

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)

Изучение процессов гомогенного горения предварительно несмешанных компонентов в ANSYS Fluent

Электронные методические указания к лабораторным работам

Работа выполнена по мероприятию блока 1 «Совершенствование образовательной деятельности» Программы развития СГАУ на 2009 – 2018 годы по проекту «Разработка образовательных стандартов СГАУ по специальности 160700.65 - Проектирование авиационных и ракетных двигателей и направлению подготовки бакалавров 160700.62 - Двигатели летательных аппаратов со сквозной документацией и создание исследовательских лабораторных работ и прогрессивных технологий лекционных занятий»
Соглашение № 1/4 от 03.06.2013 г.

С А М А Р А
2013

УДК СГАУ: 621.454.2

И 395

Составители: **Кривцов Александр Васильевич,**
Шаблий Леонид Сергеевич.

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

Изучение процессов гомогенного горения предварительно несмешанных компонентов в ANSYS Fluent [Электронный ресурс] : электрон. метод. указания к лаб. работам / М-во образования и науки РФ, Самар. гос. аэрокосм. ун-т им. С. П. Королева (нац. исслед. ун-т); сост.: А.В. Кривцов, Л.С. Шаблий. – Электрон. текстовые и граф. дан. (1,5 Мбайт). - Самара, 2013. – 1 эл. опт. диск (CD-ROM).

В методических указаниях приведены основные сведения о принципах CFD-расчётов газофазных многокомпонентных смесей в программном комплексе Fluent, в том числе с возможностью химических взаимодействий между компонентами. На примере трёхмерной модели условной горелки произведено исследование смешения и горения газовых компонентов топлива: метана и воздуха в условиях невесомости.

Методические указания предназначены для подготовки студентов, обучающихся по специальности 160700.65 «Проектирование авиационных и ракетных двигателей», изучающих дисциплину «САЕ-системы в механике жидкости и газа» в 5 семестре.

Разработано на кафедре ТДЛА.

© Самарский государственный
аэрокосмический университет, 2013

Содержание

Введение	4
Запуск ANSYS Fluent	5
Создание геометрической модели.....	7
Создание сеточной модели	11
Расчёт смешения газовых компонентов	15
Расчёт горения газовых компонентов.....	31
Преподавателю	39
Индивидуальные задания.....	40

Введение

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

Расчёт многокомпонентных течений, когда моделируемый газовый поток представляет собой смесь разных химических веществ, очень интересен как в методическом, так и в практическом плане. Большинство современных двигателей летательных аппаратов являются тепловыми машинами, что обуславливает постоянно высокий интерес авиационных специалистов к процессам горения. В то же время, экспериментальные исследования этих процессов зачастую намного сложнее (и дороже) в сравнении с исследованиями гомогенных течений. Поэтому возможность адекватного определения параметров процесса горения средствами CFD-расчёта видится весьма перспективной.

В настоящем пособии приведена универсальная методика расчёта смешения и горения топлива в газовой фазе в условных горелках: произвольных трёхмерных объектах, имеющих основные элементы любой камеры сгорания (вход горючего, вход окислителя, выход продуктов сгорания, стенки камеры сгорания) и при этом не догматизированные конкретной геометрической формой.

Запуск ANSYS Fluent

Шаг 1. Запуск ANSYS Workbench осуществляется из главного меню:

Пуск -> Программы -> Ansys 14.5 ->  Workbench .

Окно программы (рис. 1) состоит из рабочего поля проекта, списка компонентов, окна сообщений и ещё нескольких элементов, которые могут быть включены опционально (список файлов, окно статуса проекта и т.п.).

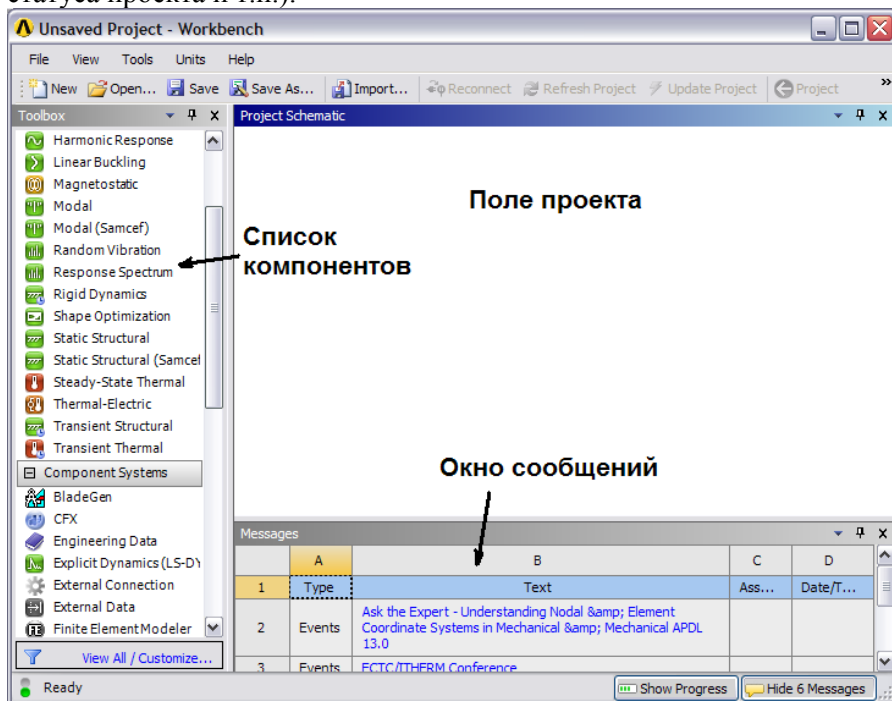


Рис. 1 - Вид окна программы ANSYS Workbench

Шаг 2. Добавьте CAE-анализ Fluent в новый проект, перетащив компонент Fluid Flow (Fluent) на свободное поле проекта к любому месту, где появится зелёный пунктирный прямоугольник, разрешающий размещение (рис. 2).

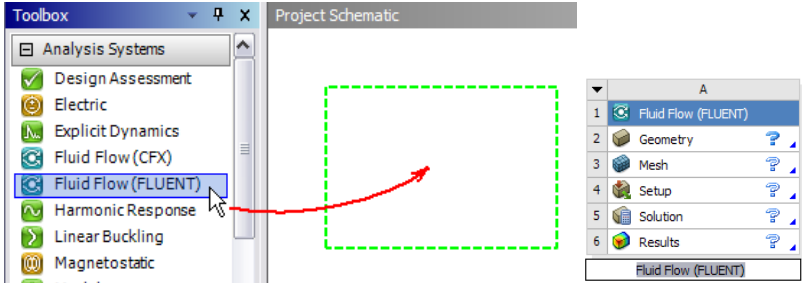


Рис. 2 - Перенос системы анализа потоков Fluent на поле проекта

На поле проекта появится таблица Fluid Flow (Fluent), в нижней части которой предлагается ввести название. Чтобы оставить название по умолчанию достаточно нажать Enter или кликнуть мышью на свободное поле проекта.

Система анализа состоит из пяти пунктов - этапов решения CFD-задачи: это построение геометрии (Geometry), создание на её основе расчётной сетки (Mesh), наложение на сетку свойств рабочего тела, граничных и начальных условий, параметров моделей (Setup), решение полученной модели (Solution) и анализ результатов (Results).

Далее каждый этап будет описан подробно.

Создание геометрической модели

Шаг 1. Открыть систему трёхмерного моделирования Design Modeler дважды щелкнув на элементе Geometry или выбрав элемент New Geometry из контекстного меню (рис. 3).

Шаг 2. При первом запуске Design Modeler предлагает выбрать единицы измерения будущей модели (рис. 4). Нужно выбрать Millimeter (миллиметры) и нажать ОК.

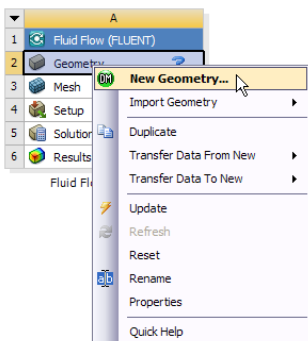


Рис. 3 - Создание новой геометрической модели

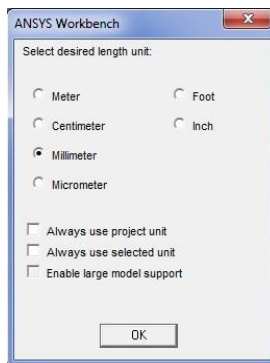


Рис. 4 - Выбор единиц измерения будущей модели

Модельная камера сгорания (см. рис. 10), используемая в данном расчёте, может быть целиком построена из геометрических примитивов.


Шаг 3. Создаём цилиндр. Для этого в главном меню выбираем пункт Create -> Primitives (рис. 5) и затем Cylinder. В Окне детализации задаются размеры и положение цилиндра (рис. 6):

Base Plane -> XY Plane (плоскость основания - XY);

Origin (координаты основания): $X = 0$, $Y = 0$, $Z = -100$;

Axis Definition (определение оси компонентами): $X=0$, $Y=0$, $Z=300$;

Radius (радиус) -> 25;

Нажимаем на панели быстрого доступа кнопку Generate  и в результате будет построен цилиндр заданного размера и положения (рис. 7).

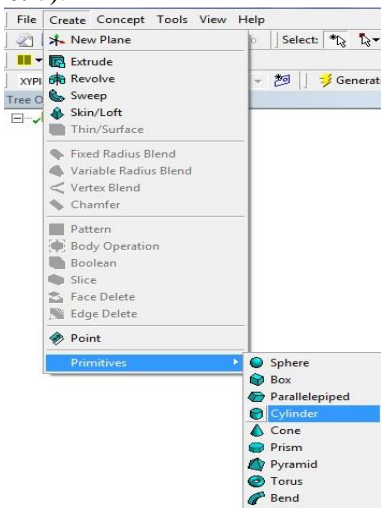


Рис. 5 – Выбор геометрического примитива Cylinder

Details of Cylinder1	
Cylinder	Cylinder 1
Base Plane	XYPlane
Operation	Add Material
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	-100 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	300 mm
<input type="checkbox"/> FD10, Radius (>0)	25 mm
As Thin/Surface?	No

Рис. 6 – Задание параметров размеров и положения цилиндра

Шаг 4. Построить второй цилиндр, перпендикулярный первому. Для этого аналогичным образом создать цилиндр радиусом 20 мм и высотой 100 мм в плоскости YZ (рис. 8).

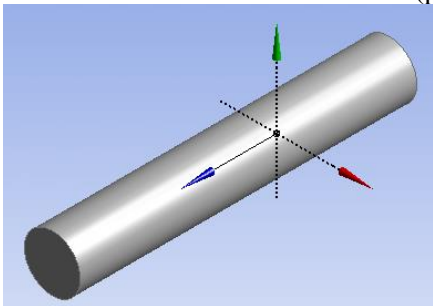


Рис. 7 – Построенный цилиндр

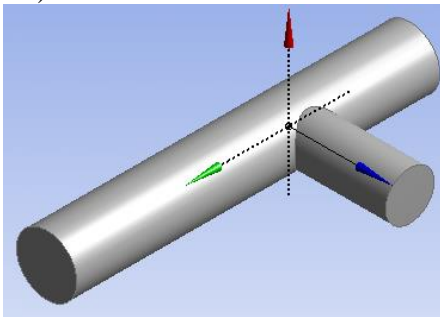


Рис. 8 – Второй цилиндр, присоединенный к первому

При создании цилиндра нужно указать:

Base Plane -> YZ Plane (плоскость основания - YZ);
Origin (координаты основания): $X = 0, Y = 0, Z = 0$;
Axis Definition (определение оси компонентами): $X=0, Y=0, Z=100$;
Radius (радиус) -> 20;

Указание базовой плоскости происходит в три этапа. Сначала нужно кликнуть левой кнопкой мыши на поле Base Plane. В нём появятся кнопки

Apply	Cancel
-------	--------

 (принять и отменить). Пока видны эти кнопки система ждёт выбора плоскости. В дереве проекта нужно выбрать элемент *YZ Plane* и после этого обязательно нажать на кнопку *Apply*.

Шаг 5. Создать скругление ребра в месте соединения цилиндров. Для этого в главном меню выбираем пункт Create -> Fixed Radius Blend. В окне детализации необходимо задать размеры и положение скругления цилиндра (рис. 9):

Radius -> 5 мм;

Geometry -> Используя описанную выше схему работы с кнопками Apply/Cancel, указать ребро в месте соединения, как показано на рис. 9;

Затем нажать Generate.

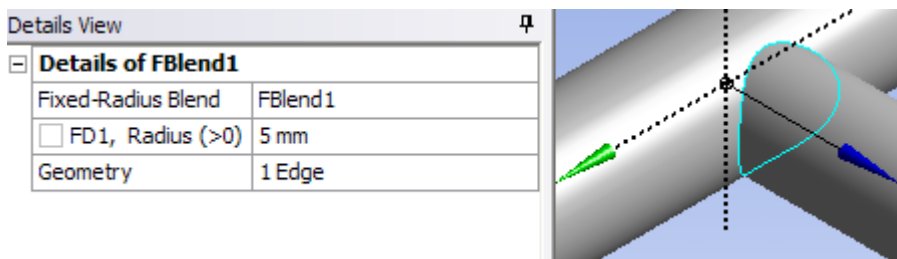


Рис. 9 – Операция скругления ребра

На этом, построение геометрической модели закончено (рис. 10), можно закрыть окно Design Modeler, сохранить проект Workbench и перейти к наложению сетки на построенную геометрию.

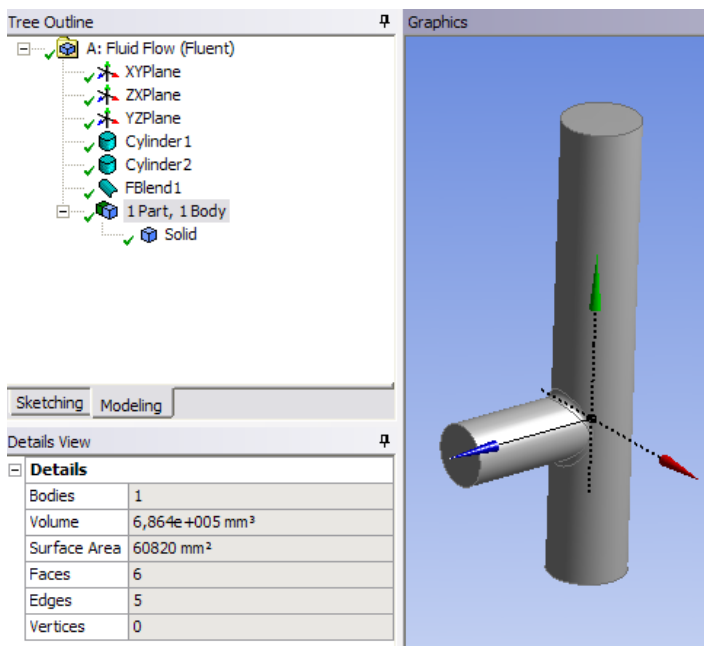


Рис. 10 – Построенная геометрическая модель

Создание сеточной модели

Чтобы открыть программу для построения сетки ANSYS Meshing нужно дважды щелкнуть левой кнопкой мыши на элементе Mesh (см. рис. 2). В появившемся окне (рис. 11) должна отобразиться импортированная геометрическая модель.

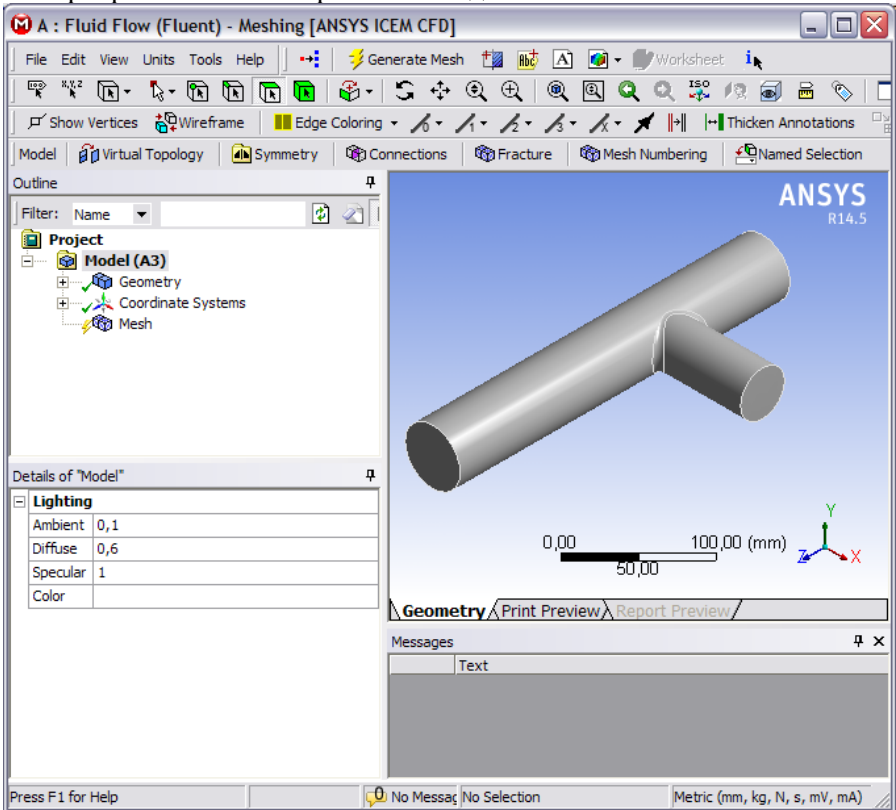
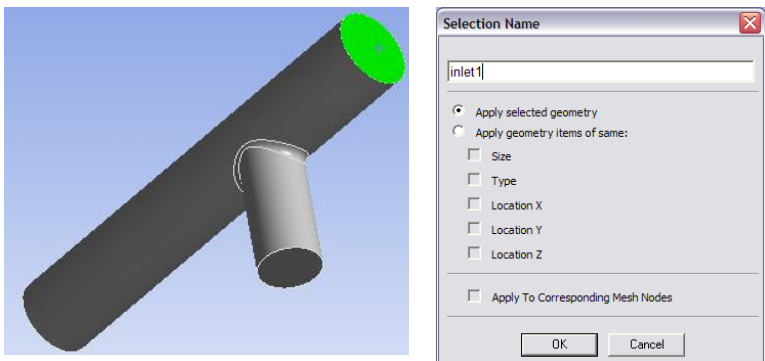
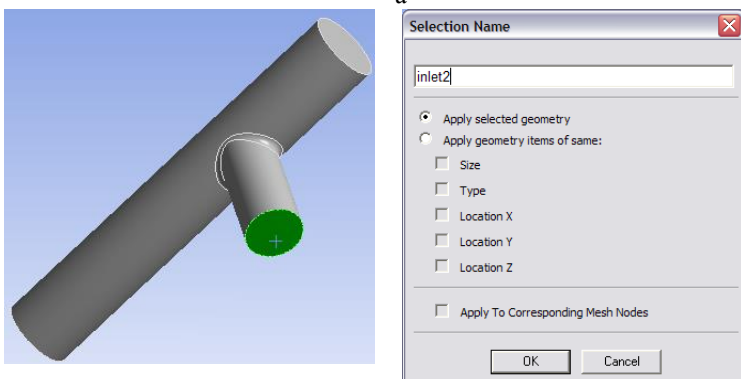


Рис. 11 – окно ANSYS Meshing

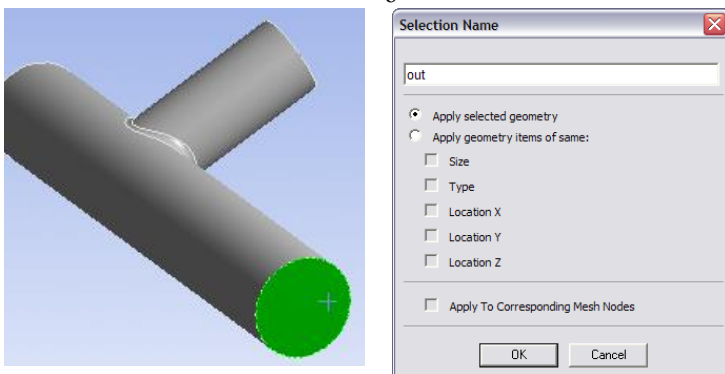
Шаг 1. Задать названия границ на торцевых поверхностях модели: два входных - inlet1 и inlet2 и одно выходное - outlet. Для того, чтобы назвать каждую границу, нужно совершить следующие действия: выбрать необходимую поверхность, выполнить команду контекстного меню *Create Named Selection* и ввести название данной границы (рис. 12).



a



б



в

Рис. 12 – Присвоение имени граням:
 а - первый вход inlet1, б - второй вход inlet2, в - выход outlet

Шаг 2. Задать параметры сеткогенерации в свойствах элемента дерева проекта Mesh (рис. 13):

Sizing -> Relevance Center -> Fine (относительный размер - мелкая)

Use Automatic Inflation -> Program Controlled.

Данные параметры задают размерность ячеек сетки и включают наложение пристеночного слоя на неназванные поверхности.

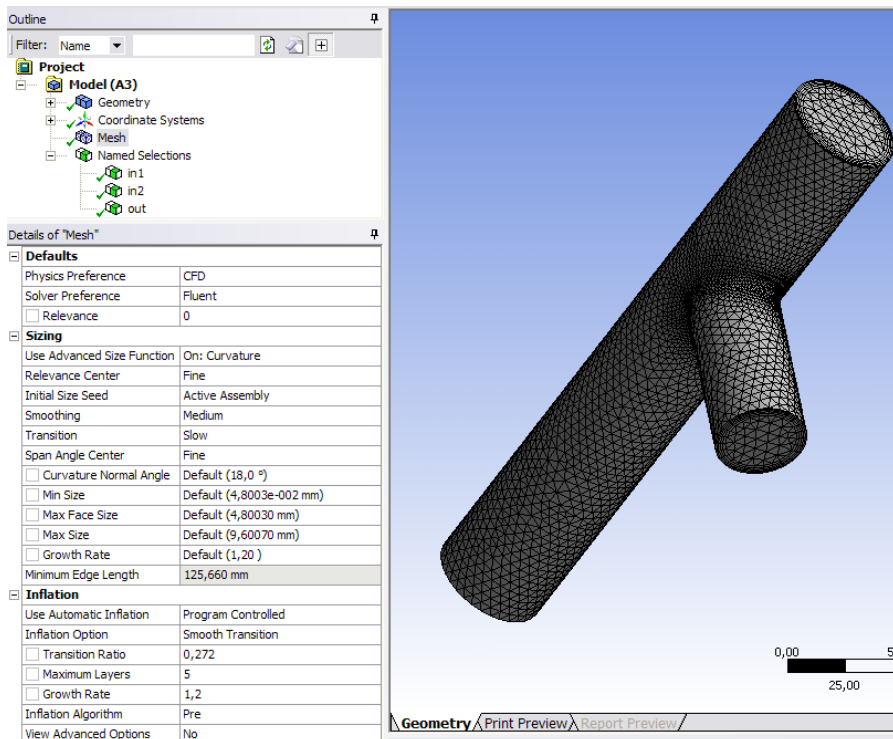


Рис. 13 – Параметры сетки и её визуализация

После задания всех параметров необходимо построить сетку, нажав **Generate Mesh**, и убедиться в том, что сетка построена верно (см. рис. 13).

На этом построение сетки закончено. Закрываем редактор сетки и сохраняем проект. Далее переходим в решатель

Расчёт смешения газовых компонентов

Шаг 1. Запустить ANSYS Fluent двойным щелчком по элементу Setup. В окне настройки параметров запуска оставить всё по умолчанию и нажать ОК. В случае успешного запуска откроется окно Fluent, отображающее расчётную модель (рис. 14):

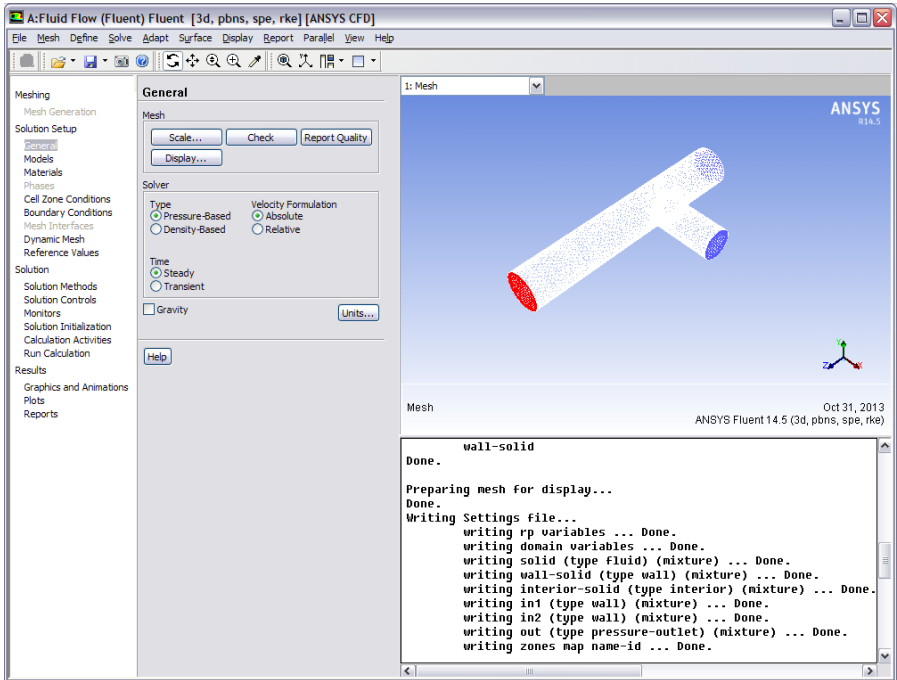


Рис. 14 – Окно ANSYS Fluent

Шаг 2. Проверить правильность расчётной сетки, нажав кнопку Check. Если в появившемся сообщении между строкой с многоточием (рис. 15) и строкой Done нет сообщений, значит сетка загрузилась без ошибок.

```

Domain Extents:
x-coordinate: min (m) = -2.499998e-02, max (m) = 1.000000e-01
y-coordinate: min (m) = -2.499997e-02, max (m) = 2.499998e-02
z-coordinate: min (m) = -1.000000e-01, max (m) = 2.000000e-01
Volume statistics:
minimum volume (m3): 1.370227e-10
maximum volume (m3): 7.532701e-08
total volume (m3): 6.833452e-04
Face area statistics:
minimum face area (m2): 1.832092e-07
maximum face area (m2): 3.998020e-05
Checking mesh.....
Done.

```

Рис. 15 – Текст сообщения при проверке сетки

Шаг 3. Установить нужные единицы измерения. В данном случае будет удобнее работать с единицами измерения длины - миллиметрами взамен метров, а единицами измерения давления - атмосферами взамен паскалей. Для того, чтобы выполнить эти изменения, нужно открыть окно единиц измерения, нажав кнопку Units. Затем в левом списке найти первую модифицируемую величину - Length (длина) переключить выделение единиц изменения с метров на миллиметры (рис. 16). Аналогичные действия нужно выполнить для давления (Pressure), выбрав atm вместо pascal. После этого можно закрыть данное окно, нажав Close, дополнительной кнопки ОК в этом окне нет, все изменения вступают в силу сразу.

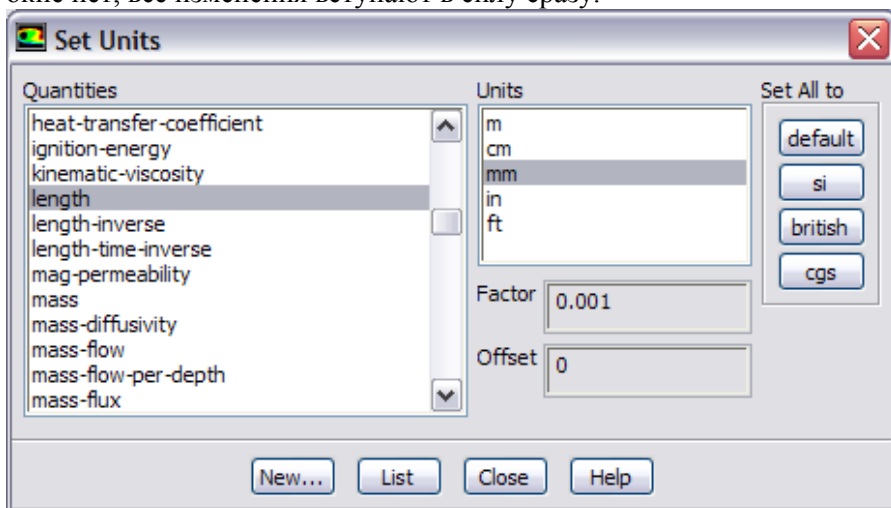


Рис. 16 – Изменение единиц измерения

Шаг 4. Во вкладке Models задать модель турбулентности k-epsilon Realizable (рис. 17), используя пункт Viscous (вязкость).

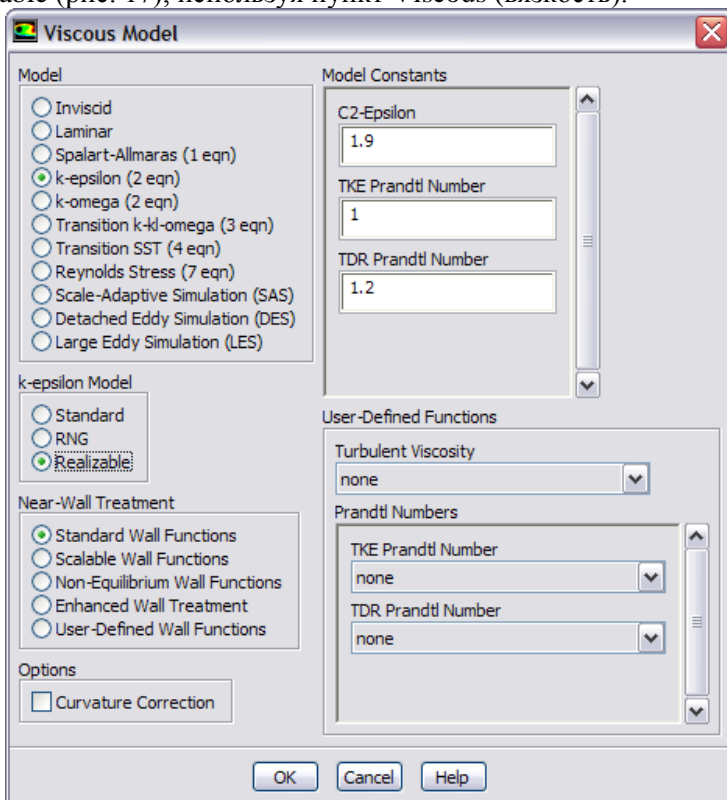


Рис. 17 – Включение модели турбулентности k-epsilon Realizable

Шаг 5. На вкладке Models задать модель переноса (смешения) компонентов Species Transport (рис. 18), используя пункт Species.

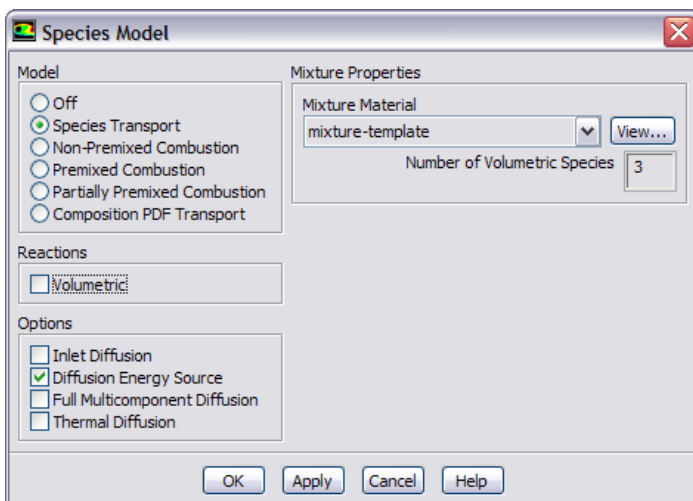
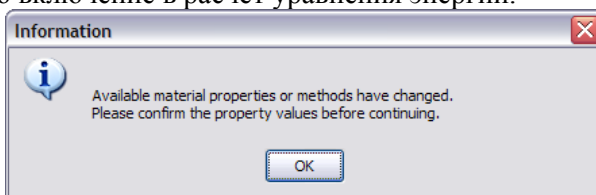


Рис. 18 – Включение модели переноса компонентов Species Transport

После нажатия кнопки ОК будет выведен ряд сообщений о включении ряда параметров моделирования, необходимых для расчёта смешения компонентов (рис. 19). Например, для расчёта плотности смеси компонентов по закону идеальной смеси программе необходимо включение в расчёт уравнения энергии.



Material mixture-template:

New property "Thermal Conductivity" has been added.

Selecting constant method for "Thermal Conductivity" -- data required.

New property "Viscosity" has been added.

Selecting constant method for "Viscosity" -- data required.

New property "Mass Diffusivity" has been added.

Selecting constant-dilute-appx method for "Mass Diffusivity" -- data required.

Note: Enabling energy equation as required by material density method.

Рис. 19 – Графическое и текстовое сообщения о включении дополнительных функций

Шаг 6. Во вкладке Materials просмотреть состав рассчитываемой смеси газов. По умолчанию смесь *mixture-template* содержит газообразные вещества азот (nitrogen), кислород (oxygen) и водяной пар (water-vapor) и таким образом, что делает ее близкой по составу к воздуху (рис. 20).

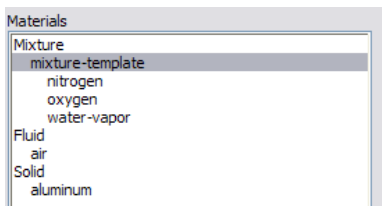


Рис. 20 – Состав смеси на вкладке Materials

В нашем случае будет проведено моделирование смеси горючего-метана в воздухе, состоящем только из азота и кислорода. Соответственно, необходимо, во-первых, добавить в список веществ данного расчёта недостающие элементы (метан), а во-вторых скорректировать состав смеси, убрав из него водяной пар.

Шаг 7. Добавить в расчёт вещество метан, используя базу данных веществ ANSYS Fluent. Для этого заходим в Materials, нажимаем кнопку Create/Edit и в появившемся окне (рис. 21) FLUENT Database. Materials. В окне базы данных (рис. 22) выбираем тип веществ - жидкие (Material Type -> Fluid), находим в левом списке вещество methane (ch4), нажимаем Copy и закрываем оба окна.

При этом в списке веществ появляется метан (см. рис. 22). Однако сейчас он ещё не включен в состав смеси *mixture-template*.

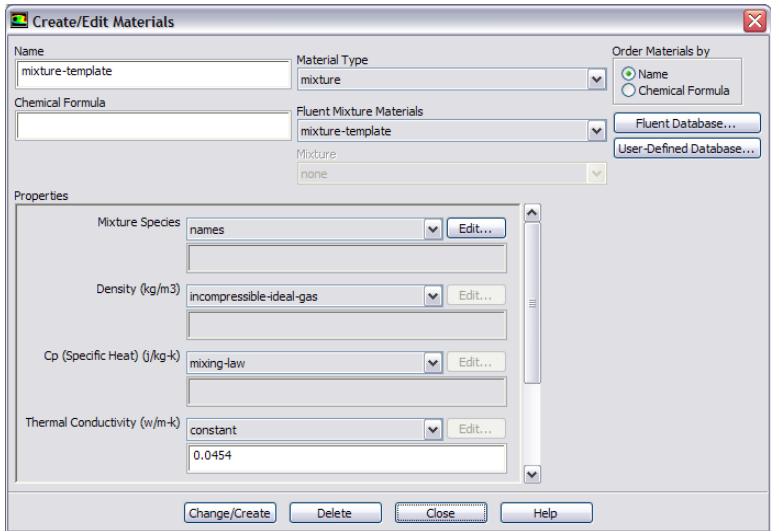


Рис. 21 – Окно модификации свойств веществ

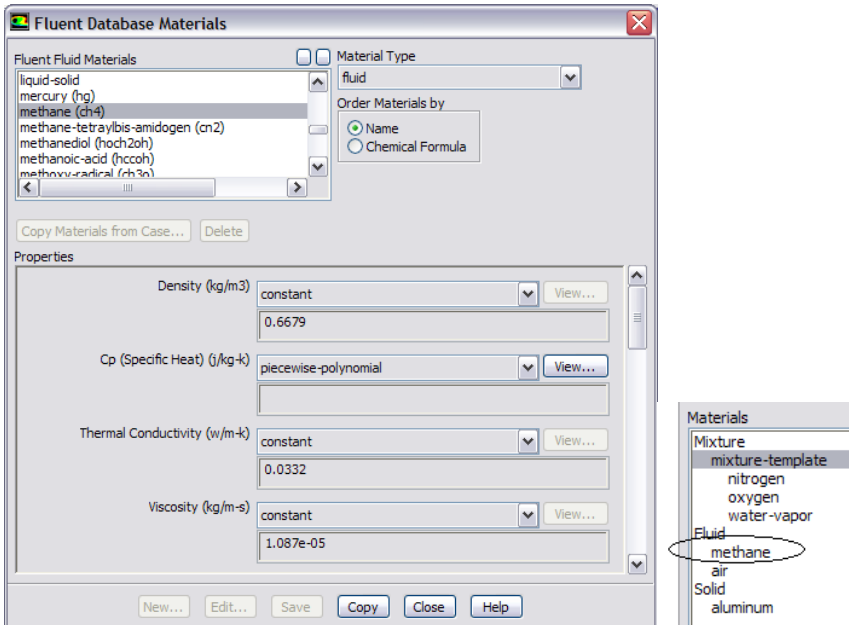


Рис. 22 – База данных веществ Fluent Database

Шаг 8. Включить метан в состав смеси *mixture-template*. Для этого нужно двойным щелчком на *mixture-template* открыть окно свойств смеси (см. рис. 21) и открыть элемент Mixture Species, нажав кнопку Edit справа.

В появившемся окне Species (рис. 23) нужно задать состав смеси следующим образом. В левом списке *Available Materials* (доступные вещества) показаны те вещества, которые не включены в состав смеси, но присутствуют в расчёте в виде отдельных веществ. В правом списке приведены вещества, включенные в состав смеси. Кнопками Add и Remove можно соответственно добавлять и удалять вещества. Необходимо добавить в состав смеси метан, и удалить водяной пар (см. рис. 23). Кроме этого обязательно нужно, чтобы последним компонентом в правом списке был азот (n₂). Чтобы этого добиться, нужно сначала переместить азот из правого списка в левый, а затем вернуть его обратно. Таким образом он окажется на последнем месте (см. рис. 23). Последний компонент из списка является так называемым дополняющим (Constraint) компонентом. Его концентрация не задаётся, а рассчитывается, как 100% минус сумма концентраций остальных компонентов.

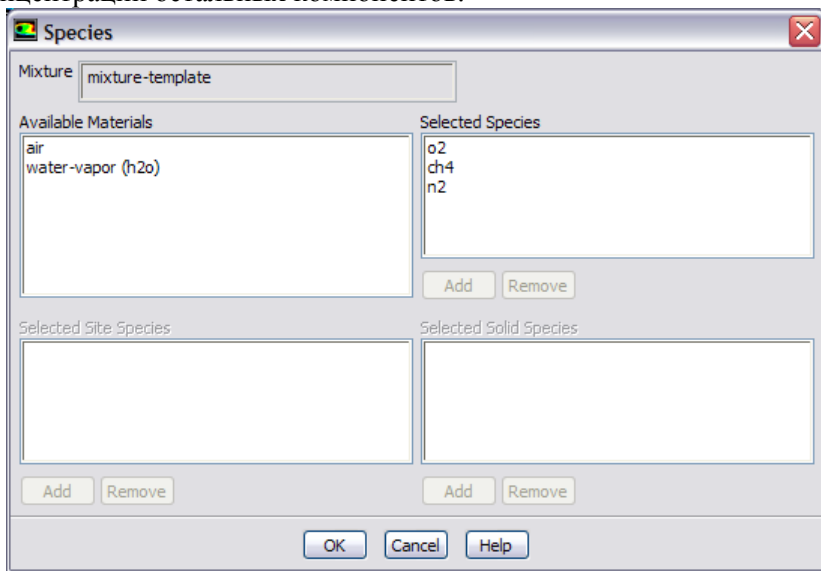


Рис. 23 – Окно состава смеси Species

После нажатия кнопки ОК можно переходить к заданию граничных условий на вкладке Boundary Conditions.

Шаг 9. Задать параметры на входе окислителя (воздуха), поступающего из границы inlet1. Для этого открыть окно задания свойств inlet1, нажав Edit, и ввести значения потока:

Momentum (количество движения, рис. 24):

Velocity Magnitude (величина скорости) -> 3 м/с

Turbulence (турбулентность):

Intensity and Hydraulic Diameter

Turbulent Intensity -> 5%

Hydraulic Diameter -> 50 мм (0.05 м).

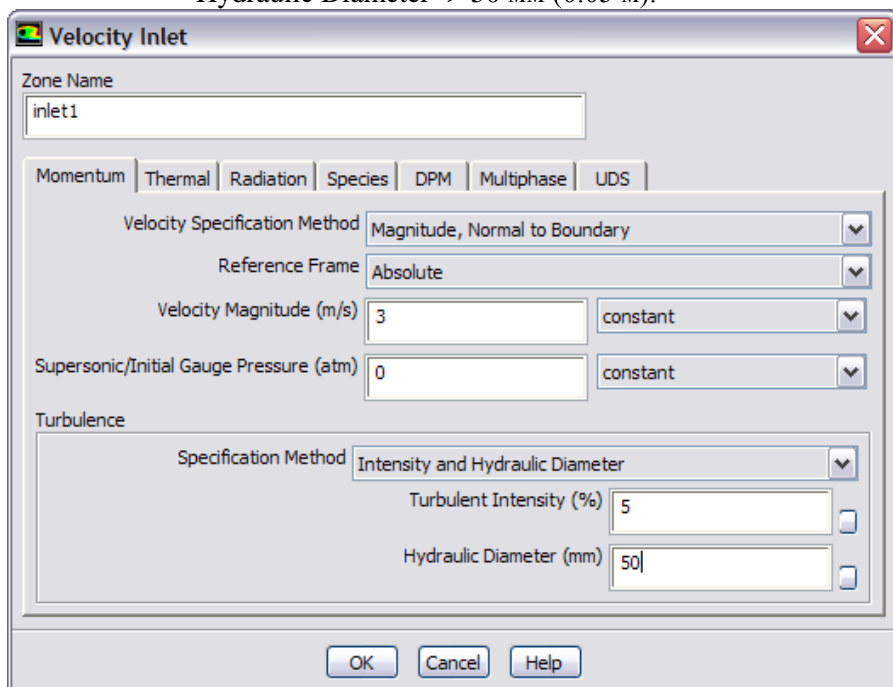


Рис. 24 – Окно Velocity Inlet, вкладка Momentum

Гидравлический диаметр - это диаметр эквивалентного канала круглого сечения, для рассматриваемого цилиндрического входного

патрубка он равен его геометрическому диаметру, а для остальных рассчитывается по формуле:

$$D_H = \frac{4A}{P},$$

где A - площадь, P - периметр.

Температуру на вкладке *Thermal* оставляем 300К. А на вкладке *Species* необходимо задать массовые соотношения компонентов, поступающих в расчётную зону через данную границу (рис. 25). В данном случае входящий поток не содержит метана ($ch_4 \rightarrow 0$), содержит по массе 23% кислорода ($o_2 \rightarrow 0.23$) и 77% азота. Азот в явном виде не задаётся, но будет вычислен, как 100% - сумма остальных компонентов.

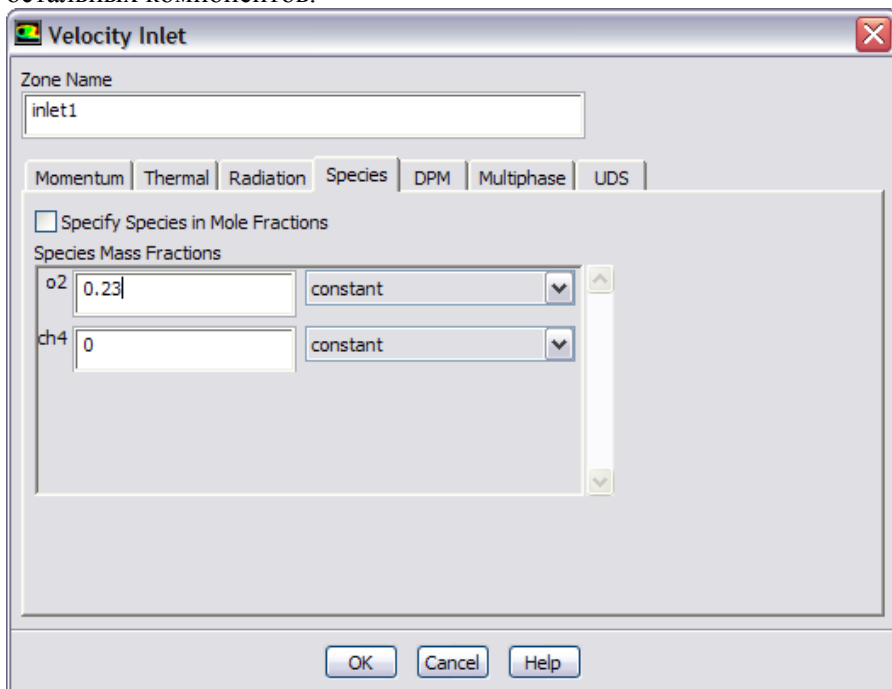


Рис. 25 – Окно Velocity Inlet, вкладка Species

Шаг 10. Аналогично задаются параметры на входе горючего (метана), поступающего из границы inlet2. Для этого открыть окно задания свойств inlet2, нажав Edit, и ввести значения потока (рис. 26):

скорость на входе 3 м/с, турбулентность – 5%, гидравлический диаметр – 40 мм, массовая доля метана – 1.

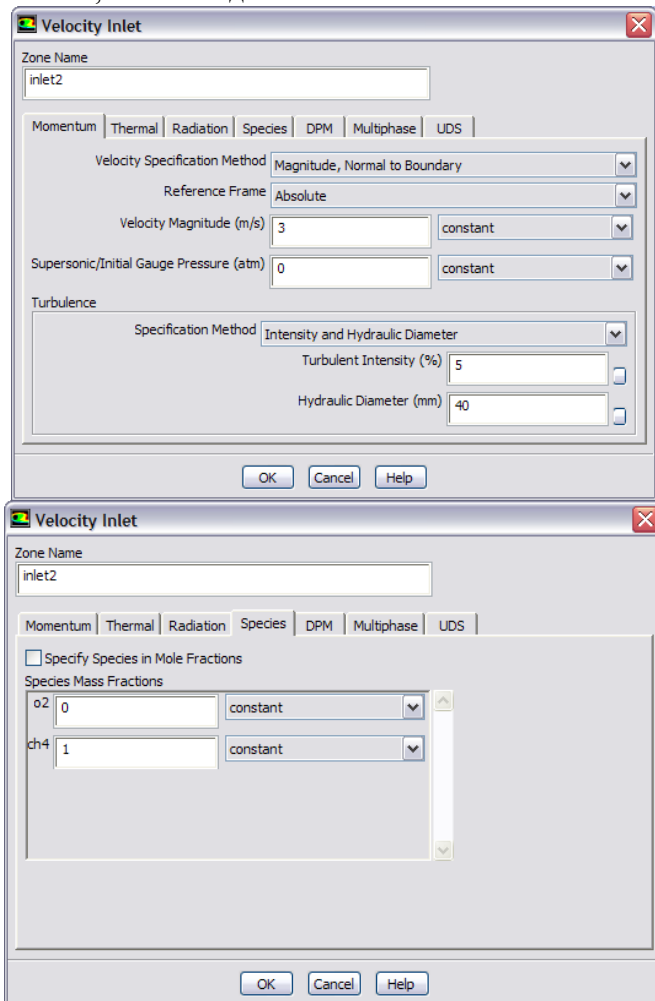


Рис. 25 – Вкладки окна inlet2

Шаг 11. Для выходного граничного условия (out) задаются параметры (рис. 26):

Momentum:

Gauge Pressure (давление) -> 0 atm

Turbulence (турбулентность):

Intensity and Hydraulic Diameter

Backflow Turbulent Intensity -> 5%

Backflow Hydraulic Diameter -> 50 мм (0.05 м).

Species:

o2 -> 0.23;

ch4 -> 0.

Нулевое давление задано относительно параметра Operation Pressure, который по умолчанию имеет значение 1 атм. Таким образом, абсолютное давление составит:

$$\text{Pressure} = \text{Operation Pressure} + \text{Gauge Pressure} = 1+0 = 1 \text{ атм.}$$

Что же касается параметров турбулентности и концентраций, то эти параметры задаются только для возвратного (Backflow) течения, в случае, если такое течение возникнет на какой-то части выхода. Если через всю поверхность выходного граничного условия поток будет покидать расчётную зону, эти параметры будут проигнорированы.

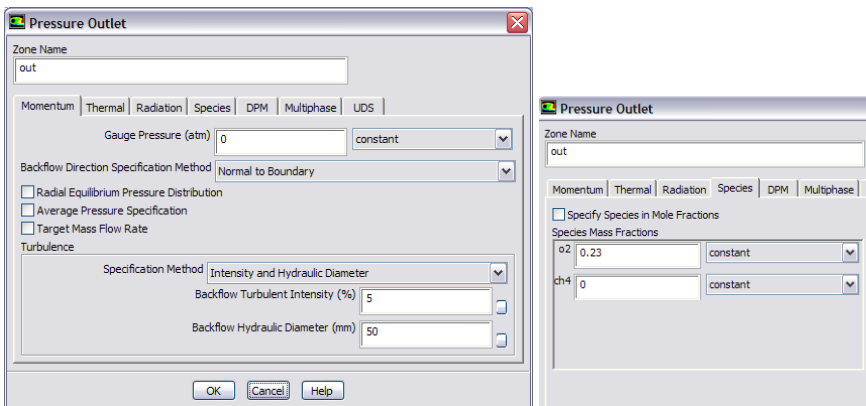


Рис. 26 – Вкладки окна out

Таким образом все граничные условия были заданы.

Шаг 12. Проводится инициализация решения - запись в памяти значений параметров потока внутри расчетной модели для первой итерации. Во вкладке **Solution Initialization** можно воспользоваться так называемой «гибридной» инициализацией, при которой в память записываются не одинаковые значения по всей расчётной области, а значения получаются в ходе решения уравнений потенциальных полей. Нажимаем кнопку **Initialize** (рис. 27) и происходит инициализация путём решения десяти итераций потенциальных полей. Теперь система готова к выполнению итераций основного расчёта.

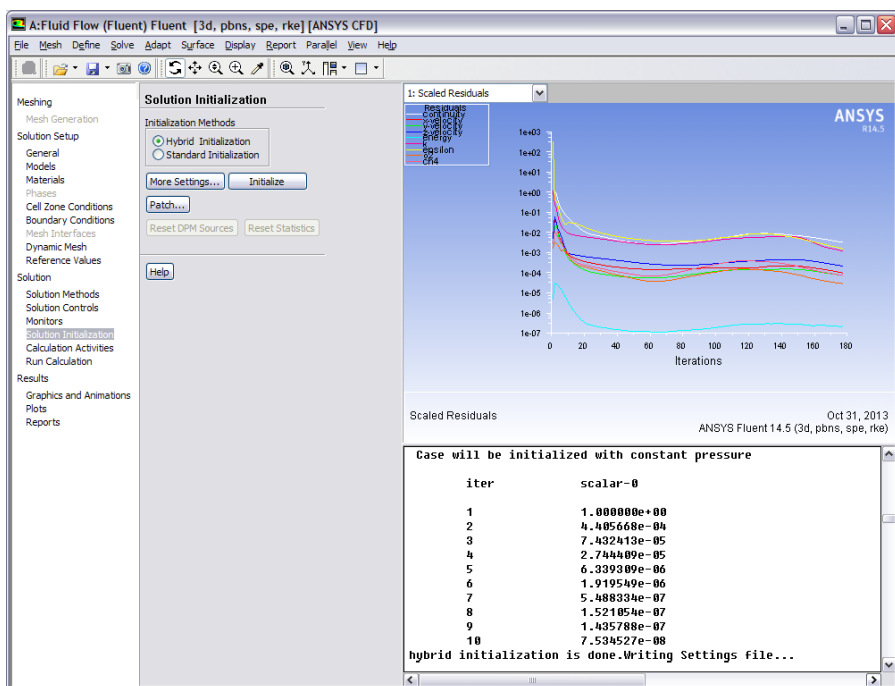


Рис. 27 – Инициализация

Шаг 13. Выполнить 200 итераций основного расчёта. На вкладке **Run Calculation** (рис. 28) ввести **Number of Iterations -> 200** и нажать кнопку **Iterate**. При этом начнут выполняться итерации расчёта, на графике и в текстовом окне будут отображаться значения

невязок по всем уравнениям. Когда все невязки снизятся до 10^{-3} , расчёт остановится автоматически, что сопровождается надписью «!solution is converged». Если этого не произошло за 200 итераций, можно попробовать сделать ещё 200 итераций и т.д.

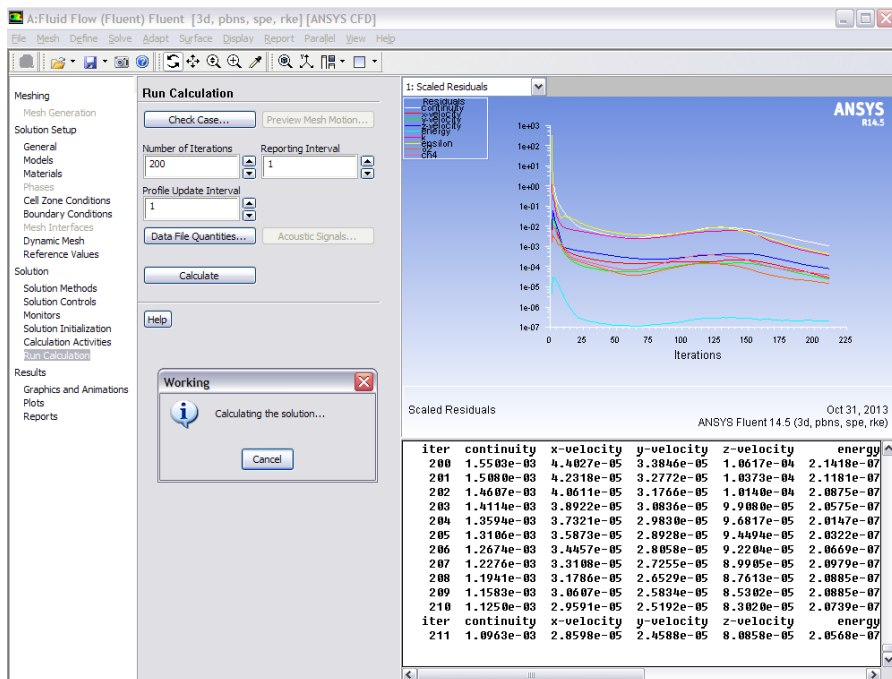


Рис. 28 – Выполнение расчёта

После выполнения расчёта необходимо посмотреть результаты - картины распределения концентраций компонентов потока.

Шаг 14. Воспользовавшись инструментом визуализации Contour на вкладке Graphics and Animations, выполнить построение поля распределения давления на стенках модели (рис. 29). Для этого нужно задать параметр визуализации (Pressure), место (поверхность) визуализации (wall-solid), поставить галочку Filled для получения закрашенных полей и нажать кнопку Display.

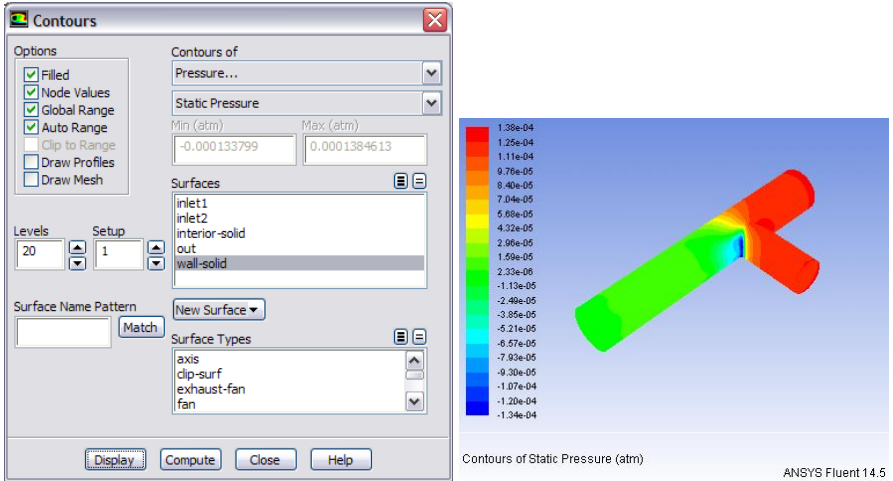


Рис. 29 – Визуализация поля давления на непроницаемой стенке

Шаг 15. Выполнить создание дополнительной плоскости визуализации, проходящей через плоскость симметрии модели. Для этого нужно воспользоваться кнопкой создания новых поверхностей *New Surface* -> *Plane*.

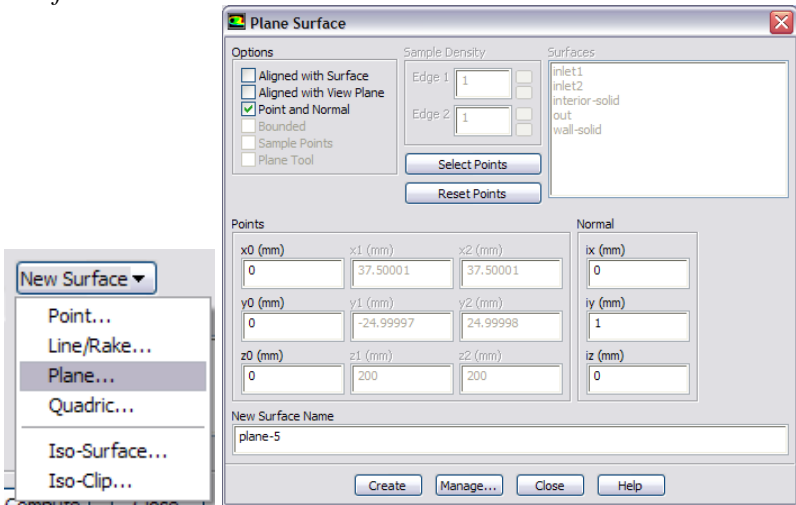


Рис. 30 – Создание новой плоскости визуализации plane-5

В появившемся окне (рис. 30) можно создать плоскость разными способами. В данном случае наиболее подходящим является задание плоскости через указание точки и нормали. Для этого нужно поставить галочку «Point and Normal». После этого задаются координаты точки - (0; 0; 0) и орты нормального вектора - (0; 1; 0), что соответствует перпендикулярности оси OY. После этого нужно нажать кнопку Create и закрыть окно создания плоскостей.

Шаг 16. Выполнить отображение полей давлений и скоростей потока на вновь созданной плоскости (рис. 31).

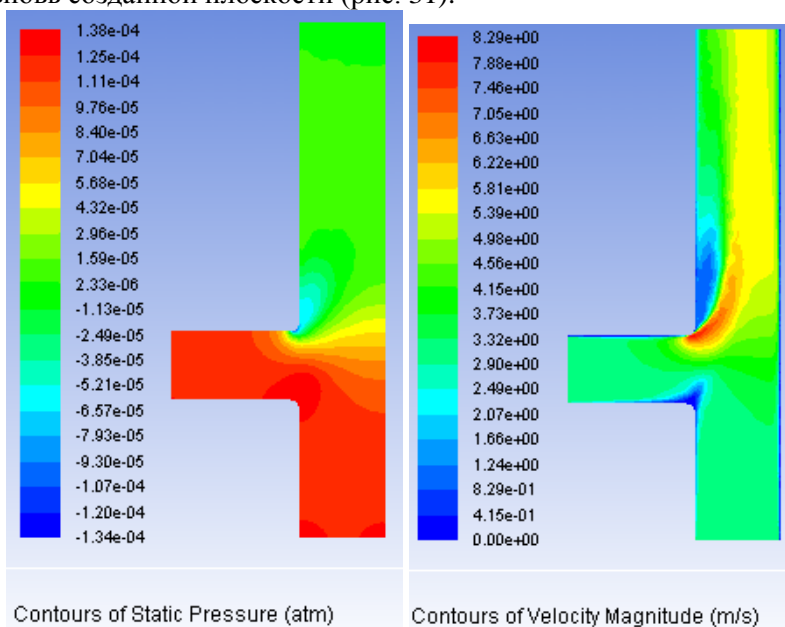
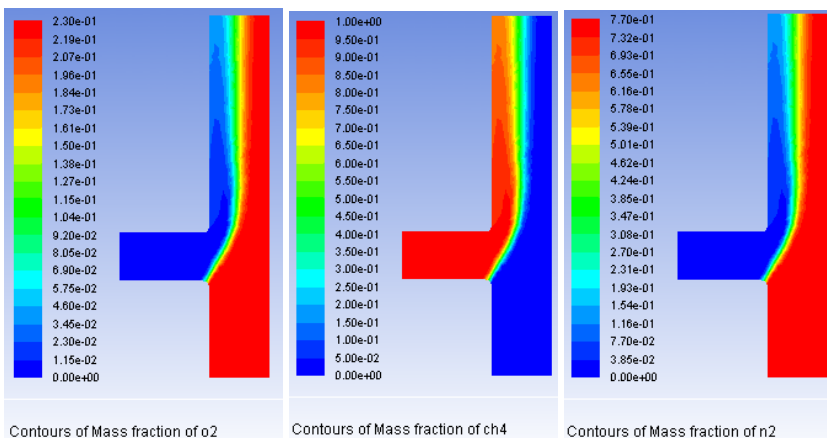


Рис. 31 – Поля давления и скорости на плоскости симметрии plane-5

Шаг 17. Просмотреть поля концентраций всех компонентов на плоскости симметрии (рис. 32).

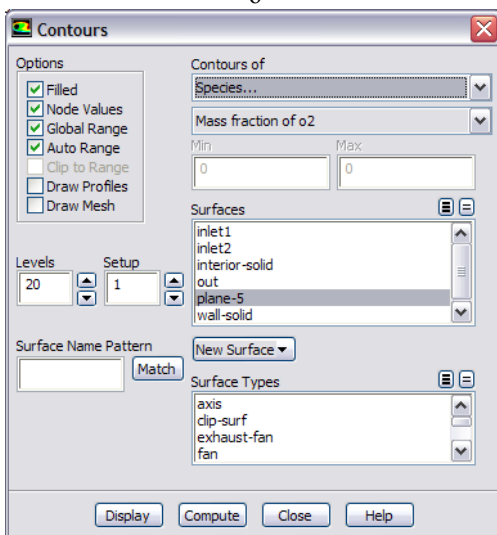
Видно (см. рис. 32), что потоки метана и воздуха (кислорода и азота) идут от входов к выходу, постепенно растворяясь друг в друге. На данном этапе химическое взаимодействие не моделировалось. Следующим этапом проводится расчёт с горением.



а

б

в

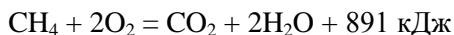


г

Рис. 32 – Просмотр полей концентраций: а - кислорода, б - метана
в - азота; г - настройка параметров на примере кислорода

Расчёт горения газовых компонентов

Постановка расчёта горения выполняется как модификация расчёта смешения путём добавления модели горения. Кроме этого необходимо добавить в расчёт вещества, которые будут образовываться в ходе химических процессов - продукты реакции. Основная реакция горения может быть записана так:



Шаг 1. Таким образом, для расчёта горения в состав горящей смеси, течение которой будет моделироваться, необходимо добавить двуокись углерода и водяной пар. Водяной пар уже по умолчанию находится в списке веществ (вкладка Materials), а двуокись углерода необходимо добавить из базы данных, действуя аналогично шагу 7 предыдущего раздела (рис. 33).

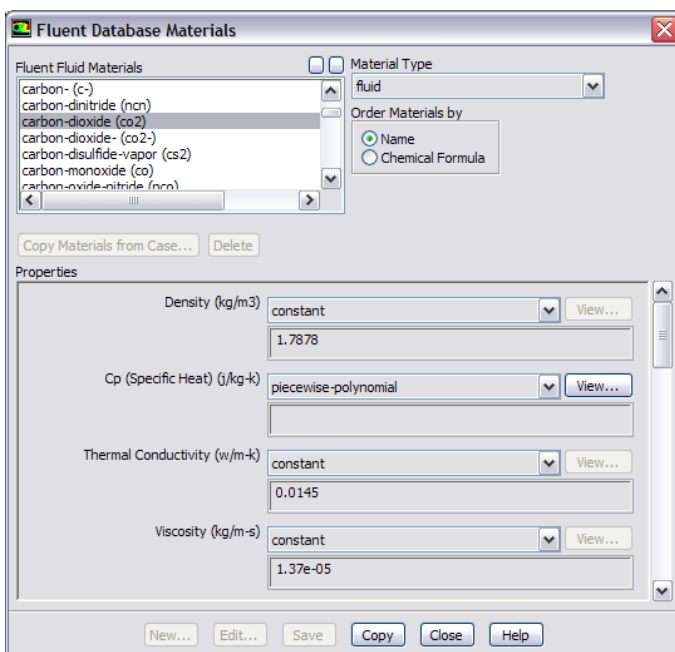


Рис. 33 – Добавление в расчёт двуокиси углерода (carbon dioxide)

Шаг 2. После добавления в расчёт всех компонентов нужно сформировать из них смесь правильного состава. Аналогично шагу 8 предыдущего раздела нужно включить в состав смеси водяной пар и диоксид углерода, а затем исключить и обратно включить азот, чтобы он оказался на последнем месте (рис. 34). Порядок компонентов с первого по предпоследнее место значения не имеет.

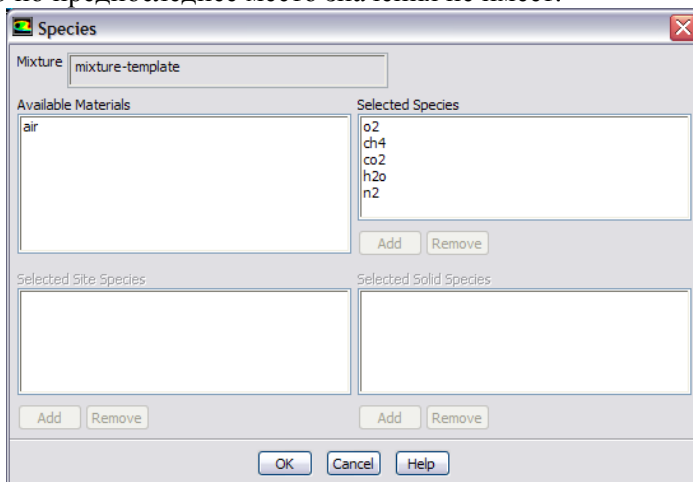


Рис. 34 – Формирование состава смеси с продуктами сгорания

Введенные в состав смеси компоненты появятся в списках граничных условий со значениями концентраций, равными нулю по умолчанию. В данном случае это правильно, поскольку во входящем потоке продукты горения отсутствуют.

Если запустить расчёт в таком виде, то картина течения не изменится, поскольку несмотря на то, что концентрации продуктов сгорания отныне формально могут быть рассчитаны программой, они будут оставаться нулевыми, поскольку пока ещё не задан механизм появления данных компонентов - так называемый механизм реакций.

Шаг 3. Задать моделирование химической реакции на вкладке Models -> Species (см. шаг 5 предыдущего раздела). Для этого нужно поставить галочку Volumetric (объёмные реакции), а затем выбрать вариант реакционного механизма - Eddy Dissipation (рис. 35). Этот

механизм основан на предположении, что скорость химических превращений намного превышает скорость смешения компонентов. То есть, как только произошло перемешивание компонентов, их сгорание с выделением продуктов и теплоты происходит мгновенно.

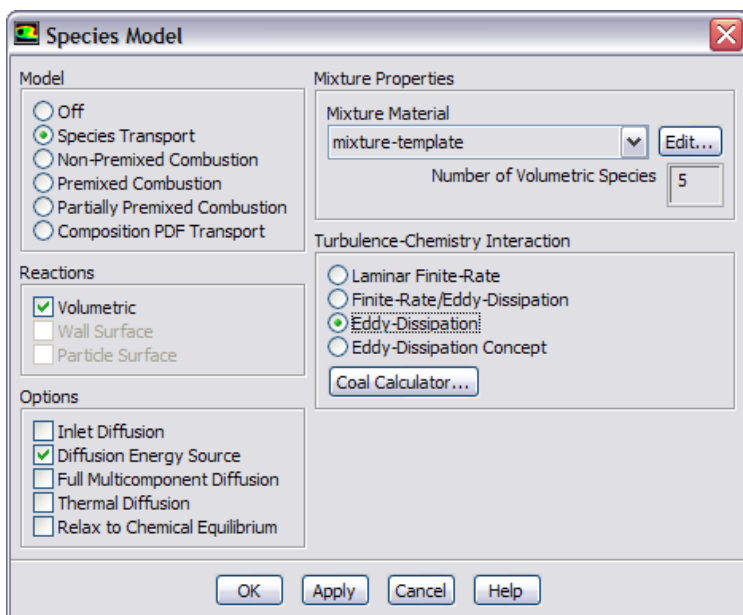


Рис. 35 – Задание механизма расчёта реакций Eddy Dissipation

Шаг 4. Далее нужно задать механизм химической реакции, т.е. какие вещества имеют право взаимодействовать, в каких соотношениях и какие при этом будут образовываться продукты реакции. Эта информация задаётся в свойствах смеси (вкладка Materials -> открыть свойства *mixture-template*). Сбоку строки Reaction (рис. 36) нажать Edit, чтобы открыть окно настроек реакции. У вас появится окно Reactions (рис 37). В строке Total Number of Reaction задается количество химических реакций (для рассматриваемого случая это одна реакция). В строке Number of Reactants выбираются число компонентов, вступающих в химическую реакцию (для рассматриваемого случая их два). Ниже указать, какие именно компоненты реагируют (CH_4 и O_2) и указать их стехиометрические

коэффициенты (рис. 37). Аналогично задать два продукта реакции - CO_2 и H_2O .

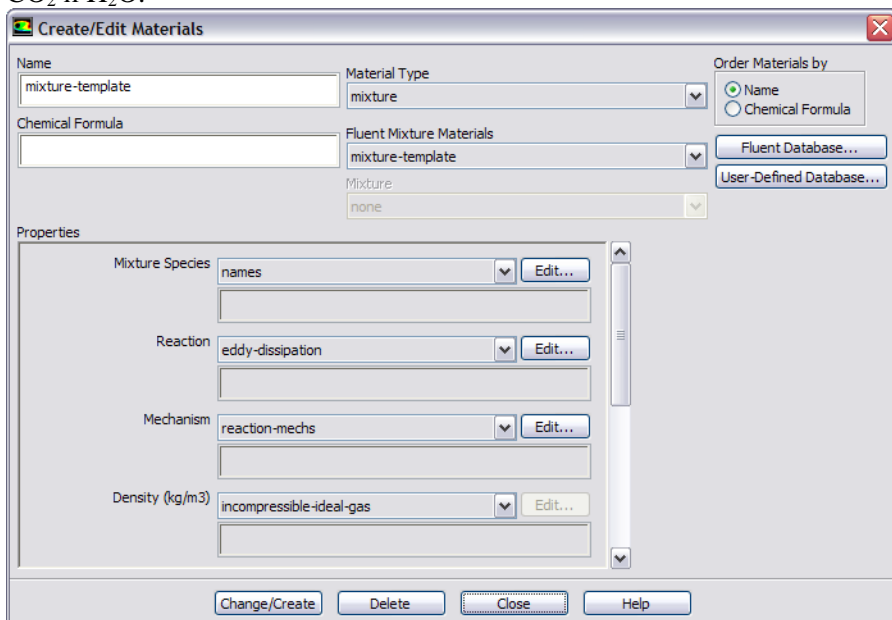


Рис. 36 – Окно задания свойств смеси с новым пунктом Reaction

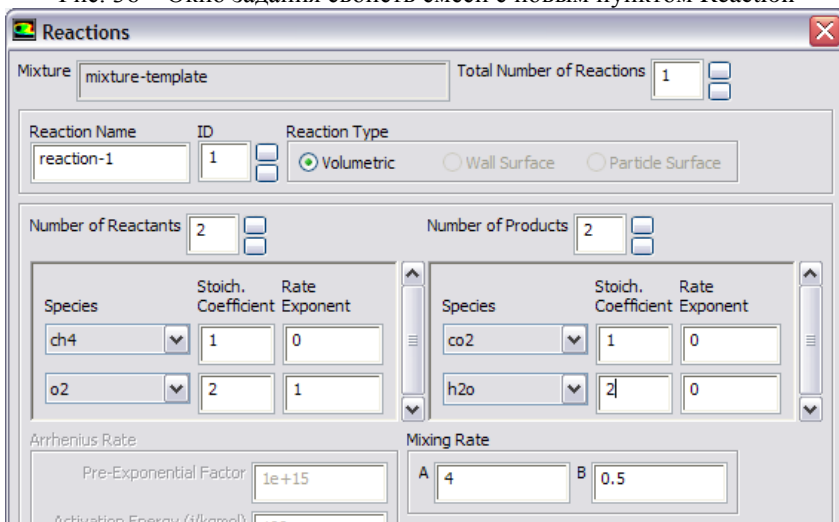


Рис. 37 – Окно настроек химической реакции

Шаг 5. После модификации модели выполняется её пересчёт - повторное выполнение итераций. При этом пересчёт можно выполнить как с выполнением начальной инициализации, так и без неё. В последнем случае в качестве начальных значений будут приняты те, которые оставались в памяти компьютера от предыдущего расчёта. Последний способ более рационален, т.к. основное распределение параметров потока уже получено и не нужно тратить время на его повторное определение.

Вместе с тем иногда расчёт без повторной инициализации выполняется без горения. Это происходит потому, что в «выглаженной» модели течений не хватает турбулентных пульсаций для срабатывания основанной на них модели горения. В этом случае можно провести расчёт с повторной инициализацией (рис. 38). Однако старт расчёта сразу с горением с поля начальных значений, полученных инициализацией иногда сопряжен с трудностями вычислительного плана: задача «разваливается» вследствие слишком больших градиентов параметров. Именно поэтому расчёты с горением являются наиболее сложными как в методическом, так и вычислительном плане.

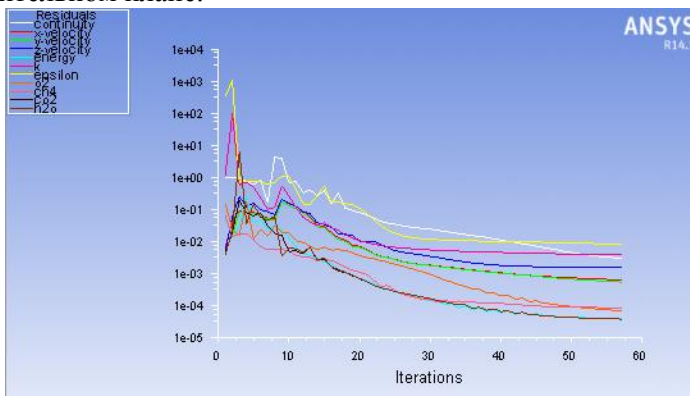


Рис. 37 – Картина невязок при решении задачи горения с повторной инициализацией

Шаг 6. После сведения задачи по аналогии с шагами 16-17 предыдущего раздела выполняется анализ результатов - получение картин распределения параметров: концентраций всех компонентов, а также температуры (рис. 38).

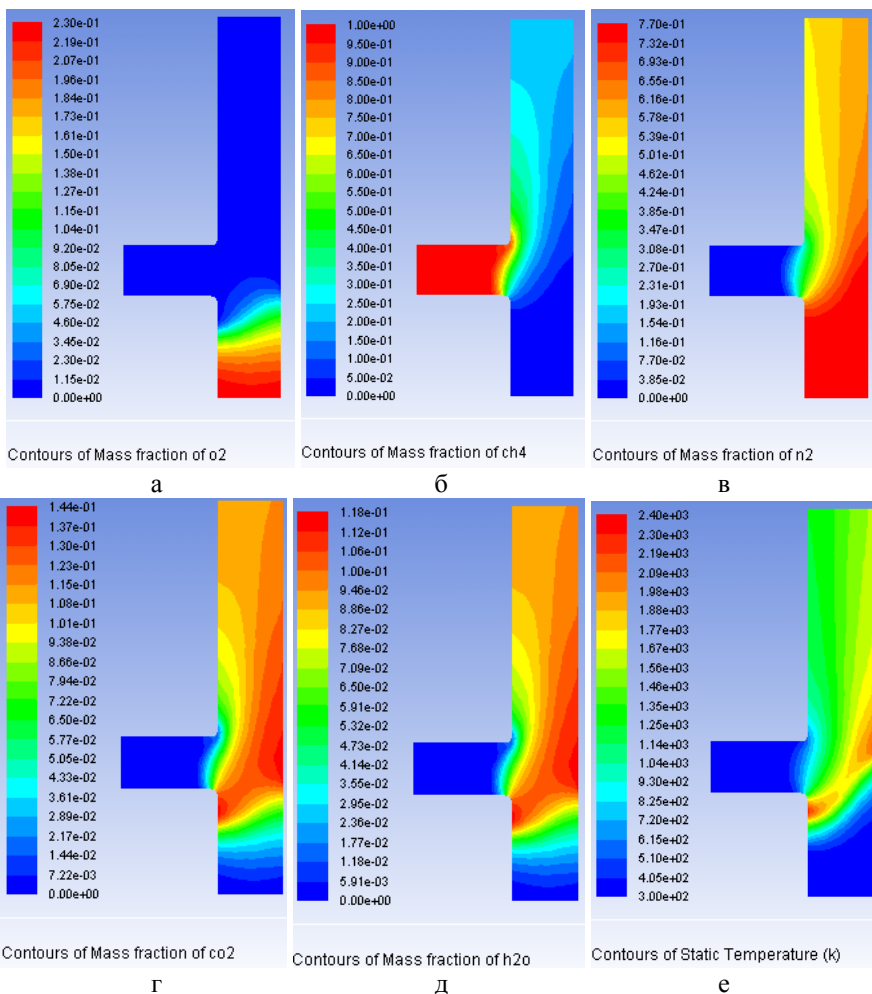
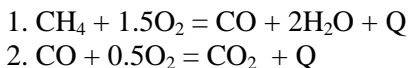


Рис. 38 – Просмотр полей концентраций: а - кислорода, б - метана
в - азота; г - диоксида углерода, д - водяного пара, е - поле температур

Сравнивая картины с горением и без (см. рис. 32), можно видеть, что в случае с горением кислород быстро выгорает, и к концу расчётной зоны его концентрация бесконечно мала. Что же касается метана, то он выгорает частично и движется к выходу из расчётной зоны, сохраняя массовую долю $\sim 25\%$. Азот и в том, и в другом случае

сохраняется до конца расчётной зоны, но в случае с горением он сильнее перемешивается с остальными компонентами потока. Продукты сгорания - водяной пар и диоксид углерода появляются в середине расчётной зоны в ходе химической реакции в соответствующих долях. При рассмотрении поля температур, видно, что температура выхода составляет ~1300К, а также присутствует локальный заброс температуры до 2600К. Такие повышенные температуры по сравнению с физическим экспериментом, вызваны применением простой модели горения, которая предполагает бесконечную скорость химических реакций, что вызывает ложную повышенную интенсивность процесса горения.

Для устранения этой ошибки можно использовать модель *Finite-Rate*, учитывающую время пребывания компонентов в расчётной зоне. Также для получения более точных результатов желательно задавать развёрнутую химическую кинетику. Так, например, реакция горения метана более точно может быть представлена в два действия:



Для задания реакций может быть использована база данных Fluent по реагирующим компонентам.

Шаг 6. Выполняя действия, аналогичные предыдущим шагам, открыть базу данных веществ Fluent (вкладка *Materials, Fluent Database*), выбрать тип вещества - *mixture* и выбрать из списка (рис. 39) нужную реагирующую смесь, например можно добавить в расчёт смесь для расчёта горения метана в воздухе в две стадии (*methane-air-2step*). Следует обратить внимание, что для данной смеси в базе имеются данные только для механизма *finite-rate*.

Шаг 7. Выбрать добавленную в расчёт смесь *methane-air-2step* в качестве основной для расчёта горения в меню *Models -> Species* (рис. 40). В этом же окне установить универсальный механизм расчёта реакций *Eddy Dissipation / Finite Rate*.

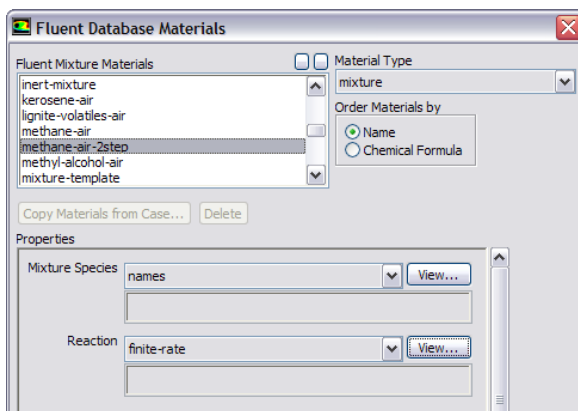


Рис. 39 – Импорт а расчёт свойств смеси для расчёта горения метана в воздухе в две стадии

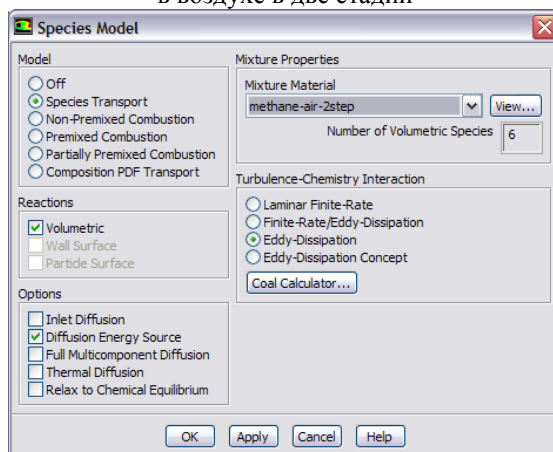


Рис. 40 – Выбор смеси *methane-air-2step* в качестве основной для расчёта и переключение механизма расчёта реакций

Шаг 8. После этого расчёт можно пересчитать, и получив результаты в виде распределения концентраций компонентов и температур и сравнить их с предыдущими.

Преподавателю

Лабораторная работа, выполняемая по данным методическим указаниям является четвертой в цикле «САЕ-системы в МЖГ», рассчитана на 4 часа и предполагается следующий порядок выполнения работы:

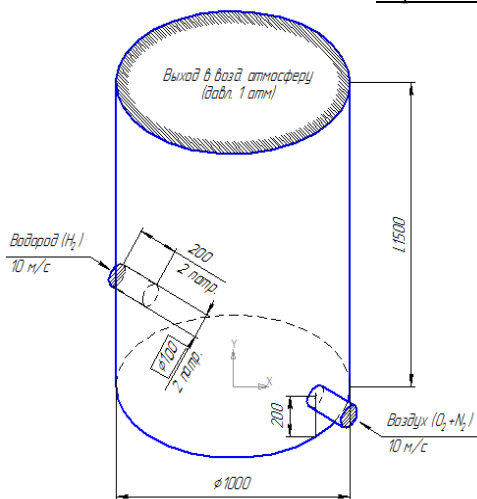
1. Преподавателем выполняется краткая лекция по моделированию горения в форме медиа-презентации: пояснение принципов расчёта газовых смесей неоднородного состава, включения в расчёт химических взаимодействий, моделирования горения и т.п. - 0,5 ак. часа;

2. Используя данные метод. указания студенты под руководством преподавателя выполняют решение задачи расчёта потока только со смешением, а затем со смешением и горением компонентов - 1,5 ак. часа;

3. Студенты самостоятельно выполняют индивидуальные задания по вариантам. По результатам выполнения самостоятельной работы преподаватель контролирует усвоение материала.

Индивидуальные задания

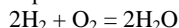
Вариант 1



Произвести расчёт смешения и горения компонентов в двух вариантах:

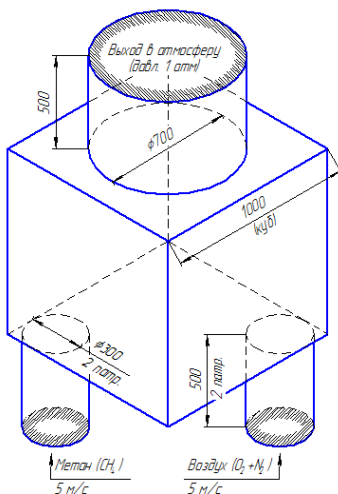
1. только смешение (без горения)
2. смешение и горение.

Для расчёта использовать реакцию горения:



Для каждого варианта отобразить поле концентраций всех компонентов смеси на плоскости симметрии, для варианта с горением дополнительно показать концентрации продуктов сгорания и температуры.

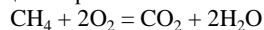
Вариант 2



Произвести расчёт смешения и горения компонентов в двух вариантах:

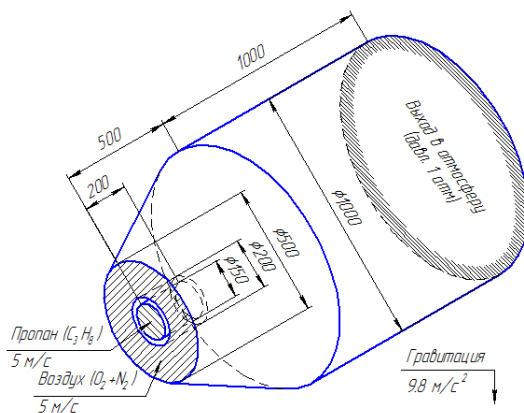
1. только смешение (без горения)
2. смешение и горение.

Для расчёта использовать реакцию горения:



Для каждого варианта отобразить поле концентраций всех компонентов смеси на плоскости симметрии, для варианта с горением дополнительно показать концентрации продуктов сгорания и температуры.

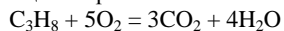
Вариант 3



Произвести расчёт смешения и горения компонентов в двух вариантах:

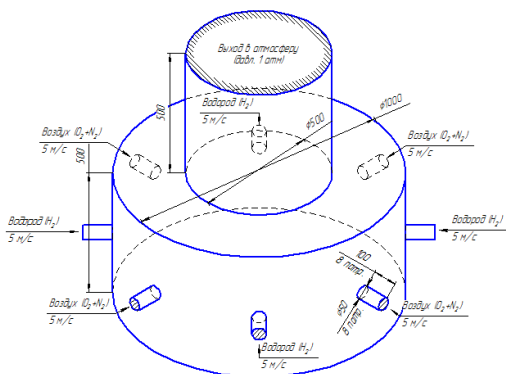
1. только смешение (без горения)
2. смешение и горение.

Для расчёта использовать реакцию горения:



Для каждого варианта отобразить поле концентраций всех компонентов смеси на плоскости симметрии, для варианта с горением дополнительно показать концентрации продуктов сгорания и температуры.

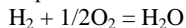
Вариант 4



Произвести расчёт смешения и горения компонентов в двух вариантах:

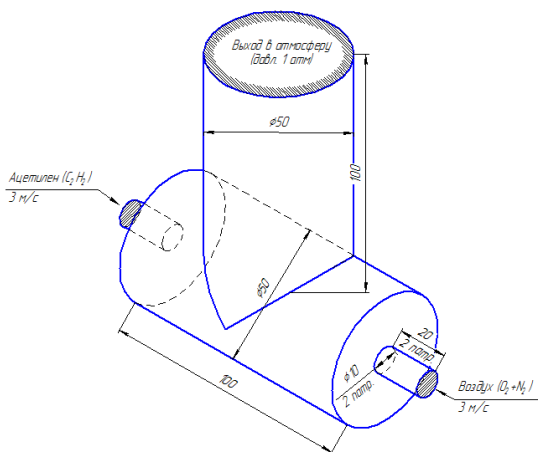
1. только смешение (без горения)
2. смешение и горение.

Для расчёта использовать реакцию горения:



Для каждого варианта отобразить поле концентраций всех компонентов смеси на двух плоскостях симметрии, одна из которых проходит через вход воздуха, другая - через вход водорода. Для варианта с горением дополнительно показать концентрации продуктов сгорания и температуры.

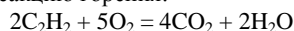
Вариант 5



Произвести расчёт смешения и горения компонентов в двух вариантах:

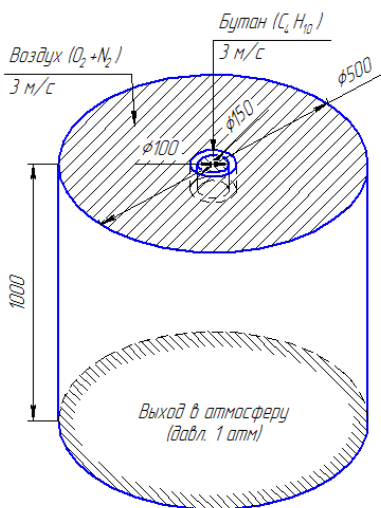
1. только смешение (без горения)
2. смешение и горение.

Для расчёта использовать реакцию горения:



Для каждого варианта отобразить поле концентраций всех компонентов смеси на плоскости симметрии, для варианта с горением дополнительно показать концентрации продуктов сгорания и температуры.

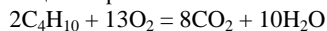
Вариант 6



Произвести расчёт смешения и горения компонентов в двух вариантах:

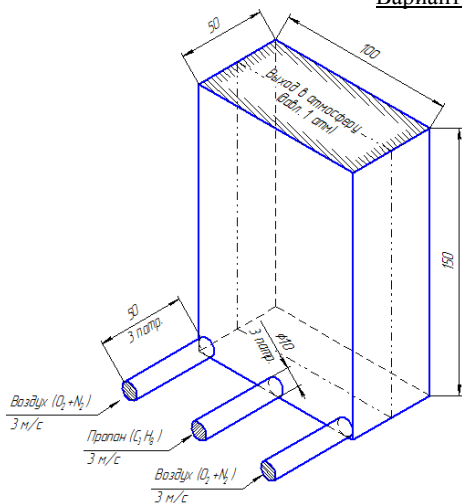
1. только смешение (без горения)
2. смешение и горение.

Для расчёта использовать реакцию горения:



Для каждого варианта отобразить поле концентраций всех компонентов смеси на плоскости симметрии, для варианта с горением дополнительно показать концентрации продуктов сгорания и температуры

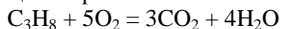
Вариант 7



Произвести расчёт смешения и горения компонентов в двух вариантах:

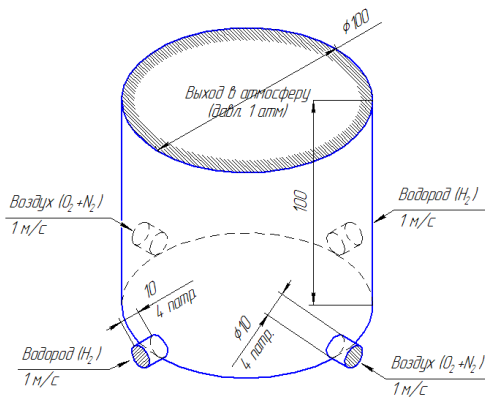
1. только смешение (без горения)
2. смешение и горение.

Для расчёта использовать реакцию горения:



Для каждого варианта отобразить поле концентраций всех компонентов смеси на указанной плоскости, для варианта с горением дополнительно показать концентрации продуктов сгорания и температуры.

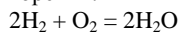
Вариант 8



Произвести расчёт смешения и горения компонентов в двух вариантах:

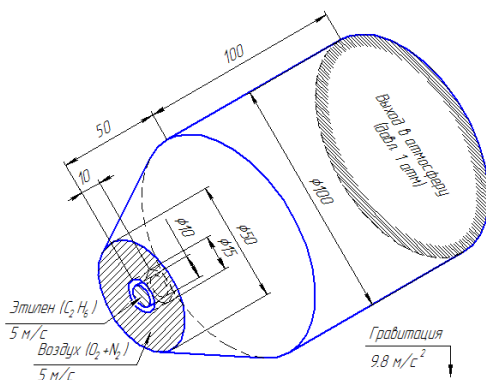
1. только смешение (без горения)
2. смешение и горение.

Для расчёта использовать реакцию горения:



Для каждого варианта отобразить поле концентраций всех компонентов смеси на двух плоскостях симметрии, проходящих через входные патрубки. Для варианта с горением дополнительно показать концентрации продуктов сгорания и температуры.

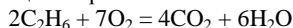
Вариант 9



Произвести расчёт смешения и горения компонентов в двух вариантах:

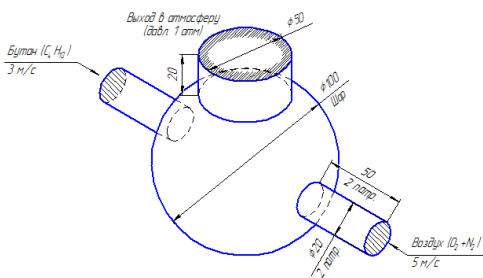
1. только смешение (без горения)
2. смешение и горение.

Для расчёта использовать реакцию горения:



Для каждого варианта отобразить поле концентраций всех компонентов смеси на плоскости симметрии, для варианта с горением дополнительно показать концентрации продуктов сгорания и температуры.

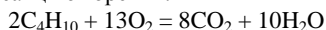
Вариант 10



Произвести расчёт смешения и горения компонентов в двух вариантах:

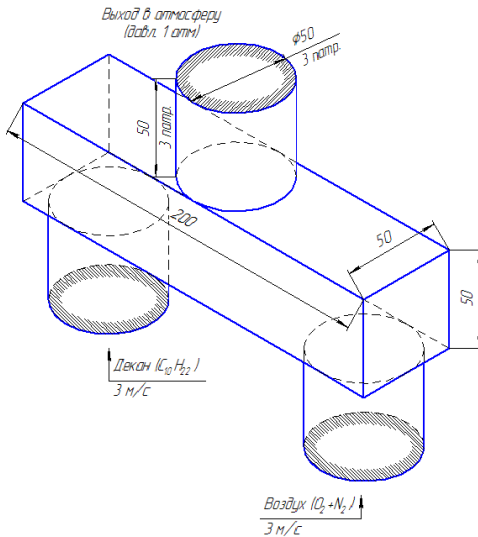
1. только смешение (без горения)
2. смешение и горение.

Для расчёта использовать реакцию горения:



Для каждого варианта отобразить поле концентраций всех компонентов смеси на плоскости симметрии, для варианта с горением дополнительно показать концентрации продуктов сгорания и температуры.

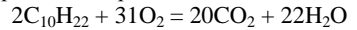
Вариант 11



Произвести расчёт смешения и горения компонентов в двух вариантах:

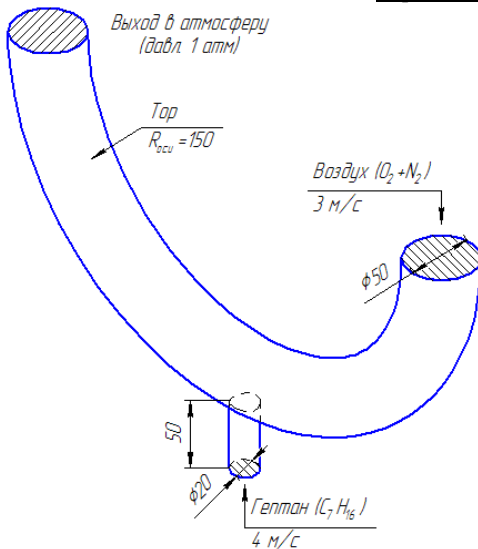
1. только смешение (без горения)
2. смешение и горение.

Для расчёта использовать реакцию горения:



Для каждого варианта отобразить поле концентраций всех компонентов смеси на плоскости симметрии, для варианта с горением дополнительно показать концентрации продуктов сгорания и температуры.

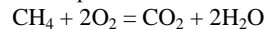
Вариант 12



Произвести расчёт смешения и горения компонентов в двух вариантах:

1. только смешение (без горения)
2. смешение и горение.

Для расчёта использовать реакцию горения:



Для каждого варианта отобразить поле концентраций всех компонентов смеси на плоскости симметрии, для варианта с горением дополнительно показать концентрации продуктов сгорания и температуры.

