

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)

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ГАЗА ПРИ ВТЕКАНИИ С ПОМОЩЬЮ САЕ-СИСТЕМ

Электронные методические указания
к лабораторной работе

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 160700.2 - Двигатели летательных аппаратов со сквозной документацией и создание исследовательских лабораторных работ и прогрессивных технологий лекционных занятий»

Соглашение № 1/4 от 3 июня 2013 г.

С А М А Р А

2013

УДК 621.03

О-624

Составители: **Бирюк Владимир Васильевич**
Благин Евгений Валерьевич
Горшкалёв Алексей Александрович
Матвеев Сергей Геннадьевич
Довгялло Александр Иванович

Рецензент: д-р техн. наук, проф. каф. теории двигателей летательных аппаратов В.Н. Матвеев

Определение параметров газа при втекании с помощью CAE-систем [Электронный ресурс] : электрон. метод. указания к лаб. работе / Минобрнауки России, Самар. гос. аэрокосм. ун-т им. С. П. Королева (нац. исслед. ун-т); сост. В. В. Бирюк, Е. В. Благин, А. А. Горшкалев, С. Г. Матвеев, Д. А. Угланов; - Электрон. текстовые и граф. дан. (1,88 Мбайт). - Самара, 2013. – 1 эл. опт. диск (CD-ROM)

В электронных методических указаниях показаны особенности использования программного пакета «ANSYS Fluent» для моделирования нестационарных процессов в рамках лабораторного практикума по курсу «Термодинамика».

Электронные методические указания предназначены для подготовки специалистов по специальности 160700.65 «Проектирование авиационных и ракетных двигателей», изучающих дисциплину «Термодинамика» в 3 семестре, бакалавров по направлению 141100.62 «Энергетическое машиностроение», изучающих дисциплину «Термодинамика» в 3 семестре, бакалавров по направлению 151900.62 «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств», изучающих дисциплину «Термодинамика» в 3 семестре.

Подготовлено на кафедре теплотехники и тепловых двигателей

© Самарский государственный
аэрокосмический университет 2013

СОДЕРЖАНИЕ

1 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭКСПЕРИМЕНТА.....	4
1.1 Описание лабораторной установки	8
1.2 Порядок выполнения работы	10
1.3 Обработка результатов эксперимента (для всех вариантов опытов)	10
2 СОЗДАНИЕ РАСЧЕТНОЙ МОДЕЛИ.....	13
2.1 Запуск программы <i>ANSYS Gambit</i> и ее особенности.....	13
2.2 Задание имени модели	14
2.3 Назначение программы, в которой будет происходить решение рассматриваемой задачи	15
2.4 Построение базовых точек.	15
2.5 Построение контура резервуара.....	17
2.6 Построение поверхности	18
2.7 Построение дополнительных точек и линий ограничивающих поверхность «атмосферы».	19
2.8 Просмотр расчетной модели в виде твердого тела	19
2.9 Указание граничных поверхностей.	20
2.10 Задание параметров сгущения сетки.	22
2.11 Построение конечно-элементной сетки	22
2.12 Передача построенной расчетной модели во <i>ANSYS Fluent</i>	25
2.13 Сохранение модели <i>ANSYS Gambit</i>	25
2.14 Закрытие программы <i>ANSYS Gambit</i>	25
3 ЗАПУСК ПРОГРАММЫ ANSYS FLUENT И ЕЕ ОСОБЕННОСТИ	26
3.1 Загрузка расчетной модели, созданной в программе <i>ANSYS Gambit</i>	27
3.2 Проверка конечно-элементной сетки на наличие ошибок	28
3.3 Масштабирование конечно-элементной сетки.....	28
3.4 Просмотр конечно-элементной сетки.....	29
3.5 Задание опций решателя.	31
3.6 Учет в расчете уравнения энергии.....	32
3.7 Определение модели турбулентности	32
3.8 Задание свойств рабочего тела.	33
3.9 Задание справочного давления.....	34
3.10 Задание граничных условий	35
3.11 Задание проницаемости стенок.....	36
3.13 Установка начальных значений параметров.....	37
3.14 Настройка отображения процесса решения.....	38
3.15 Настройка процесса создания анимации.....	40
3.16 Сохранение расчетной модели	42
3.17. Запуск решения задачи	43
3.18. Сохранение анимации	44
3.19. Просмотр результатов расчета	44
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	46
СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ	47

1 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

В рассматриваемом процессе смешения газов при наполнении резервуара постоянного объема V , содержащего массу газа m_1 с известными параметрами состояния p_1, T_1, v_1 , вводится некоторое количество m_2 того же газа с параметрами p_2, v_2, T_2 .

Теоретическое и экспериментальное исследование такого процесса имеет большое практическое значение, так как позволяет определить параметры состояния смеси. Зная их, можно отыскивать важные характеристики процесса - массу газа, заполнившего резервуар, текущие параметры рабочего тела в наполняемой емкости, определяющие, в свою очередь, динамику процесса наполнения, а значит, и технологию наполнения.

Теоретическое решение задачи - определение температуры смеси газов - возможно на основе приложения первого начала термодинамики к исследованию типичного нестационарного процесса.

Для решения задачи воспользуемся аналитическим выражением первого начала термодинамики $Q = \Delta U + L$. Тогда исследуемый объект должен быть представлен в виде термодинамической системы (рис. 1), которая удовлетворяет двум обязательным требованиям:

- а) установлены границы системы;
- б) через границу термодинамической системы масса не переносится.

Количество тепла и работы, передаваемой через границы, контролируется, а сами границы в рассматриваемом процессе подвижны (полностью или частично). Для рассматриваемого случая это может быть резервуар из воображаемого мягкого непроницаемого материала, не имеющего массы и упругости (рисунок 1 а), или жесткий цилиндр с подвижным поршнем (рисунок 1 б).

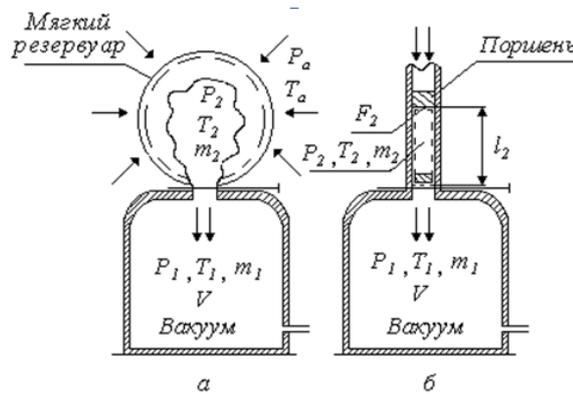


Рисунок 1.1 - Термодинамическая система процесса

Объем «мешка» или цилиндра равен такому объему газа, который в последующем опыте будет введен внутрь резервуара. Задача осложняется тем, что объем втекающего газа заранее неизвестен.

Примем в основу расчетов термодинамическую систему по схеме (рис 1 б). Здесь, в цилиндре длиной l_2 перемещается поршень с площадью F_2 . Перемещение поршня за некоторый промежуток времени на расстоянии l_2 обеспечивает втекание газа до тех пор, пока давление p_1 в резервуаре не станет равным p_2 . Процесс смешения газов в резервуаре протекает быстротечно, поэтому задача решается в предположении, что теплообмен между газом и внутренними поверхностями резервуара отсутствует. Таким образом, установка может рассматриваться как неравновесная адиабатическая термодинамическая система.

К приведенным замечаниям следует добавить, что передачу энергии в форме механической работы, совершаемой внешней средой, в данном случае можно рассматривать как процесс с малой степенью необратимости.

Действительно, в начальной стадии втекания воображаемым поршень движется с малыми скоростями, поэтому можно считать, что внешнее атмосферное давление p_a на поверхности поршня (внешняя граница системы) и внутреннее давление газа p_2 под поршнем практически равны друг другу. В заключительной фазе процесса давление в резервуаре увеличивается, скорость втекания газа уменьшается и скорость перемещения поршня замедляется, что тоже обеспечивает равенство $p_2 = p_a$, т. е, в течение всего процесса статическое

давление под поршнем сохраняется равным атмосферному и, следовательно, интересующая нас работа может быть определена как работа изобарного процесса, выражаемая отрицательной величиной, так как объем системы уменьшается:

$$-L_2 = F_2 l_2 p_2 = \nu_2 p_2 m_2. \quad (1)$$

В связи с тем, что объем резервуара постоянный, газ, втекающий в него, внешней работы не совершает. Ее можно рассматривать как работу, производимую над газом, содержащимся в резервуаре до смешения:

$$-L_2 = L.$$

В адиабатном процессе работа может быть получена только за счет уменьшения внутренней энергии системы:

$$L = (u_1 m_1 + u_2 m_2) - ut. \quad (2)$$

Здесь u_1 , u_2 и u - внутренняя энергия газа соответственно в резервуаре, под поршнем и после смешения, t - масса газовой смеси равна $(m_1 + m_2)$. Приравнивая правые части уравнений (1 и 2), получим

$$ut = u_1 m_1 + (u_2 + p_2 \nu_2) m_2$$

или

$$ut = u_1 m_1 + h_2 m_2.$$

Откуда

$$u = \frac{u_1 m_1 + h_2 m_2}{m_1 + m_2}. \quad (3)$$

Если известна масса m_2 , то нетрудно определить удельный объем смеси:

$$\nu = \frac{V}{m_1 + m_2}$$

и с помощью диаграммы состояния или по таблицам определить остальные параметры газовой смеси (p , T , S , h).

Для идеальных газов можно получить соотношение, чтобы рассчитать температуру газовой смеси по известным значениям p_1 , T_1 , p_2 и T_2 , используя известные зависимости:

$$u = c_v T \text{ и } h = c_p T.$$

Из уравнения (3) температура смеси газов равна

$$T = \frac{T_1 m_1 + k T_2 m_2}{m_1 + m_2}, \quad (4)$$

где $k = c_p / c_v$ — показатель изоэнтропы идеального газа.

Из выражения (4) следует интересный вывод, что при $m_1 = 0$, когда резервуар, например, отвакуумирован до очень малых значений p_1 , и происходит только втекание газа (без смешения), температура его в конце процесса будет равна

$$T = k T_a, \quad (5)$$

то есть, независимо от давления окружающей среды и размеров резервуара, абсолютная температура газа после втекания должна увеличиться в k раз.

Однако, вследствие того, что подвижная граница термодинамической системы выбрана нами произвольно, величину m_2 определить расчетным путем не представляется возможным, а измерять ее в условиях реальных процессов наполнения резервуаров сложно и нецелесообразно. В связи с этим, удобнее измерять параметры смеси T и p в конце процесса и по их значениям находить m_2 . Выражая величины m_1 и m_2 через параметры состояния по уравнению:

$$m = \frac{pV}{RT}, \quad (6)$$

несложно получить из соотношения (4) выражение для текущей температуры смеси в процессе наполнения резервуара:

$$T = \frac{kpT_1T_2}{T_1(p - p_1) + kp_1T_2}. \quad (7)$$

Величина подогрева газа, определенная из выражения (7), будет меньше вычисленной по соотношению (5). Физически это объясняется следующим образом: втекающая масса газа разогревается в k раз, но в процессе втекания в резервуаре она смешивается с оставшимся газом, имеющим более низкую температуру; в результате смешения образуется смесь с температурой $T < kT_a$.

Оценивая результаты разогрева газа в резервуаре в относительных величинах T/T_1 и p_1/p_2 для воздуха, получим, согласно (7) таблицу 1.1:

Таблица 1.1 - Отношение температур в зависимости от отношений давлений

p_1/p_a	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0
T/T_a	1,40	1,30	1,205	1,127	1,06	1,0

Следует отметить, что теоретический расчет велся при некоторых упрощающих допущениях, поэтому неизбежны разногласия в расчетных и последующих экспериментальных результатах.

Например, в связи с тем, что температурный эффект подогрева является значительным, в процессе заполнения между газом и стенками резервуара будет иметь место теплообмен, и фактический процесс не будет адиабатным, а величина регистрируемого подогрева будет ниже. Учесть количество тепла, переданного газом стенке резервуара, можно на основе весьма сложных аналитических соотношений, что не входит в задачу лабораторной работы.

1.1 Описание лабораторной установки

Для реализации процесса наполнения резервуара однородным газом в лабораторных условиях применяется установка, представленная на рисунке 1.2, в которой воздух из окружающей среды и при её параметрах вытекает в предварительно отвакуумированный резервуар после открытия впускного крана.

Таким образом, осуществляется рассмотренная выше схема термодинамической системы при давлениях не выше атмосферного.

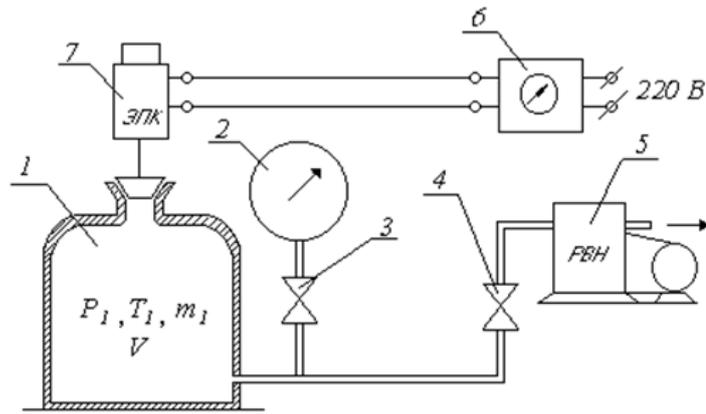


Рисунок 1.2 - Схема установки

Установка содержит резервуар *1* объемом $V = 30$ литров, соединенный трубопроводом через запорный вентиль *4* с вакуум-насосом *5* и через вентиль *3*, либо с мановакуумметром *2*.

На горловине резервуара установлен атмосферный кран - нормально закрытый электропневмоклапан *7*. Он открывается для впуска атмосферного воздуха с помощью экспозиметра *б*. Экспозиметр необходим для регулировки продолжительности открытого положения крана в пределах от 0,2 до 10 с. Это время установлено при осциллографировании процесса и определяется равенством давлений $p_2 - p_a$ при наполнении.

Так как процесс выравнивания давления в резервуаре при открытом кране *7* протекает очень быстро, применение каких-либо термометрических приборов невозможно из-за их термической инерции. Поэтому для измерения температуры газа в резервуаре в качестве газового термометра используется сама емкость. В этом случае температура определяется с помощью мановакуумметра *2*. Монтаж вентилях трубопроводов и других приборов осуществлен из лабораторном столе. Давление в расчетах применяем абсолютным:

$$P_{абс} = P_a \pm P_{изм}.$$

1.2 Порядок выполнения работы

1. Для записи показаний приборов и результатов вычислений заготавливается протокол эксперимента (Таблица 2).

2. Измерить давление p_a и температуру T_a воздуха в помещении лаборатории. Значения этих параметров соответствуют $p_a = p_2$ и $T_a = T_2$.

3. Включить вакуумнасос 5 и, открыв вентили 3 и 4, отвакуумировать резервуар до первого заданного варианта $p_{1\text{ абс}}$ по вакууметру 2.

4. Перекрыть вентили 3 и 4 и выдержать установку 30 секунд для термостабилизации и проверки герметичности.

5. Нажать кнопку на экспозиметре 6 для впуска воздуха в резервуар (время открытия клапана задается преподавателем). Впускной клапан 6 закрывается автоматически.

6. Открыть вентиль 3 для измерения перепада давления в резервуаре $p_{к\text{ абс}}$.

7. Повторить пункты 3, 4, 5, 6 для каждого следующего варианта $p_{1\text{ абс}}$.

8. Выключить вакуумнасос.

9. Результаты измерений всех вариантов записать в протокол.

1.3 Обработка результатов эксперимента (для всех вариантов опытов)

1. По формуле (7) рассчитать теоретическую температуру подогрева газа в резервуаре.

2. Рассчитать относительную степень вакуумирования (p_1/p_a).

3. По формуле (7) рассчитать фактическое значение температуры подогрева газа в резервуаре.

Указание. Так как для измерения температуры используется сам резервуар (как газовый термометр), руководствуемся следующими соображениями: в момент закрытия клапана давление в резервуаре равно атмосферному; остывание воздуха в условиях $V = \text{const}$ приводит к падению давления воздуха в резервуаре, что регистрировалось пьезометром

величиной $p_{к\text{ абс}}$; следовательно, используя уравнение состояния для момента закрытия:

$$p_a V = mRT_{\text{факт}},$$

и для условий выравнивания температуры газа и стенок резервуара:

$$p_k V = mRT_a$$

и, разделив первое выражение на второе, получим относительную величину подогрева газа:

$$\frac{T_{\text{факт}}}{T_a} = \frac{p_a}{p_k}.$$

(8)

4. По формуле (8) вычислить относительную температуру подогрева.

5. Построить теоретическую и экспериментальную зависимость относительной величины подогрева от относительной степени вакуумирования резервуара.

6. Вычислить массу газа: m_1 , m_2 , m , используя выражение (6).

7. Найти относительное расхождение экспериментальных и расчетных данных по соотношению:

$$\delta T = \frac{\left(\frac{T}{T_a}\right) - \left(\frac{T_{\text{факт}}}{T_a}\right)}{\left(\frac{T}{T_a}\right)} \cdot 100\%.$$

Цель работы: ознакомление с термодинамическими основами процесса смешения газов при наполнении резервуара.

Рабочая модель установки для данной лабораторной работы представляет собой резервуар, который подсоединен к трубопроводу общей вакуумной системы. Поток воздуха движется за счет перепада давления между атмосферным давлением P_n на входе в резервуар и пониженным давлением P_{np} , создаваемым вакуум-насосом за соплом.

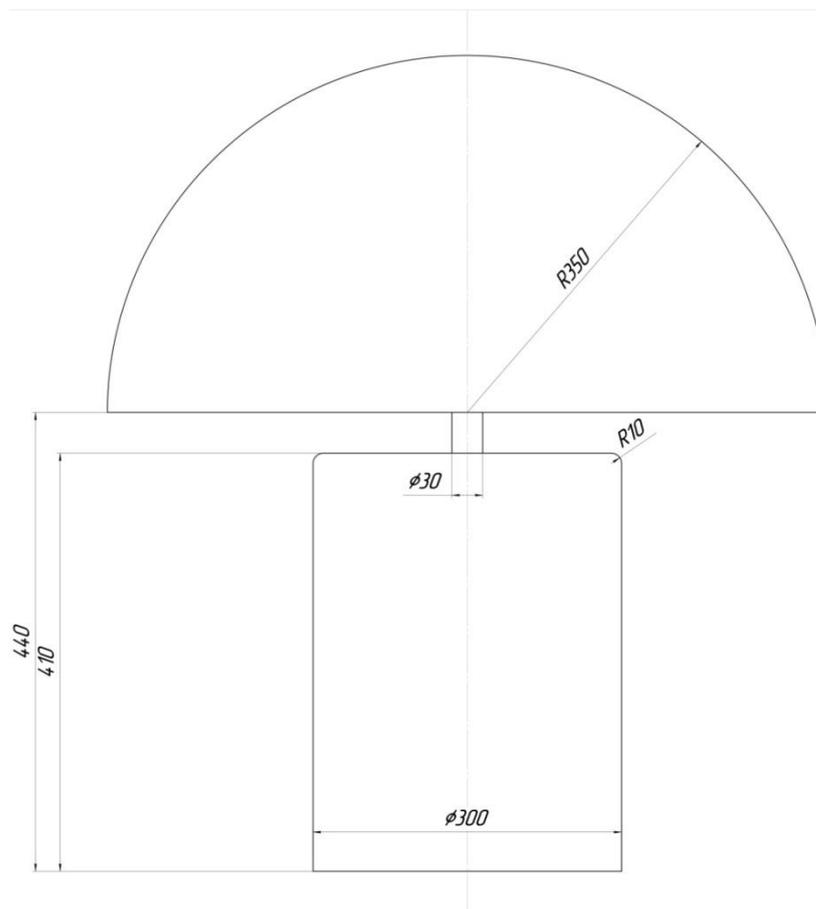


Рисунок 1.3 - Расчетная модель

Таблица 1 - Координаты точек исследуемой модели

$X, мм$	$Y, мм$
0	0
300	0
165	410
135	410

<i>10</i>	<i>410</i>
<i>10</i>	<i>400</i>
<i>135</i>	<i>440</i>
<i>165</i>	<i>440</i>
<i>290</i>	<i>410</i>
<i>290</i>	<i>400</i>
<i>300</i>	<i>400</i>
<i>0</i>	<i>400</i>
<i>-200</i>	<i>440</i>
<i>500</i>	<i>440</i>
<i>150</i>	<i>800</i>

2 СОЗДАНИЕ РАСЧЕТНОЙ МОДЕЛИ

2.1 Запуск программы *ANSYS Gambit* и ее особенности

Построение расчетной модели производится в программе *ANSYS Gambit*. Ее запуск осуществляется нажатием на соответствующий ярлык на рабочем столе или из меню «Пуск» ОС «Windows»:

Пуск → *Все программы* → *Fluent Inc Products* → *Gambit 2.4.6* → *Gambit 2.4.6*

В результате этого действия появится окно, изображенное на рисунке 2.2.

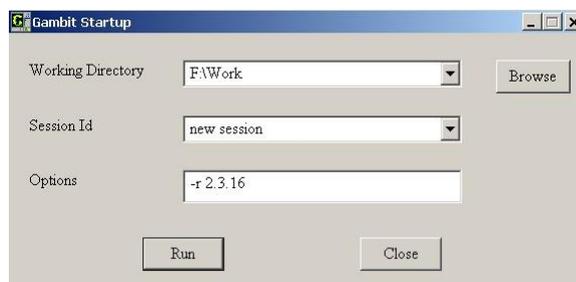


Рисунок 2.2 - Стартовое окно программы *ANSYS Gambit*

В нем в поле *Working Directory* необходимо выбрать папку, в которой будут сохраняться модели в данной сессии. После этого следует нажать кнопку *Run*. Это приведет к появлению окна программы *ANSYS Gambit*. Оно показано на рисунке 2.3:

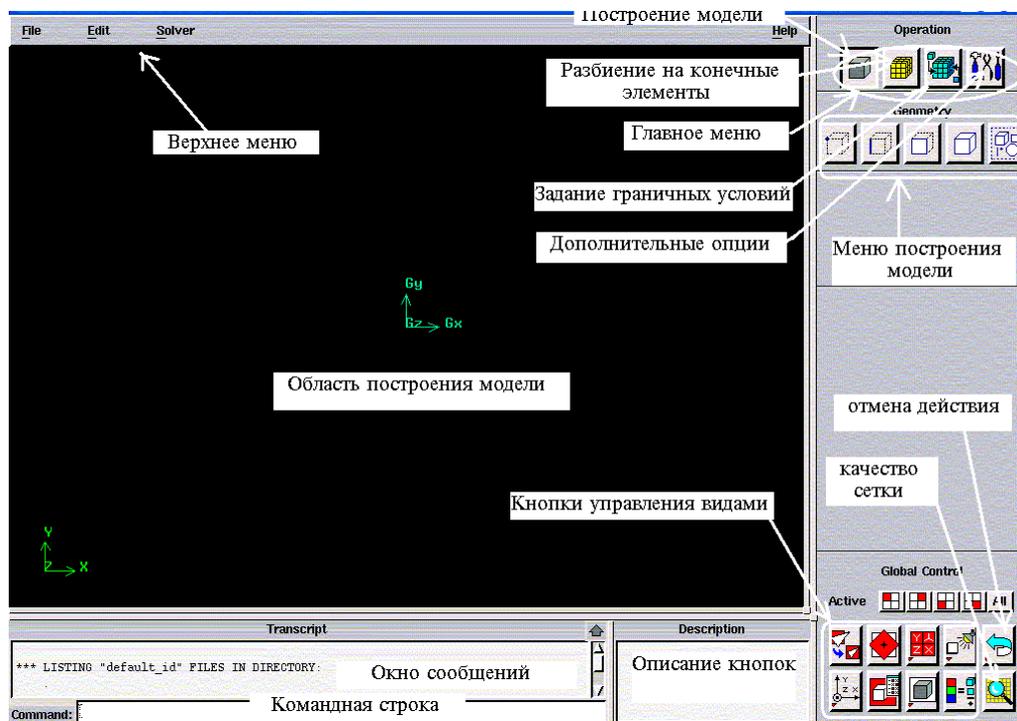


Рисунок 2.3 - Окно программы *ANSYS Gambit*

2.2 Задание имени модели

Для определения имени модели в верхнем меню нужно выбрать следующие пункты:

BM: File → New.

Появится диалоговое окно, изображенное на рисунке 2.4:

- в графе *ID* вводится имя модели;
- ввод имени подтверждается нажатием кнопки *Accept*.

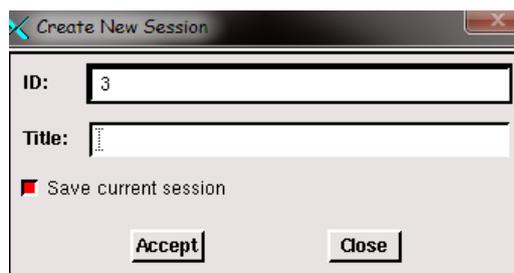


Рисунок 2.4 - Меню создания новых моделей (*File → New*)

После этого действия появится окно уточняющее, согласен ли пользователь сохранить предыдущую сессию. В нем следует нажать кнопку *Yes*. После этого в верхнем левом углу окна программы появится выбранное имя модели.

2.3 Назначение программы, в которой будет происходить решение рассматриваемой задачи

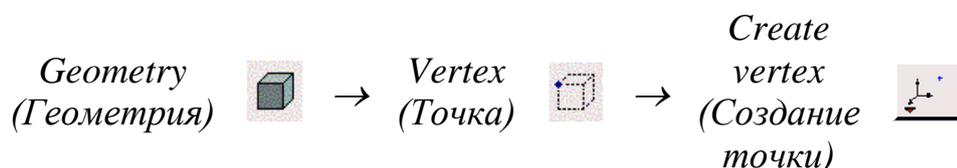
От выбора расчётной программы зависит набор доступных граничных условий. В данной лабораторной работе расчет характеристик будет происходить в программе *ANSYS Fluent*. Поэтому в верхнем меню следует выбрать:

BM: Solver → Fluent 5/6.

На первом этапе построения модели будут построены точки контура установки, известные из схемы. Затем на их базе будут получены границы расчетной области с помощью отрезков и окружности, которые станут основой для создания поверхностей двумерной расчетной модели.

2.4 Построение базовых точек.

Меню построения точек по координатам (рисунок 2.5) вызывается в главном меню с помощью команды:



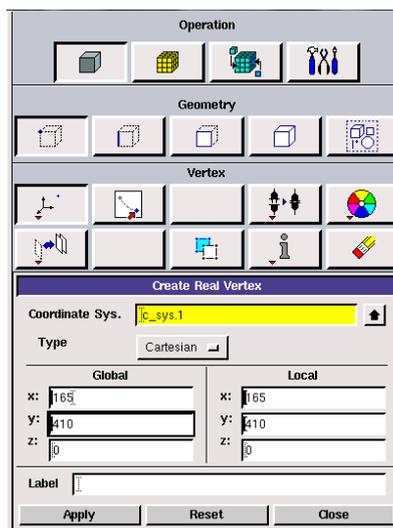


Рисунок 2.5- Меню построения точек по координатам

В появившемся меню в поле *Global* (в глобальной системе координат) следует ввести координату требуемой точки, например (165; 410; 0). Подтверждается построение точки нажатием кнопки «Apply». Аналогичным образом следует ввести все точки из таблицы координат модели.

В случае совершения ошибки, действие можно отменить с помощью кнопки  («отмена»). Увидеть все построенные точки можно с помощью кнопки  («вписать в экран»). Результат построения изображен на рисунке 2.6:

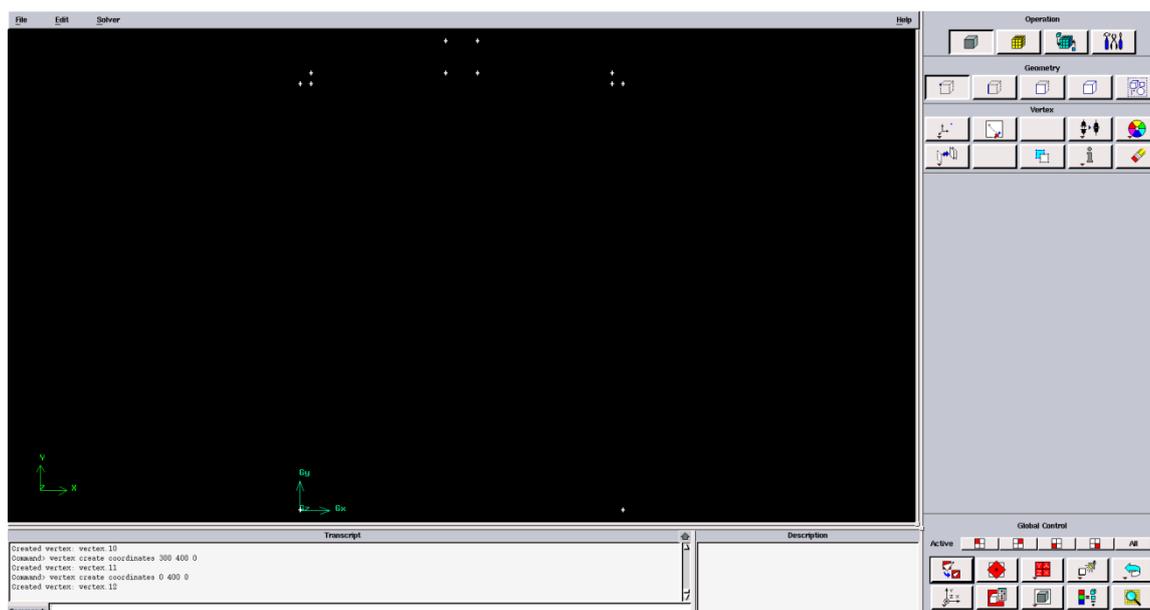
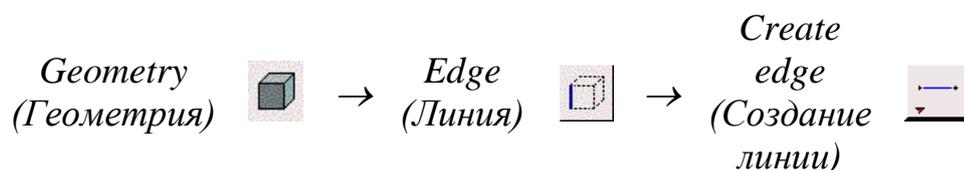


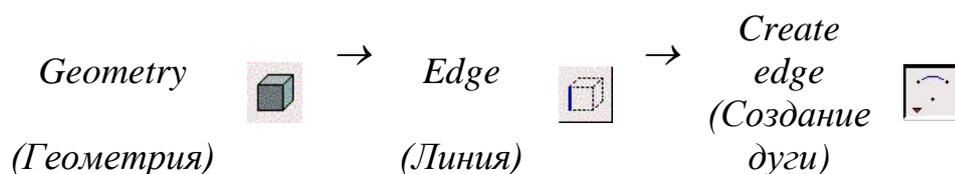
Рисунок 2.6 - Построенные базовые точки резервуара

2.5 Построение контура резервуара

Контур резервуара образован двумя дугами и восемью отрезками. Начинать построения удобно с отрезков. Для этого нужно вызвать соответствующее меню командой:



Для построения контура необходимо с помощью левой клавиши мыши и нажатой клавишей *Shift* выбрать соответствующие точки которые необходимо соединить. Для принятия действия нужно нажать кнопку «*Apply*». Результат действия показан на рисунке 2.7. Следующим этапом строятся дуги, образующие кромки профиля. Для этого нужно вызвать меню построения дуг.



Примечание: По умолчанию кнопка  скрыта, получить доступ к ней, а также к другим кнопкам меню построения линий можно щелкнув правой клавишей мыши на левой кнопке в верхнем ряду в подменю *Edge*.

В этом меню нужно выполнить следующие действия:

- в графе *Method* нужно выбрать метод построения (по центру и двум точкам);
- в поле *Center* выбрать центр окружности;
- в поле *End-points* выбрать концы построенных отрезков;
- поле *Arc* оставить без изменений;
- запустить команду с помощью кнопки «*Apply*».

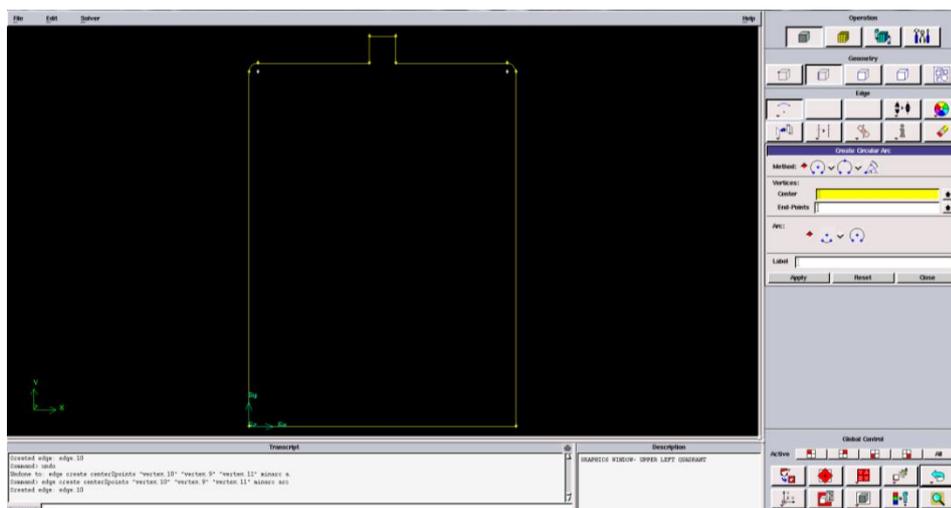
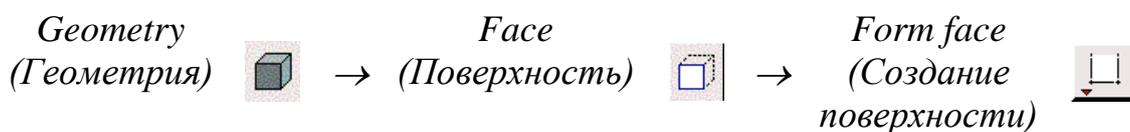


Рисунок 2.7 - Контур резервуара

2.6 Построение поверхности

Основой для построения конечно-элементной сетки двухмерной модели является поверхность. Она строится с помощью меню построения поверхности (рисунке 2.8):



В появившемся меню необходимо поставить курсор в окно *Edges* и с помощью мыши выбрать линии, образующие замкнутый контур резервуара. Для построения поверхности следует нажать кнопку «Apply». В результате линии контура модели поменяют цвет.

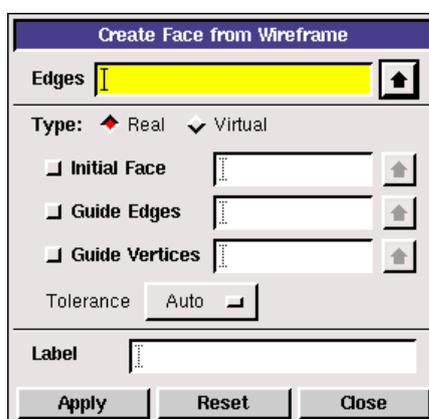


Рисунок 2.8 - Меню построения поверхности по линии

2.7 Построение дополнительных точек и линий ограничивающих поверхность «атмосферы».

Таблица 2 - Координаты точек поверхность «атмосферы»

<i>X, мм</i>	<i>Y, мм</i>
-200	440
500	440
135	440
165	440
150	800
135	410
165	410
165	410
135	410

Построение точек, линий и поверхности производится аналогично пунктам 2.4-2.6

2.8 Просмотр расчетной модели в виде твердого тела

Для того чтобы убедиться, что операция построения поверхностей или объемов прошла удачно, необходимо скрыть невидимые линии. Для этого нужно нажать кнопку  в меню управления видами.

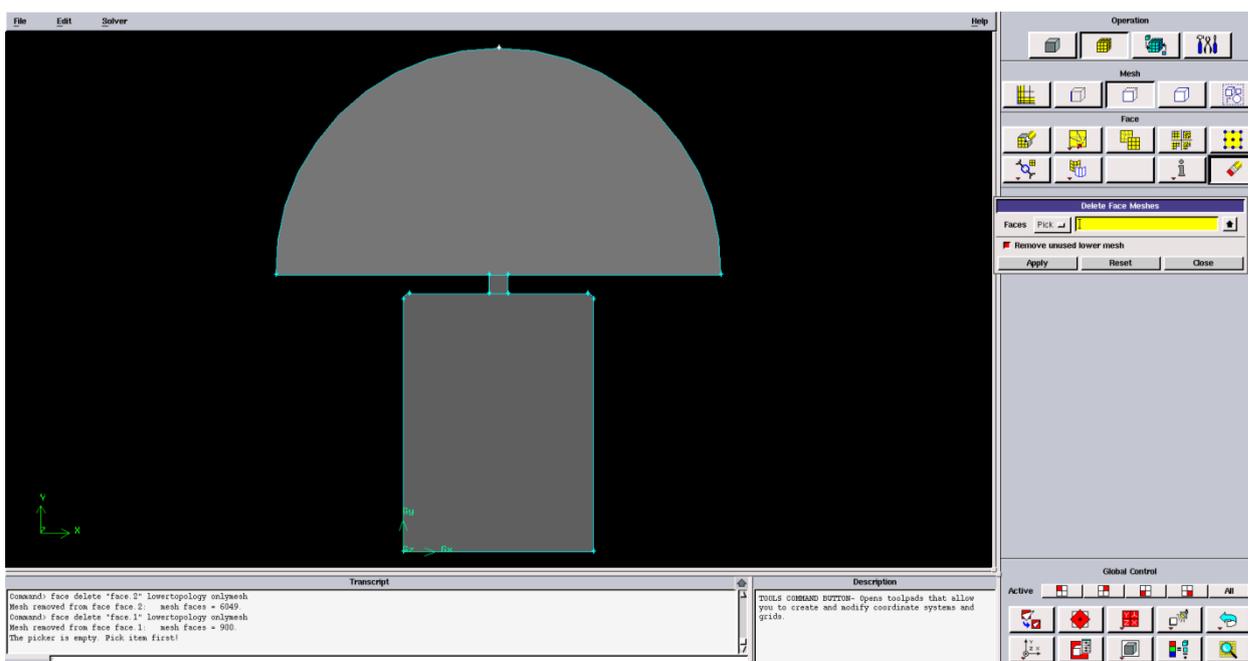


Рисунок 2.9 – Результат построения полной расчетной модели

2.9 Указание граничных поверхностей.

В программе *ANSYS Gambit* осуществляется предварительное указание линий и поверхностей расчетной области, к которым будут приложены граничные условия. Численные значения граничных условий задаются в программе *ANSYS Fluent*. Поверхности, которые не будут указаны как граничные, по умолчанию считаются стенками (*Wall*) и к ним применяется соответствующее граничное условие. Указанный в программе *ANSYS Gambit* тип граничного условия в случае ошибок или изменения стратегии решения можно поменять во *ANSYS Fluent*.

Для входа в меню задания граничных условий (рисунок 2.10) следует нажать следующие кнопки в главном меню:

Zones  → *Specify Boundary Types* 
(зоны) (Задать тип граничных условий)

Для определения входной границы в нем необходимо произвести следующие действия:

- В поле *Action* необходимо нажать кнопку *Add*. Это действие укажет на то, что будет задана новая граничная поверхность.
- В графе *Name* можно задать наименование граничного условия латинскими буквами. Если поле оставить пустым, то имя будет назначено автоматически в соответствии с типом граничного условия.
- Нажать кнопки *Show labels* и *Show colors*. В результате в окне построения созданные граничные условия будут подписываться и выделяться цветом.
- Щелкнуть мышью по кнопке *Type*. В результате откроется доступ к списку доступных граничных условий. Содержание списка зависит от расчетной программы, которая была выбрана в начале построения модели. Для задания входного граничного условия нужно выбрать *pressure inlet* (давление на входе).

- Поскольку решаемая задача двухмерная, то граничные условия будут задаваться на линиях. Для того, чтобы определить это, необходимо щелкнуть мышью на кнопке в области *Entity* и в появившемся списке выбрать *Edge*.
- Поставить курсор в поле напротив кнопки *Edge* и с помощью мыши выбрать входную границу расчетной области. Если произошла ошибка, то удалить линию из списка можно, нажав кнопку *Remove*.
- Выбранные настройки границы подтверждаются нажатием кнопки «*Apply*».

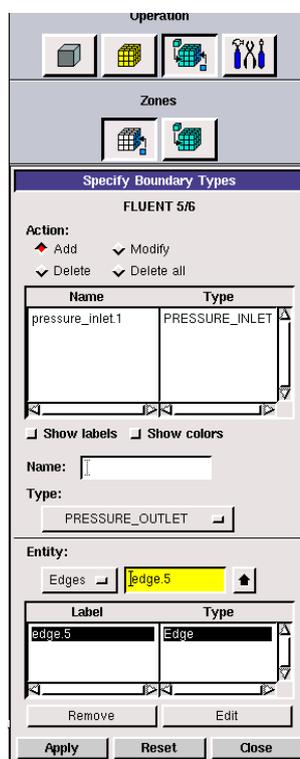
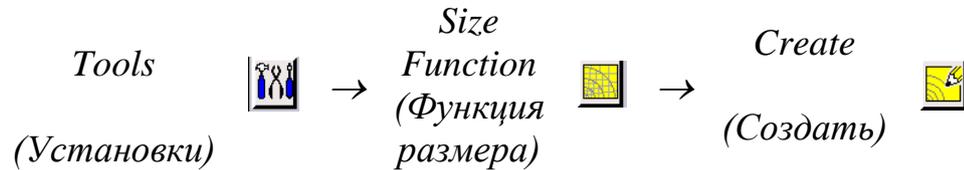


Рисунок 2.10 – Меню задания граничных условий

Линии объединяющие горловину и баллон, «атмосферу» и горловину задаются как INTERFACE.

2.10 Задание параметров сгущения сетки.

Для совершения корректного расчета сетку необходимо сгущать в местах перехода от более мелкой к более крупной сетке, в данном расчете это переход от атмосферы к горловине и от горловины к баллону.



В меню *Create Size Function* необходимо ввести параметры сгущения. В окне *Source* выбирается *Edges* (линия), в окне *Attachment* выбирается *Faces* (поверхность), начальный размер элемента равен 1 мм, коэффициент роста элемента 1,05 и максимальный размер элемента 5 мм

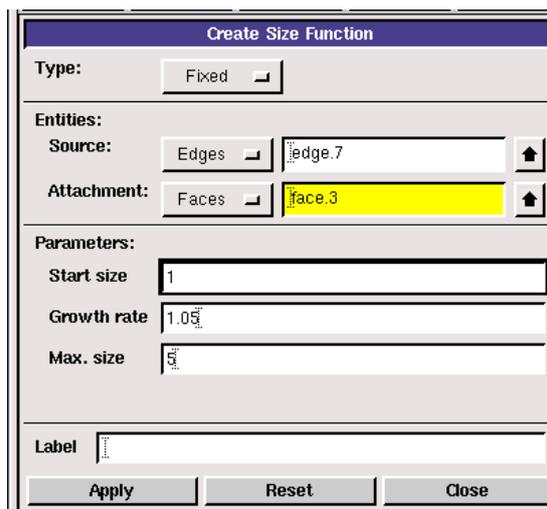


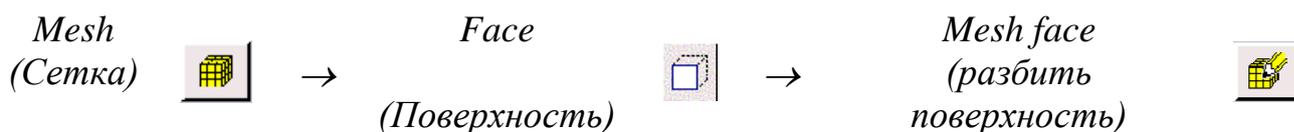
Рисунок 2.11- Меню задания сгущения конечно-элементной сетки

2.11 Построение конечно-элементной сетки

В программном комплексе *ANSYS Fluent* есть возможность разбивать расчетную область как на четырехугольные, так и на треугольные элементы. Конечно-элементная сетка может быть структурированной или неструктурированной (сетка на базе треугольных элементов только неструктурированная). Структурированная сетка позволяет получать более

точные решения, однако она сложнее в построении, особенно для моделей со сложной пространственной формой. Время построения такой сетки может достигать 80% времени работы над задачей. Неструктурированное разбиение проводится легко, однако за это приходится платить ухудшением точности расчета.

Разбиение поверхности горловины осуществляется с помощью команды:



В результате появится меню. В нем следует провести следующие манипуляции. В поле *Face* надо выбрать поверхность, которая будут разбиваться.

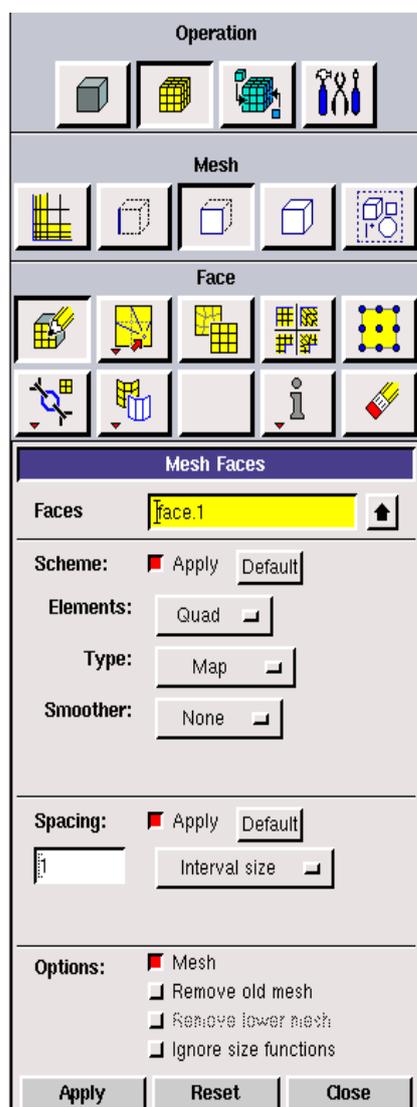


Рисунок 2.12 - Меню разбиения поверхности

- В поле *Elements* выбирается тип конечного элемента *Quad* (четырёхугольный), *Tri* (треугольный) или *Quad/Tri* (смешанный).
- В поле *Type* выбирается схема, по которой производится разбиение. Схемы *Submap*, *Map* используются для структурированной сетки, схема *Pave* – для неструктурированной. При решении рассматриваемой задачи следует оставить схему выбранную по умолчанию (схему *Map*).
- В поле *Spacing* (рисунок 2.12) вводится требуемый размер конечного элемента (например, 1 мм).

Для построения конечно-элементной сетки с выбранными параметрами нужно нажать кнопку «*Apply*».

Поверхность «атмосферы» и баллона разбиваются не структурированной сеткой, тип конечного элемента *Tri* (треугольный) с размером конечного элемента 5 мм.

2.12 Передача построенной расчетной модели во *ANSYS Fluent*

Для экспорта созданной модели в верхнем меню нужно выбрать следующие пункты:

BM: File → Export → Mesh.

В появившемся окне нужно ввести имя файла обмена. По умолчанию оно совпадает с именем файла модели (например, *Vtekanie.msh*). С помощью кнопки *Browse* можно выбрать место, где файл необходимо сохранить. Поскольку расчетная модель двухмерная, то обязательно следует нажать кнопку *Export 2D (X-Y) Mesh*. Запись файла обмена подтверждается нажатием кнопки *Accept*. Если файл обмена был успешно записан, то в окне сообщений появится надпись *Mesh was successfully written to <имя файла>.msh*.

В указанном месте появится файл *<имя файла>.msh*.

2.13 Сохранение модели *ANSYS Gambit*

Сохранение модели *ANSYS Gambit* для редактирования или каких-то других действий производится с помощью команды:

BM: File → Save.

2.14 Закрытие программы *ANSYS Gambit*

Закрытие программы *ANSYS Gambit* осуществляется командой:

BM: File → Exit.

Перед закрытием программы появится окно, предлагающее сохранить модель. Для того чтобы это сделать, нужно нажать *Yes*. В противном случае нужно нажать *No*.

Закрытие окна программы стандартным образом в ОС «Windows» с помощью крестика в правом верхнем углу не всегда проходит корректно и этим способом пользоваться не стоит.

3 ЗАПУСК ПРОГРАММЫ ANSYS FLUENT И ЕЕ ОСОБЕННОСТИ

Дальнейшие действия с расчетной моделью: задание граничных условий, настройка параметров решателя, решение и обработка результатов производится в программе *ANSYS Fluent*.

Запуск программы осуществляется нажатием на соответствующий ярлык на рабочем столе или из меню «Пуск» ОС «Windows»:

Пуск → Все программы → ANSYS 13.0 → Fluid Dynamics → Fluent.

Перед открытием рабочего окна программы появится меню (рисунок 3.1), предлагающее выбрать тип решаемой задачи из двух предложенных вариантов:

2D– двухмерная;

3D – трехмерная;

В рассматриваемом случае задача является двухмерной. После выбора нужно нажать кнопку *Ok*. Это действие вызовет появление рабочего окна программы *ANSYS Fluent* (рисунок 3.2).



Рисунок 3.1 - Меню выбора размерности задачи



Рисунок 3.2 - Окно программы *ANSYS Fluent*

Окно программы достаточно простое и состоит из трех основных элементов:

- *главного меню*, через которое осуществляется доступ ко всем командам и меню программы;
- *окна сообщений*, где находится командная строка, и отображаются результаты выполнения команд;
- *графических окон*, в которых отображаются результаты расчета и построений.

3.1 Загрузка расчетной модели, созданной в программе *ANSYS Gambit*

Чтобы прочитать созданную расчетную модель, необходимо в главном меню выбрать:

ГМ: File → Read → Mesh

В появившемся стандартном окне проводника ОС «Windows» нужно найти место, где был сохранен файл обмена, выбрать его и подтвердить выбор кнопкой *OK*.

При чтении файла в окне сообщений *ANSYS Fluent* появятся полные сведения о модели, содержащейся в читаемом файле: размеры, количество и тип конечных элементов и т.п.

3.2 Проверка конечно-элементной сетки на наличие ошибок

Проверка расчетной сетки на наличие ошибок осуществляется с помощью команды:

ГМ: Mesh → *Check*.

После ее запуска программа начнет проверять конечно-элементную сетку, а в окне сообщения появятся полные сведения о конечно-элементной сетке. Если будет найдена ошибка, то будет выдано соответствующее сообщение. В этом случае необходимо вернуться в программу *ANSYS Gambit*, найти ошибку и исправить ее.

3.3 Масштабирование конечно-элементной сетки.

Размеры расчетных моделей в программе *ANSYS Fluent* должны быть обязательно заданы в метрах. Построение же моделей удобнее проводить в миллиметрах. Так, рассматриваемая модель баллона была создана в миллиметрах, то построенную сетку нужно уменьшить в *1000* раз. Для этого в программе есть удобная команда масштабирования *Scale Mesh* (рисунок 3.3). Она вызывается из главного меню командой:

ГМ: Mesh → *Scale*

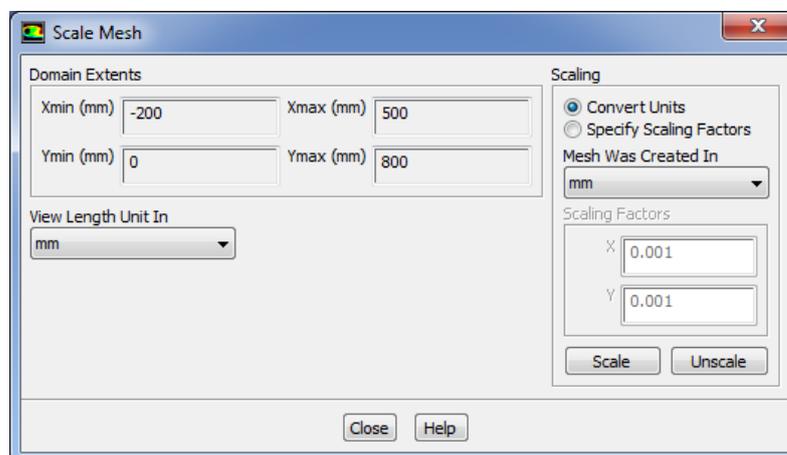


Рисунок 3.3 - Меню *Scale Mesh*

В поле *Domain Extents* меню приведены максимальные значения размеров модели по всем координатам. Поскольку она создана в миллиметрах, то до масштабирования эти цифры запредельны.

В меню *Scale Mesh* в поле *Mesh Was Created In* (сетка была создана в ..) нужно выбрать миллиметры *mm* (или другую единицу измерения, в которой была создана расчетная модель), а затем нажать кнопку *Scale*. Модель будет автоматически отмасштабирована. Следует обратить внимание на то, что в поле *Domain Extents* размеры модели примут правильные значения. Отменить масштабирование в случае ошибки можно с помощью кнопки *Unscale*. После завершения операции меню необходимо закрыть с помощью кнопки *Close*.

3.4 Просмотр конечно-элементной сетки

Конечно-элементная сетка отображается автоматически в графическом окне программы *Fluent*, для дополнительных опций просмотра можно вызвать меню *Mesh Display*.

ГМ: Display → Mesh.

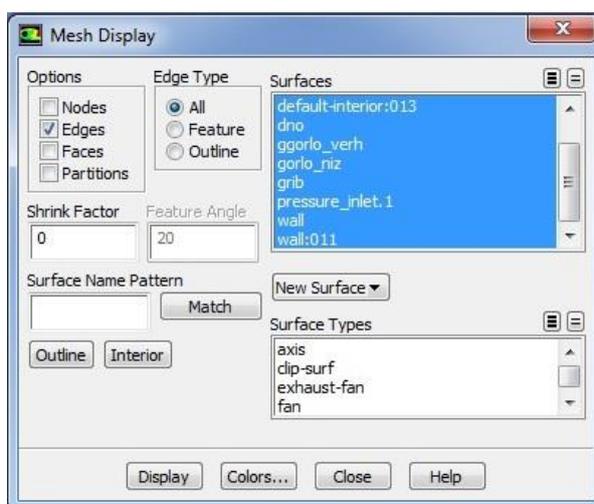


Рисунок 3.4 - Меню *Mesh Display*

В появившемся меню *Mesh Display* (рисунок 3.4) в окне *Surfaces* можно выбрать любой набор поверхностей, которые пользователь хочет просмотреть. Следует обратить внимание на то, что имена в списке совпадают с именами граничных условий, заданных в *Gambit*. Для просмотра выбранных элементов сетки нужно нажать кнопку *Display* (рисунок 3.5).

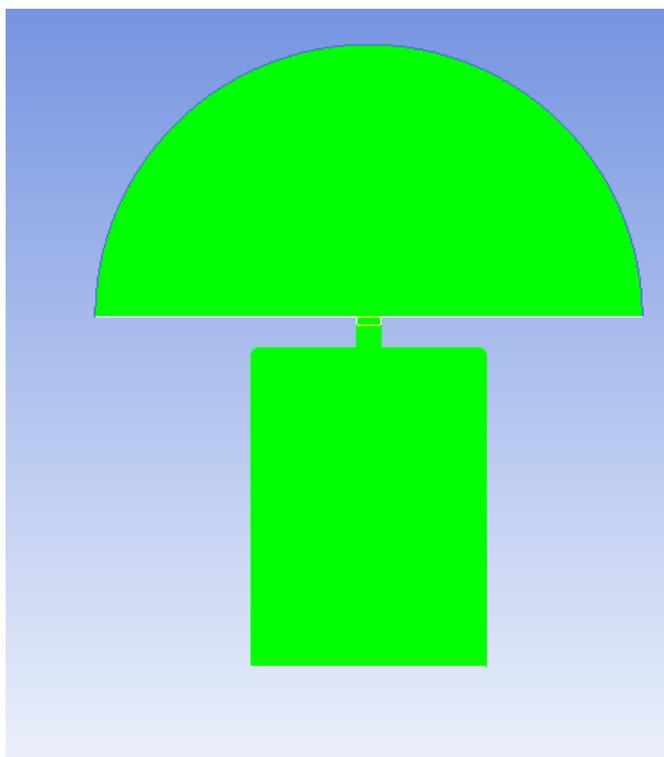


Рисунок 3.5 - Результат отображения расчетной сетки

Для того, чтобы просмотреть конечно-элементную сетку, нужно использовать мышь. Движение мыши с нажатой левой кнопкой вызывает сдвиг модели. Движение мыши с нажатой средней кнопкой вызывает появление рамки, с помощью которой можно приблизить (если рамку вытягивать слева направо) выделенный фрагмент модели или, наоборот, отдалить (если рамку вытягивать справа налево).

Если в окне *Surfaces* снять выделение с пункта *default – interior*, то в окне можно будет увидеть только контур модели, без расчетной сетки.

3.5 Задание опций решателя.

В качестве первого действия при описании расчетной модели следует выбрать решатель, с помощью которого будет проводиться решение, а также определить стационарность или нестационарность задачи. Этот выбор осуществляется с помощью команды *General: Define → General*.

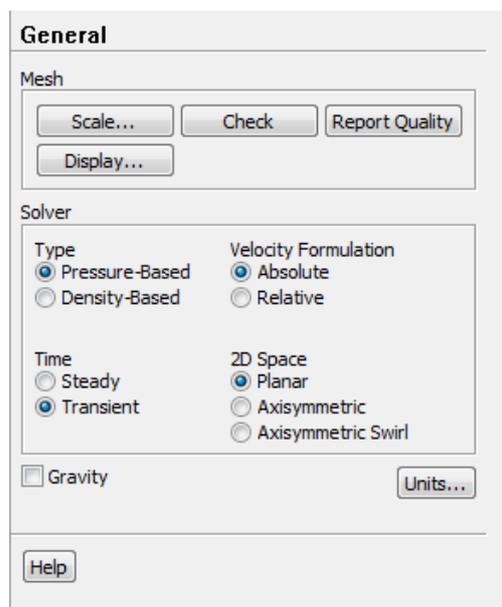


Рисунок 3.6 - Меню *General*

В меню *General* (рисунок 3.6) нужно обратить внимание на следующие пункты.

В поле *Solver* следует выбрать алгоритм решения. Программа *Fluent* позволяет использовать два алгоритма: *Pressure Based* (в российской литературе его называют алгоритмом установления) или *Density Based* (в российской литературе - алгоритм расщепления). Первый из них изначально разрабатывался для низкоскоростных потоков, но впоследствии был модифицирован и распространен и на другие течения. Алгоритм расщепления создавался для расчетов высокоскоростных транс- и сверхзвуковых потоков. Для решения рассматриваемой задачи целесообразно выбрать *Pressure-Based*.

В поле *2D Space* выбирается тип задачи:

Planar - плоская;

Axisymmetric – осесимметричная;

Axisymmetric Swirl – осесимметричная с вращением.

В поле *Time* описывается, будет ли решение стационарным *Steady* или нестационарным *Transient*. То есть, будут ли параметры потока зависеть от времени или нет.

Рассматриваемая задача является плоской (*Planar*) нестационарной (*Transient*).

3.6 Учет в расчете уравнения энергии

При решении данной задачи нужно учитывать изменение температуры потока и тепловые явления (теплообмен и теплопередачу). Для этого необходимо включить в решение уравнение энергии с помощью команды:

ГМ: Define → Models → Energy.

В появившемся окне нужно поставить галочку в строке *Energy Equation* и нажать *OK*.

3.7 Определение модели турбулентности

Поток газа в расчетной модели характеризуется наличием *турбулентности* – беспорядочного движения вихревых масс. При этом на основное направление скорости накладываются поперечные составляющие, вызывающие сильное перемешивание жидкости/газа.

При осреднении по времени уравнений Навье-Стокса в них появляются новые члены, которые могут быть интерпретированы как градиенты «кажущихся» напряжений и тепловых потоков, связанных с турбулентным движением. Уравнения Навье-Стокса принимают вид, похожий на канонический, с единственным отличием. Оно заключается в том, что коэффициенты вязкости и теплопроводности представляют собой сумму коэффициентов ламинарной и турбулентной вязкости и теплопроводности соответственно:

$$\mu = \mu_{\text{лам}} + \mu_{\text{турб}}; \lambda = \lambda_{\text{лам}} + \lambda_{\text{турб}}.$$

Для определения $\mu_{турб}$ и $\lambda_{турб}$ необходимо привлечь дополнительные, полуэмпирические уравнения, называемые *моделями турбулентности*. От точности и надежности описания турбулентных явлений непосредственно зависит точность и надежность определения отрыва пограничного слоя, ламинарно-турбулентного перехода, потерь кинетической энергии в потоке, процессов теплообмена и т.д. На настоящий период времени нет универсальной модели, корректно описывающей турбулентность в любых условиях. Каждая из множества известных моделей имеет свою, достаточно узкую, область применения. В программе *Fluent* разработчики предлагают использовать одну из наиболее известных моделей турбулентности, таких как: Спаларта-Алламарса, $k-\varepsilon$ (*k-epsilon*), $k-\omega$, модель напряжений Рейнольдса. При исследовании течения в данной задаче следует остановить выбор на модели турбулентности *RNG k-epsilon*, поскольку она позволяет получать решения с приемлемой точностью, устойчиво решается и хорошо сходится.

Для задания модели турбулентности необходимо выбрать команду:

ГМ: Define → Models → Viscous.

В появившемся списке моделей турбулентности нужно выбрать модель турбулентности $k-\varepsilon$ (*k-epsilon*). В появившемся меню отмечается модель *RNG*.

3.8 Задание свойств рабочего тела.

Задание свойств рабочего тела осуществляется в меню *Materials* (рисунок 3.7), которое вызывается командой:

ГМ: Define → Materials.

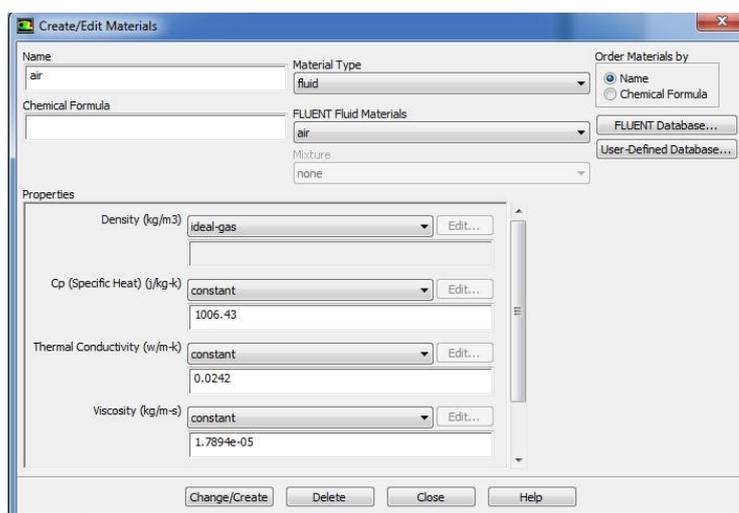


Рисунок 3.7- Меню *Materials*

В рассматриваемой задаче в качестве рабочего тела используется воздух. Он установлен в программе *Fluent* по умолчанию. При решении задач течения газов обязательно нужно учитывать сжимаемость рабочего тела. Поэтому следует задать зависимость плотности газа от параметров потока. Чаще всего для этого пользуются уравнением состояния идеального газа (Менделеева – Клайперона). Для того, чтобы осуществить эту установку, в меню *Materials* в списке *Density* нужно выбрать пункт *Ideal-gas*.

Для сохранения изменения свойств рабочего тела необходимо нажать кнопку *Change/Create*. После завершения операции меню необходимо закрыть с помощью кнопки *Close*.

3.9 Задание справочного давления

Особенность программы *ANSYS Fluent* состоит в том, что давление, получаемое и задаваемое в расчете, является избыточным. То есть для того, чтобы получить истинное значение давления необходимо прибавить к нему так называемое «справочное давление». По умолчанию в его качестве используется атмосферное давление в САУ – 101325Па . Если в качестве «справочного давления» принять 0, то результаты расчета и исходные данные будут задаваться в абсолютных значениях. Изменить значение

«справочного давления» можно в меню, которое появится в результате выполнения команды:

ГМ: Define → Operating Condition.

Для упрощения обработки результатов в решаемой задаче целесообразно принять «справочное давление», равное нулю, и ввести его значение в поле *Operating pressure*.

3.10 Задание граничных условий

Меню задания граничных условий (рисунок 3.8) вызывается командой:

ГМ: Define → Boundary Condition.

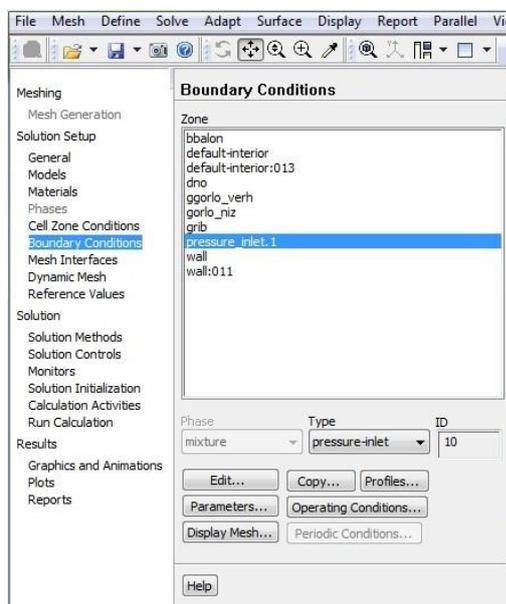


Рисунок 3.8- Меню *Boundary Condition*

В поле *Zone* находится список всех граничных условий, определенных в *ANSYS Gambit*. Если выбрать имя одного из них, например *pressure_inlet.1*, то в окне *Type* будет указан тип граничного условия. В случае необходимости в этом окне тип граничных условий можно поменять.

Чтобы приступить к заданию граничных условий, необходимо в окне *Zone* выбрать нужное граничное условие, убедиться, что в окне *Type* тип граничного условия указан верно, и нажать *Edit....*

В рассматриваемой задаче будет задано только одно условие на входной границе (рисунок 3.9). В поле *Gauge Total Pressure* и *Supersonic/Initial Gauge Pressure* вводится значение давления на входе в расчетную область равное 101325 Па.

В поле *Direction Specification Method* определяется направление вектора скорости на входной границе. Чтобы указать направление вектора по направляющим косинусам, в списке нужно выбрать пункт *Direction Vector* (направляющий вектор). В случае, когда входящий поток направлен нормально к входной границе, в поле *Direction Specification Method* выбирается пункт *Normal to Boundary* (перпендикулярно границе). В данном случае необходимо выбрать *Normal to Boundary* (перпендикулярно границе).

Для задания полной температуры потока на входе нужно в верхней части меню выбрать вкладку *Thermal*, а в ставшем доступном поле *Total Temperature* ввести значение температуры. Для рассматриваемого примера $T_0^* = 293$.

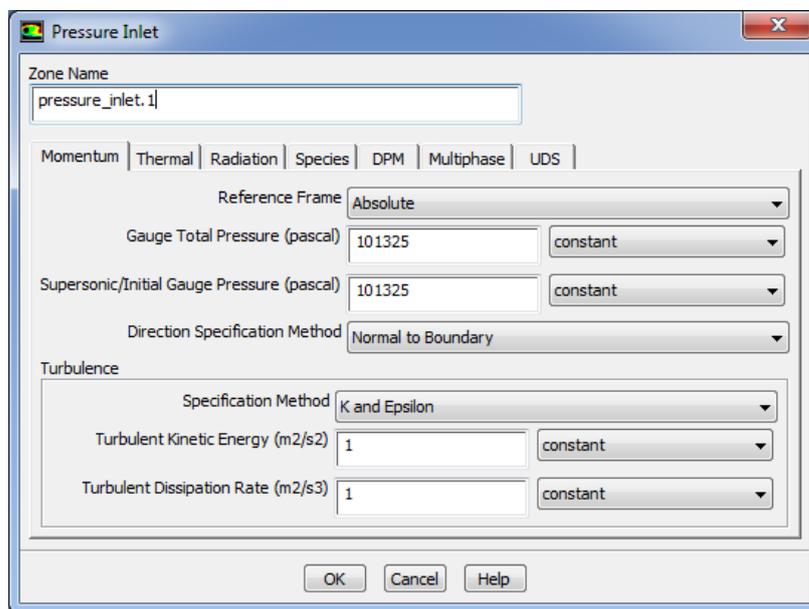


Рисунок 3.9- Меню *Pressure inlet*

3.11 Задание проницаемости стенок

Доступ к меню настройки проницаемости стенок осуществляется с помощью команды:

ГМ: Define → Mesh Interfaces

В результате появится пустое окно. Внизу окна необходимо нажать кнопку *Create/edit...*, в результате появится окно *Create/Edit Mesh Interfaces* представленное на рисунке 3.10.

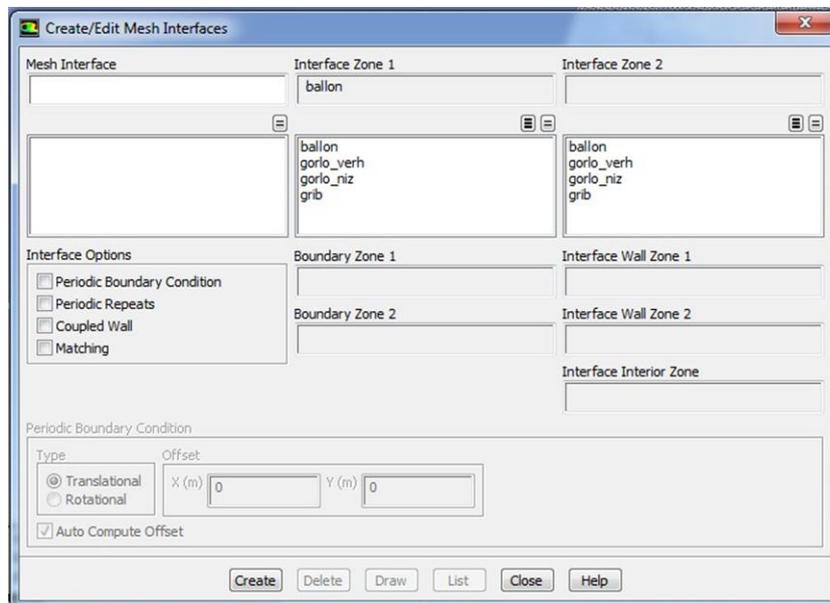


Рисунок 3.10 - Меню *Mesh Interfaces*

В окне *Mesh Interface* вводится любое имя, например *int1*. В окне *Interface Zone 1* выбирается один проницаемый отрезок *ballon*, в *Interface Zone 2* выбирается второй проницаемый отрезок *gorlo_niz*. Для завершения задания проницаемости необходимо нажать *Create*.

Для задания второй проницаемой пары необходимо провести аналогичную процедуру. В окне *Mesh Interface* ввести имя *int2*. В окне *Interface Zone 1* выбирать один проницаемый отрезок *gorlo_verh*, в *Interface Zone 2* выбирать второй проницаемый отрезок *grib*. Для завершения задания проницаемости необходимо нажать *Create*.

3.13 Установка начальных значений параметров

При решении задач газовой динамики численными методами перед запуском решения необходимо установить начальные значения параметров в

расчетной области. Правильный выбор этих параметров может существенно улучшить устойчивость и сходимость, чем ускорить получение решения. Меню установки начальных условий (рисунок 3.11) вызывается командой:

ГМ: Solve → Initialization.

В этом меню в поле *Compute From* необходимо выбрать входную границу. В результате рекомендуемые значения начальных параметров будут рассчитаны по входным граничным условиям. Для их принятия следует нажать *Initialize*.

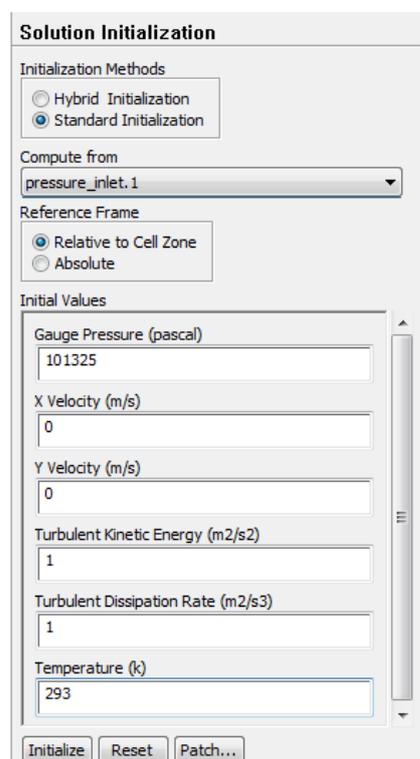


Рисунок 3.11-Меню установки начальных значений параметров

3.14 Настройка отображения процесса решения

Уравнения Навье-Стокса решаются численным методом. Вкратце этот метод заключается в следующем. Расчетная область делится на большое количество конечных элементов. Дифференциальное уравнение в области произвольного узла сетки заменяется алгебраическим уравнением-аналогом, описывающим изменение переменной между несколькими соседними точками. Решение аналога осуществляется итерационным методом. После

каждой итерации находятся некоторые значения переменных. Они подставляются в исходные уравнения, выраженные в виде $f(p, T, \rho, x, y, z, v, w \dots) = 0$. Поскольку решение является приближенным (т.к. решается алгебраический аналог, а не дифференциальное уравнение), то $f(p, T, \rho, x, y, z, v, w \dots) = R$. Величина R называется невязкой и является критерием, по которому судят о процессе решения. Очевидно, что чем ближе R к нулю, тем ближе найденное решение дискретного аналога к решению исходного дифференциального уравнения. В случае, если невязка R окажется меньше заданного предела, решение считается законченным. Разработчики программы утверждают, что решение можно считать законченным, если $R = 1 \cdot 10^{-3}$.

Решение можно считать законченным, если:

- Разность расходов рабочего тела между входной и выходной границей стремится к нулю и мало меняется от итерации к итерации.
- Невязки по всем уравнениям в процессе решения достигают значения меньше рекомендуемого предела ($1 \cdot 10^{-3}$).

Однако в ряде случаев требуемых невязок не удается достичь или невязки достигли заданного предела, а разность расходов рабочего тела между входом и выходом составляет значительную величину (более 1% от расхода).

В этом случае в качестве второго критерия сходимости следует принять неизменность невязок от итерации к итерации. Это говорит о том, что достигнута предельная точность расчета, и снижения невязок можно добиться только изменением конечно-элементной сетки.

Для того, чтобы отображать невязки в процессе расчета, а также задать критерий остановки решения, необходимо вызвать меню *Residual Monitors* (рисунок 3.12) с помощью команды:

GM: Solve → Monitors → Residual

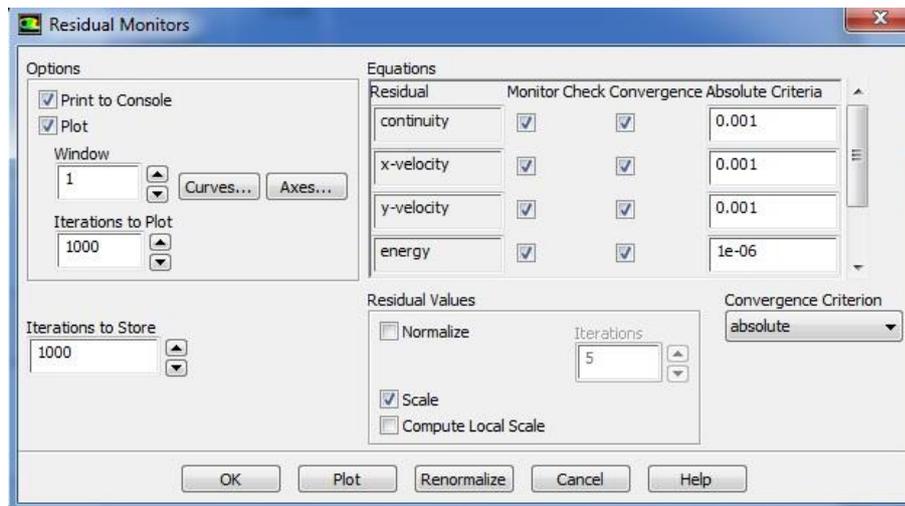


Рисунок 3.12 - Меню *Residual Monitors*

В поле *Option* необходимо поставить галочки напротив слов *Plot* и *Print*. Это приведет к тому, что невязки по всем уравнениям будут печататься в окне сообщения (*Print*) и отображаться в виде графиков в графическом окне (*Plot*).

В полях *Residual* друг над другом перечислены все решаемые уравнения, а напротив каждого из них в столбце *Convergence Criterion* установлены предельные невязки. Задача считается решенной, когда невязки по всем уравнениям окажутся меньше заданных значений. В этом случае процесс вычисления будет автоматически остановлен. Считается, что для получения точного решения достаточно достижения невязок 10^{-3} по всем уравнениям.

3.15 Настройка процесса создания анимации

Для того что бы создать анимацию необходимо вызвать команду:

GM: Solve → *Calculation Activities*.

Далее под окном *Solution Animations* необходимо нажать *Create/Edit...*, в результате чего появится меню, представленное на рисунке 3.13.

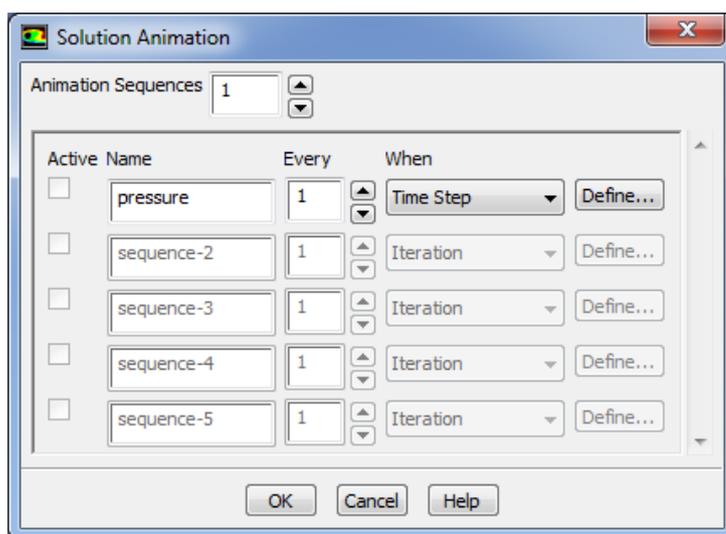


Рисунок 3.13 - Меню *Solution Animation*

В данном окне в опцию *Animation Sequences* следует ввести количество анимации, которое будет создано в процессе решения. В данном случае оно будет равно числу 1. Затем в первой строчке вводится имя анимации - *Pressure*. Во вкладке *When* следует установить *Time Step*. Затем нажимается кнопка *Define...*

В появившемся окне ввести число 2 в опцию *Window* (рисунок 3.14). В окно №2 будет происходить запись анимации изменения температуры проточной части. Затем нажимается кнопка *Set*.

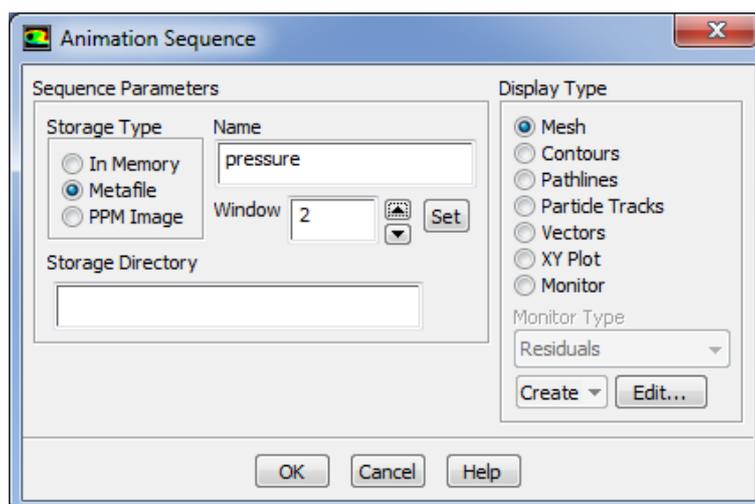


Рисунок 3.15 - Меню *Animation Sequence*

В опции вида отображения расчетных данных *Display Type* следует выбрать *Contours* . После этого для последующей настройки следует нажать клавишу *Edit*.

В появившемся окне (рисунок 3.16) во вкладке *Contours of* выбирается соответственно *Pressure...* и *Total Pressure*. После этого следует нажать *Display* и закрыть окно, нажав кнопку *Close*. Для подтверждения всех введенных значений и настроек нажимается кнопка *OK* в окне *Animation Sequence*.

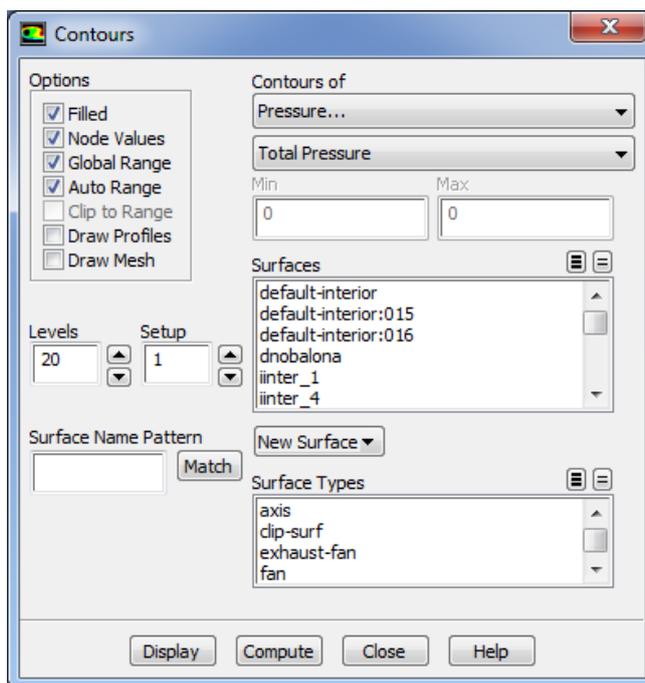


Рисунок 3.16 - Меню *Contours*

3.16 Сохранение расчетной модели

Для сохранения расчетной модели и всех сделанных настроек решателя необходимо вызвать команду:

ГМ: File → Write → Case & Data.

В появившемся окне проводника необходимо выбрать место, где будет сохранена модель и ее имя. После нажатия кнопки *OK* в указанном месте появятся два файла модели с расширением **.cas* и **.dat*.

3.17. Запуск решения задачи

1. Для запуска решения задачи следует выбрать следующую команду:
Solve → *Run Calculation...*

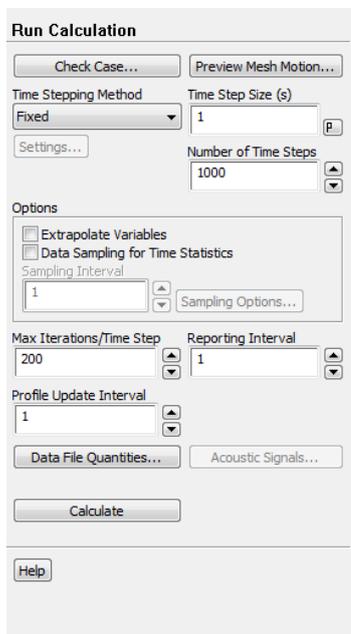


Рисунок 3.17 – Меню задания процесса решения (*Run Calculation*)

В меню *Run Calculation* рисунок 3.17 выполняются следующие действия:

- а) В строке *Number of Time Steps* выбирается количество шагов расчета, равное *1000*.
- б) В строке *Time Step Size* вводится время одного шага, равное 1 секунде.
- в) В строку *Max Iterations per Time Step* вводится максимальное количество итераций на один шаг расчета. В данном случае рекомендуется ввести число *200* для данного параметра.
- г) После этого нажатием клавиши *Calculate* запускается расчет.

Решение может быть остановлено в любой момент нажатием на кнопку *Cancel* и вновь запущено с места остановки нажатием кнопки *Calculate* в меню запуска решения. Во время паузы могут быть просмотрены предварительные результаты решения, внесены изменения в граничные условия или настройки решателя.

3.18. Сохранение анимации

Данная процедура выполняется в следующей последовательности:

Display → *Graphics and Animations...*

- а) В окне *Animations* выбирается опция *Solution Animation Playback* и нажимается *Set Up...*
- б) В появившемся окне (рисунок 3.18) выбирается какой-либо термодинамический параметр, который предварительно описан в пункте 3.15, например *Pressure*.
- в) В опции *Write/Record Format* выбирается тип файла *MPEG*.
- г) Для того чтобы запустить процесс сохранения следует нажать кнопку *Write*.
- д) Затем следует закрыть данное окно, нажав кнопку *Close*.

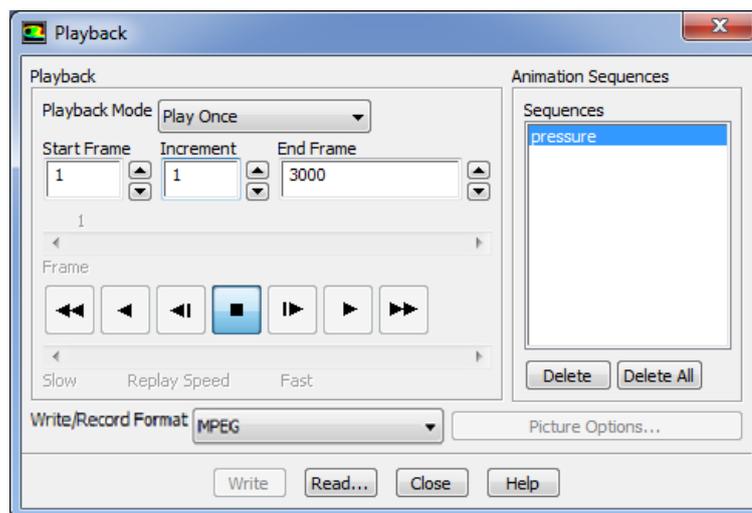


Рисунок 3.18 – Меню работы с анимацией

3.19. Просмотр результатов расчета

Для просмотра результатов расчет необходимо возвести видеопроигрывателем сохраненные анимации соответствующих термодинамических параметров (рисунки 3.19 - 3.20).

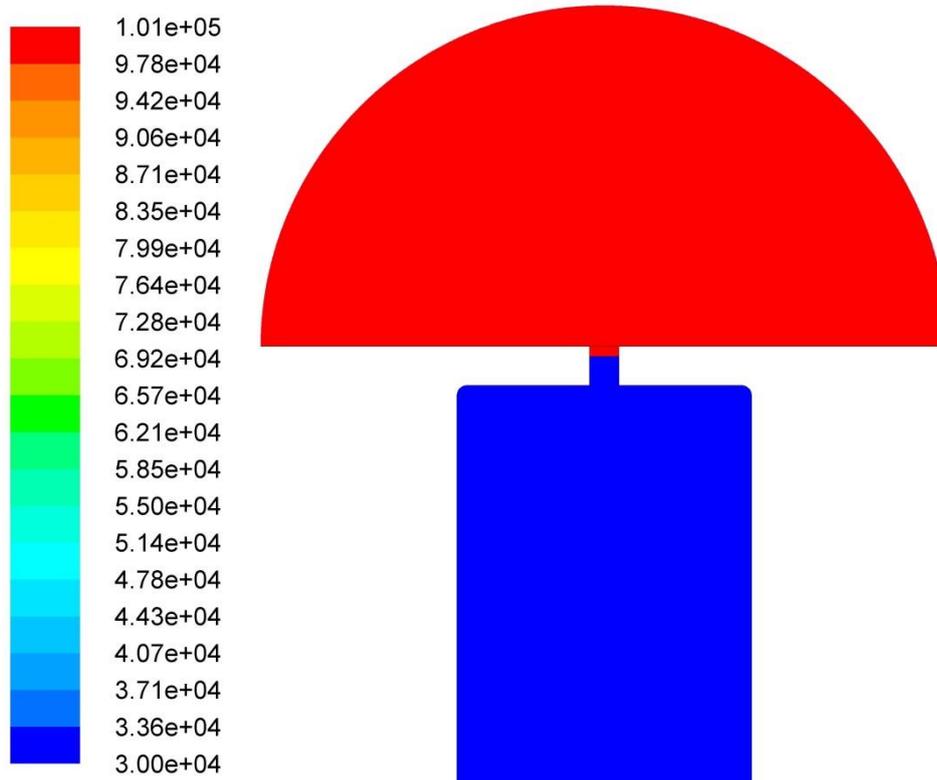


Рисунок 3.19 - Поле распределения давлений в начале расчёта

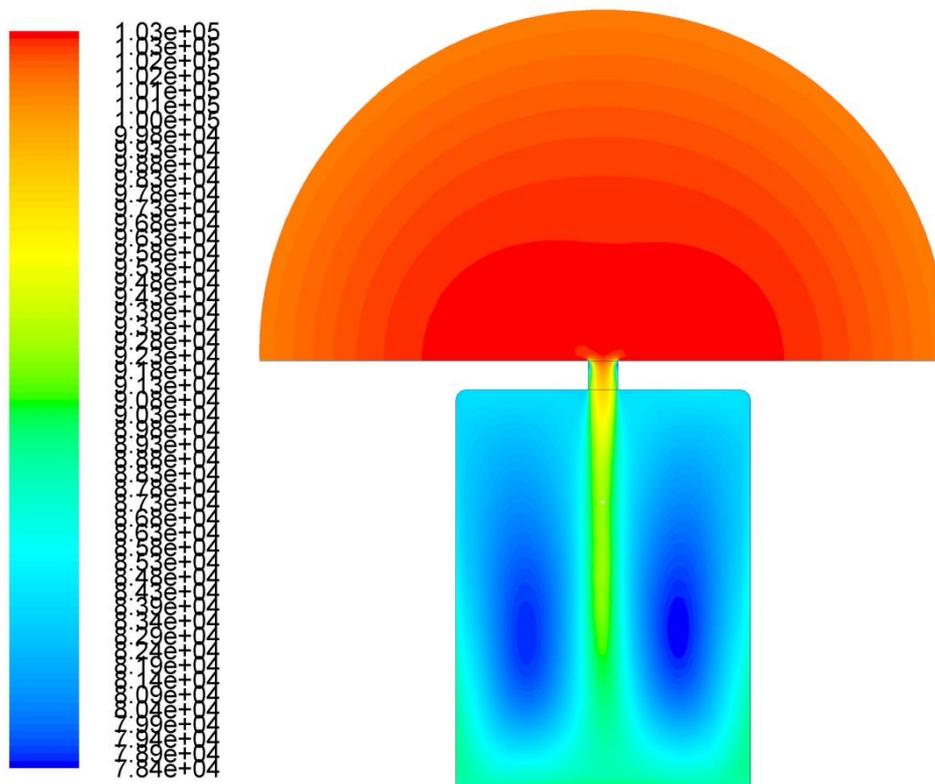


Рисунок 3.20 - Поле распределения давлений через 0,2 секунды после начала расчёта

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам выполненной работы можно сделать следующие выводы:

1. Высокая информативность результатов численного моделирования способствует более глубокому анализу процессов втекания газа в резервуар.
2. Моделирование газодинамической структуры потока при обоснованном выборе модели турбулентности позволяет с достаточной для практики точностью получить распределения основных термодинамических параметров.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Батурин О. В. Расчет течений жидкостей и газов с помощью универсального программного комплекса. Часть 2. Построение расчетных моделей в препроцессоре Gambite/ О. В. Батурин, И. И. Морозов, В. Н. Матвеев – Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2008. - 125с.

2. Батурин О. В. Расчет течений жидкостей и газов с помощью универсального программного комплекса. Часть 3. Работа в программе Fluent/ О. В. Батурин, И. И. Морозов, В. Н. Матвеев – Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2008. - 115с.

3. Использование программного пакета FLUENT для решения задач по газодинамике [Электронный ресурс] : электрон. метод. указания к лаб. работам / Минобрнауки России, Самар. гос. аэрокосм. ун-т им. С. П. Королева (нац. исслед. ун-т) ; [В. В. Бирюк, А. А. Горшкалев, Д. А. Угланов]. - Электрон. текстовые и граф. дан. (8,65 Мбайт). - Самара : [б. и.], 2012. - 1 эл. опт. диск (CD-ROM)