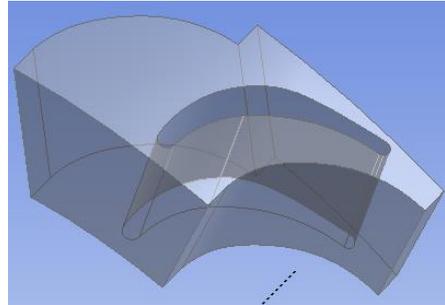


Рисунок1.13 - КаналСА

Шаг17. Построить РК аналогично СА. В результате будут созданы два тела: канал СА и РК (рисунок 1.14). Поверхность выхода из СА должна обязательно совпадать с поверхностью входа в РК по осевой и радиальной координатам, а тангенциальные координаты могут не совпадать, что естественно при различных угловых шагах СА и РК.

Шаг18. Переименовать в дереве проекта тела СА и РК, используя команду контекстного меню Rename и задав для СА название SA, а для РК – RK.

Шаг 19. Завершить работу в DesignModeler, закрыв его. Убедиться, что элемент Геометрии имеет признак корректного выполнения - зелёную галочку. Сохранить проект Workbench, используя кнопку  Save или

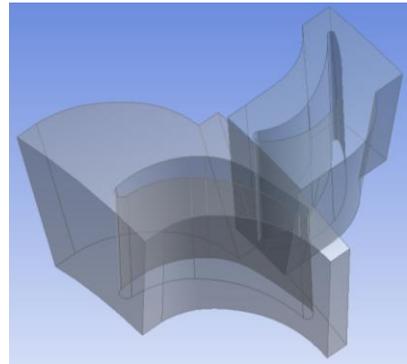


Рисунок 1.14 – Канал СА и РК

 Save As...

При сохранении проекта нужно учитывать, что название файла и путь к нему должны содержать только латинские символы и цифры. По этим же причинам не рекомендуется сохранять проект на рабочем столе, путь к которому включает имя пользователя, которое может содержать неподдерживаемые символы.

1.2 Создание сеточной модели одноступенчатой турбины

Для CFD-расчёта созданная в предыдущем разделе геометрия турбины должна быть представлена сеткой контрольных объёмов. Наложение сетки на геометрическую модель выполняется в сеткогенераторе.

Шаг 20. Открыть сеткогенератор ANSYS Meshing, дважды кликнув на элементе Mesh проекта Workbench.

Перед построением сетки необходимо назвать входные, выходные и боковые грани расчётных зон СА и РК соответствующим образом. Поскольку СА и РК соприкасаются друг с другом удобнее это делать поочереди для СА и РК, погасив противоположную зону.

Шаг 21. Погасить зону РК. Для этого нужно в дереве проекта раскрыть список    Geometry, нажать правой кнопкой на элемент  RK, а затем нажать  Hide Body.

Шаг 22. Назвать зону выхода СА. Для этого нужно, находясь в режиме выбора поверхностей (), левой кнопкой мыши выбрать поверхность выхода из СА. Затем вызвать правой кнопкой мыши контекстное меню и выбрать пункт  Create Named Selection. В появившемся окне нужно вписать новое название выходной границы «SA_outlet» и нажать ОК.

Шаг 23. Аналогичным образом нужно назвать входную границу СА «SA_inlet».

Шаг 24. Погасить зону СА аналогично шагу 21. После этого нужно сделать видимой зону РК. Для этого нужно выбрать в дереве проекта элемент геометрии  RK и нажать  Show Body.

Шаг 25. Назвать входную зону РК «RK_inlet», а выходную - «RK_outlet».

Шаг 26. Назвать периодические боковые границы РК. Для этого нужно сначала выделить (удерживая Ctrl) поверхности, относящиеся к одной стороне, и назвать их «RK_symmetry1», а к другой стороне - «RK_symmetry2»¹.

Шаг 27. Аналогично назвать периодические границы СА «SA_symmetry1» и «SA_symmetry2».

Шаг 28. Назвать поверхности, относящиеся к лопатке РК «RK_blade», а к СА- «SA_blade». Это необходимо для более удобного просмотра распределения параметров по высоте лопатки в дальнейшем. В результате границы должны быть расставлены как на рисунке 1.15.

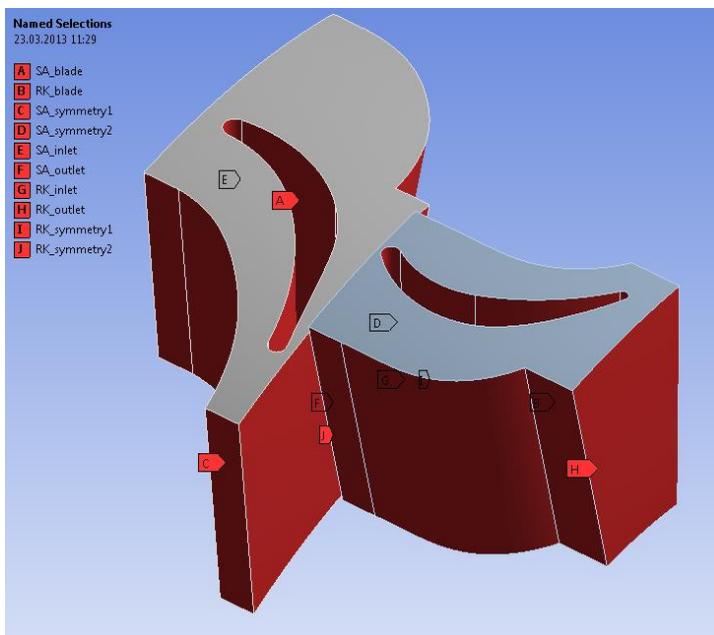


Рисунок 1.15–Названные границы расчётной зоны

¹ Не стоит обращать внимание на то, что в названии границ встречается слово Symmetry. В данном случае будет использовано не симметричное, а периодическое граничное условие, поскольку межлопаточные каналы периодические, а не симметричные.

Шаг 29. Настроить параметры сеткогенерации. Для этого нужно выбрать в дереве проекта элемент  Mesh и задать параметры будущей сетки. На вкладке Sizing задать размер элементов сетки: Relevance Center → Fine. На вкладке Inflation включить создание пристеночного слоя Use Automatic Inflation → Program Controlled (рисунок 1.16). Алгоритм Program Controlled по умолчанию накладывает пристеночный призматический слой на все неназванные элементы. В нашем случае среди названных элементов есть поверхности лопаток (названные на предыдущем шаге), на которые также может быть наложен пристеночный слой для более точного решения. Для этого нужно поочередно выбрать наименования «SA_blade» и «RK_blade» и в их окне детализации установить включение этих зон в алгоритм Inflation (Program Controlled Inflation → Include).

| | |
|---|-------------------------|
| Sizing | |
| Use Advanced Size Function | On: Curvature |
| Relevance Center | Fine |
| Initial Size Seed | Active Assembly |
| Smoothing | High |
| Transition | Slow |
| Span Angle Center | Fine |
| <input type="checkbox"/> Curvature Normal Angle | Default (18,0 °) |
| <input type="checkbox"/> Min Size | Default (2,1003e-005 m) |
| <input type="checkbox"/> Max Face Size | Default (2,1003e-003 m) |
| <input type="checkbox"/> Max Size | Default (4,2006e-003 m) |
| <input type="checkbox"/> Growth Rate | Default (1,20) |
| Minimum Edge Length | 3,1268e-003 m |
| Inflation | |
| Use Automatic Inflation | Program Controlled |
| Inflation Option | Smooth Transition |
| <input type="checkbox"/> Transition Ratio | 0,15 |
| <input type="checkbox"/> Maximum Layers | 5 |
| <input type="checkbox"/> Growth Rate | 1,2 |
| Inflation Algorithm | Pre |
| View Advanced Options | No |

Рисунок 1.16-Настройка параметров сетки

Шаг 30. Выполнить построение сетки с заданными параметрами. Для этого нужно нажать кнопку  Update или  Generate Mesh. Процесс построения сетки выполняется пять-десять минут. Признаком удачного завершения является зелёная галочка у элемента  Mesh.

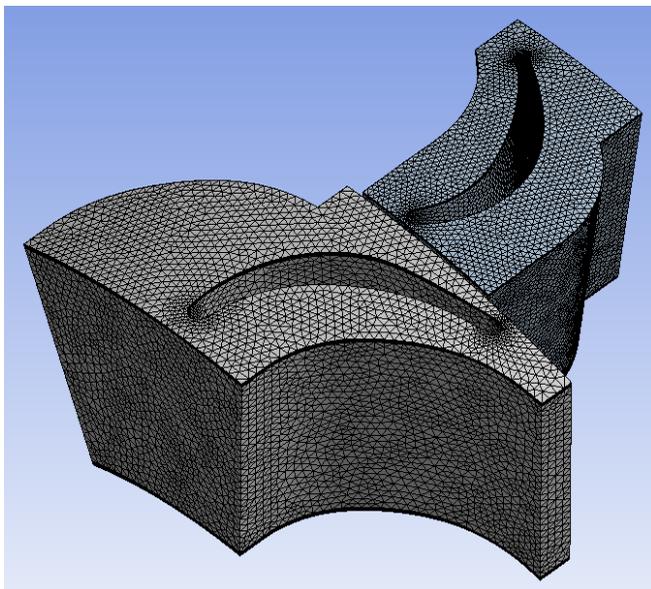


Рисунок 1.17–Построенная сетка

Шаг 31. Просмотреть размеры сетки. Для этого раскрыть пункт Statistics элемента Mesh (рисунок 1.18). Данная сетка имеет ~470 тыс. элементов и ~105 тыс. узлов.

| Statistics | |
|-----------------------------------|--------|
| <input type="checkbox"/> Nodes | 105313 |
| <input type="checkbox"/> Elements | 466700 |
| Mesh Metric | None |

Рисунок 1.18– Окно статистики сетки

1.3 Создание расчётной модели одноступенчатой турбины

Расчётная модель создаётся на основе созданной в предыдущем разделе сетки путём наложения граничных условий, параметров моделируемых процессов и задания настроек решателя.

Основные параметры рабочего процесса турбины приведены в таблице 1.2.

Таблица 1.2 – Основные параметры рабочего процесса одноступенчатой турбины

| № | Наименование параметра | Обозначение | Размерность | Значение |
|---|--|-------------|-------------|----------|
| 1 | Мощность турбины | N_T | кВт | 18500 |
| 2 | Угловая скорость вращения вала турбины | ω | c^{-1} | 1513 |
| 3 | Давление рабочего тела на входе в турбину | p_0^* | кПа | 23740 |
| 4 | Давление рабочего тела на выходе из турбины | p_2 | кПа | 17441 |
| 5 | Температура рабочего тела на входе в турбину | T_0^* | К | 800 |
| 6 | Газовая постоянная рабочего тела | R | Дж/кг·К | 260,5 |
| 7 | Показатель изэнтропы | k | - | 1,3 |
| 8 | Расход рабочего тела | \dot{m}_T | кг/с | 410,2 |

Далее описано пошаговое задание условий моделирования.

Шаг 32. Запустить препроцессор, дважды щелкнув по элементу Setup. Далее необходимо задать рабочее тело в соответствии с таблицей 1.2 путём модификации свойств воздуха: молярной массы и теплоёмкости рабочего тела турбины (генераторного газа):

$$\text{Молярная масса } M = \frac{8314,3}{R} = \frac{8314,3}{260,5} = 31,92 \text{ кг/моль}$$

$$\text{Теплоёмкость } C_p = \frac{k}{k-1} R = \frac{1,3}{1,3-1} \cdot 260,5 = 1128,8 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$$

Также может быть задана вязкость.

Шаг 33. Переименовать воздух в генераторный газ. Для этого в дереве проекта нужно развернуть список веществ ( **Materials**), найти там воздух с параметрами идеального газа ( **Air Ideal Gas**) и переименовать его в «gg»(генераторный газ), используя пункт  **Rename** контекстного меню.

Шаг 34. Модифицировать свойства генераторного газа. Для этого нужно открыть окно параметров рабочего тела, дважды щёлкнув по элементу «gg» левой кнопкой мыши (рисунок 1.19). На вкладке **Basic Settings** (основные настройки) не нужно ничего менять, а на вкладке **Material Properties** (Свойства вещества) необходимо задать вычисленные значения молярной массы и теплоёмкости в соответствующие поля. Следует обратить внимание, что все числовые параметры в CFX задаются с точкой в качестве разделителя целой и дробной части, а запятую CFX воспринимает как неверный символ. По завершении задания свойств нужно закрыть окно, нажав **ОК**.

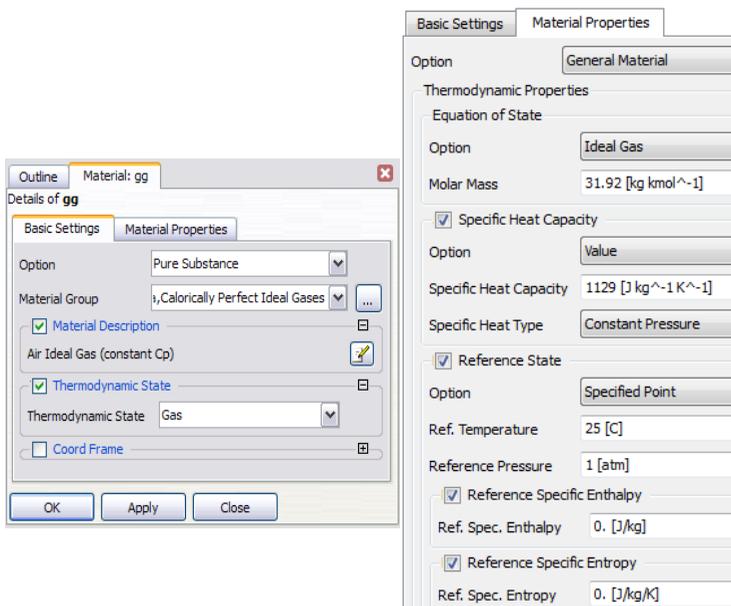


Рисунок 1.19–Задание параметров рабочего тела – генераторного газа

Шаг 35. Создать расчётную зону для СА. Для этого выполнить команду вставки расчётной зоны главного меню Insert →  Domain. Затем задать имя новой зоны - «SA» (рисунок 1.20).



Рисунок 1.20 - Добавление новой расчётной зоны

Шаг 36. Задать основные параметры (Basic Settings) зоны SA. Для этого на первой вкладке задать размещение (Location) зоны SA на геометрии СА, выбрав один из двух пунктов. В качестве вещества (Material) выбрать gg (рисунок 1.21). Ссылочное давление (Reference Pressure) установить равным нулю. Нажать Apply.

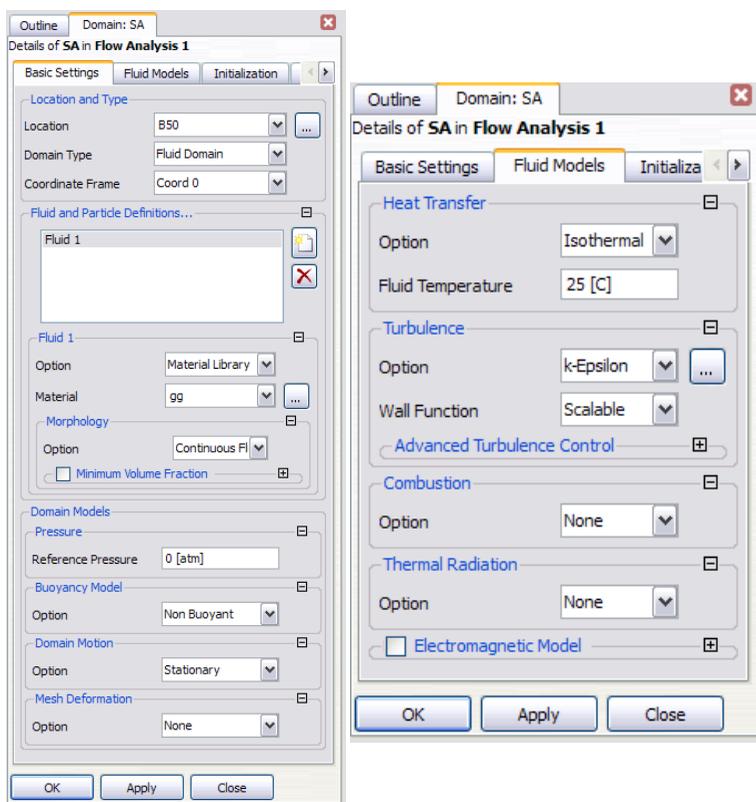


Рисунок 1.21 -Задание параметров зоны SA

Шаг 37. Задать модели потока зоны SA. Для этого нужно перейти на вторую вкладку (Fluid Models) и там указать параметр теплопереноса – расчёт полной энергии (Heat Transfer→Total Energy). Нажать ОК.

Шаг 38. Аналогичным образом задать добавить зону потока RK, повторяя шаги 35-37. В качестве размещения (Locations) второй зоны указать элемент РК. Кроме того, необходимо задать опцию вращения зоны (Domain Motion→Rotating) и указать скорость вращения (рисунок 1.22). При задании скорости вращения знаком числа указывается направление вращения с учётом правила правого буравчика: при вкручивании буравчика вдоль направления оси вращения по часовой стрелке вращение положительное, иначе – отрицательное. Направление оси вращения можно оценить по тройке векторов, приведенной в правом нижнем углу экрана.

В результате проект должен содержать две зоны (рисунок 1.23).

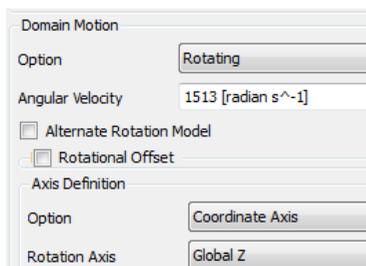


Рисунок 1.22 - Задание вращения зоны RK

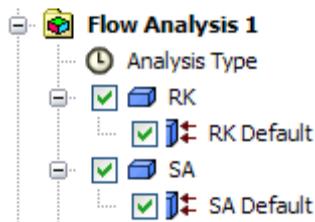


Рисунок 1.23 - Результат создания расчётных зон SA и RK

Шаг 39. Создать интерфейс перехода потока из выхода SA на вход RK. Для этого вставить интерфейс (Insert→Domain Interface), согласиться с его названием «Domain Interface 1», задать в качестве первой стороны (Side 1) - зону SA и границу SA_outlet в качестве второй стороны (Side2) - зону RK, и границу RK_inlet (рисунок 1.24). Также нужно задать модель смешения потоков Stage (Mixing Model→Stage). Поскольку число лопаток РК отличается от числа лопаток СА, задаем угловой шаг (Pitchangle) каждого из каналов (360/z).

Также для этого можно использовать автоматическое определение угловых шагов расчётных зон, применяя опцию Pitch → Change Automatic.

Шаг 40. Создать входную границу на СА:

Insert →  Boundary → in SA.

Назвать границу «inlet» (рисунок 1.25).

Пролистывая вкладки, установить расположение входной зоны на элементе сетки SA_inlet, задать давление, температуру и параметры турбулентности втекающего потока:

Type → Inlet

Location → SA_inlet,

Total Pressure → 23.74 MPa

Total Temperature → 800 K

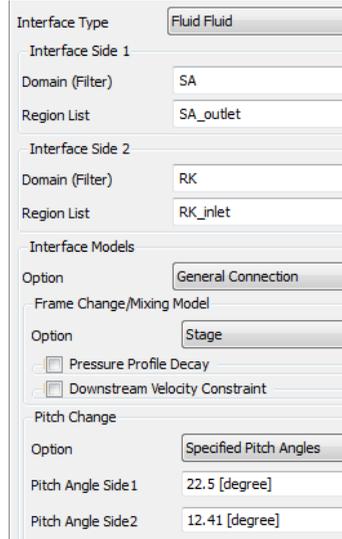


Рисунок 1.24 – Задание интерфейса перехода потока из СА в РК

Шаг 41. Аналогичным образом создать выходную границу на РК:

Insert →  Boundary → in RK. Назвать границу «outlet».

Type → Outlet

Location → RK_outlet,

Mass → 14,14 kg/s (рисунок 1.26).

Расчёт выполняется в два этапа. На первом этапе на выходе устанавливается граничное условие расхода. Поскольку моделируется только один межлопаточный канал, то расход через него равен:

$$G_1 = \frac{\dot{m}}{z_{PK}} = \frac{410,2}{29} = 14,14 \text{ кг/с}$$

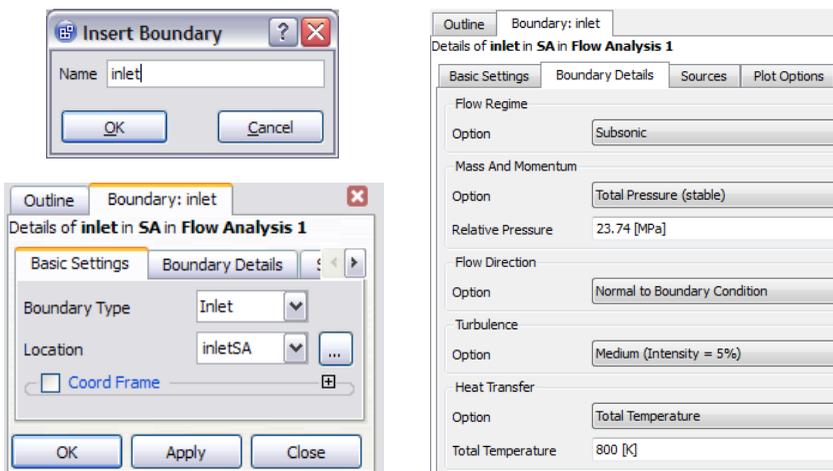


Рисунок 1.25 -Задание входного граничного условия

Шаг 42. Создать периодическое граничное условие для СА. Создать интерфейс Insert →  **Domain Interface**, назвав его «SA_periodic». Задать границы СА «SA_symmetry1» и «SA_symmetry2» в качестве сторон Side 1 и Side 2, а тип интерфейса установить «Rotational Periodicity», также задав в качестве оси периодичности ось вращения РК (рисунок 1.27).

Шаг 43. Создать периодическое граничное условие для РК, аналогично предыдущему шагу.

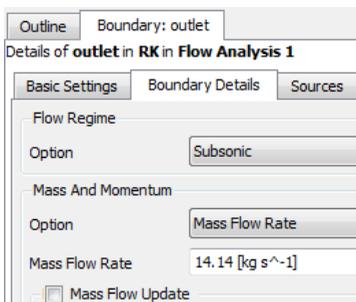


Рисунок 1.26 -Задание выходного граничного условия

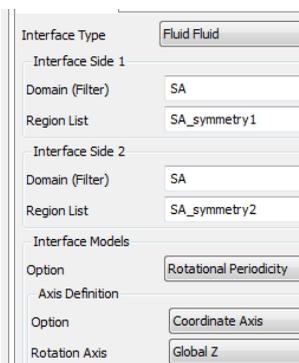


Рисунок 1.27 -Задание периодического граничного условия

В результате описанных выше манипуляций расчётная модель приобретет вид, представленный на рисунке 1.28.

Шаг 45. Завершить построение модели, закрыв препроцессор. Проект должен выглядеть, как показано на рисунке 1.30. Проект можно сохранить.

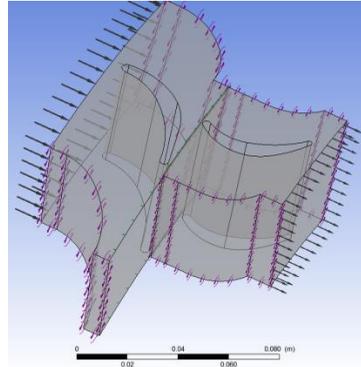


Рисунок 1.28 -Результат наложения граничных условий

Шаг 44. Далее нужно задать параметры решателя, используя элемент дерева проекта **Solver Control**. Нужно установить максимальное количество итераций 80 (рисунок 1.29), этого достаточно для предварительного расчёта.

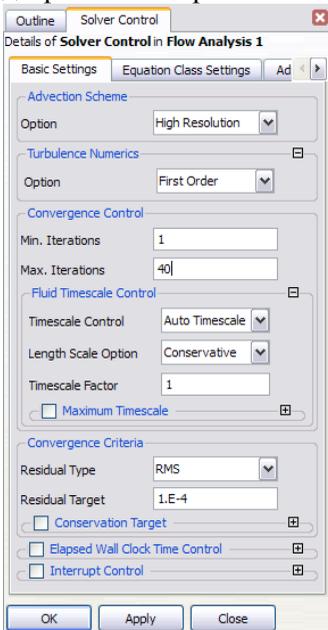
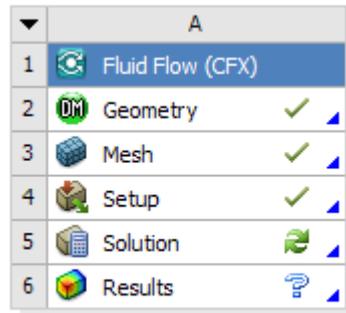


Рисунок 1.29- Задание параметров решателя



Fluid Flow (CFX)

Рисунок 1.30 - Результат описания задачи в препроцессоре

1.4 Поиск решения

Отыскание решения поставленной задачи выполняется в так называемом «решателе» (Solver).

Шаг 46. Открыть решатель двойным щелчком на элементе Solution.

Шаг 47. Задать параметры многопроцессорного расчёта (рисунок 1.31): Run Mode→HP Local Parallel, число параллельных процессов – 2 (или 4, в зависимости от количества свободных ядер процессора компьютера), включить галочку Show Advanced Controls и на вкладке Partitioner установить опцию связанного распараллеливания многозонной задачи (Multidomain Option→Coupled Partitioning).

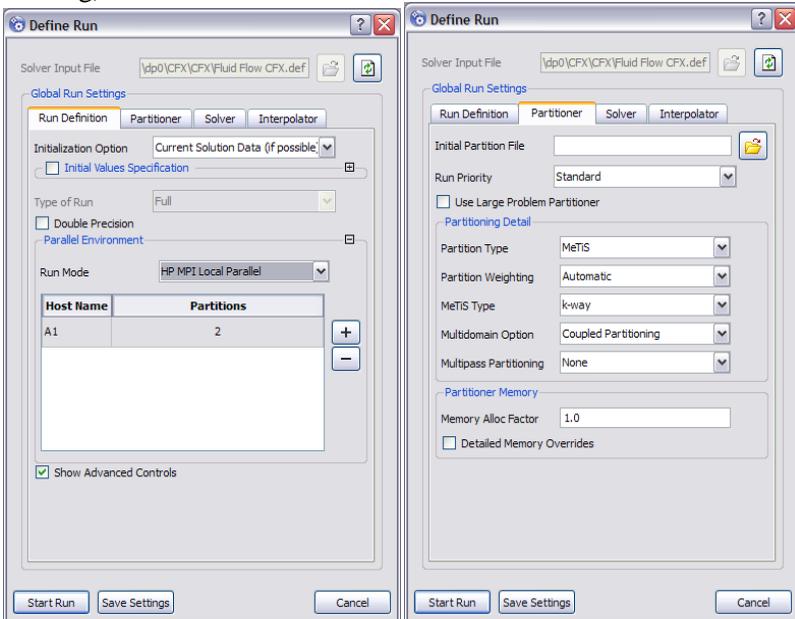


Рисунок 1.31 -Параметры запуска решателя

Шаг 48. Запустить расчёт, нажав Start Run. Следить за снижением невязок и сообщениями решателя (рисунок 1.32).

Если расчёт не запускается, то это может быть связано как с ошибками при формировании расчётной модели, так и проблемами аппаратно-программного характера. Например, нередко при решении задач в параллельном режиме из-за неправильной оценки требуемой памяти происходит аварийное завершение работы распараллеливателя (Partitioner) или решателя (Solver) по причине нехватки выделенной памяти (Insufficientmemoryallocated). В этом случае можно попробоватькратно увеличить размер выделяемой памяти с помощью параметра Memory Alloc (ated) Factor (рисунок 1.31), который следует задавать больше единицы: 1.1 (+10%), 1.2 (+20%) и т.п. Причём при работе распараллеливателя и решателя используется разное выделение памяти и множители нужно задавать на соответствующих вкладках.

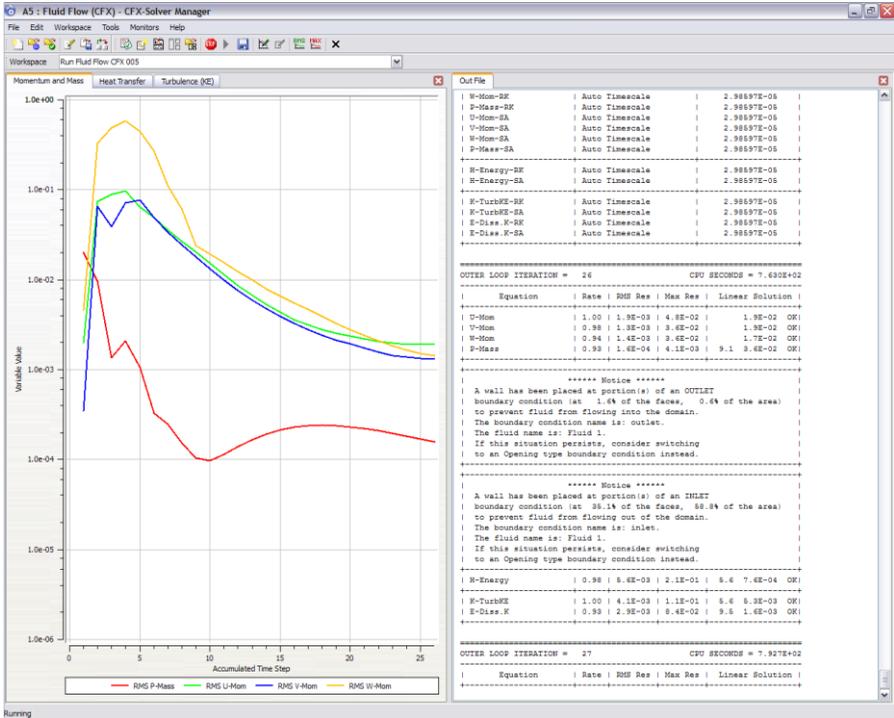


Рисунок 1.32 -Работа решателя

После выполнения 40 итераций предварительного расчёта решатель остановится. Для выполнения следующего этапа его нужно закрыть, изменить параметры моделирования, а именно поставить в качестве граничных условий на выходе не расход, а давление и продолжить решение.

Шаг 49. Закрыть решатель. Открыть препроцессор (Setup).

Шаг 50. Двойным щелчком открыть граничное условие Outlet, на вкладке Boundary Details выставить предварительное значение статического давления Average Static Pressure→23,00 МПа. Это давление задаётся равным среднему давлению на выходе, полученному в предварительных результатах. Обычно оно чуть больше рабочего давления на выходе из турбины. Подтвердить ввод, нажав ОК.

Шаг 51. Закрыть препроцессор, двойным щелчком, открыть решатель и нажать Start Run. Расчёт продолжит выполняться с новыми граничными условиями и параметрами решателя, но с начальными условиями, взятыми из предварительных результатов. Этим достигается устойчивость работы решателя, поскольку запуск решения задачи с условиями типа «давление на входе плюс давление на выходе» запуск обычно затруднён.

Шаг 53. Аналогично шагам 50-52 выполнить последовательные расчёты, ступенчато понижая давление на выходной границе:

1. 23,00→21,00,
2. 21,00→19,00,
3. 19,00→17,44 МПа.

На последнем этапе, поскольку он является заключительным, необходимо также повысить максимальное количество итераций до 150 для увеличения точности результатов (рисунок 1.33). Изменения граничных условий вызывают временные повышения невязок, которые затем выравниваются. Поэтому если делать более резкие изменения граничных условий, то расчёт может аварийно завершиться из-за слишком больших градиентов параметров.

Размеры «ступенек» параметров являются очень индивидуальными для расчётов разных турбин. Зачастую необходимо провести несколько пробных запусков, заканчивающихся аварийно, чтобы оценить, насколько расчёт устойчив. Для некоторых расчётов может задаваться сразу рабочее давление турбины на выходе p_2 , т.е. достаточно одного изменения граничного условия. Но большинство расчётов требуют несколько этапов.

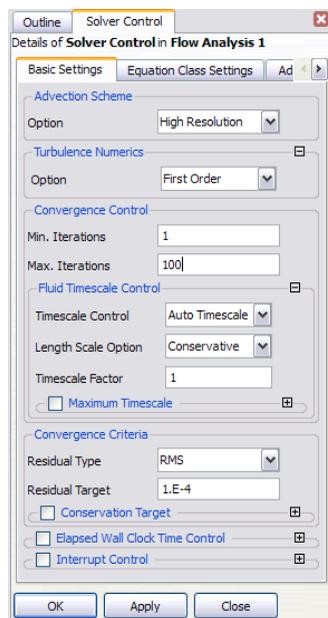


Рисунок 1.33 - Увеличение максимального количества итераций

Шаг 52. После завершения расчёта необходимо закрыть решатель. Признаком правильного завершения расчёта является зелёная галочка у элемента Solver в проекте Workbench.

1.5 Анализ результатов расчёта одноступенчатой турбины

Для анализа результатов расчёта их необходимо представить в виде полей параметров, линий тока, интегральных значений параметров. Эти процедуры выполняются в пост-процессоре. Полученные студентом результаты могут несколько отличаться от приведенных в данном пособии вследствие грубой сетки, неполной сходимости расчёта, вызванной временными ограничениями практического занятия. Однако порядки параметров должны быть одинаковыми. В противном случае вероятнее всего расчёт выполнен с ошибкой.

Шаг 54. Запустить пост-процессор двойным щелчком на элементе Results.

Шаг 55. Создать элемент визуализации потока Streamline (линии тока): Insert →  Streamline. Задать его название и параметры (рисунок 1.34). Нажать Apply. Просмотреть картину потока (рисунок 1.35).

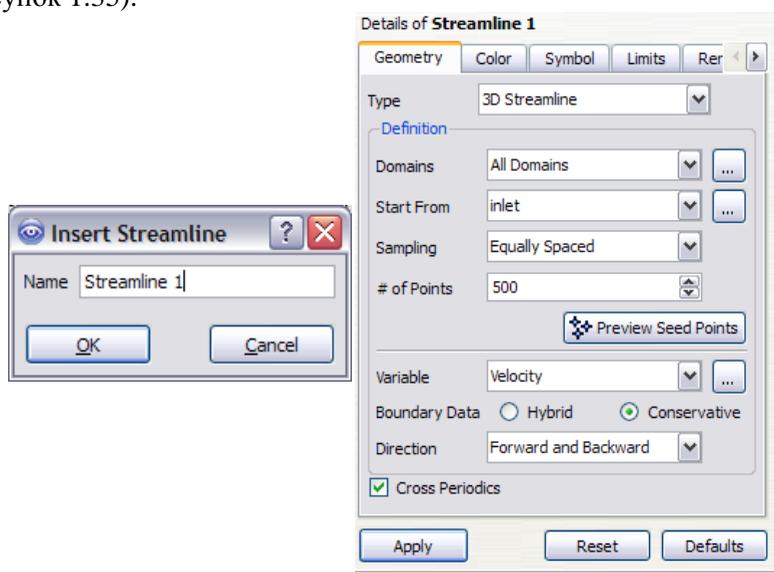


Рисунок 1.34 -Параметры элемента визуализации Streamline1

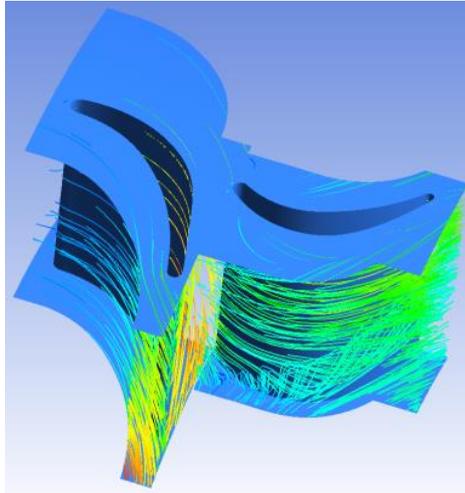


Рисунок 1.35 – Картина потока

Шаг 56. Для лучшего отображения РК и СА можно размножить зону РК и СА. Для этого нужно открыть двойным щелчком элемент  RK в дереве проекта и установить число копий - 29, а также поставить галочку FullCircle (полный круг) для автоматического определения угла поворота копий. Также следует поступить с СА, указав число копий - 16. Если включить отображение непроницаемых границ РК, поставив в дереве проекта галочку у элемента  RK Default и так же у СА,

то картина приобретёт вид, показанный на рисунке 1.36.



Рисунок 1.36 - Включение отображения полного РК и СА

Шаг 57. Для оценки интегральных параметров потока необходимо перейти на вкладку Calculators и выбрать (дважды щелкнуть) Function Calculator (рисунок 1.37).

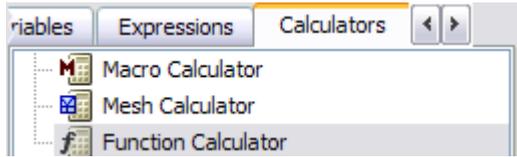


Рисунок 1.37 -Включение калькулятора функций

Шаг 58.Используя калькулятор, нужно оценить (рисунок 1.38) значение расхода (mass Flow) на входной границе (inlet) и крутящего момента (torque) относительно оси Z на непроницаемых стенках рабочего колеса (RK Default) для одного канала. Значение момента может получился отрицательным, если направление вращения РК не совпадает с направлением ввинчивания правого буравчика вдоль оси вращения.

Расход

$$\dot{m}_T = \dot{m}_{\text{каналCA}} \cdot z_{\text{CA}} = 25,77 \cdot 16 = 412,32 \frac{\text{кг}}{\text{с}}$$

Момент на колесе

$$M_{\text{колеса}} = M_1 \cdot z_k = 452,3 \cdot 29 = 13,12 \text{ кН}\cdot\text{м}$$

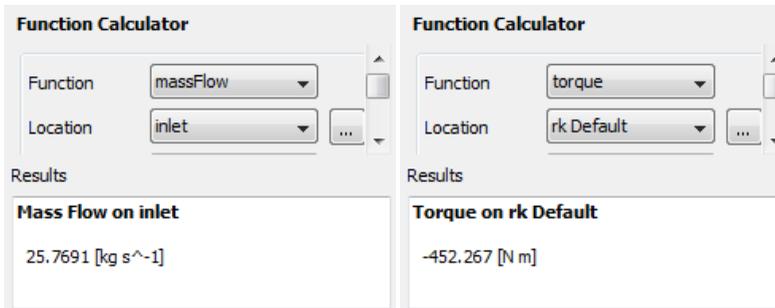
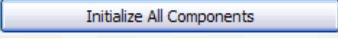


Рисунок 1.38– Определение интегральных параметров потока

Шаг 59. Для определения углов потока в характерных сечениях турбины необходимо вычислить проекционные составляющие

скоростей потока. Для этого нужно перейти на вкладку Turbo(правее Calculators) и проинициализировать Турбокомпоненты (нажать ) , а затем опять вернуться на вкладку Calculators.

Если процесс инициализации не прошел автоматически, то щелкнуть по компоненту Component 1 (SA) и указать необходимые поверхности вручную. Hub– поверхность у втулки, Shroud–поверхности на периферии, Blade – лопатка (SA_blade), Inlet–входная зона (Inlet), Outlet–выходная зона СА (SA_outl), Periodic 1 и 2– периодические границы (SA_symmetry1 и 2).

Кроме того, можно без инициализации Turbo-компонентов, вычислить только проекционные составляющие скоростей, нажав кнопку Calculate Velocity Components.

Шаг 60. Определить среднерасходные (mass Flow Ave) компоненты скорости на выходе из СА (Domain Interface 1Side 1): осевой (Velocity Axial) и окружной (Velocity Circumferential) составляющих скоростей (рисунок 1.39). На основе полученных значений скоростей нужно вычислить среднеинтегральный угол выхода потока из СА:

$$\alpha_1 = \arctg \frac{c_{1a}}{c_{1u}} = \arctg \frac{111,7}{231,3} \approx 26^\circ$$

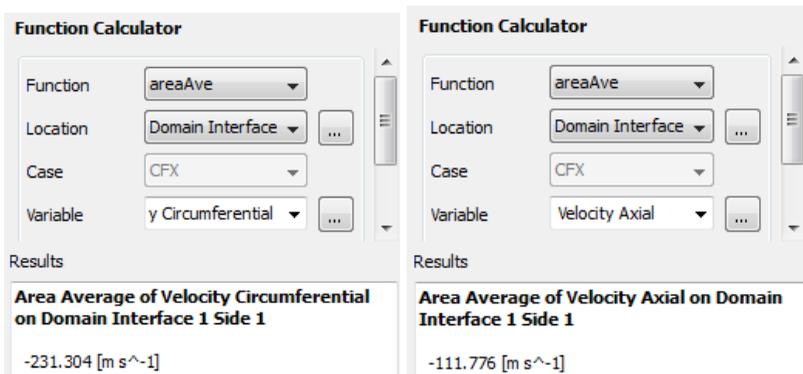


Рисунок 1.39 - Определение абсолютных скоростей на выходе из СА
 При определении скоростей также важно правильно интерпретировать знаки получаемых величин. Если движение потока к осевом

направлении совпадает с направлением оси вращения, то осевая скорость будет с положительным знаком, если движение идёт в противоположном направлении – с отрицательным. То же самое касается тангенциальной (окружной) скорости: если она совпадает с правилом правого буравчика на оси вращения, то значение положительное, иначе - отрицательное. Поэтому при определении значений скоростей можно уже по знаку оценить, верно решена задача или нет, ведь самая часто встречающаяся ошибка при расчёте турбомашин – неверное задание направления вращения.

Шаг 61. Аналогично шагу 60 определить среднерасходные (massFlowAve) составляющие скорости в относительном движении на входе в РК (DomainInterface 1Side 2): осевой (Velocity Axial) и окружной (Velocity Circumferential) составляющих скоростей. На основе полученных значений скоростей нужно вычислить среднеинтегральный угол входа потока в РК в относительном движении:

$$\beta_1 = \arctg \frac{w_{1a}}{w_{1u}} = \arctg \frac{118,4}{50,16} = 67^\circ$$

Следует помнить, что скорости в CFD-Post оцениваются в относительном выражении относительно той зоны, в которой они определяются. То есть, если оценивать параметр Velocity на границе, принадлежащей неподвижной зоне (шаг 60), то результатом будут значения скорости относительно неподвижной зоны, соответственно это будут абсолютные скорости (с). Если же оценивать параметр Velocity на границе, принадлежащей вращающему РК (шаг 61), то результатом будут значения скорости относительно движущейся зоны, т.е. относительные (w). Если же необходимо оценить абсолютные значения скоростей на движущихся границах, следует использовать особый параметр – Velocity in Stationary Frame (скорость в неподвижной системе координат). Подробнее этот параметр рассмотрен на шаге 63.

Шаг 62. Определить среднерасходные (massFlowAve) составляющие скорости в относительном движении на выходе из РК (outlet): осевой (Velocity Axial) и окружной (Velocity Circumferential) составляющих скоростей. «Минус» окружной скорости на выходе соответствует её

противоположному направлению в цилиндрической системе координат. На основе полученных значений скоростей нужно вычислить среднеинтегральный угол выхода потока из РК в относительном движении:

$$\beta_2 = \arctg \frac{w_{2a}}{w_{2u}} = \arctg \frac{119}{207} = 30^\circ$$

Шаг 63. Определяем среднерасходную окружную (Velocity in Stn Frame Circumferential) компоненту скорости в абсолютном движении на выходе из РК (рисунок 1.40). На основе полученных значений скоростей вычислить среднеинтегральный угол выхода потока из РК в абсолютном движении:

$$\alpha_2 = \arctg \frac{w_{2a}}{c_{2u}} = \arctg \frac{119}{11} = 85^\circ$$

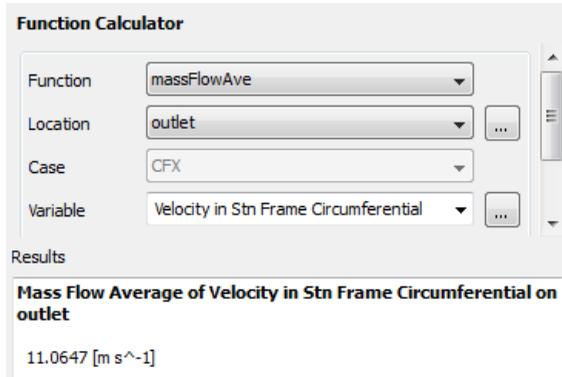


Рисунок 1.40- Определение абсолютной окружной скорости на выходе из РК

При определении скорости c_{2u} следует обратить особое внимание на знак величины. Необходимо оценить направление скорости c_{2u} по отношению к c_{1u} , т.е. направлению вращения. В данном случае знаки c_{1u} и c_{2u} разные (см. рисунки 1.39 и 1.40), а значит в угол α_2 – острый (а не тупой, как на рисунке 1.41). Если же c_{1u} и c_{2u} будут направлены в одну сторону, то это значит, что угол α_2 будет тупой и его следует вычислять как

$$\alpha_2 = 180^\circ - \arctg \frac{w_{2a}}{c_{2u}}$$

Шаг 63. Сравнить полученные данные с имеющимися данными проектного расчета представленными на рисунке 1.41. Результаты сравнения показаны в таблице 1.3.

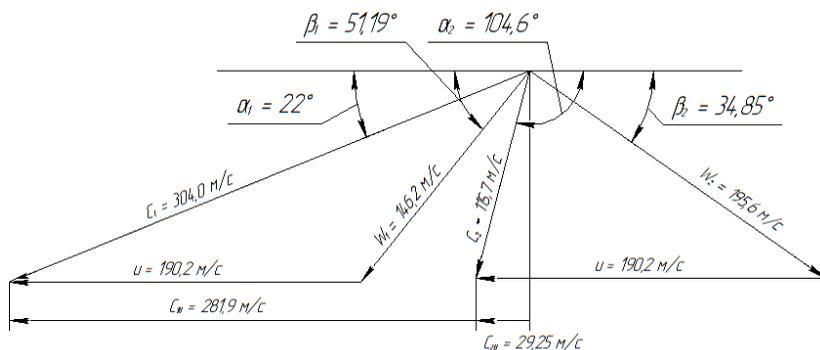


Рисунок 1.41 - План скоростей исследуемой турбины, полученный в результате проектного расчета

Различия в значениях являются расчётными ошибками. Их можно уменьшить несколькими способами:

1. Провести большее количество итераций для лучшего сведения расчёта, выставив больший параметр Max Iterations на завершающем этапе расчёта.

2. Улучшить качество сетки, применив большее количество элементов с меньшими размерами. Но при этом возрастёт время расчёта.

3. Применить более точную модель турбулентности, например SST вместо k-epsilon. Для модели SST необходимо разрешение пограничных слоёв не менее чем 10-ю узлами сетки.

4. Более точно задать параметры рабочего тела: заменить константы выражениями или таблицами, более точно задать вязкость и теплопроводность генераторного газа, поскольку в данном расчёте использовались параметры воздуха.

Таблица 1.3 – Сравнение результатов проектного расчета с данными, полученными в ANSYS

| Величина | Размерность | Проектный расчет | ANSYS | Расхождение, % |
|----------|-------------|------------------|-------|----------------|
|----------|-------------|------------------|-------|----------------|

| | | | | |
|-------------|------|-------|-------|-----|
| \dot{m}_T | кг/с | 410,2 | 412,3 | 0,5 |
| α_1 | град | 22 | 26 | 18 |
| β_1 | град | 51 | 67 | 32 |
| β_2 | град | 35 | 30 | 14 |
| α_2 | град | 104,6 | 85 | 19 |
| p_0^* | кПа | 23740 | 23740 | 0 |
| p_2 | кПа | 17441 | 17441 | 0 |
| T_0^* | К | 800 | 800 | 0 |
| T_2 | К | 751,5 | 750,8 | 0,1 |
| T_2^* | К | 757,4 | 759,1 | 0,2 |
| p_1^* | кПа | 23333 | 23150 | 7,8 |
| p_1 | кПа | 18907 | 19332 | 2,2 |
| T_{1w}^* | К | 768,5 | 759 | 1,2 |
| p_{1w}^* | кПа | 19608 | 18529 | 5,5 |

2 CFD-моделирование двухступенчатой предкамерной осевой турбины

2.1 Создание геометрической модели двухступенчатой турбины

Для CAD-моделирования двухступенчатой предкамерной осевой турбины необходимы исходные данные, отражающие полную геометрическую форму проточной части, которые были получены в результате проектного расчёта турбины [1]. На рисунке 2.1 представлены геометрические параметры проточной части исследуемой турбины: меридионального сечения, а также профилей проточной части соплового аппарата и рабочего колеса каждой из ступеней.

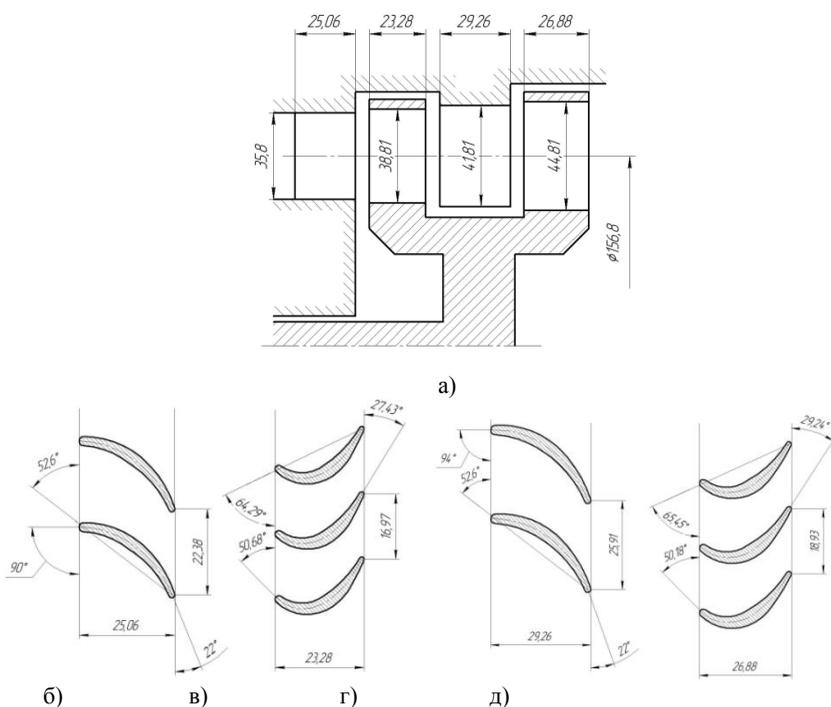


Рисунок 2.1 - Схема двухступенчатой турбины и геометрические параметры её проточной части: а - меридиональное сечение, б - решетка профилей СА первой ступени, в – решетка профилей РК первой ступени, г- решетка профилей СА второй ступени, д - решетка профилей РК второй ступени

В таблице 2.1 приведены основные геометрические параметры исследуемой турбины.

Таблица 2.1 -Геометрические параметры двухступенчатой турбины

| № | Наименование параметра | Обозначение | Размерность | Значение параметра |
|-----------------------|---|-------------|-------------|--------------------|
| 1. Общие параметры | | | | |
| 1 | Средний диаметр турбины | D_{cp} | мм | 156,8 |
| 2 Первая ступень | | | | |
| 2.1 Сопловой аппарат | | | | |
| 2.1.1. | Высота лопатки | h_c | мм | 35,81 |
| 2.1.2. | Ширина решётки лопаток | b_c | мм | 25,06 |
| 2.1.3. | Шаг решётки соплового аппарата | t_c | мм | 22,38 |
| 2.1.4. | Число лопаток соплового аппарата | z_c | – | 22 |
| 2.1.5 | Зазор между СА и РК 1-ой ступени | Δ | мм | 2 |
| 2.2. Рабочее колесо | | | | |
| 2.2.1. | Высота лопатки | h_k | мм | 38,81 |
| 2.2.2. | Ширина решётки лопаток | b_k | мм | 23,28 |
| 2.2.3. | Шаг решётки РК | t_k | мм | 16,97 |
| 2.2.4. | Число лопаток РК | z_k | – | 29 |
| 2.2.5 | Зазор между РК 1-ой ступени и СА 2-ой ступени | Δ | мм | 2 |
| 3. Вторая ступень | | | | |
| 3.1. Сопловой аппарат | | | | |
| 3.1.1. | Высота лопатки | h_c | мм | 41,81 |
| 3.1.2. | Ширина решётки лопаток | b_c | мм | 29,26 |
| 3.1.3. | Шаг решётки СА | t_c | мм | 25,91 |
| 3.1.4. | Число лопаток СА | z_c | – | 19 |
| 2.2.5 | Зазор между СА и РК 2-ой ступени | Δ | мм | 2 |
| 3.2. Рабочее колесо | | | | |
| 3.2.1. | Высота лопатки | h_k | мм | 44,81 |
| 3.2.2. | Ширина решётки лопаток | b_k | мм | 26,88 |
| 3.2.3. | Шаг решётки РК | t_k | мм | 18,93 |
| 3.2.4. | Число лопаток РК | z_k | – | 25 |

Создание геометрической модели выполняется в программе Solid Edge.

Шаг 1. Запуск Solid Edge (рисунок 2.2) из меню программ:

Пуск → Программы → Solid Edge.

Шаг 2. В появившемся окне выбираем «Деталь ISO».

Шаг 3. Турбина будет вращаться вокруг оси Z. Выбираем инструмент «Окружность по центру» из панели инструментов, вкладка «Главная», раздел «Построения». Наводим курсор на плоскость YX так, чтобы она подсветилась и нажимаем на «замок», чтобы зафиксировать её (рисунок 2.3).

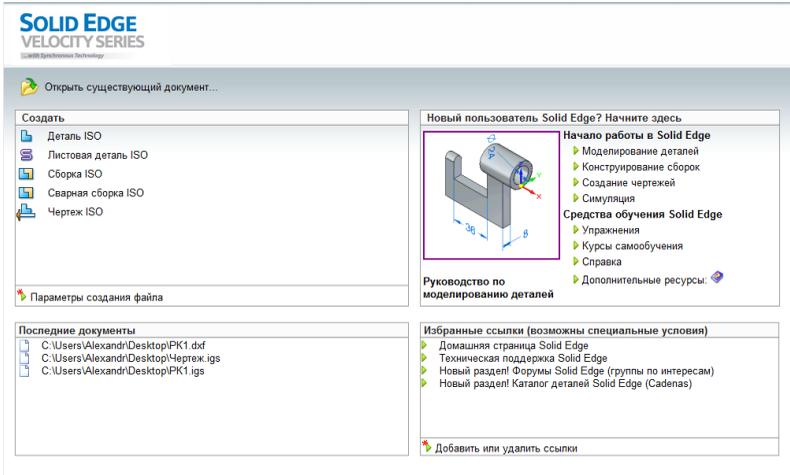


Рисунок 2.2 – Окно SolidEdge при запуске

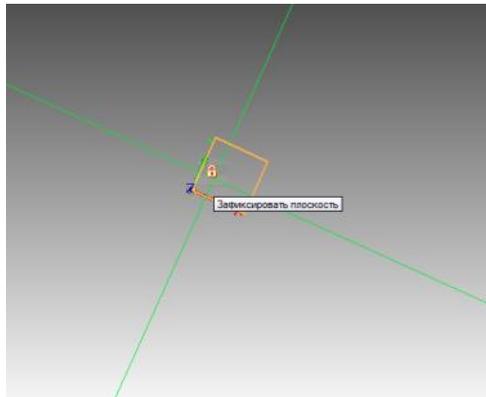


Рисунок 2.3 – Выбор плоскости

Шаг 4. Чертим две окружности из центра координат диаметрами равными втулочному и периферийному диаметрам соплового аппарата первой ступени (рисунок 2.4).

Шаг 5. Нажимаем на получившийся круг. Появляются две стрелки, указывающие направление выдавливания. Выбираем стрелку, сонаправленную с осью Z. В появившемся окне вводим значение ширины соплового аппарата первой ступени плюс 1 мм – половину зазора между лопатками соплового аппарата и рабочего колеса. Нажимаем Enter. (рисунок 2.5).

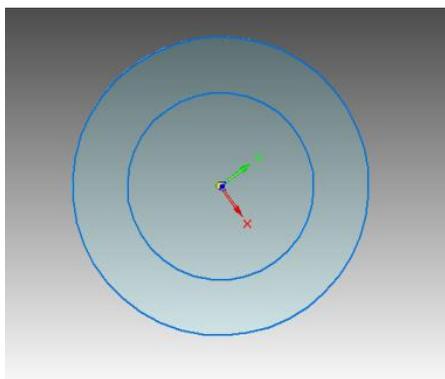


Рисунок 2.4 – Втулочный и периферийный диаметры

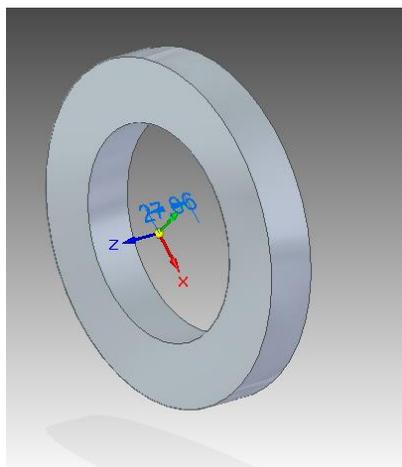


Рисунок 2.5 – Проточная часть СА первой ступени без лопаток

Шаг 6. Из получившейся проточной части нужно вырезать лопатку. Для этого фиксируем плоскость XZ и ставим отображение спереди: Вид → Ориентация вида → Вид спереди (рисунок 2.6).

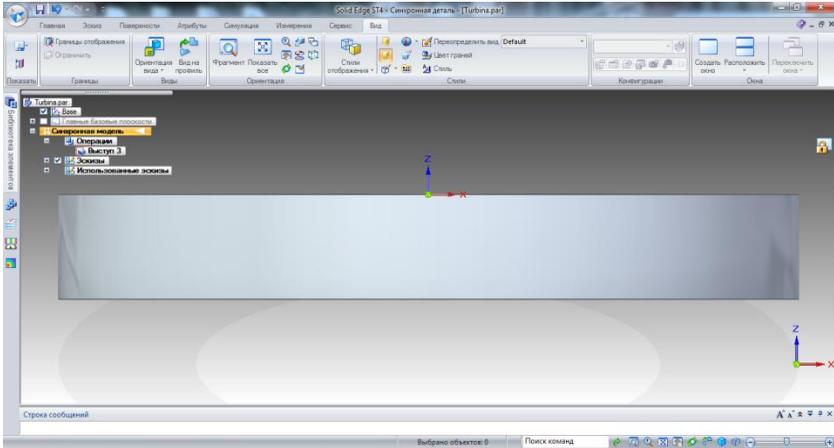


Рисунок 2.6 – Вид спереди

Шаг 7. Чертим сечение лопатки, помня, что рабочее тело будет двигаться в отрицательном направлении оси Z. Лопатку строим по трём окружностям, привязанным к осям Z и X (рисунок 2.7), помня, что до и после лопатки должно оставаться пространство проточной части, т.е. лопатка должна быть полностью охвачена потоком.

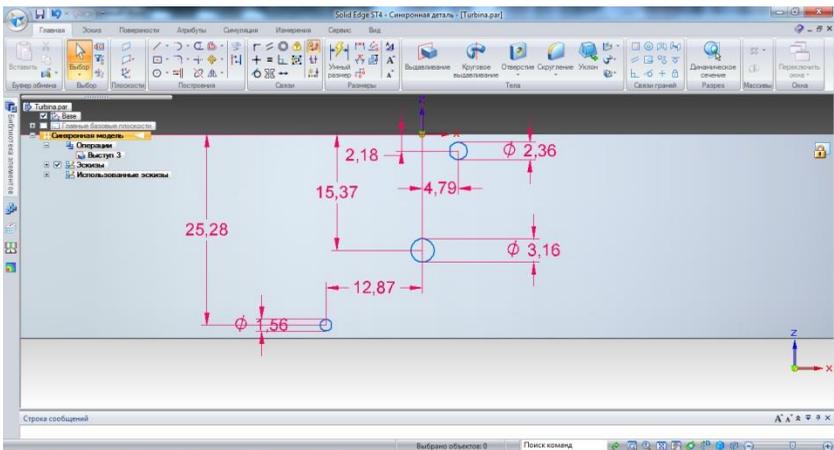


Рисунок 2.7 – Ориентация окружностей

Шаг 8. Соединяем получившиеся окружности касательными кривыми и удаляем все размеры и вырезаем ненужные части окружностей (рисунок 2.8).

Шаг 9. Поворачиваем модель так, чтобы ось Y «смотрела» вниз и выдавливаем контур лопатки в отрицательном направлении этой оси (рисунок 2.9).

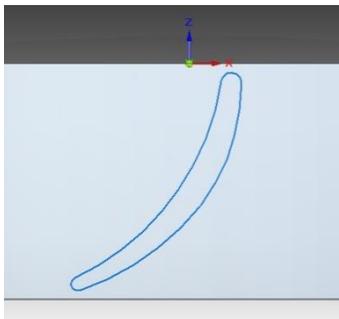


Рисунок 2.8 – Контур лопатки соплового аппарата первой ступени турбины

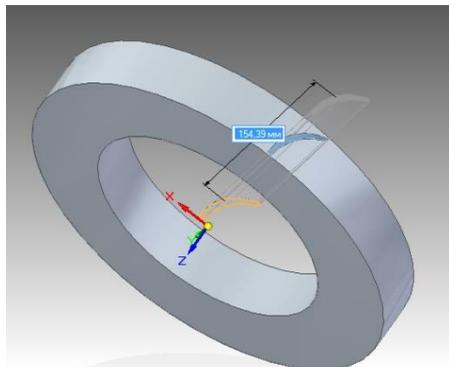


Рисунок 2.9 – Выдавливание лопатки

Шаг 10. Так как сопловой аппарат является периодическим элементом, оставим лишь одну лопатку для уменьшения времени расчёта. Для этого, вернув вид спереди, построим отрезок по ширине лопаточного венца под углом, равным углу наклона лопатки в плоскости XZ (рисунок 2.10). Затем, закрепив выходную плоскость канала, проведём прямую из начала уже начерченной прямой (рисунок 2.11). Создадим из получившихся прямых поверхность: вкладка Поверхности → По направляющим. В появившемся окне нажимаем Ок, выделяем сначала одну прямую, нажимаем Enter, а затем – вторую, Enter (рисунок 2.12).

Шаг 11. В данном сопловом аппарате 22 лопатки, следовательно на каждую лопатку приходится $16,36^\circ$, а значит нужно вырезать $343,64^\circ$. Сделать это можно с помощью инструмента Круговое выдавливание во вкладке Главная (рисунок 2.13). Удаляем оставшуюся вспомогательную плоскость.

Желательно, чтобы в оставшемся канале лопатка находилась посередине. Кроме того, в случае высокой плотности лопаток для обрезки канала можно использовать не плоскость, а криволинейную поверхность, по форме повторяющую среднюю линию лопатки.

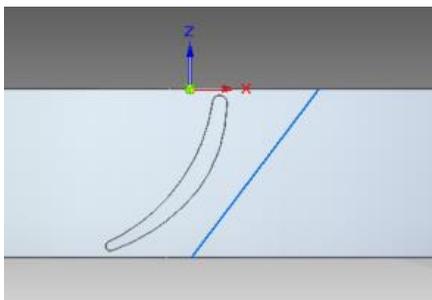


Рисунок 2.10

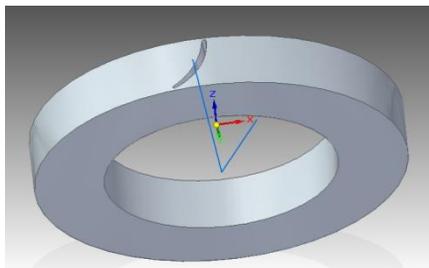


Рисунок 2.11

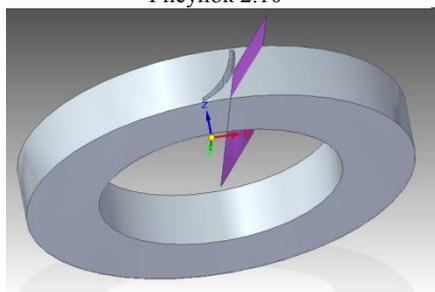


Рисунок 2.12

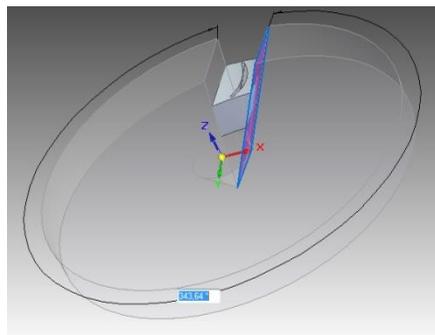


Рисунок 2.13

Шаг 12. Аналогичным образом строим рабочее колесо первой ступени и вторую ступень (рисунок 2.14).

Шаг 13. Для того чтобы экспортировать полученную геометрию в ANSYS, нужно сохранить документ в формате IGES.

Шаг 14. Запускаем ANSYS Workbench. На верхней панели инструментов нажимаем Import into Project, далее выбираем Geometry File из списка доступных расширений и открываем сохранённый ранее файл (рисунок 2.15).

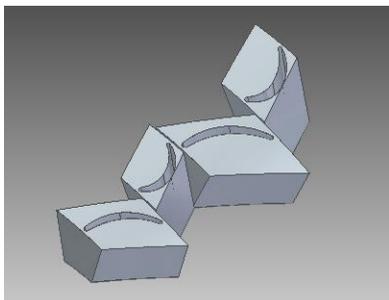


Рисунок 2.14 – Геометрия в Solid Edge

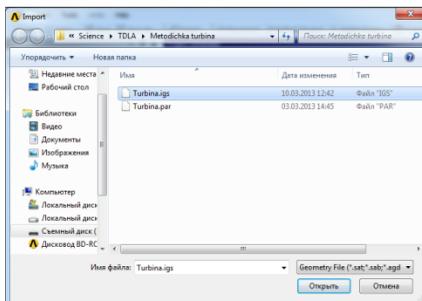


Рисунок 2.15 – Импорт геометрии в ANSYS

Шаг 15. В поле проектов ANSYS Workbench появился новый проект, состоящий только из одной геометрии. Откроем его. Во всплывшем окне выбираем миллиметры. В левом меню в открытой вкладке Geometry выбираем Import1 и нажимаем Generate (рисунок 2.16).

Полученная геометрия является одним сплошным телом. Для того чтобы в дальнейшем иметь возможность задавать граничные условия для соплового аппарата и рабочего колеса используем булевы операции для разделения тела на 4 части.

Шаг 16. Создадим четыре цилиндра (Create→ Primitives→ Cylinder) с заданными параметрами (рисунок 2.17).

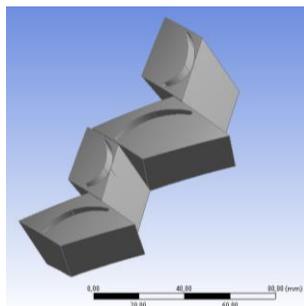


Рисунок 2.16 – Геометрия в Ansys Design Modeler

Затем выполняем булеву операцию пересечения (Create→ Boolean). Во вкладке Operation выбираем Intersect, а в Tool Bodies, зажав Ctrl, выбираем геометрию проточной части и один из

цилиндров, нажимаем Apply, в Preserve Tool Bodies ставим Yes. Необходимо повторить эту операцию с каждым из цилиндров.

После этого удаляются все лишние элементы. Выделим первоначальное тело и четыре цилиндра. Нажмём на них правой кнопкой и во всплывшем окошке выберем Suppress Body (рисунок 2.18). Оставшиеся четыре части переименуем в соответствии с их назначением: сопловые аппараты и рабочие колёса первой и второй ступеней соответственно – SA1, RK1, SA2, RK2.

| Details of Cylinder1 | |
|---|-------------|
| Cylinder | Cylinder1 |
| Base Plane | XYPlane |
| Operation | Add Frozen |
| Origin Definition | Coordinates |
| <input type="checkbox"/> FD3, Origin X Coordinate | 0 mm |
| <input type="checkbox"/> FD4, Origin Y Coordinate | 0 mm |
| <input type="checkbox"/> FD5, Origin Z Coordinate | -27,06 mm |
| Axis Definition | Components |
| <input type="checkbox"/> FD6, Axis X Component | 0 mm |
| <input type="checkbox"/> FD7, Axis Y Component | 0 mm |
| <input type="checkbox"/> FD8, Axis Z Component | 30 mm |
| <input type="checkbox"/> FD10, Radius (>0) | 150 mm |
| As Thin/Surface? | No |

| Details of Cylinder2 | |
|---|-------------|
| Cylinder | Cylinder2 |
| Base Plane | XYPlane |
| Operation | Add Frozen |
| Origin Definition | Coordinates |
| <input type="checkbox"/> FD3, Origin X Coordinate | 0 mm |
| <input type="checkbox"/> FD4, Origin Y Coordinate | 0 mm |
| <input type="checkbox"/> FD5, Origin Z Coordinate | -52,34 mm |
| Axis Definition | Components |
| <input type="checkbox"/> FD6, Axis X Component | 0 mm |
| <input type="checkbox"/> FD7, Axis Y Component | 0 mm |
| <input type="checkbox"/> FD8, Axis Z Component | 25,28 mm |
| <input type="checkbox"/> FD10, Radius (>0) | 150 mm |
| As Thin/Surface? | No |

| Details of Cylinder3 | |
|---|-------------|
| Cylinder | Cylinder3 |
| Base Plane | XYPlane |
| Operation | Add Frozen |
| Origin Definition | Coordinates |
| <input type="checkbox"/> FD3, Origin X Coordinate | 0 mm |
| <input type="checkbox"/> FD4, Origin Y Coordinate | 0 mm |
| <input type="checkbox"/> FD5, Origin Z Coordinate | -83,6 mm |
| Axis Definition | Components |
| <input type="checkbox"/> FD6, Axis X Component | 0 mm |
| <input type="checkbox"/> FD7, Axis Y Component | 0 mm |
| <input checked="" type="checkbox"/> FD8, Axis Z Component | 31,26 mm |
| <input type="checkbox"/> FD10, Radius (>0) | 150 mm |
| As Thin/Surface? | No |

| Details of Cylinder4 | |
|--|-------------|
| Cylinder | Cylinder4 |
| Base Plane | XYPlane |
| Operation | Add Frozen |
| Origin Definition | Coordinates |
| <input type="checkbox"/> FD3, Origin X Coordinate | 0 mm |
| <input type="checkbox"/> FD4, Origin Y Coordinate | 0 mm |
| <input checked="" type="checkbox"/> FD5, Origin Z Coordinate | -112,48 mm |
| Axis Definition | Components |
| <input type="checkbox"/> FD6, Axis X Component | 0 mm |
| <input type="checkbox"/> FD7, Axis Y Component | 0 mm |
| <input type="checkbox"/> FD8, Axis Z Component | 28,88 mm |
| <input type="checkbox"/> FD10, Radius (>0) | 150 mm |
| As Thin/Surface? | No |

Рисунок 2.17 – Параметры цилиндров

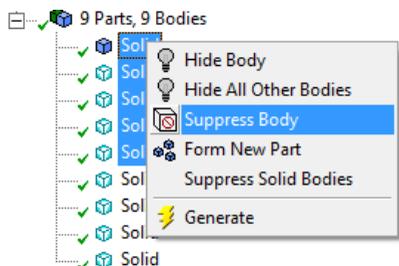


Рисунок 2.18 – «Подавление» ненужной для дальнейшего расчёта геометрии

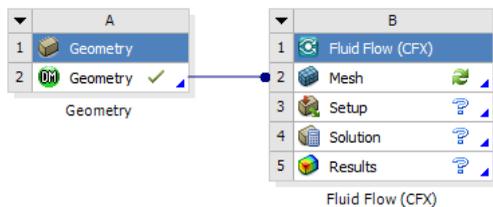


Рисунок 2.19 – Объединение проектов

Также можно использовать другой способ. Если выполнять импорт геометрии в ANSYS четырьмя отдельными венцами (загружая поочередно четыре файла), можно получить сразу отдельные (несоединенные в одну деталь) венцы, что позволит избежать операции их разделения. При экспорте-импорте геометрии многое зависит от программ, между которыми происходит обмен данными, причём зачастую кардинальные отличия можно встретить в методах загрузки геометрии из разных версий одной и той же программы. Наиболее стабильная методика импорта геометрии разрабатывается непосредственными пробами в условиях конкретного программно-аппаратного обеспечения.

Шаг 17. Добавляем в пустой проект Workbench систему газодинамического анализа Fluid Flow (CFX), вытянув её на белое поле проекта из левого списка. Затем, «схватив» элементы подготовленной геометрии левой кнопкой мыши, переносим его на элемент Mesh газодинамического расчёта, таким образом соединив эти два элемента проекта Workbench (рисунок 2.19).

2.2 Создание сеточной модели двухступенчатой турбины

Для CFD-расчёта созданная в предыдущем разделе геометрия турбины должна быть представлена сеткой контрольных объёмов. Разбиение геометрической модели сеткой выполняется в сеткогенераторе.

Шаг 18. Открыть сеткогенератор ANSYS Meshing, дважды кликнув на элементе Mesh проекта Workbench. Откроется окно сеткогенератора с импортированной CAD-моделью.

Перед построением сетки необходимо назвать входные и выходные грани расчётных зон СА и РК соответствующим образом. Поскольку СА и РК соприкасаются друг с другом, удобнее это делать поочереди для СА и РК, погасив противоположную зону.

Шаг 19. Погасить зону РК. Для этого нужно в дереве проекта раскрыть список    Geometry, нажать правой кнопкой на элемент  RK, и нажать  Hide Body. Таким образом погасить РК обеих ступеней.

Шаг 20. Назвать зону входа СА. Для этого нужно, находясь в режиме выбора поверхностей () , левой кнопкой мыши выбрать поверхность входа в СА (рисунок 2.20). Затем вызвать правой кнопкой мыши контекстное меню и выбрать пункт   Create Named Selection. В появившемся окне (рисунок 2.20) нужно вписать название входной границы «inlet SA1» и «inlet SA2» (без пробела) для первой и второй ступеней соответственно и нажать ОК.

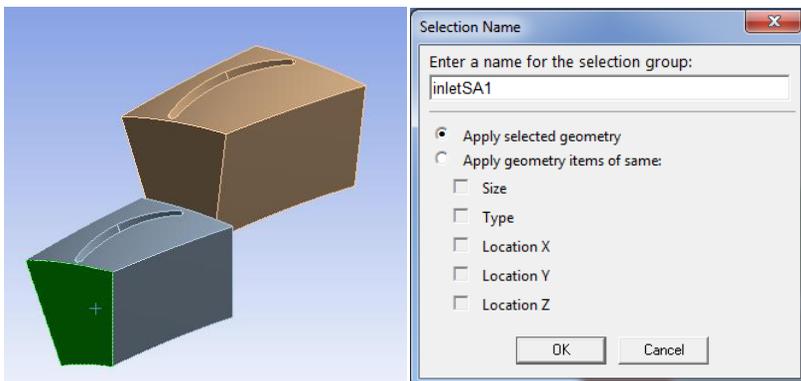


Рисунок 2.20 – Процесс названия входной границы СА

Шаг 21. Аналогичным образом нужно назвать выходную границу СА «outlet SA1» и «outlet SA2» для первой и второй ступеней соответственно (рисунок 2.21).

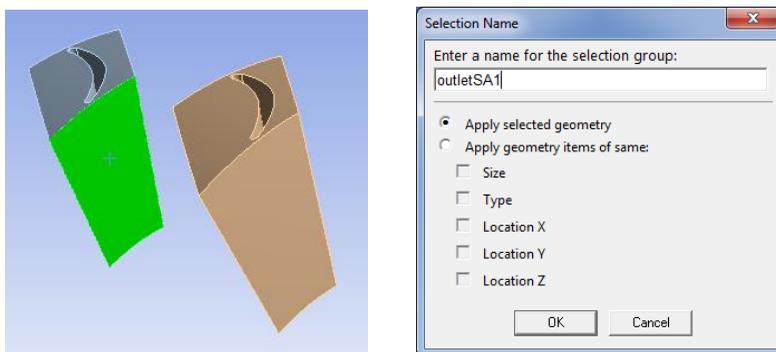


Рисунок 2.21 – Процесс названия выходной границы СА

Шаг 22. Аналогично шагу 19 погасить зону СА. После этого нужно сделать видимой зону РК. Для этого нужно выбрать в дереве проекта элемент геометрии  **RK** , и нажать  **Show Body** .

Шаг 23. Аналогично шагам 20 и 21 назвать входную зону РК «inlet RK1» и «inlet RK2», а выходную - «outlet RK1» и «outlet RK2» для первой и второй ступеней соответственно (рисунок 2.22).

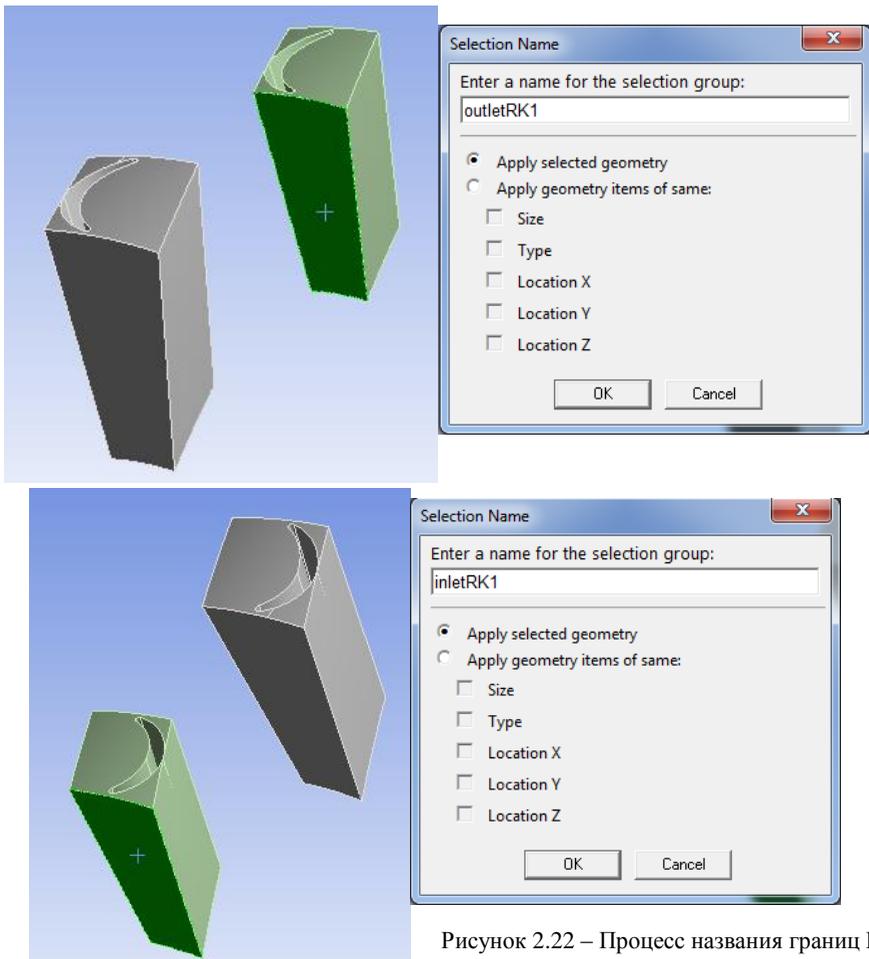


Рисунок 2.22 – Процесс названия границ РК

Шаг 24. Назвать периодические границы РК. Для этого нужно сначала выделить поверхность на одной стороне и назвать её «in RK1» и «in RK2» (рисунок 2.23) для первой и второй ступеней соответственно. Аналогично назвать стороны для первой и второй ступени соплового аппарата «in SA1» и «in SA2».

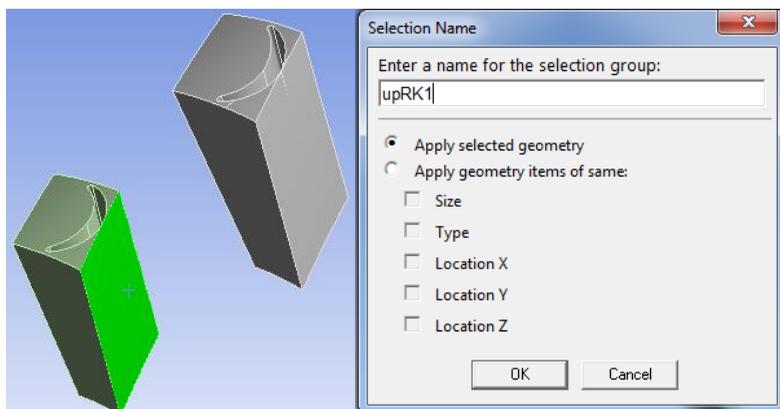


Рисунок 2.23 – Процесс названия первой периодической границы РК первой ступени

Шаг 25. Аналогично шагу 24 назвать вторую периодическую границу РК «down RK1» и «down RK2», вторую периодическую границу СА «down SA1» и «down SA2» для первой и второй ступеней соответственно (рисунок 2.24).

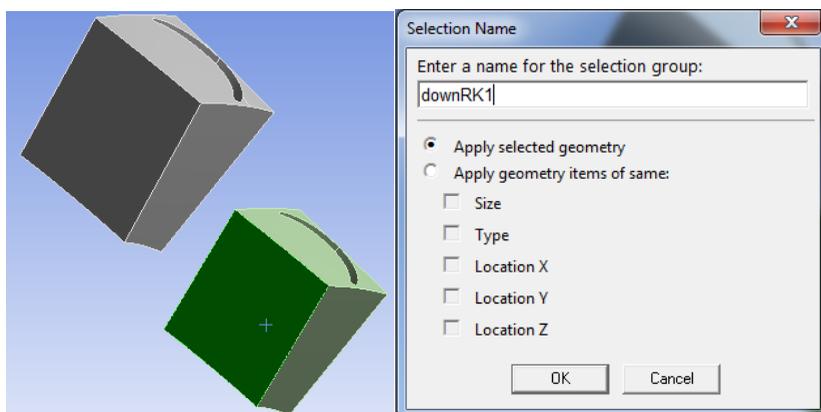


Рисунок 2.24 – Процесс названия второй периодической границы РК первой ступени

Шаг 26. Настроить параметры сеткогенерации. Для этого нужно выбрать в дереве проекта элемент  Mesh и указать его параметры. На вкладке Sizing задать размеры элементов сетки Relevance Center → Fine, Smoothing → High. На вкладке Inflation задать параметры пристеночного слоя Use AutomaticInflation → Program Controlled (рисунок 2.25).

| Sizing | | Inflation | |
|---|-------------------------|--|--------------------|
| Use Advanced Size Function | On: Curvature | Use Automatic Inflation | Program Controlled |
| Relevance Center | Fine | Inflation Option | Smooth Transition |
| Initial Size Seed | Active Assembly | <input type="checkbox"/> Transition Ratio | 0,77 |
| Smoothing | High | <input type="checkbox"/> Maximum Layers | 5 |
| Transition | Slow | <input type="checkbox"/> Growth Rate | 1,2 |
| Span Angle Center | Fine | Inflation Algorithm | Pre |
| <input type="checkbox"/> Curvature Normal Angle | Default (18,0 °) | <input type="checkbox"/> View Advanced Options | No |
| <input type="checkbox"/> Min Size | Default (2,0202e-005 m) | | |
| <input type="checkbox"/> Max Face Size | Default (2,0202e-003 m) | | |
| <input type="checkbox"/> Max Size | Default (4,0404e-003 m) | | |
| <input type="checkbox"/> Growth Rate | Default (1,20) | | |
| Minimum Edge Length | 9,4409e-006 m | | |

Рисунок 2.25 – Настройка параметров сетки

Шаг 27. Выполнить построение сетки с заданными параметрами. Для этого нужно нажать кнопку  Update или  Generate Mesh. Процесс построения сетки выполняется пять-десять минут. Признаком удачного завершения является зелёная галочка у элемента  Mesh (рисунок 2.26).

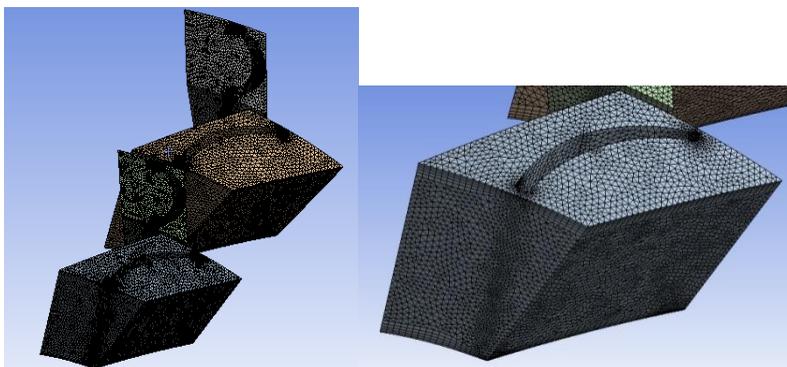


Рисунок 2.26 – Построенная сетка

Шаг 28. Просмотреть размеры сетки. Для этого раскрыть пункт Statistics элемента Mesh (рисунок 2.27). Данная сетка имеет ~1 млн. элементов и ~300 тыс. узлов.

| Statistics | |
|-----------------------------------|--------|
| <input type="checkbox"/> Nodes | 268340 |
| <input type="checkbox"/> Elements | 982531 |
| Mesh Metric | None |

Рисунок 2.27 – Статистика сетки

Шаг 29. После построения сетки нужно закрыть сеткогенератор и сохранить проект. Необходимо также убедиться, что элемент Mesh проекта Workbench имеет признак корректного выполнения - зелёную галочку (рисунок 2.28). Иногда сетка бывает обозначена жёлтой молнией, при этом необходимо выполнить её дополнительное обновление, выбрав в контекстном меню элемента Mesh пункт  Update .

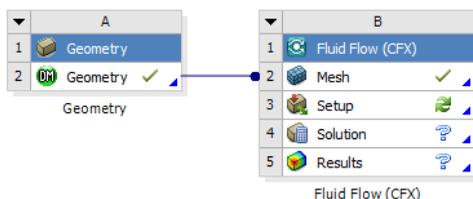


Рисунок 2.28 – Признак корректного выполнения сеткогенерации

2.3 Создание расчётной модели двухступенчатой турбины

На основе созданной в предыдущем разделе сетки создаётся расчётная модель путём наложения граничных условий, параметров моделируемых процессов и задания настроек решателя. Основные параметры работы турбины приведены в таблице 2.2.

Таблица 2.2 – Основные параметры работы двухступенчатой турбины

| № | Наименование параметра | Обозначение | Размерность | Численное значение |
|---|--|-------------|-------------|--------------------|
| 1 | Мощность турбины | N_T | МВт | 12,77 |
| 2 | Угловая скорость вращения вала турбины | ω | c^{-1} | 1840 |
| 3 | Давление рабочего тела на входе в турбину | p_0^* | МПа | 30,21 |
| 4 | Давление рабочего тела на выходе из турбины | p_2 | МПа | 20,27 |
| 5 | Температура рабочего тела на входе в турбину | T_0^* | К | 750 |
| 6 | Газовая постоянная рабочего тела | R | Дж/кг·К | 260,5 |
| 7 | Показатель изэнтропы | k | - | 1,31 |
| 8 | Расход рабочего тела | \dot{m}_T | кг/с | 214,64 |

Шаг 30. Запустить препроцессор, дважды щелкнув по элементу Setup (см. рисунок 2.28).

Далее необходимо задать рабочее тело в соответствии с таблицей 2.2 путём модификации свойств воздуха: молярной массы и теплоёмкости. Молярная масса вычисляется как:

$$M = \frac{8314,3}{R} = \frac{8314,3}{260,5} = 31,92 \text{ кг / моль}$$

Теплоёмкость вычисляется как

$$C_p = \frac{k}{k-1} R = \frac{1,31}{1,31-1} \cdot 260,5 = 1100,8 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$$

Шаг 31. Переименовать воздух в генераторный газ. Для этого в дереве проекта нужно развернуть список веществ ( **Materials**), найти там воздух с параметрами идеального газа ( **Air Ideal Gas**) и переименовать его в «gg» (генераторный газ), используя пункт ‘  **Rename** ’ контекстного меню.

Шаг 32. Модифицировать свойства генераторного газа. Для этого нужно открыть окно параметров рабочего тела, дважды щёлкнув по элементу «gg» левой кнопкой мыши (рисунок 2.29). На вкладке **Basic Settings** (основные настройки) не нужно ничего менять, а на вкладке **Material Properties** (Свойства вещества) нужно задать вычисленные значения молярной массы и теплоёмкости в соответствующие поля. Следует обратить внимание, что все числовые параметры в CFX задаются с точкой в качестве разделителя целой и дробной части. Запятую CFX воспринимает как неверный символ. По завершении задания свойств нужно закрыть окно, нажав **OK**. Также в поле **Transport Properties** можно задать вязкость генераторного газа, если она сильно отличается от вязкости воздуха.

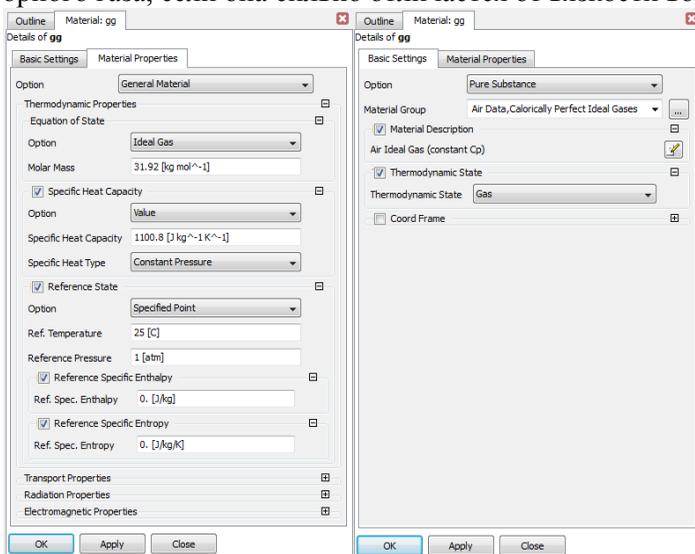


Рисунок 2.29 – Параметры рабочего тела

Шаг 32. Создать расчётную зону для соплового аппарата и турбины каждой ступени. Для этого выполнить команду главного меню Insert →  Domain . Затем задать имя новой зоны - «SA1» (рисунок 2.30).

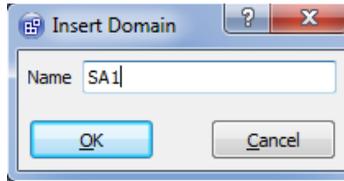


Рисунок 2.30 – Добавление новой расчётной зоны для соплового аппарата первой ступени

Шаг 33. Задать основные параметры (Basic Settings) зоны SA1. Для этого на первой вкладке задать размещение (Location) зоны SA - на геометрии CA, выбрав один из двух пунктов. В качестве вещества (Material) выбрать gg (рисунок 2.31). Reference Pressure установить 0. Нажать Apply.

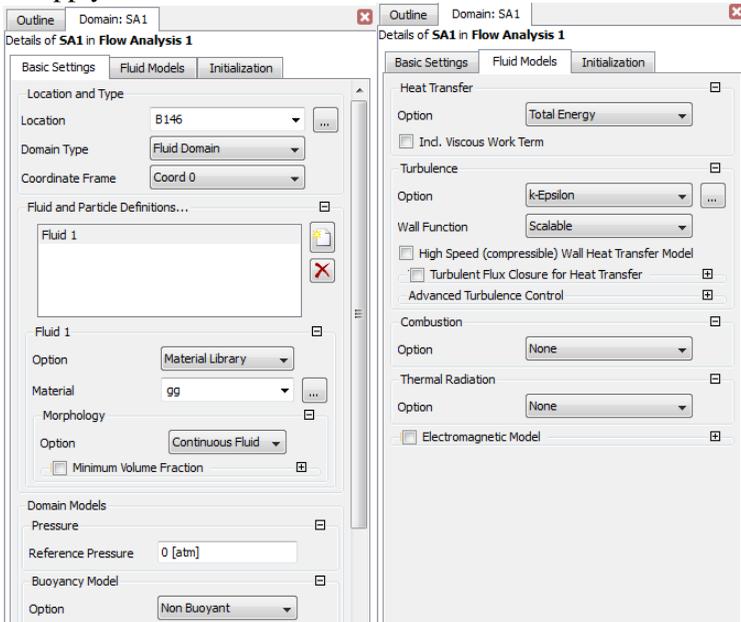


Рисунок 2.31 – Задание параметров зоны SA1

Шаг 34. Задать модели потока (Fluid Models) зоны SA1. Для этого нужно перейти на вторую вкладку и там указать параметр теплопереноса (Heat Transfer) –Total Energy. По окончании нажать ОК.

Шаг 35. Аналогичным образом добавить зоны потока RK1, SA2, RK2 повторяя шаги 32 – 34. В качестве размещения (Locations) второй зоны указать элемент РК первой ступени и так аналогично для других зон. Кроме того, необходимо задать опцию движения зоны (Domain Motion) - вращение (Rotating) и указать скорость вращения. Направление вращения задаётся знаком величины скорости. Положительное значение – это направление, совпадающее с направлением правого буравчика, ввинчиваемого вдоль направления оси вращения. Отрицательное – обратное.

Шаг 36. Создать интерфейс перехода потока из выхода SA1 (outlet SA1) на вход RK1 (inlet RK1). Для этого добавить интерфейс Insert->  Domain Interface, согласиться с его названием «Domain Interface 1» задать в качестве первой стороны (Side 1) - зону SA1 и границу outlet SA1, в качестве второй стороны (Side 2) - зону RK1 и границу inlet RK1 (рисунок 2.32). Также нужно задать модель смешения потоков (Mixing Model) Stage. Аналогично для всех остальных переходных зон.

Шаг 37. Создать входную границу на CA:Insert->  Boundary →in SA. Назвать границу «inlet» (рисунок 2.33), задать параметры:
Location ->inlet SA,
Total Pressure ->30,21MPa
Total Temperature ->750 K

Расчёт выполняется в два этапа. На первом этапе на выходе устанавливается граничное условие расхода. Поскольку моделируется только один межлопаточный канал, то расход через него равен:

$$G_1 = \frac{\dot{m}}{z_K} = \frac{214,64}{25} = 8,5856 \text{ кг / с} .$$

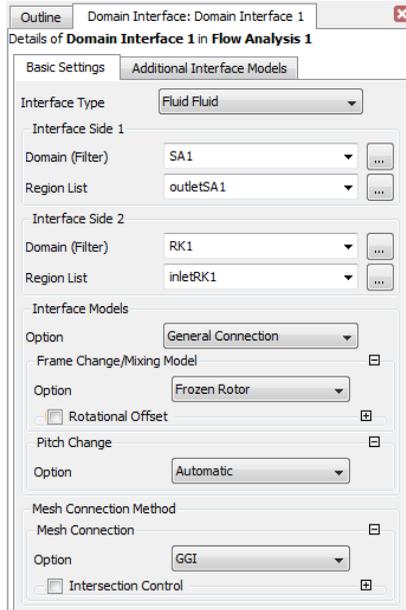


Рисунок 2.32 – Создание интерфейса расчётных зон SA1 и RK1

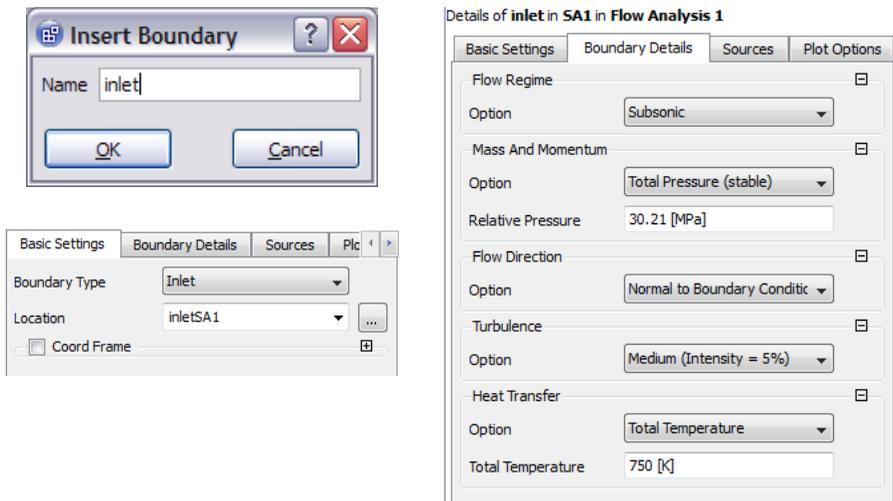


Рисунок 2.33 – Задание входного граничного условия

Шаг 38. Создать выходную границу на РК: Insert →  Boundary → in RK2. Назвать границу «Outlet» (рисунок 2.34), задать параметры: Type → Outlet
Location → outletRK2,
MassFlowRate -> 8585,6g/s
(или 8,585 kg/s - Будьте внимательны с единицами измерения!)

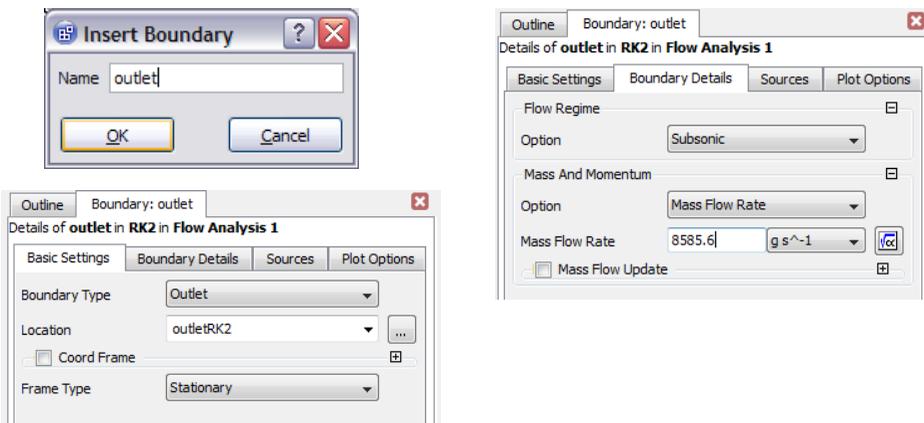


Рисунок 2.34 – Задание выходного граничного условия

Шаг 39. Создать периодическое граничное условие для РК и СА обеих ступеней. Для этого аналогично шагу 36 добавить интерфейс, назвав его «periodic SA1» для соплового аппарата первой ступени, а так же аналогично для других зон, и задать в качестве сторон Side 1 и Side 2 границы СА «up» и «down», а тип интерфейса установить «Rotational Periodicity» (рисунок 2.35).

В результате описанных выше манипуляций расчётная модель приобретет вид, представленный на рисунке 2.36.

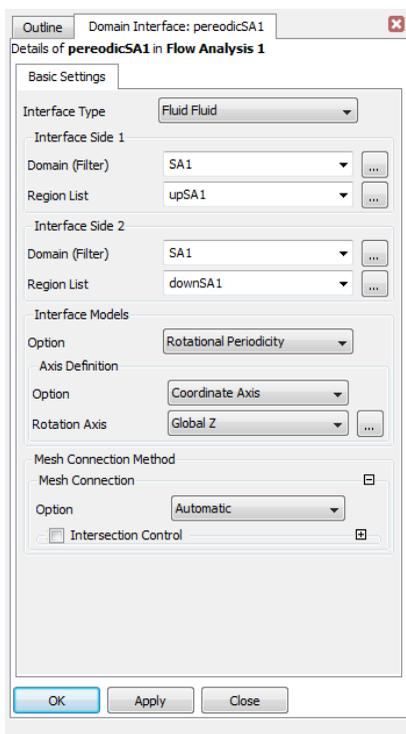
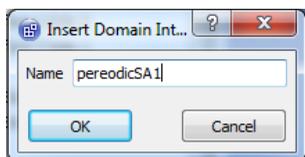


Рисунок 2.35 – Задание периодического граничного условия

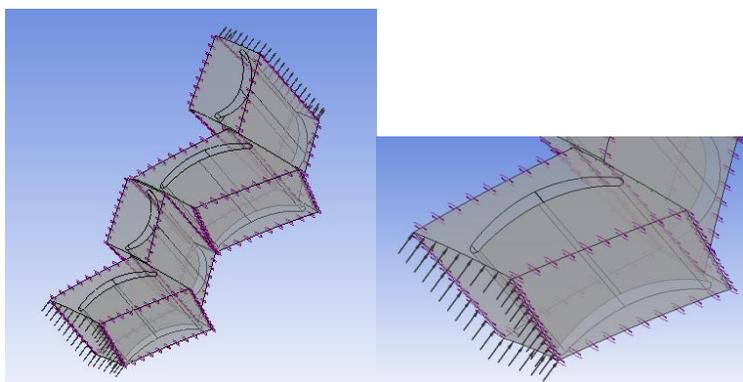


Рисунок 2.36 – Результат наложения граничных условий

Шаг 40. Задать параметры решателя, используя элемент дерева проекта  Solver Control. Нужно установить максимальное количество итераций 50 (рисунок 2.37), этого достаточно для предварительного расчёта.

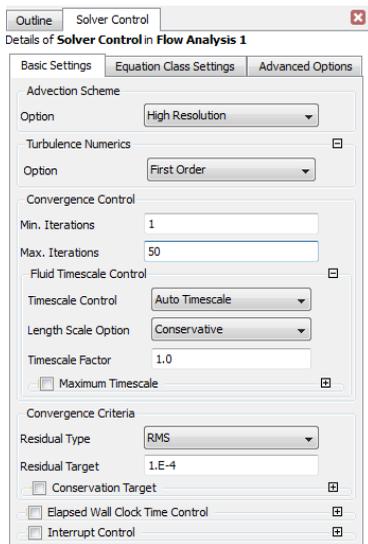


Рисунок 2.37 – Задание параметров решателя

Шаг 41. Завершить построение модели, закрыв препроцессор. Проект должен выглядеть, как показано на рисунке 2.38. Проект можно сохранить.

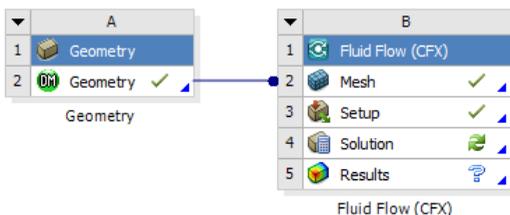


Рисунок 2.38 – Результат описания задачи в препроцессоре

2.4 Поиск решения

Отыскание решения поставленной задачи выполняется в так называемом «решателе» (Solver).

Шаг 42. Открыть решатель двойным щелчком на элементе Solution.

Шаг 43. Задать параметры многопроцессорного расчёта: Run Mode→ HP Local Parallel, число параллельных процессов - 4 (рисунок 2.39), включить галочку Show Advanced Controls и на вкладке Partitioner установить опцию связанного распараллеливания многозонной задачи Multidomain Option→ Coupled Partitioning.

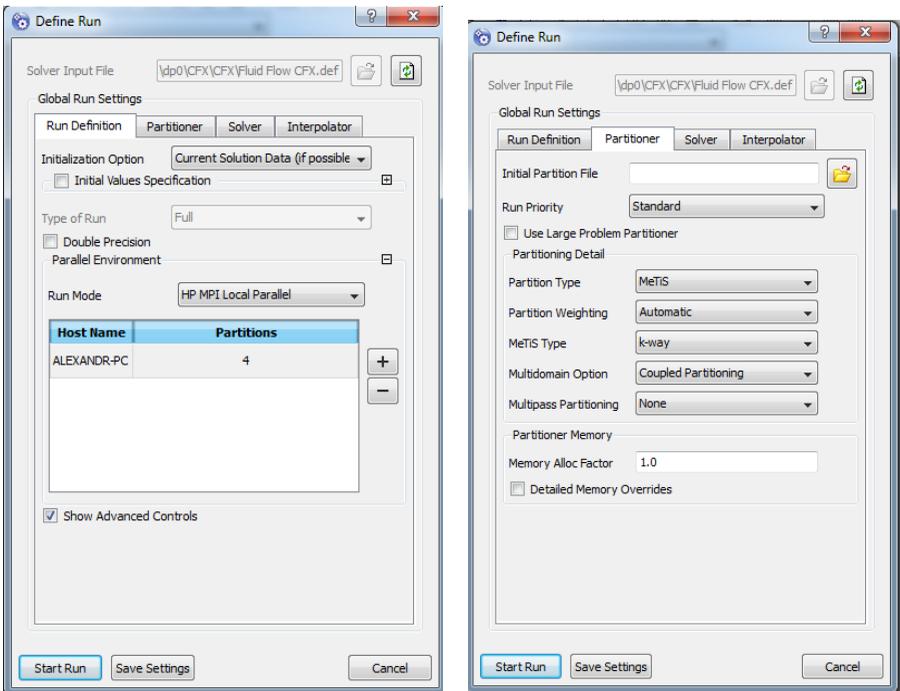


Рисунок 2.39 – Параметры запуска решателя

Шаг 44. Запустить расчёт, нажав Start Run. Следить за снижением невязок и сообщениями решателя (рисунок 2.40).

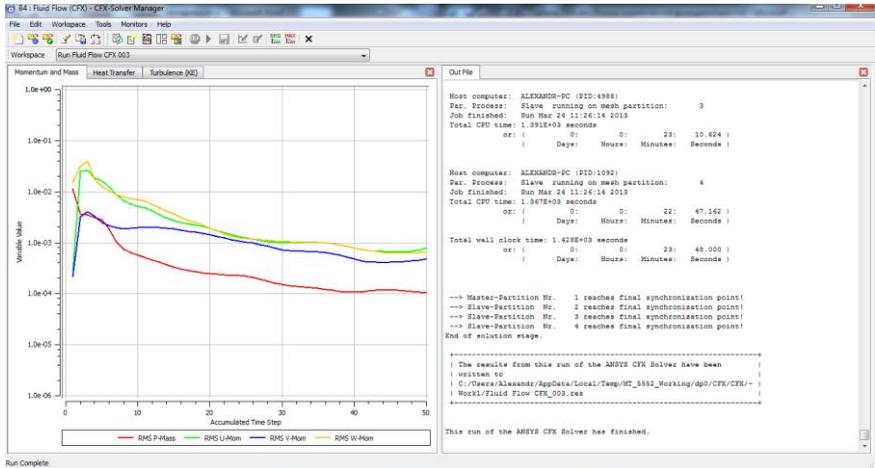


Рисунок 2.40 – Работа решателя

После выполнения 50 итераций предварительного расчёта решатель остановится. Для выполнения следующего этапа его нужно закрыть, изменить параметры моделирования и продолжить решение.

Шаг 45. Закрыть решатель. Открыть препроцессор (Setup).

Шаг 46. Двойным щелчком открыть граничное условие outlet, на вкладке Boundary Details выставить предварительное значение статического давления 27 МПа (рисунок 2.41):
Average Static Pressure → 27 МПа.
Подтвердить ввод, нажав ОК.

Шаг 47. Закрыть препроцессор, двойным щелчком открыть решатель и нажать Start Run. Расчёт продолжит выполняться с новыми граничными условиями и параметрами решателя, но с начальными условиями, взятыми из предварительных результатов. Этим достигается устойчивость работы решателя, поскольку запуск решения задачи с условиями типа «давление на входе плюс давление на выходе» запуск обычно затруднён.

Шаг 48. Аналогично шагам 46 – 47 выполнить последовательные расчёты, ступенчато понижая давление на выходной границе:

1. 27 → 25,
2. 25 → 23,
3. 23 → 20,27 МПа.

На последнем этапе, поскольку он является заключительным, необходимо также повысить максимальное количество итераций до 100 для увеличения точности результатов. В результате решения картина невязок в окне решателя будет выглядеть так, как на рисунке 2.42. Видно, что изменения граничных условий вызывают временные повышения невязок, которые затем выравниваются. Поэтому если делать более резкие изменения граничных условий, например, поставить сразу 20,27 МПа на выходной границе, расчёт может аварийно завершиться из-за слишком больших градиентов параметров. Колебания графиков в конце расчёта говорят о нестационарности процесса.

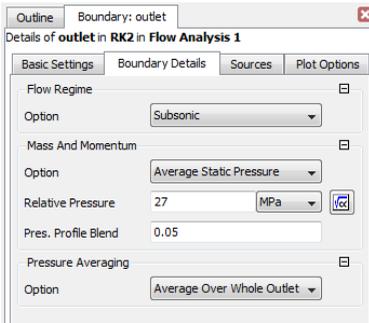


Рисунок 2.41 – Модификация параметров задачи

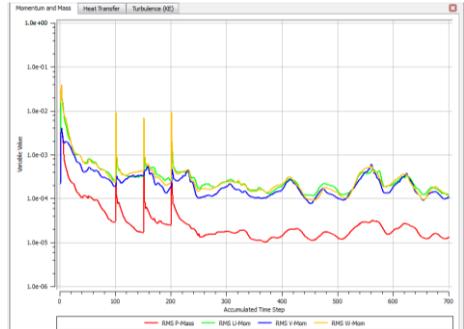


Рисунок 2.42 – Окно решателя в конце процесса решения

2.5 Анализ результатов расчёта двухступенчатой турбины

Для анализа результатов расчёта их необходимо представить в виде полей параметров, линий тока, интегральных значений параметров. Эти процедуры выполняются в пост-процессоре.

Шаг 49. Запустить пост-процессор двойным щелчком на элементе Results.

Шаг 50. Создать элемент визуализации потока Streamline (линии тока): Insert→ Streamline. Задать его название и параметры (рисунок 2.43). Нажать Apply. Просмотреть картину потока (рисунок 2.44).

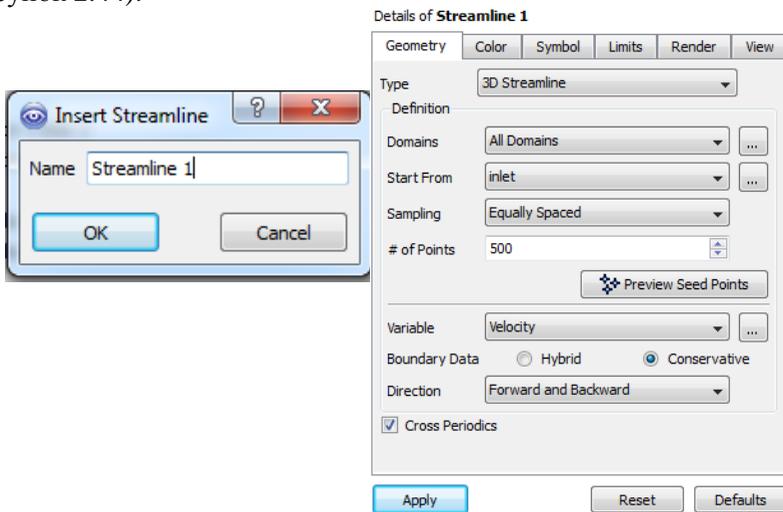


Рисунок 2.43 – Параметры элемента визуализации Streamline 1

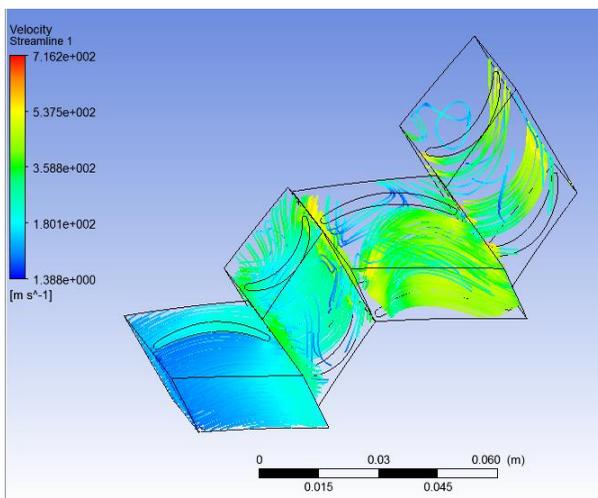


Рисунок 2.44 – Результат визуализации Streamline 1

Шаг 51. Для лучшего отображения можно размножить зоны турбины. Для этого нужно открыть двойным щелчком соответствующий элемент в дереве проекта и установить число копий для данного элемента, а также поставить галочку Full Circle (полный круг) для автоматического определения угла поворота копий (рисунок 2.45).

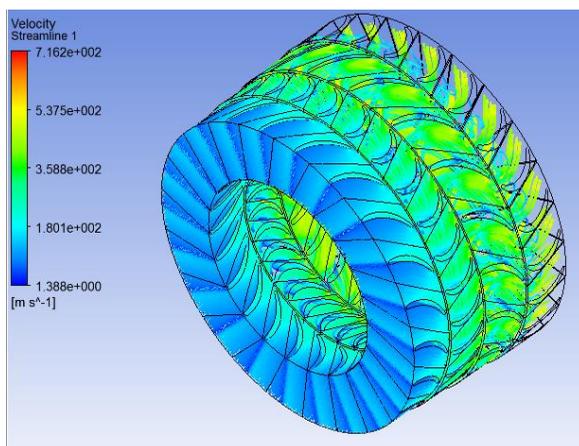


Рисунок 2.45 – Включение отображения полной турбины

Шаг 52. Для оценки интегральных параметров потока необходимо перейти на вкладку Calculators и выбрать (дважды щелкнуть) Function Calculator.

Шаг 53. Используя калькулятор, нужно оценить значение расхода (massFlow) на входной границе (inlet) (рисунок 2.46) и крутящего момента (torque) относительно оси Z на непроницаемых стенках рабочего колеса (RK1 Default и RK2 Default) (рисунок 2.47). Следует иметь в виду, что крутящий момент определяется для одного межлопаточного канала РК, чтобы найти момент на колесе, нужно умножить его на количество лопаток:

$$\begin{aligned} M_{\text{колеса}} &= M_{1Z_{k1}} + M_{2Z_{k2}} = 358,5 \cdot 29 + 747,8 \cdot 25 = \\ &= 10396 + 18694 = 29090 \text{ Н}\cdot\text{м} \end{aligned}$$

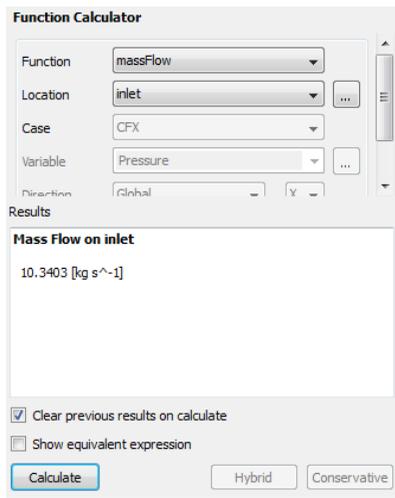


Рисунок 2.46 – Значение расхода на входе в турбину

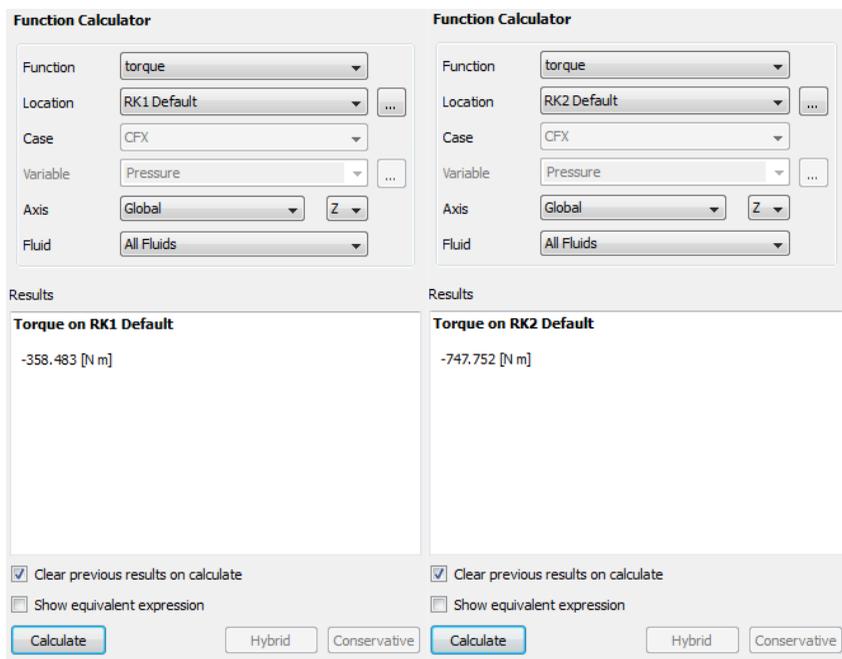


Рисунок 2.47 – Значения крутящего момента на рабочих колёсах первой и второй ступеней

Шаг 54. Для определения углов потока в характерных сечениях турбины необходимо вычислить проекционные составляющие скоростей потока. Для этого нужно перейти на вкладку Turbo (правее Calculators) и нажать Calculate Velocity Components. Затем опять вернуться на вкладку Calculators. Кроме того, для включения дополнительной функция анализа турбомашин, можно выполнить не только расчёт компонентов скоростей, а полную инициализацию Turbo-компонентов, но перед этим каждый венец необходимо дополнительно настроить (рисунок 2.48).

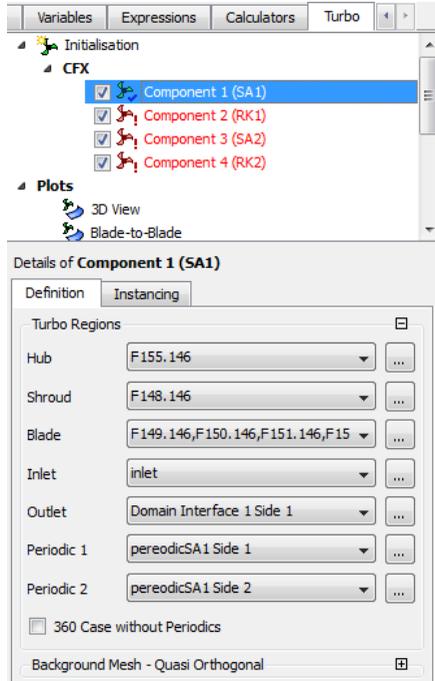


Рисунок 2.48 – Инициализация соплового аппарата первой ступени

Шаг 55. Определить среднерасходные (mass FlowAve) компоненты скорости для выхода из СА первой ступени (Domain Interface 1Side 1): осевой (Velocity Axial) и окружной (Velocity Circumferential) составляющих скоростей (рисунок 2.48). «Минус» окружной скорости на выходе соответствует её противоположному направлению в цилиндрической системе координат. На основе полученных значений скоростей нужно вычислить среднеинтегральный угол выхода потока из СА:

$$\alpha_1 = \arctg \frac{c_{1a}}{c_{1u}} = \arctg \frac{127,41}{159,801} = 38,57^\circ$$

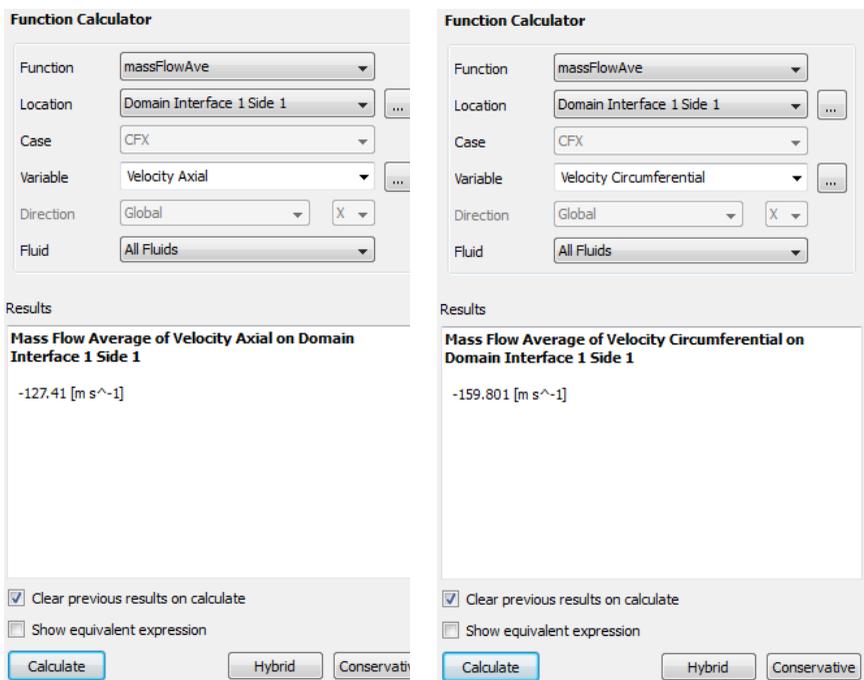


Рисунок 2.49 – Определение абсолютных скоростей на выходе из СА первой ступени

Шаг 56. Аналогично шагу 55 определить среднерасходные (mass Flow Ave) компоненты скорости в относительном движении на входе в РК (Domain Interface 1 Side 2): осевой (Velocity Axial) и окружной (Velocity Circumferential) составляющих скоростей (рисунок 2.50). На основе полученных значений скоростей нужно вычислить среднеинтегральный угол входа потока в РК в относительном движении:

$$\beta_1 = \arctg \frac{w_{1a}}{w_{1u}} = \arctg \frac{139,601}{305,902} = 24,53^\circ$$

Function Calculator

Function: massFlowAve

Location: Domain Interface 1 Side 2

Case: CFX

Variable: Velocity Axial

Direction: Global X

Fluid: All Fluids

Results

Mass Flow Average of Velocity Axial on Domain Interface 1 Side 2

-139.601 [m s⁻¹]

Clear previous results on calculate

Show equivalent expression

Calculate Hybrid Conservative

Function Calculator

Function: massFlowAve

Location: Domain Interface 1 Side 2

Case: CFX

Variable: Velocity Circumferential

Direction: Global X

Fluid: All Fluids

Results

Mass Flow Average of Velocity Circumferential on Domain Interface 1 Side 2

-305.902 [m s⁻¹]

Clear previous results on calculate

Show equivalent expression

Calculate Hybrid Conservative

Рисунок 2.50 – Определение относительных скоростей на входе в РК первой ступени

Шаг 57. Аналогично шагу 56 определить среднерасходные (mass Flow Ave) компоненты скорости в относительном движении на выходе из РК первой ступени (Domain Interface 2 Side 1): осевой (Velocity Axial) и окружной (Velocity Circumferential) составляющих скоростей (рисунок 2.51). На основе полученных значений скоростей нужно вычислить среднеинтегральный угол выхода потока из РК в *относительном* движении:

$$\beta_2 = \arctg \frac{w_{2a}}{w_{2u}} = \arctg \frac{232,021}{207,4} = 48,21^\circ .$$

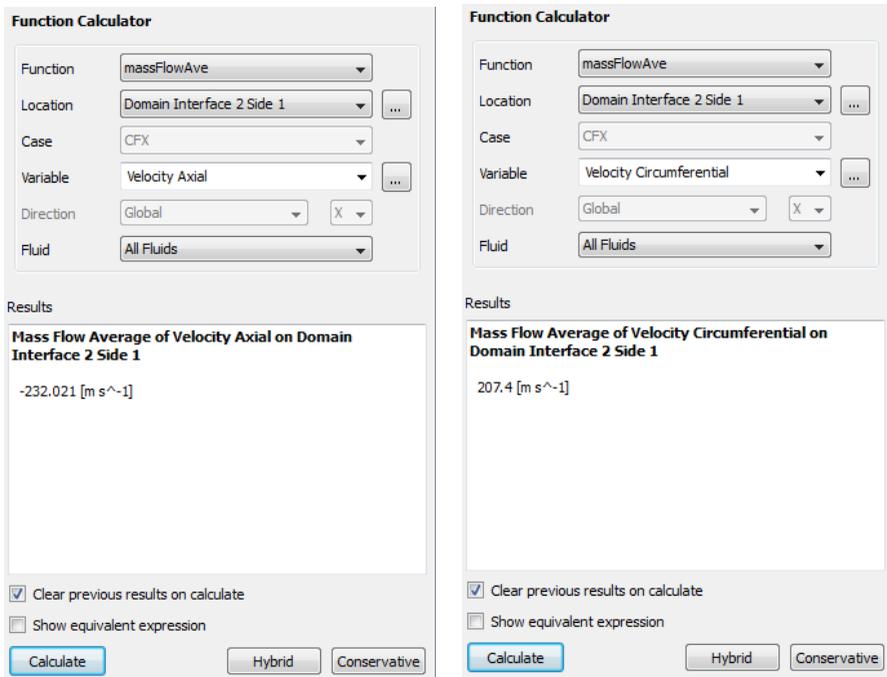


Рисунок 2.51 – Определение относительных скоростей на выходе из РК первой ступени

Шаг 58. Аналогично шагу 57 определить среднерасходную окружную (Velocity in Stn Frame Circumferential) компоненту скорости в *абсолютном* движении на выходе из РК (рисунок 2.52). На основе полученных значений скоростей вычислить среднеинтегральный угол выхода потока из РК в *абсолютном* движении:

$$\alpha_2 = \arctg \frac{w_{2a}}{c_{2u}} = \arctg \frac{232,021}{355,279} = 33,15^\circ .$$

Шаг 59. Аналогично шагу 55 определить угол потока в

абсолютном движении на выходе из СА второй ступени:

$$\alpha_1 = \arctg \frac{c_{1a}}{c_{1u}} = \arctg \frac{192,974}{324,856} \approx 30^\circ$$

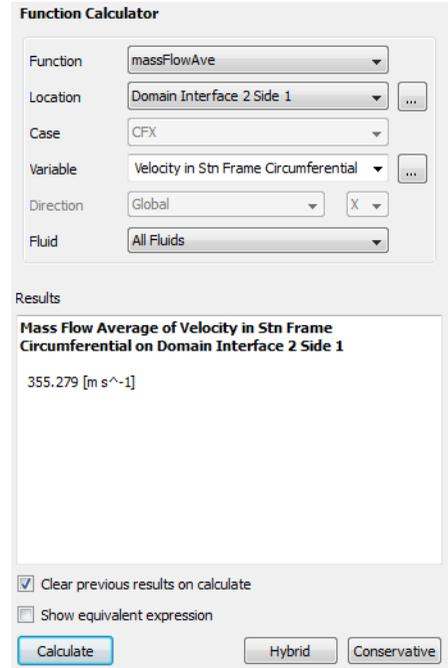


Рисунок 2.52 – Определение абсолютной окружной скорости на выходе из РК первой ступени

Следует помнить, что скорости в CFD-Post оцениваются в относительном выражении относительно той зоны, в которой они определяются. То есть, если оценивать параметр Velocity на границе, принадлежащей неподвижной зоне, то результатом будут значения скорости относительно неподвижной зоны, соответственно это будут абсолютные скорости (с). Если же оценивать параметр Velocity на границе, принадлежащей вращающему РК, то результатом будут значения скорости относительно движущейся зоны, т.е. относительные (w). Если же необходимо оценить абсолютные значения скоростей на движущихся границах, следует использовать особый параметр – Velocity in St(atio)n(ary) Frame (скорость в неподвижной системе координат).

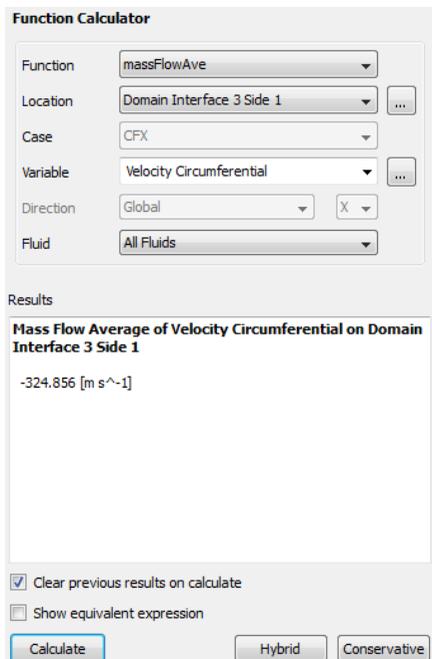
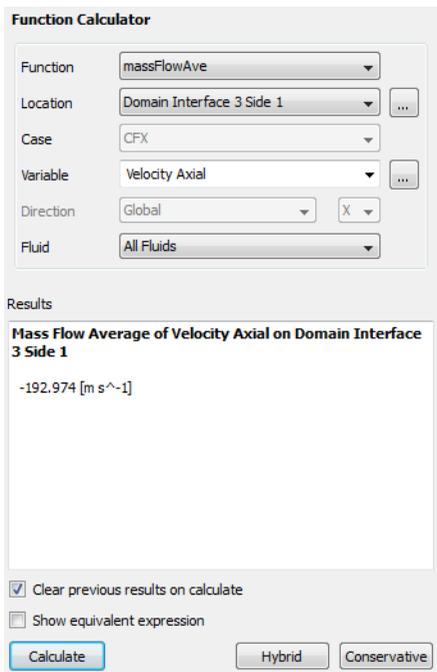


Рисунок 2.53 – Определение абсолютных скоростей на выходе из СА второй ступени

Шаг 60. Аналогично шагу 56 определить угол потока в *относительном* движении на входе в РК второй ступени:

$$\beta_1 = \arctg \frac{w_{1a}}{w_{1u}} = \arctg \frac{211,465}{469,73} = 24,24^\circ$$

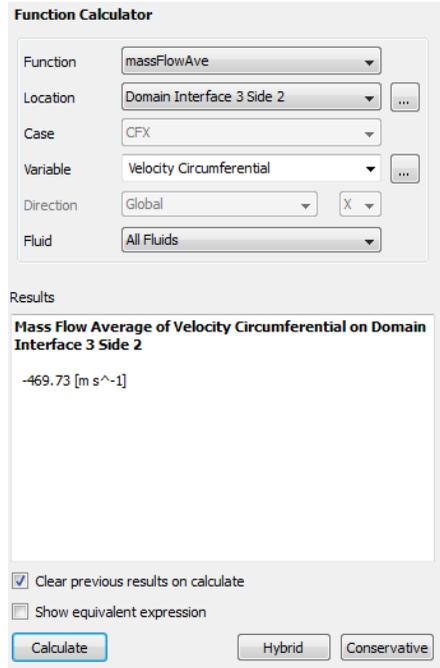
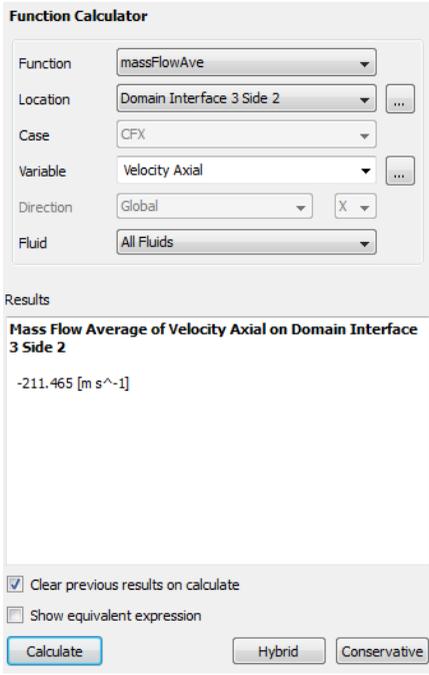


Рисунок 2.54 – Определение относительных скоростей на входе в РК второй ступени

Шаг 61. Аналогично шагу 57 определить угол потока в *относительном* движении на выходе из РК второй ступени:

$$\beta_2 = \arctg \frac{w_{2a}}{w_{2u}} = \arctg \frac{209,012}{321,475} = 33,03^\circ$$

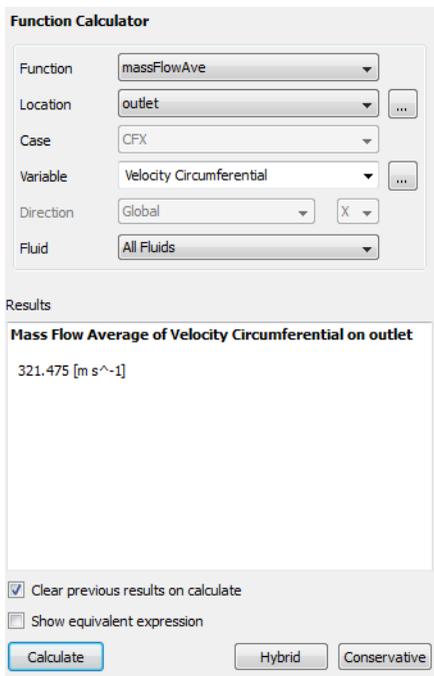


Рисунок 2.55 – Определение относительных скоростей на выходе из РК второй ступени

Шаг 62. Аналогично шагу 58 определить угол потока в *абсолютном* движении на выходе из РК второй ступени:

$$\alpha_2 = \arctg \frac{w_{2a}}{c_{2u}} = \arctg \frac{209,012}{471,912} = 23,89^\circ$$

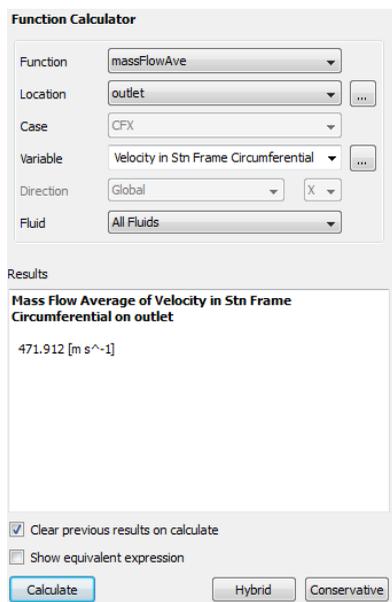


Рисунок 2.56 – Определение абсолютной окружной скорости на выходе из ПК второй ступени

Шаг 63. Проведем сравнение полученных результатов с имеющимися данными проектного расчёта турбины (рисунки 2.57...2.58).

Сравнивая результаты можно увидеть (таблица 2.3), что даже с учетом погрешностей обоих расчётов их результаты качественно не совпадают (см. α_2). Причиной этому могут быть ошибки при CFD-моделировании турбины. Так, например, частой ошибкой является задание направления вращения не в ту сторону. В случае обнаружения ошибок моделирования необходимо их устранить и заново провести расчёт с верными параметрами. При проведении реальных (не учебных) расчётов такая ситуация нередка и для устранения всех ошибок как правило приходится повторять расчёт 3-5 раз, до тех пор, пока не будет достигнуто качественное совпадение.

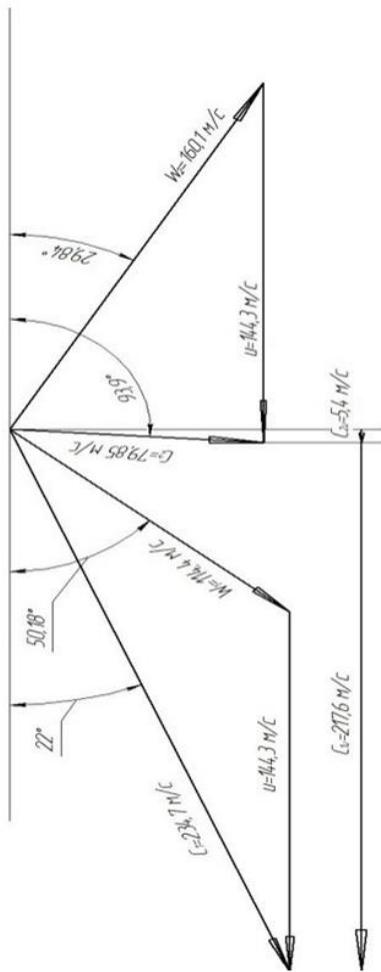


Рисунок 2.57 - План скоростей первой ступени турбины исследуемой турбины, полученный аналитическим путём

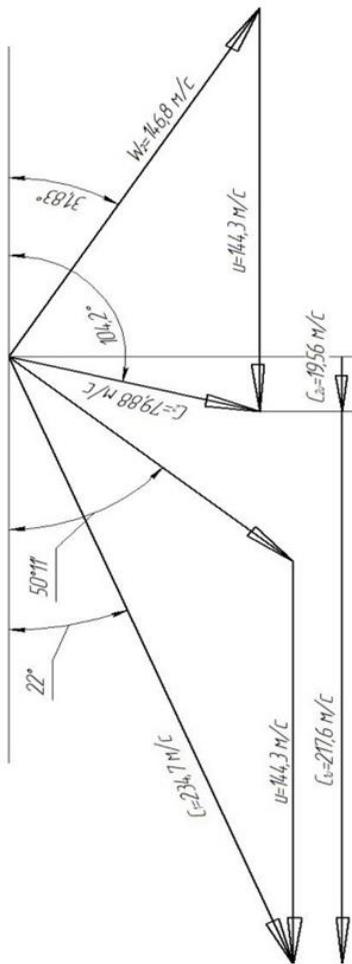


Рисунок 2.58 - План скоростей второй ступени турбины исследуемой турбины, полученный аналитическим путём

Таблица 2.3 – Сравнение проектного расчета с данными, полученными в ANSYS

| Параметр | Размерность | Проектный расчет | ANSYS |
|----------------|-------------|------------------|--------|
| \dot{m}_T | кг/с | 210,2 | 227,48 |
| Первая ступень | | | |
| α_1 | град | 20,30 | 38,57 |
| α_2 | град | 93,8 | 33,15 |
| β_1 | град | 50,18 | 24,53 |
| β_2 | град | 29,84 | 48,21 |
| p_0^* | МПа | 30,21 | 30,21 |
| p_2 | МПа | 23,89 | 24,43 |
| p_1^* | МПа | 30,05 | 30,10 |
| p_1 | МПа | 29,63 | 27,12 |
| Вторая ступень | | | |
| α_1 | град | 20,30 | 30,71 |
| α_2 | град | 104,1 | 23,89 |
| β_1 | град | 50,18 | 24,24 |
| β_2 | град | 31,84 | 33,03 |
| p_0^* | МПа | 24,31 | 29,80 |
| p_2 | МПа | 20,27 | 20,15 |
| p_1^* | МПа | 24,17 | 29,31 |
| p_1 | МПа | 23,81 | 20,72 |

Если качественное совпадение результатов достигнуто, то различия в результатах, как правило, связаны с расчётными ошибками. Их можно уменьшить несколькими способами:

1. Провести большее количество итераций для лучшего сведения расчёта, выставив больший параметр MaxIterations на завершающем этапе расчёта.

2. Увеличить качество сетки (измельчить элементы в области высоких градиентов параметров).

3. Применить более точную модель турбулентности, например SST вместо k-epsilon. Для модели SST необходимо разрешение пограничных слоёв не менее, чем 10-ю узлами сетки.

4. Более точно задать параметры рабочего тела: заменить константы выражениями или таблицами, более точно задать вязкость и теплопроводность генераторного газа, поскольку в данном расчёте использовались параметры воздуха.

Библиографический список:

1. Матвеев, В.Н. Проектный расчет осевых турбин турбонасосных агрегатов ЖРД: Учебное пособие / В.Н. Матвеев, А.В. Сулинов. – Самара: Самар. гос. аэрокосм. ун-т, 2012. - 98 с.: ил.

2. Исследование рабочего процесса в ступени осевой турбины с помощью универсального программного комплекса AnsysCFX: метод.указания /сост. О.В. Батурин, Д.А. Колмакова, В.Н. Матвеев, Г.М. Попов, Л.С. Шаблей– Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2011. - 100 с.: ил.

3. CFD-моделирование автономных осевых турбин турбонасосных агрегатов ЖРД в ANSYSCFX: метод. указания /сост. А.В. Сулинов, Л.С. Шаблей - Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2012. - 47 с.: ил.

4. CFD-моделирование шнекоцентробежных насосов турбонасосных агрегатов ЖРД в ANSYSCFX:метод. указания /сост. А.В. Сулинов, Л.С. Шаблей - Электрон.текстовые и граф. дан. (2 Мбайт). - Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2013. - 57 с.: ил.