

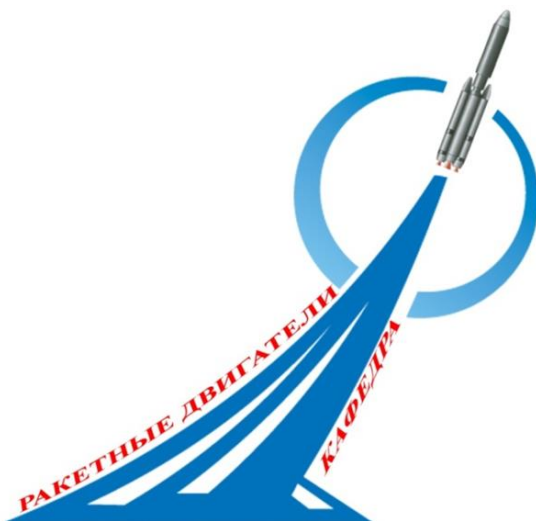
**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования  
«Воронежский государственный технический университет»

Кафедра ракетных двигателей

**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ**

для выполнения расчетов методами вычислительной гидрога-  
зодинамики при подготовке дипломного проектирования для  
студентов направления подготовки 24.05.02 «Проектирование  
авиационных и ракетных двигателей»  
очной формы обучения



Воронеж 2019

УДК 681.3:532.5 (07)  
ББК 32.97:22.25я7

**Составители:** канд. физ.-мат. наук А. А. Афанасьев,  
канд. техн. наук К. В. Кружаев

Методические указания для выполнения расчетов методами вычислительной гидрогазодинамики при подготовке дипломного проектирования для студентов специальности 24.05.02 «Проектирование авиационных и ракетных двигателей» очной формы обучения / ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»; сост. А. А. Афанасьев, К. В. Кружаев. Воронеж: Изд-во ВГТУ, 2019. 40 с.

В методических указаниях представлены основные понятия и возможные действия, используемые при проведении компьютерного эксперимента с помощью пакета программ инженерного и научного анализа ANSYS. Предназначены для студентов шестого курса, обучающихся по специальности 24.05.02 «Проектирование авиационных и ракетных двигателей» очной формы обучения.

Методические указания подготовлены в электронном виде и содержатся в файле DIPLOMANSYS.pdf.

Ил. 36. Библиограф.: 19 назв.

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. Ю. В. Демьяненко

*Издается по решению учебно-методического совета  
Воронежского государственного технического университета*

## **ВВЕДЕНИЕ**

Настоящее учебно-методическое пособие посвящено развитию практических навыков работы с пакетом программ ANSYS CFX 19 при решении задач механики жидкости и газа [2, 5-9, 11, 13, 14].

В качестве учебной задачи выбрана задача о вращающемся диске с постоянной скоростью в замкнутой цилиндрической полости, являющаяся базовой задачей при исследовании течения в турбонасосных агрегатах.

В приложении представлены примеры индивидуальных задач, которые могут выполнить студенты при проведении дипломного проектирования.

Материал рассчитан для студентов шестого курса, обучающихся по специальности 24.05.02 «Проектирование авиационных и ракетных двигателей», специализация «Проектирование жидкостных ракетных двигателей». При этом он может представлять интерес для инженерно-технических специалистов, сталкивающихся в своей работе с методами вычислительной гидрогазодинамики с применением современных программных продуктов.

## 1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ПАКЕТЕ ПРОГРАММ ANSYS

В настоящее время платформу пакета ANSYS Workbench образуют следующие основные составные части [19]:

- **ANSYS SpaceClaim Direct Modeler.**
- **ANSYS DesignModeler..**
- **ANSYS Meshing.**
- **ANSYS DesignXplorer.**

В данном пособии в качестве предметной области выбрана механика жидкости и газа, вычислительный эксперимент для которой выполняется с помощью программы гидродинамического анализа (CFD – вычислительная гидродинамика [13]). Рассматривается задача вычислительной гидродинамики, связанная с проектированием турбомашин.

Уделяется внимание наиболее рациональным приемам технологии компьютерного эксперимента – генерации и управлению качеством создаваемой сетки для области решения, использованию встроенной базы данных теплофизических свойств рабочих тел и материалов, заданию параметров турбулентного режима течения, граничных условий, определению численных параметров алгоритма вычислений, выбору выходных параметров, контролю за сходимостью вычислительного процесса, способам визуализации результатов вычислений.

В компьютерном эксперименте принято выделять следующие этапы:

1. Описание функционирования реального объекта на основании имеющихся сведений о его свойствах, одни из которых характеризуют его состояние, а другие поведение. Эти сведения позволяют сформулировать задание на исследование.

2. Концептуальное моделирование, в ходе которого определяются основные и второстепенные факторы, учет которых позволяет построить иерархическую совокупность физических или концептуальных моделей.

3. Построение и исследование математических моделей, представляющих собой совокупность некоторых уравнений (как правило, дифференциальных) и некоторая совокупность условий однозначности решений (начальные и граничные условия). В ходе исследования определяется наиболее вероятный режим течения и соответствующая математическая модель для ламинарного или турбулентного потоков рабочего тела.

4. Построение геометрической модели – области пространства, в которой будет искомое численное решение математической задачи.

5. Дискретизация области решения задачи, уравнений, представляющих собой математическую модель, и соответствующих условий однозначности их решения, с помощью одного из способов – конечных разностей, конечных элементов, контрольных объемов и т.п.

6. Выбор метода и проведение вычислений с помощью какого-либо выбранного или разработанного алгоритма.

7. Визуализация результатов вычислений, то есть представление их в виде, удобном для изучения поведения реального объекта на всем множестве допустимых значений параметров модели.

8. Анализ полученных результатов и формулировка выводов, раскрывающих основные закономерности и особенности поведения реального объекта исследования.

В методических указаниях представлен минимум необходимых сведений для приобретения первичных практических навыков эксплуатации пакета ANSYS 19. Для более глубокого изучения функциональных возможностей программы следует обратиться к фирменным техническим руководствам.

Традиционное деление процесса инженерного анализа с использованием программного обеспечения ANSYS может быть разделено на три основных этапа: препроцессинг, решение и постпроцессинг.

Назначение *препроцессора* – это импорт расчетной сетки и постановка задачи: задание типа течения, начальных и

граничных условий, критериев сходимости и шага интегрирования по времени.

Блок *решателя (Solver)* осуществляет численное решение поставленной задачи и осуществляет контроль за ходом вычислений. Возможность распараллеливания процесса решения задачи на несколько расчетных узлов с общей или распределенной памятью (многопроцессорная рабочая станция или кластер) позволяет уменьшить время решения задачи, с одной стороны, а с другой стороны, увеличить ее размерность.

*Постпроцессор* позволяет проводить качественную и количественную оценку результатов вычислений.

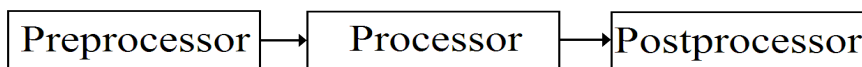


Рис. 1. Традиционная схема пакетов программ «тяжелого класса»

## 2. ВРАЩЕНИЕ ДИСКА В ЗАМКНУТОЙ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ОБЛАСТИ, ЗАПОЛНЕННОЙ ВЯЗКОЙ ЖИДКОСТЬЮ

В данном разделе будет рассмотрено вращательное движение диска в узком кожухе, заполненном жидкостью. Эта задача может считаться базовой моделью для многих процессов, происходящих в различного рода турбомашинах [3,10].

Для данной задачи получено большое число опытных результатов, численных решений и полуэмпирических формул для определения кинематических и динамических распределенных характеристик и расчета интегральных величин. Целью данной работы является развитие практических навыков постановки и решения задач гидродинамики для систем с одним или несколькими вращающимися дисками с помощью пакета программ инженерного анализа ANSYS. Полученные результаты компьютерного эксперимента сопоставляются с классическими данными изучения этой задачи, представленными в работах [4, 16, 18].



Рис. 2. Турбонасосные агрегаты жидкостных ракетных двигателей РД 0146 и РД 0124

**Задание для исследования.** Выполнить математическое моделирование течения жидкости, возникающего в замкнутой цилиндрической полости за счёт вращения в ней тонкого диска с известной угловой скоростью. Установить основные закономерности и особенности течения вязкой несжимаемой жидкости в кожухе с вращающимся диском диаметром 100 мм, если скорость вращения диска изменяется в диапазон от 20000 до 30000 об/мин, а зазор между диском и основаниями цилиндрической полости варьируется в диапазоне от 5 до 15 мм. Построить векторное поле скоростей и распределение давления. Вычислить момент сил трения диска и сравнить его величину с известными экспериментальными данными [4].

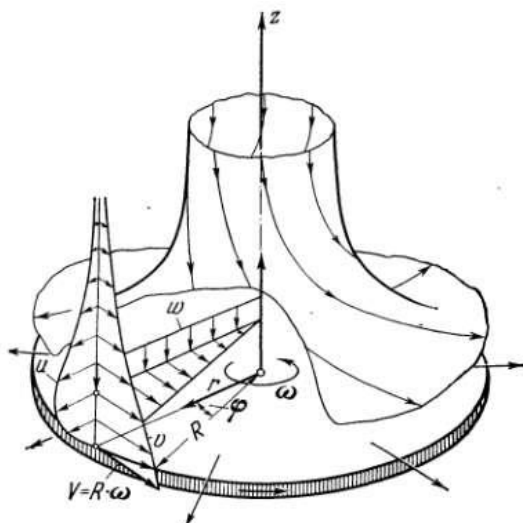


Рис. 3. Схема течения жидкости вблизи диска, вращающегося в достаточно большом объеме покоящейся жидкости

## 2.1. Подготовка расчетной модели

Прежде всего, определяются основные геометрические факторы: форма области течения, её размеры (геометрические параметры), размеры диска (диаметр и толщина).

Зазоры между вращающимся диском и стенками области, в которой происходит вращение диска, определяются на основании заданных размеров области и диска.

После этого определяются теплофизические свойства рабочего тела, заполняющего область течения: плотность и вязкость (динамический коэффициент вязкости). В случае необходимости учета эффектов неизотермичности течения должны быть заданы также некоторые дополнительные свойства рабочего тела и, возможно, материалов, из которых изготовлены полость и вращающийся диск.

Выбор такого свойства среды, как сжимаемость, определяется сопоставлением возможной скорости движения жидко-

сти и скоростью звука в рабочем теле при соответствующих термодинамических условия.

Режим движения рабочего тела определяется характерным значением вращательного числа Рейнольдса [4, 16]:

$$\text{Re} = r_1^2 \frac{\omega}{\nu}. \quad (1)$$

Если оно не превосходит критического значения  $\text{Re}$ , то течение рабочего тела носит ламинарный характер. В противном случае имеет место турбулентный режим.

Для последующей оценки задаем диапазоны основных варьируемых величин и значения параметров исследуемой системы, изменение которых в рамках проводимого компьютерного моделирования не потребует. Вычисляем характерные значения числа вращательного числа Рейнольдса, выбрав в качестве рабочей среды жидкий кислород. В указанном диапазоне частоты вращения, при сравнении с величиной известного критического числа [4] определяем режим течения как турбулентный.

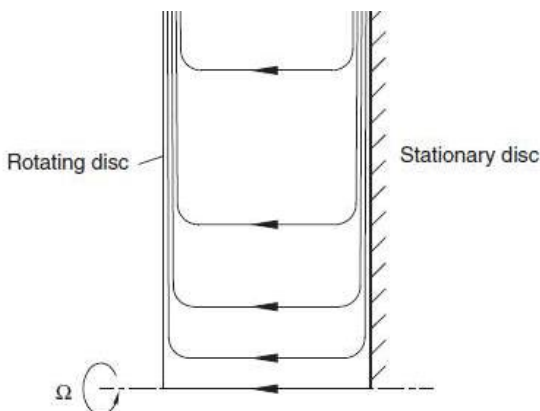


Рис. 4. Схема течения, вызванного вращением диска в замкнутой цилиндрической полости (в меридиональной плоскости)

Построение математической модели связано с выбором модели турбулентности. Только после этого можно писать какие-либо уравнения.

Сформулируем математическую модель. Рассмотрим диск радиуса  $r_1$ , вращающийся в кожухе радиуса  $r_2$ , с угловой скоростью  $\omega$ . Диск имеет конечную толщину  $b$ . Зазор между корпусом и диском равен  $s$ . Уравнения динамики стационарного турбулентного потока, пренебрегая действием массовых сил, в операторной форме запишутся в виде [12, 17]:

$$\nabla \cdot \bar{v} = 0; \quad (2)$$

$$\rho \nabla \cdot (\bar{v} \bar{v}) = \nabla \cdot P; \quad (3)$$

$$P = -\bar{p}I + 2\mu\bar{S} + \Pi; \quad (4)$$

$$\Pi = 2\mu_t\bar{S}; \quad (5)$$

$$\mu_t = C_\mu \frac{\rho k^2}{\varepsilon}; \quad (6)$$

$$\rho \nabla \cdot (\bar{v} k) = \nabla \cdot \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \nabla k \right) + G - \rho \varepsilon; \quad (7)$$

$$\rho \nabla \cdot (\bar{v} \varepsilon) = \nabla \cdot \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \nabla \varepsilon \right) + \frac{\varepsilon}{k} (C_1 G - C_2 \rho \varepsilon); \quad (8)$$

$$G = 2\mu_t \bar{S} \cdot (\nabla \bar{v}). \quad (9)$$

Здесь  $\rho$  – плотность рабочего тела;  $\bar{v} = (\bar{v}_r, \bar{v}_\theta, \bar{v}_z)$  – вектор осредненной по времени скорости течения;  $P$  – тензор полного напряжения;  $\bar{S}$  – тензор скоростей деформаций;  $\bar{p}$  –

осредненное давление;  $\mu$  – коэффициент «молекулярной вязкости» турбулизованной среды;  $\mu_t$  – коэффициент турбулентной вязкости;  $I$  – единичный тензор;  $\Pi$  – дополнительный тензор турбулентных напряжений;  $k$  – приведенная к единице массы кинетическая энергия пульсационного движения;  $\varepsilon$  – скорость диссипации турбулентной пульсационной кинетической энергии;  $G$  – диссипативная функция турбулентного потока;  $C_\mu = 0,09$ ;  $\sigma_k = 1,0$ ;  $\sigma_\varepsilon = 1,3$ ;  $C_1 = 1,44$ ;  $C_2 = 1,92$  эмпирические константы модели.

Положим дополнительно, что течение будет удовлетворять условиям:

- Стационарность;
- Осесимметричность течения;
- Несжимаемость, то есть постоянство плотности;
- Отсутствие массовых сил.

Граничные условия сформулируем следующим образом:

- Условие прилипания на вращающемся диске – компонента скорости  $v_\theta$  на всех поверхностях диска зависит от радиуса и равна  $\omega r$ , а две другие равны нулю;
- Условие прилипания на всех поверхностях корпуса – все компоненты вектора скорости равны нулю;
- Давление на оси вращения полагаем равным  $p_0$ .

Рекомендуется проводить серию расчетов в диапазоне угловых скоростей вращения и осевых зазоров между корпусом и диском.

Одним из интересующих параметров при моделировании являются потери на трение. Потери на трение диска о жидкость вызваны тем, что частицы окружающей жидкости под влиянием трения о поверхность диска приобретают вращательное движение. При этом они отбрасываются к периферии и замещаются другими частицами: в меридиональном сечении возникает циркуляционное движение между диском и корпусом. У поверхности диска частицы движутся к пе-

риферии, а у поверхности кожуха к центру на создание этого движения и вращательного затрачивается энергия диска.

Число Рейнольдса будем вычислять по формуле (1). Определяя возможный диапазон изменения характерного значения вращательного числа Рейнольдса, устанавливаем, что он соответствует интервалу изменения его значений от  $1.17 \cdot 10^6$  до  $3.52 \cdot 10^6$ , что указывает на развитое турбулентное течение.

## 2.2. Построение области решения задачи

Предварительно создаем папку, в которой будут храниться все файлы, относящиеся к данной задаче. Путь к папке должен содержать только латинские буквы и/или цифры.

1. Геометрическую модель для решения поставленной задачи создадим в пакете CAD SpaceClaim. Создаем новый элемент в проекте Workbench – Fluid Flow CFX. Далее необходимо двойным щелчком ЛКМ перейти в раздел геометрия (либо ПКМ и выбрать New Geometry in Space Claim) (рис. 5).

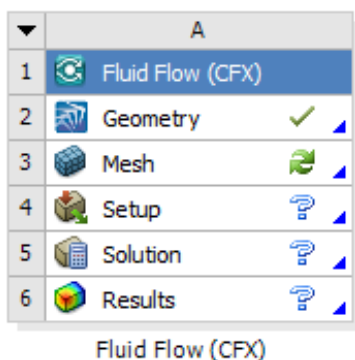


Рис. 5. Новый элемент в проекте Workbench – Fluid Flow CFX

2. Выбираем плоскость в которой будет строиться эскиз и на ней изображаем эскиз области решения поставленной

нами задачи (в меридиональной плоскости). Для этого используется инструмент Line раздела Sketch (рис. 6).

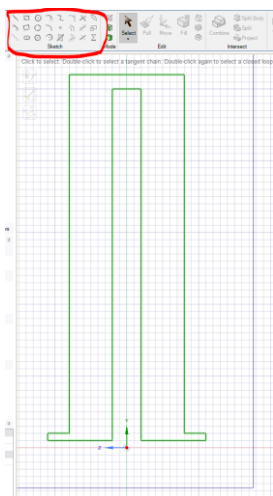


Рис. 6. Эскиз задачи

3. Размеры при ассоциативном построении геометрии задаются интерактивно с помощью сетки и последовательного выбора отдельных линий эскиза. В данном случае показан диск толщиной 4 мм, диаметром 100 мм, с осевым зазором между диском и корпусом 6 мм, и радиальным зазором 2 мм (рис. 7).

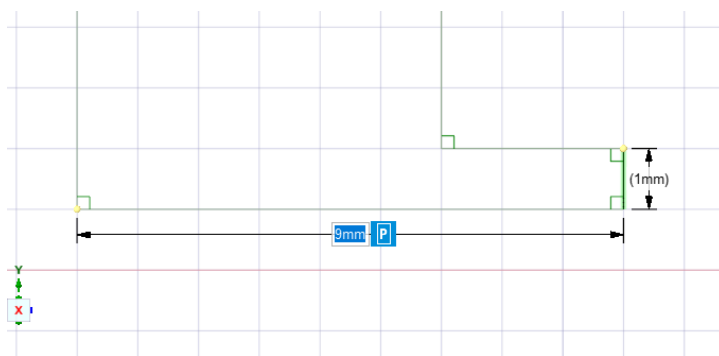


Рис. 7. Построение размеров на примере диска

4. Далее, выбрав инструмент Pull – вытягиваем твердое тело в окружном направлении относительно оси Z. Строится 1/10 от полной модели, то есть сектор  $36^\circ$  (рис. 8).

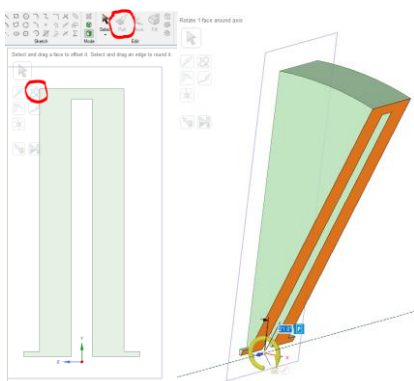


Рис. 8. Вытягивание модели

5. Итогом проведенных действий должна являться объемная модель, представленная на рис. 9. Преимуществом такого метода построения является отсутствие промежуточных форматов CAD-геометрии и возможность «горячего» изменения размеров, что значительно сократит время построения. С помощью инструмент Pull соответственно можно перестроить грань для получения желаемого осевого зазора между диском и корпусом.

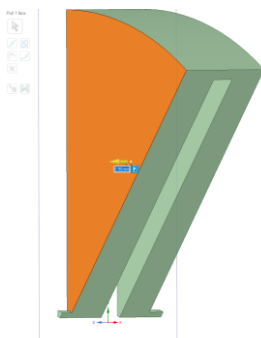


Рис. 9. Полученная объемная модель

## 2.3. Генерация сетки

1. Далее необходимо закрыть SpaceClaim, вернуться в проект Workbench и запустить элемент проекта Mesh. В главном окне программы отображается построенная геометрия. Слева от области работы с геометрией находится дерево проекта (рис. 10).

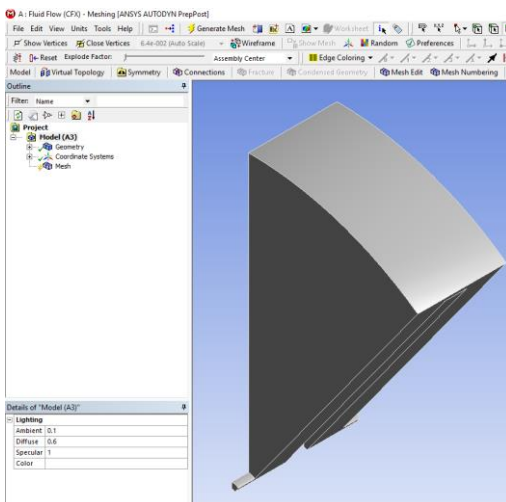


Рис. 10. Открытое окно с построенной геометрией

2. Щелкнув в дереве проекта на ветку Mesh, редактируем параметры создаваемой сеточной модели в соответствии с данными, приведенными на рис. 11. Размер элемента сетки как на стенке Max Face Size, так и внутри тела Max Tet Size задаем равным 0,5 мм.

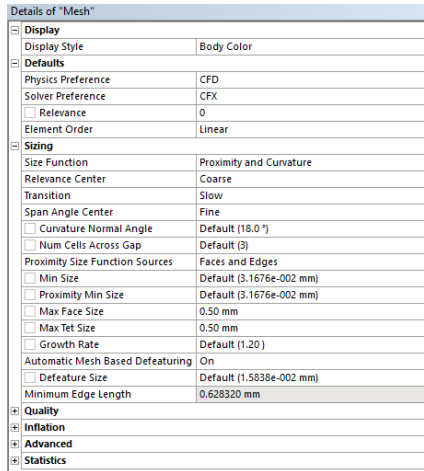


Рис. 11. Данные окна

3. Для геометрии в которой сечения вдоль некоторого направления топологически идентичны рекомендуется при построении сетки применять метод Sweep. Данный метод позволяет построить поверхностную сетку и «клонировать» ее вдоль направления. Для добавления данного метода щелчком ПКМ по ветке Mesh выбирается опция Method (рис. 12).

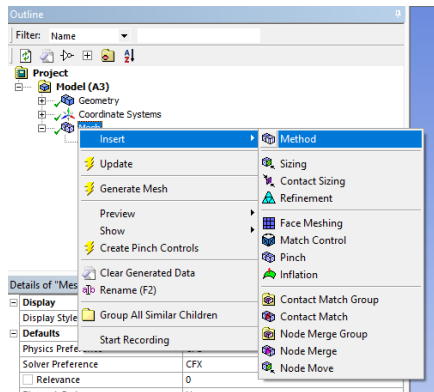


Рис. 12. Добавление метода щелчком ПКМ по ветке Mesh

4. Проводится настройка указанного метода. Выбираются грани «Источник/Source» и «Цель/Target», соответствую-

ющие циклически периодическим граням. Также задается количество разбиений равное 30 (рис. 13).

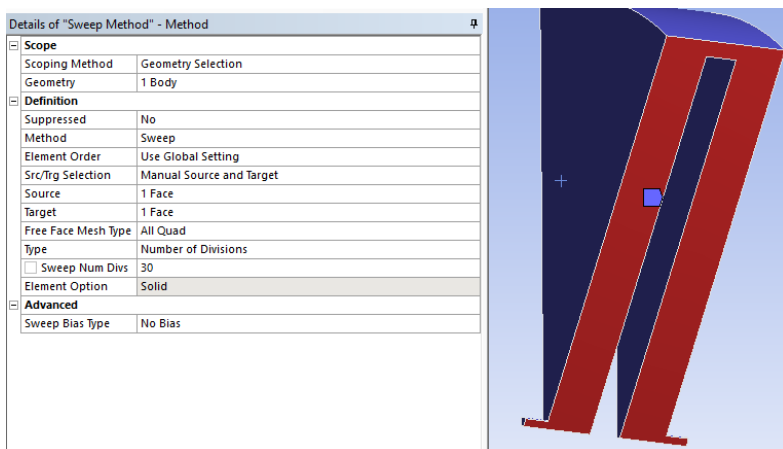


Рис. 13. Настройка метода

5. Далее для корректного решения течения в пограничном слое необходимо построить слои призматических элементов на стенках расчетной области. Щелчком ПКМ по Sweep Method в дереве вызывается меню, в котором выбирается опция Inflation this method (рис. 14).

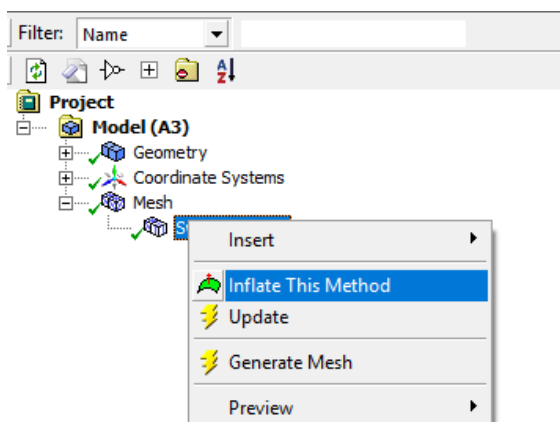


Рис. 14. Выбор опции Inflation this method

6. После выбора данной опции автоматически выбирается грань, заданная в качестве «Источник/Source». В качестве границ «Boundary» выбираются стенки корпуса и диска. Вводятся значения отвечающие за настройку толщины и количества призматических слоев. При выполнении самостоятельных работ всегда рекомендуется оценивать влияние размера элементов сетки и параметров призматического слоя на получаемые результаты решения.

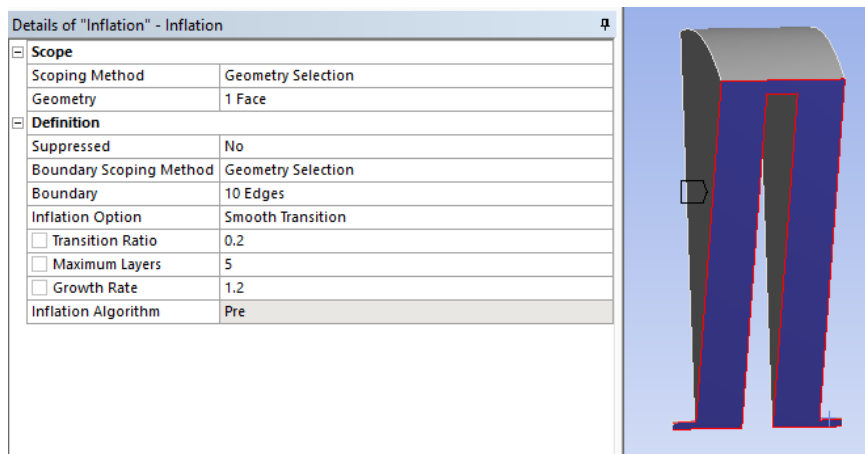


Рис. 15. Выбор грани

7. Щелчком ПКМ по Mesh в дереве вызывается меню, в котором выбирается опция Generate Mesh. В течение некоторого промежутка времени происходит процесс генерации сетки. В зависимости от сложности геометрии и размера элемента на разных задачах данный процесс может занимать от нескольких минут (как в рассматриваемом случае) до нескольких часов (рис. 16). В ветке Mesh в разделе Statistics можно посмотреть количество узлов и элементов в сетке. При указанных настройках получено количество узлов ~170 тыс. и количество элементов ~156 тыс.

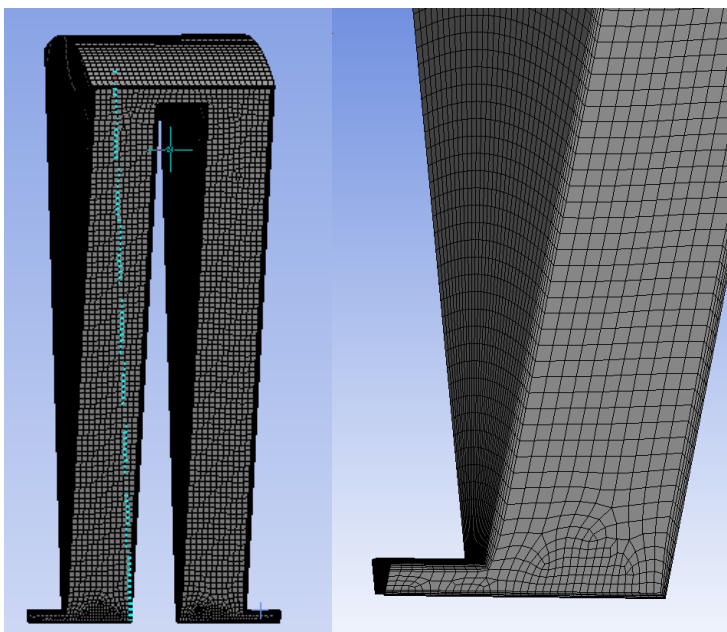


Рис. 16. Генерация сетки на объекте

8. Финальным шагом при построении сетки является создание именованных групп поверхностей, которые будут использоваться при задании граничных условий в препроцессоре. Нажатием сочетания клавиш **Ctrl+F** осуществляется переход в области работы с геометрией к выбору геометрии. С помощью удерживания клавиши **Ctrl** можно выбрать группу поверхностей последовательно щелкнув по ним ЛКМ. После выбора требуемых поверхностей необходимо нажать «горячую» клавишу **N** которая вызовет меню ввода имени для выбранных поверхностей (рис. 17). После завершения указанных процедур в дереве построения появится новая ветки под названием **Named Selections**.

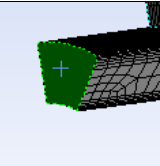
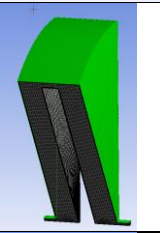
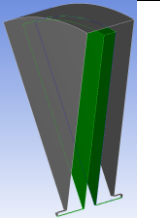
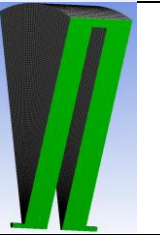
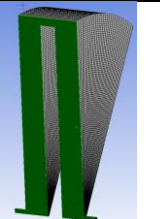
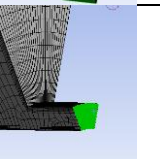
Inlet			
Stator			
Rotor			
Periodic_1			
Periodic_2			
Outlet			

Рис. 17. Группы поверхностей

9. Завершив работу с именовани­ем по­верх­но­стей сле­ду­ет вый­ти из про­грам­мы и про­из­ве­сти за­груз­ку с­ге­не­ри­ро­ван­ной сет­ки в пре­про­цес­сор. Для это­го в Workbench необ­хо­ди­мо щелч­ком ПКМ вы­звать кон­текст­ное ме­ню (рис. 18).

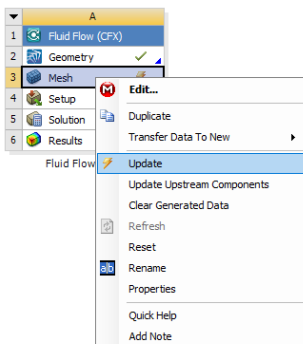


Рис. 18. Контекст­ное ме­ню

## 2.4. За­да­ние гранич­ных ус­ло­вий

1. Об­ра­ща­ем­ся к пре­про­цес­со­ру, вы­би­ра­ем пункт Setup (рис. 19).

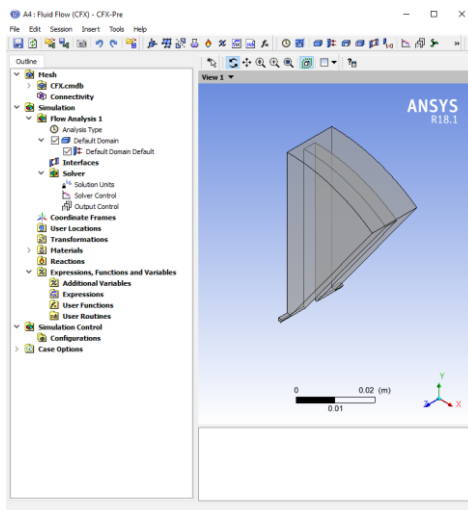


Рис. 19. Пункт Setup

2. Щелкаем ПКМ по Default Domain→Insert→Boundary. Назовем граничное условие Stator. На вкладке Basic Settings выбираем тип граничного условия Wall и задаем его для внешних стенок корпуса. На вкладке Boundary Details всё остается по умолчанию.

3. Далее задается граничное условие для вращающегося диска. Аналогично пункту 2 создаем граничное условие Rotor, но выбираем стенки диска. На вкладке Boundary Details необходимо задать условие вращения диска. Выбираем опцию Wall Velocity с активированной опцией Rotating Wall и задаем угловую скорость 25000 rev/min, обязательно корректно указав ось вращения. Текущая система координат отображается в окне, показывающем трехмерное представление математической модели (рис. 20).

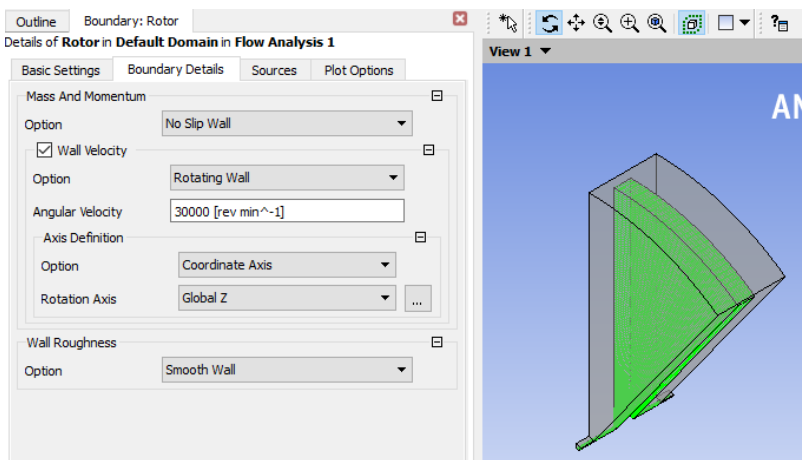


Рис. 20. Трехмерное представление математической модели

4. Необходимо задать граничное условие на входе. Несмотря на то, что в данном варианте рассматривается течение в полости без учета транзитного расхода, то есть суммарный расход жидкости на граничном условии входа будет равен нулю и необходимость создания условия входа связана с инициализацией давления у корня диска. Создается граничное усло-

вие области Inlet типа Opening (опция допускает течение через стенку в обоих направлениях) (рис. 21).

На вкладке Boundary Details выбирается опция Opening pressure and direction, с помощью которой будет задано давление у корня диска величиной 1 бар (рис. 22).

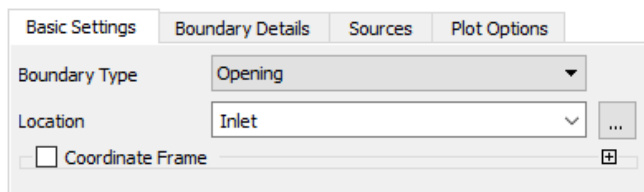


Рис. 21. Граничное условие области Inlet типа Opening

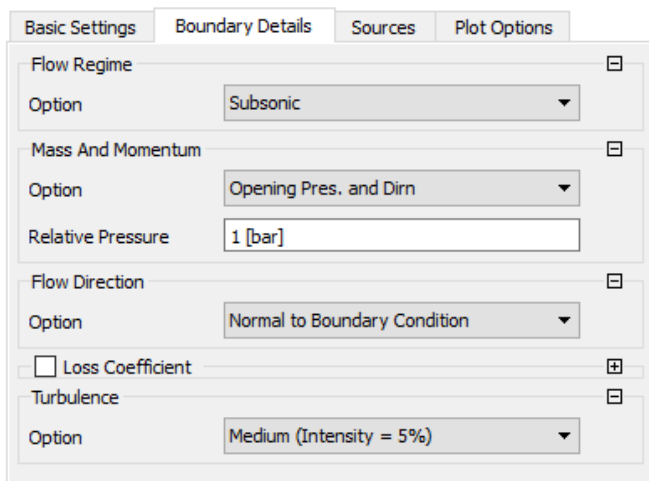


Рис. 22 – Во вкладке Boundary Details выбор опции Opening pressure and direction

5. Граничное условие на области Outlet в данной постановке следует задать как неподвижную стенку области Stator. При самостоятельной работе рекомендуется заменить граничное условие на «Outlet-Выход» задать на нем массовый расход Mass flow rate и исследовать влияние транзитного расхода на параметры потока в полости.

6. Необходимо создать циклический интерфейс, соединяющий области Periodic\_1 и Periodic\_2. В настройках интерфейса задается тип интерфейса Rotational Periodicity и ось относительно которой в созданной модели наблюдается циклическая симметрия (рис. 23).

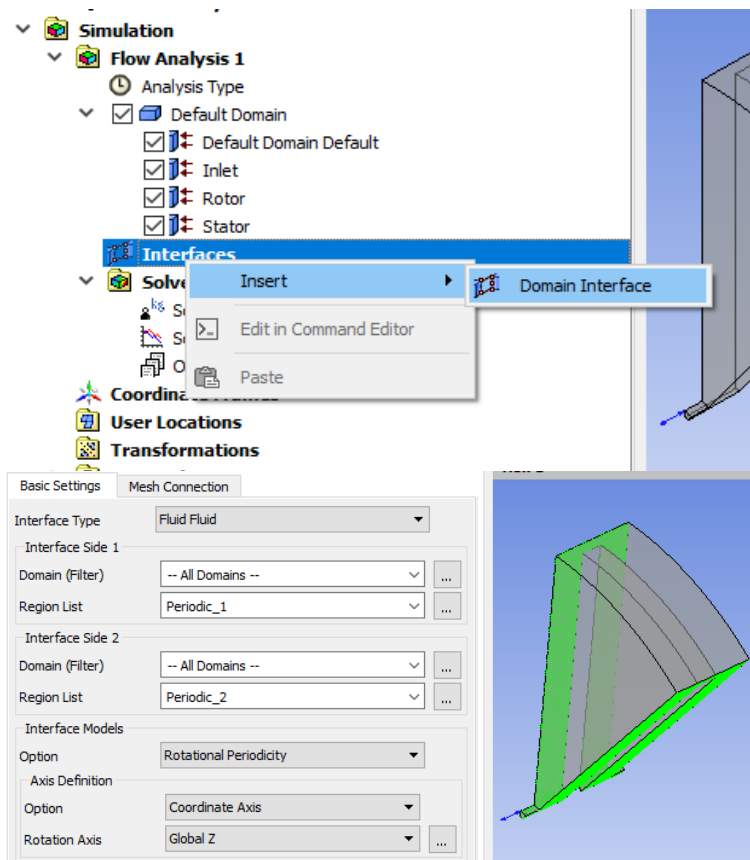


Рис. 23. Создание циклического интерфейса, соединяющий области Periodic\_1 и Periodic\_2

7. По результатам проделанных операций модель и дерево проектирования должны принять следующий вид (рис. 24).

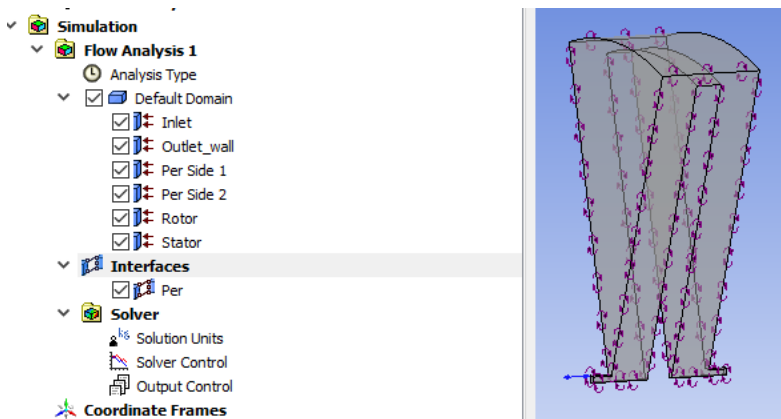


Рис. 24. Модель и дерево

## 2.5. Определение физических свойств рабочего тела

Выбираем в качестве рабочего тела жидкий кислород. Для этого воспользуемся библиотекой стандартных материалов CFX. В дереве проектирования щелчком ПКМ по ветке Materials вызывается контекстное меню импорта из библиотеки материалов. Выбираем библиотеку Liquid Phase Combustion откуда импортируем материал O2l (рис. 25). После этого он должен отобразиться в ветке Materials дерева проекта.

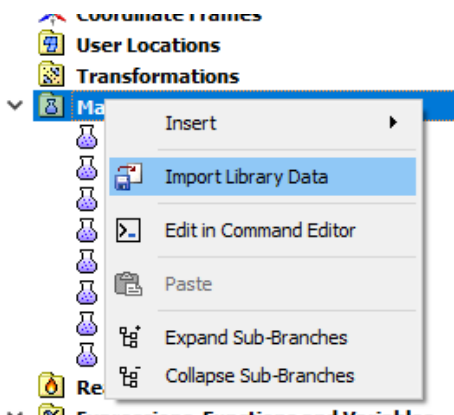


Рис. 25. Контекстное меню импорта из библиотеки материалов

Двойным щелчком ЛКМ в дереве по четному домену Default Domain открываем меню его редактирования. На вкладке Basic Settings выбираем материал O2I, для чего вызывается меню с помощью кнопки с тремя точками «Select from extended list», где во вкладке Liquid Phase Combustion выбираем требуемый материал. На вкладке Fluid Models выбираем в опции Heat transfer значение Isothermal с температурой 90 К. В опции Turbulence выбираем модель турбулентности стандартную k-ε модель (второй расчет проводим для SST-модели). Подтверждаем выбор нажатием ОК (рис. 26).

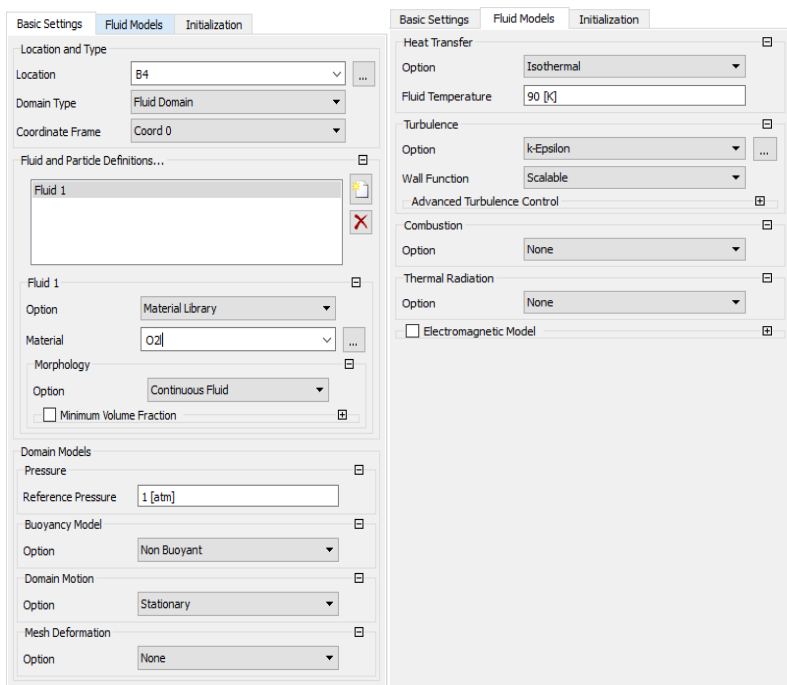


Рис. 26. Меню во вкладке Basic Settings

## 2.6. Задание параметров алгоритма вычислений

Далее переходим в дереве к разделу Solver Control дерева проекта, отвечающему за параметры решателя. Задаем ко-

личество итераций, равное 10000 и Convergence Criteria, равный  $10^{-7}$ . Кроме того так как решение задачи проводится в квазистационарной постановке необходимо дать описание временной шкалы. Для задач турбомашиностроения рекомендуется задавать временной шаг обратный по величине частоте вращения ротора.

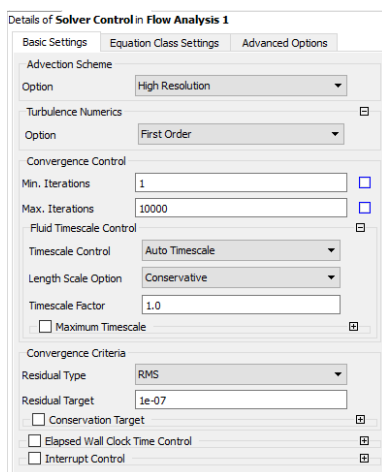


Рис. 27 Раздел Solver Control дерева проекта

Процесс сходимости решения будем оценивать по величине крутящего момента на стенках диска. Для этого в дереве проектирования щелчком ПКМ по ветке Expression создадим новое выражение для вычисления момента сил трения диска о жидкость (рис. 28).

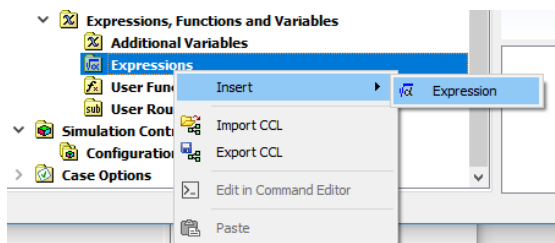


Рис. 28. Создание нового выражения для вычисления момента сил трения диска о жидкость

При формировании выражений используется стандартная форма языка CCL вида «функция(переменная)@регион». Функция для вычисления крутящего момента torque, при этом переменная в данном случае не задается. В качестве региона выбирается в ветке Physics Locators регион, отвечающий вращающемуся диску Rotor (рис. 29). При этом в данной задаче необходимо вычислить только момент относительно оси вращения и выражение примет вид torque\_z()@Rotor.

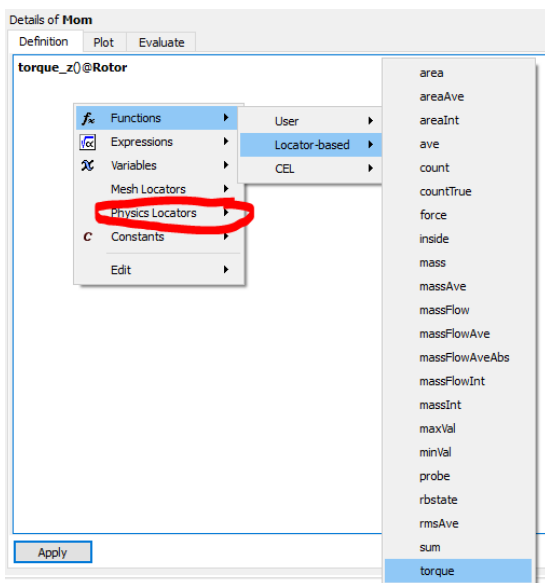


Рис. 29. Выбор в ветке Physics Locators регион

Данное выражение следует выбрать в качестве отображаемого монитора решения в разделе Output Control дерева проекта. На вкладке Monitor активируется опция Monitor Objects (рис. 30). В разделе Monitor Points and Expressions создается новое выражение, которому присваивается опция Expression и щелчком ПКМ вызывается контекстное меню, в котором выбирается ранее созданное выражение для вычисления момента сил трения диска. Подтверждаем проделанные операции нажатием ОК.

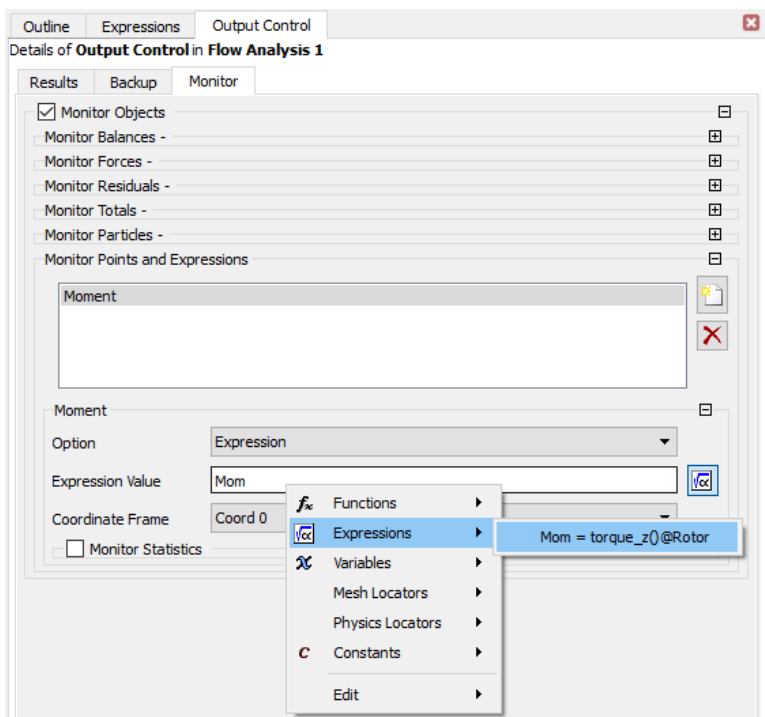


Рис. 30. Во вкладке Monitor активируется опция Monitor Objects

Выходим из препроцессора и переходим к процессу решения.

## 2.7. Решение задачи и контроль за его ходом

1. Запускаем следующий пункт проекта Workbench, называющийся Solution – Решатель. В данном окне выбирается количество ядер процессора, на которых будет проводиться решение и может быть проведена тонкая настройка решателя. В рассматриваемом случае рекомендуется изменить только количество ядер, для ускорения итерационного процесса (рис. 31).

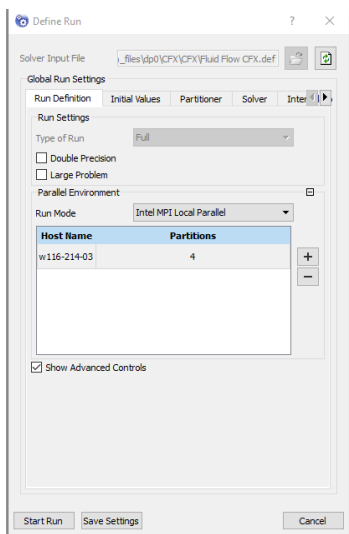


Рис. 31. Пункт Solution – Решатель

2. Скорость решения указанной задачи зависит от количества элементов сетки, настроек решателя и выбранных граничных условий. С выбранными настройками решение задачи сошлось за ~250 итераций. На рис. 32 показаны графики невязок и добавленный монитор момента сил трения. Процесс решения останавливается нажатием клавиши «Stop» на панели решателя.

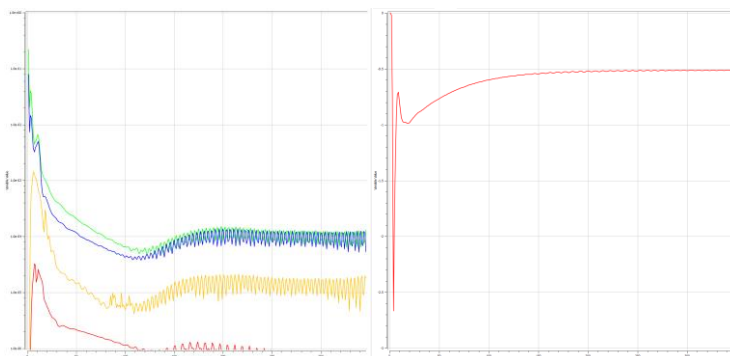


Рис. 32. Графики невязок

## 2.8. Визуализация результатов компьютерного эксперимента

1. Далее в рабочем окне Workbench следует открыть раздел проекта Results и перейти к анализу полученного решения.

2. Необходимо построить плоскость соответствующую меридиональной в данном случае YZ. Для этого используем инструмент Location→Plane (рис. 33).

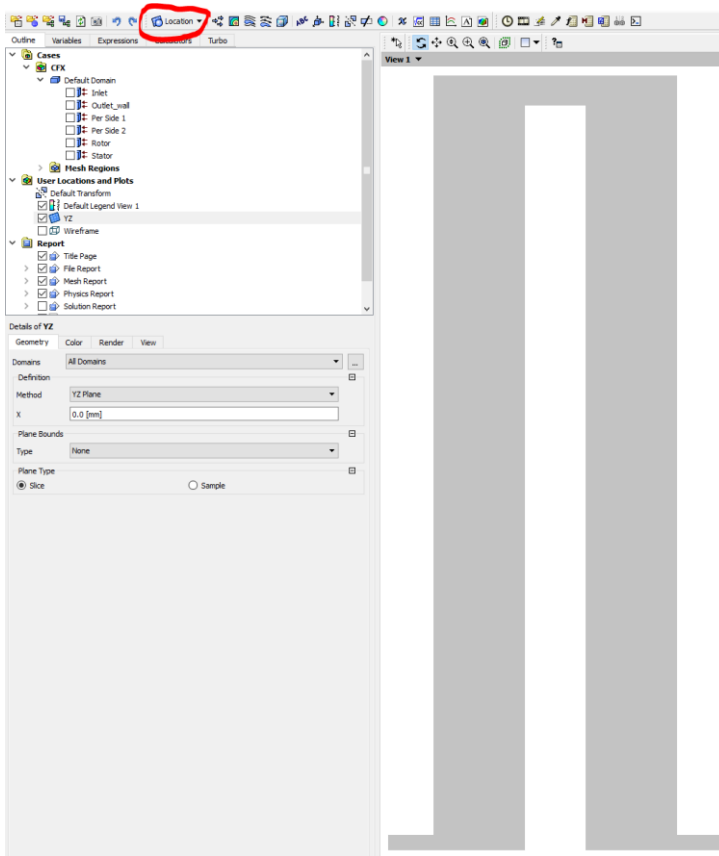


Рис. 33. Построение плоскости YZ

3. Построим распределение давления на данной плоскости. Для этого используем инструмент Contour. Зададим в качестве локации построенную плоскость и выберем в качестве переменной Pressure (рис. 34).

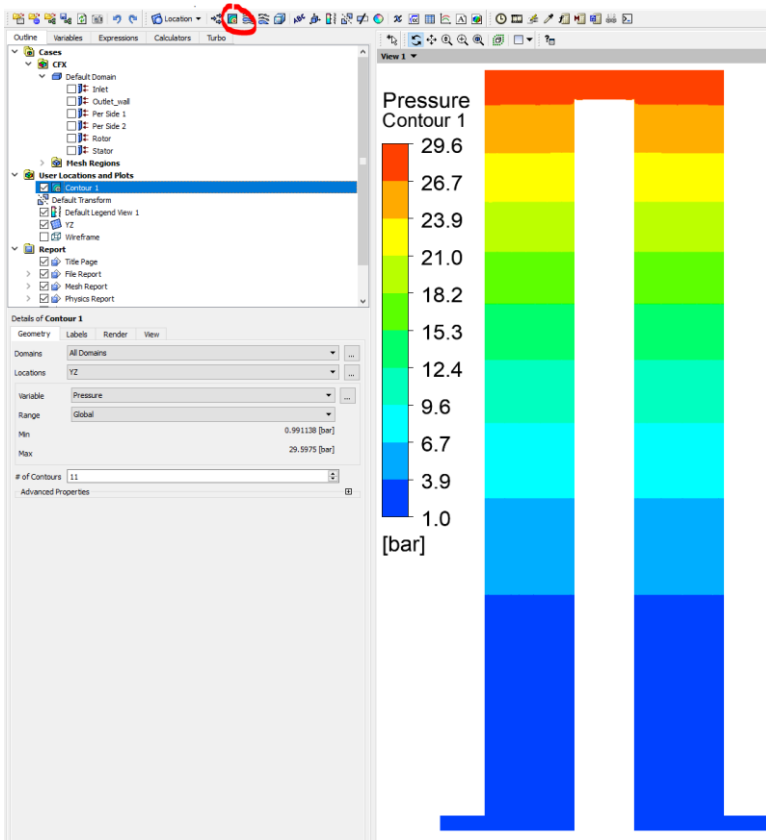


Рис. 34 – Распределение давления на плоскости

4. Как отмечалось ранее, задача осесимметричная, поэтому удобнее всего анализ результатов проводить в цилиндрической системе координат (ЦСК). Вычислим компоненты скорости в указанной системе. Для этого следует перейти на вкладку Turbo. Далее необходимо выбрать опцию Define Global Rotational Axis, где задается ось вращения диска. Затем

нажимаем кнопки Calculate Velocity Components, вызывается процедура разложения векторов скорости в декартовой системе координат в ЦСК.

5. После того как проделан шаг 4, можно переходить к построению векторного поля меридиональной скорости. Для этого выбирается построенная ранее плоскость, задается равномерное распределение векторов и их количество (например 5000), а также выбирается переменная (меридиональную скорость) (рис. 35).

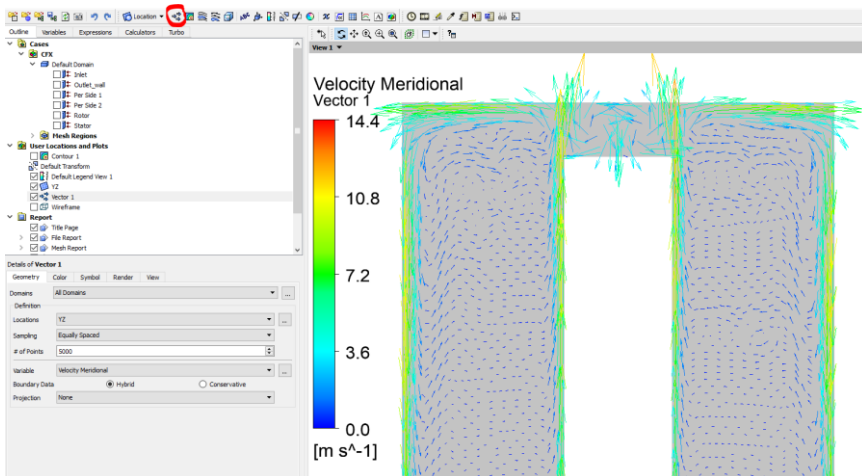


Рис. 35. Векторное поле меридиональной скорости

6. Для проверки точности полученного решения следует произвести вычисление момента сил трения диска. Перейдя на вкладку Calculators и выбрав Function Calculator, произведем указанное вычисление с использованием функцию момента Тorque на поверхности Rotor, задав в качестве оси ту, относительно которой будет вычисляться момент ось вращения. Для получения результата нажимаем кнопку Calculate. Следует отметить, что для получения суммарного момента сил трения полученную величину необходимо умножить на 10, так как в задаче рассматривается сектор в 1/10 от полной окружности. Кроме того, для сравнения с аналитической формулой необ-

ходимо вычислить момент сил трения одной боковой стороны диска. Для этого используем инструмент Location→Surface group и из выпадающего списка выберем искомую поверхность (рис. 36).

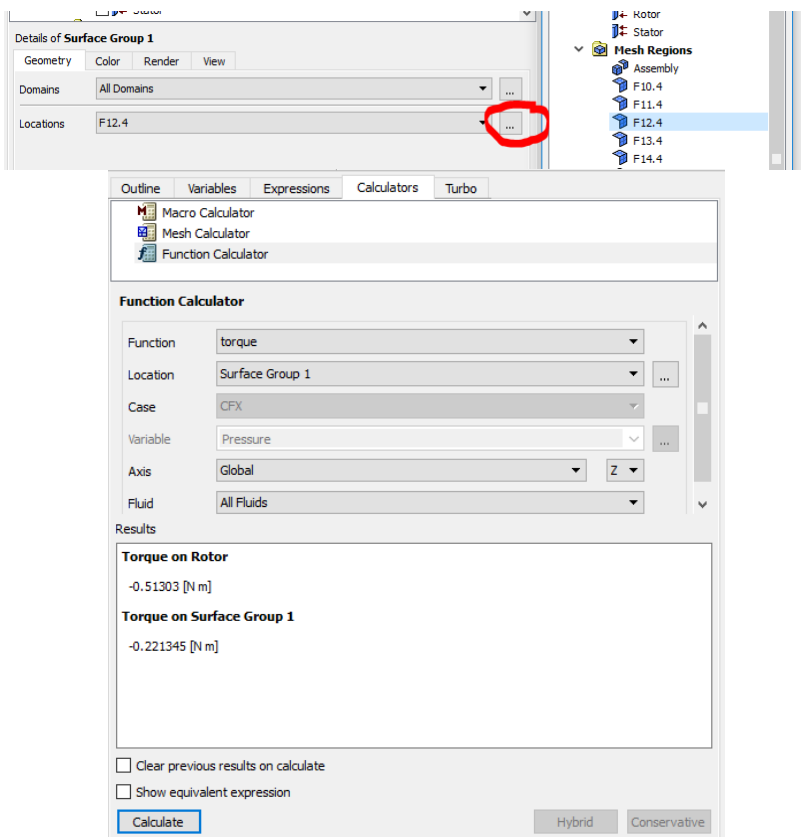


Рис. 36. Вычисление момента силы трения диска

## 2.9. Анализ результатов и выводы

Построенное распределение давления наглядно демонстрирует, то, что давление вдоль осевого зазора меняется незначительно. Этот вывод хорошо согласуется с данными при-

веденными в [4]. Максимум давления достигается на периферии диска, минимум давления достигается у вала.

Векторное поле меридиональной скорости также согласуется с классическими результатами: вдоль диска течение направлена от центра к периферии, на корпусе наоборот от периферии к центру.

Качественно результаты, полученные в ходе компьютерного эксперимента, хорошо согласуются с классическими решениями. Количественно верифицировать результаты расчета можно с помощью эмпирической интерполяционной формулы Пантелла (11) для учета влияния ширины зазора  $s$  на момент сопротивления одной стороны диска радиуса  $R$ . Формула справедлива до  $s/R=0,44$ .

$$M = \left[ \frac{0,151}{\left(\frac{s}{R}\right)^2 \text{Re}^{1,2}} + \frac{1,02 + \frac{s}{R}}{12\left(6 + \frac{s}{R}\right) \text{Re}^{0,182}} \right] \rho \omega^2 R^5 \quad (10)$$

где  $M$  – момент сил трения одной стороны диска.

Полученный в ANSYS CFX момент сил трения легко сравнить со значением, получаемым из формулы (10). Момент трения одной стороны диска вычисленный в CFX равен 2,213 Н·м; по формуле (10) 2,127 Н·м. То есть погрешность составляет менее 4%. Для уточнения решения компьютерного эксперимента в препроцессоре следует изменить модель турбулентности на модель сдвиговых напряжений Shear Stress Transport (SST) и уменьшить размер элемента в призматическом слое сетки.

### 3. Задание для самостоятельной работы

1. Провести компьютерный эксперимент согласно описанной методике в диапазоне угловых скоростей вращения

диска и в диапазоне осевых зазоров между корпусом и диском.

2. Построить графики зависимости момента сил трения, полученной в ANSYS CFX, от числа Рейнольдса. Сравнить полученные графики с формулой Пантелла (10).

3. Провести компьютерный эксперимент с моделью турбулентности SST. На основании проведенной серии компьютерных экспериментов сделать вывод о корректности или некорректности построенных математических моделях и предпочтительности выбора той или иной модели турбулентности.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Афанасьев А.А., Бондарева М.В. Коржов Е.Н. Пакеты программ инженерного и научного анализа. ANSYS: учеб. пособие [Текст] / А.А. Афанасьев, М.В. Бондарева, Е.Н. Коржов. – Воронеж: Изд-во ВГУ, 2014. – 51 с.
2. Басов К.А. ANSYS справочник пользователя: справ. пособие [Текст] / К.А. Басов – М.: ДМК Пресс, 2005. – 640 с.
3. Волков К.Н., Емельянов В.Н. Течения и теплообмен в каналах и вращающихся полостях: учеб. пособие [Текст] / К.Н. Волков, В.Н. Емельянов – М.: Физматлит, 2010. – 480 с.
4. Дорфман Л.А. Гидродинамическое сопротивление и теплопередача вращающихся тел: учеб. пособие [Текст] / Л.А. Дорфман – М.: Физматгиз, 1960. – 260 с.
5. Дрёмин В.Ф. Основы теории ANSYS CFX: учеб. пособие [Текст] / В.Ф. Дрёмин - Екатеринбург: ЗАО «КАДФЭМ-Си-Ай-Эс», 2009. – 233 с.
6. Дрёмин В.Ф. Возможности препроцессора ANSYS CFX-Pre: учеб. пособие [Текст] / В.Ф. Дрёмин - - Екатеринбург: ЗАО «КАДФЭМ-Си-Ай-Эс», 2009. – 110 с.
7. Дрёмин В.Ф. Создание сеток ANSYS CFX-Mesh: учеб. пособие [Текст] / В.Ф. Дрёмин - Екатеринбург: ЗАО «КАДФЭМ-Си-Ай-Эс», 2009. – 136 с.
8. Дрёмин В.Ф. Моделирование в ANSYS CFX: учеб. пособие [Текст] / В.Ф. Дрёмин - Екатеринбург: ЗАО «КАДФЭМ-Си-Ай-Эс», 2009. – 114 с.
9. Дрёмин В.Ф. Оптимизация ANSYS: учеб. пособие [Текст] / В.Ф. Дрёмин - Екатеринбург: ЗАО «КАДФЭМ-Си-Ай-Эс», 2011. – 180 с.
10. Иванов А.В., Белоусов А.И., Дмитренко А.И. Турбонасосные агрегаты кислородно-водородных ЖРД: метод. указания [Текст] / А.В. Иванов, А.И. Белоусов, А.И. Дмитренко – Воронеж: Изд-во ВГТУ, 2011. – 283 с.

11. Каплун А.Б., Морозов Е.М., Олферьев М.А. ANSYS в руках инженера: практическое руководство [Текст] /. А.Б. Каплун, Е.М. Морозов, М.А. Олферьев – М.: Эдиториал УРСС, 2004. – 272 с.

12. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа: учеб. пособие [Текст] /.Л.Г. Лойцянский – М.: Дрофа, 2003. – 840 с.

13. Морозов И.И., Ляскин А.С. Введение в численные методы вычислительной гидродинамики: учеб. пособие [Текст] /.И.И. Морозов, А.С. Ляскин – Самара: Изд-во СГАУ, 2010. – 60 с.

14. Чигарев А.В., Кравчук А.С., Смалюк А.Ф. ANSYS для инженеров: справочное пособие [Текст] /.А.В. Чигарев, А.С. Кравчук, А.Ф. Смалюк – М.: Машиностроение, 2003 - 512 с.

15. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя: учеб. пособие [Текст] /.Г. Шлихтинг – М.: Наука, 1974. – 840 с.

16. Childs P.R.N. Rotating Flow. - Amsterdam e.a.: Elsevier, 2011. – 415 p.

17. Mohammadi B., Pironneau O. Analysis of the k-epsilon turbulence model. Research in Applied Mathematics. – New York: John Wiley & Sons, 1994. – 196 p.

18. Poncet S., Schiestel R., Chauve M.-P. Centrifugal flow in a rotor-stator cavity. *Trans. ASME: J. Fluid Engineering*, 2005. – v.127, p. 787-794.

19. [www.ansys.com](http://www.ansys.com)

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	3
1. Общие сведения о пакете программ ANSYS.....	4
2. Вращение диска в замкнутой цилиндрической области, заполненной вязкой жидкостью.....	6
2.1. Подготовка вычислительного эксперимента.....	8
2.2. Построение области решения задачи.....	12
2.3. Генерация сетки.....	15
2.4. Задание граничных условий.....	21
2.5. Определение физических свойств рабочего тела.....	25
2.6. Задание параметров алгоритма вычислений.....	26
2.7. Решение задачи и контроль за его ходом.....	29
2.8. Визуализация результатов компьютерного эксперимента.....	31
2.9. Анализ результатов и выводы.....	34
3. Задание для самостоятельной работы.....	35
Библиографический список.....	37

Методические указания для выполнения расчетов методами вычислительной гидрогазодинамики при подготовке дипломного проектирования для студентов специальности 24.05.02 «Проектирование авиационных и ракетных двигателей» очной формы обучения.

Составители

**Афанасьев** Александр Александрович  
**Кружаев** Константин Владимирович

Компьютерный набор А.А. Афанасьев  
Редактор Е.А. Кусаинова

Подписано к изданию 2019  
Объем данных 1,5 Мб.

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»  
394026 Воронеж, Московский просп., 14