

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)

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В
ОДНО - И ДВУХФАЗНЫХ КРИОГЕННЫХ СИСТЕМАХ С
ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ CFD-ПАКЕТОВ**

Электронное учебное пособие

Работа выполнена по мероприятию блока 2 «Развитие и повышение эффективности научно-инновационной деятельности» и блока 3 «Развитие информационной научно-образовательной среды и инфраструктуры» Программы развития СГАУ на 2009 – 2018 годы по проекту «Разработка технологии и методического обеспечения для создания виртуального двигателя внутреннего сгорания и проектирование на этой основе ДВС мощностью 2 л.с.»
Соглашение № 2/13 от 3 июня 2013 г.

С А М А Р А

2013

УДК 621.64

ББК 30.1

М 744

Авторы: **Бирюк Владимир Васильевич**
Сармин Дмитрий Викторович
Довгялло Александр Иванович
Угланов Дмитрий Александрович
Шиманов Артём Андреевич

Редакторская обработка: А.А. Шиманов

Компьютерная верстка: А.А. Шиманов

Доверстка: А.А. Шиманов

Моделирование теплофизических процессов в одно - и двухфазных криогенных систем с использованием CFD - пакетов: [Электронный ресурс]: электрон. учеб. пособие / В. В. Бирюк, А. И. Довгялло, Д. В. Сармин, Д. А. Угланов, А. А. Шиманов; М-во образования и науки РФ, Самар. гос. аэрокосм. ун-т им. С. П. Королева (нац. исслед. ун-т). - Электрон. текстовые и граф. дан. (3,47 Мбайт). - Самара, 2013. – 1 эл. опт. диск (CD-ROM).

В электронном учебном пособии представлена методика построения двухмерной модели ёмкости с криогенной заправкой и разбиение её на конечно-элементную сетку. Описан процесс моделирования испарения-конденсации азота с помощью программного комплекса *ANSYS Fluent*. Описаны возможности, особенности и свойства численного метода решения. Представлена методика написания и компиляции пользовательских функций UDF для описания свойств азота.

Электронное учебное пособие предназначено для подготовки специалистов по специальности 160700.65 «Проектирование авиационных и ракетных двигателей», изучающих дисциплину «Бортовая энергетика» в 6 семестре, специалистов по специальности 160700.65 «Проектирование авиационных и ракетных двигателей», изучающих дисциплину «Системы охлаждения энергетических установок» в 8 семестре, магистров по направлению 160700.68 «Двигатели летательных аппаратов», изучающих дисциплину «Бортовые энергетические системы и установки» в семестре В.

Подготовлено на кафедре теплотехники и тепловых двигателей

© Самарский государственный

аэрокосмический университет 2013

СОДЕРЖАНИЕ

| | |
|---|----|
| ВВЕДЕНИЕ | 4 |
| 1. ОСОБЕННОСТИ НАПИСАНИЯ ПОЛЬЗОВАТЕЛЬСКИХ ФУНКЦИЙ | |
| <i>UDF</i> | 5 |
| 1.1 Основные характеристики <i>UDF</i> -функций..... | 5 |
| 1.2 Использование макроса <i>DEFINE</i> в <i>UDF</i> -функциях | 7 |
| 1.3 Компиляция и интерпретирование <i>UDF</i> -функций | 8 |
| 1.4 Виды переменных в программе <i>ANSYS Fluent</i> | 9 |
| 2. МЕТОДИКА МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ | |
| В ОДНО - И ДВУХФАЗНЫХ КРИОГЕННЫХ СИСТЕМ С | |
| ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ CFD-ПАКЕТОВ | 12 |
| 2.1 Построение 2D модели ёмкости с криогенной заправкой | 12 |
| 2.2 Моделирование теплофизических процессов в одно - и двухфазных | |
| криогенных систем с использованием пакета <i>ANSYS Fluent</i> | 25 |
| 2.2.1 Запуск программы <i>ANSYS Fluent</i> и ее особенности | 25 |
| 2.2.2 Настройка решения задачи. Проверка качества сетки | 26 |
| 2.2.3 Настройка параметров модели расчета..... | 29 |
| 2.2.4 Задание свойств рабочего тела | 33 |
| 2.2.5 Установка модели испарения-конденсации | 35 |
| 2.2.6 Граничные условия | 37 |
| 2.2.7 Настройка процесса решения задачи | 40 |
| 2.2.8 Обработка результатов расчета | 48 |
| ЗАКЛЮЧЕНИЕ | 52 |
| СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ | 53 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ | 54 |

ВВЕДЕНИЕ

Целью данной методической работы является моделирование теплофизических процессов в одно- и двухфазных криогенных систем. Данное моделирование было произведено для баллона с криогенной заправкой. Внутри баллона высокого давления размещается криогенный сосуд (термос) в который заливается рабочее тело, при этом между оболочкой термоса и внутренней стенкой баллона образуется незаполняемая жидкостью газовая полость. Соотношение объемов термоса и газовой полости таково, что, если масса заправляемого в термос криопродукта полностью газифицируется, то она заполнит весь суммарный объем баллона, при стандартном давлении заправки и будет соответствовать номинальной массе заправки газообразным продуктом.

После наполнения внутреннего сосуда криогенной жидкостью она начинает испаряться, и испарившаяся доля криопродукта перераспределяется по слоям газовой полости. Давление в начальный момент может даже снизиться, что будет способствовать дальнейшему испарению жидкости. Однако через какое-то время давление может возрасти, и кипение прекратится. Особенности начального этапа и последующего поведения криопродукта будут обусловлены соотношением объёмов жидкой и газовой фаз. Так, если удельный объем двухфазной смеси (при изохорном процессе) больше удельного критического объема, то жидкость будет непрерывно испаряться вплоть до полного перехода криопродукта в состояние сухого насыщенного пара.

При этом также рассмотрены следующие аспекты использования программы *ANSYS Fluent*: применение и особенности написания пользовательских функций (*UDF*), моделирование испарения-конденсации криогенной жидкости, создание расчетной модели баллона с криогенной заправкой.

1. ОСОБЕННОСТИ НАПИСАНИЯ ПОЛЬЗОВАТЕЛЬСКИХ ФУНКЦИЙ

UDF

1.1 Основные характеристики *UDF*-функций

Пользовательской функцией или *UDF*-функцией является функция, созданная на языке программирования C, которые может быть динамически загружена вместе с программой *ANSYS Fluent* для расширения его стандартных возможностей. Например, *UDF*-функции можно использовать для решения следующих задач:

- Настройка граничных условий, определение свойств материалов, скоростей реакций, источников в уравнения переноса, параметров процесса массопереноса и диффузии и т.д.
- Инициализация расчета.
- Запуск асинхронного (по запросу) выполнения *UDF*.
- Улучшение обработки полученных данных.
- Решать дополнительные дифференциальные уравнения.
- Совершенствование существующих моделей в *ANSYS Fluent* (таких как, например, модель многофазной смеси).

Файлы содержащие *UDF*-функции имеют расширение *.c* (например, *myudf.c*). Один файл может содержать одну или несколько скомпилированных *UDF*-функций.

Пользовательские функции определяются с помощью макросов *DEFINE*, предоставляемые *ANSYS Fluent*. Они кодируются с помощью дополнительных макросов и функций, которые обращаются к данным решателя и могут выполнять более сложные задачи.

Каждый файл с *UDF*-функциями должен содержать команду *udf.h* включения (`# include " udf.h "`) в начале исходного кода, которая позволяет

как определять подключать *DEFINE* макросы и так другие функции и макросы *ANSYS Fluent*.

UDF-функции могут быть загружены в *ANSYS Fluent* режиме интерпретации (команда *interpreted*) или компиляции (команда *compiled*). Для интерпретации *UDF*-функций, исходные файлы интерпретируются и загружаются непосредственно во время выполнения программы в пошаговом процессе. Для компиляции пользовательских функций, процесс включает в себя две отдельные стадии. Сначала создается директория содержащие библиотеки Visual C, с помощью которых затем загружается файл .c с кодом в программу *ANSYS Fluent*.

После того, как *UDF*-функция интерпретирована или скомпилирована, она становится активной и появляется возможность выбора её в диалоговых окнах программы *ANSYS Fluent* и может быть подключена к решателю. Подключение осуществляется за счет выбора соответствующего имени *UDF*-функции в диалоговом окне.

Таким образом, *UDF*-функции:

- пишутся на языке программирования C,
- должны быть определены с помощью макроса *DEFINE*, прописанного в программе *ANSYS Fluent*;
- должны включать в себя файл *udf.h*;
- позволяют использовать макросы и функции для доступа к результатам расчета программы *ANSYS Fluent* и выполнять другие задачи
- должны загружаться методом интерпретации или компиляции.
- подключаются к решателю программы *ANSYS Fluent* за счет использования графического интерфейса диалоговых окон пользователя.

1.2 Использование макроса *DEFINE* в *UDF*-функциях

Макросы *DEFINE* являются макросами верхнего уровня. Основная функция каждого *DEFINE* макроса содержится в *udf.h* заголовке кода *.c* файла.

Общая форма записи макроса *DEFINE* представляется следующим образом: *DEFINE_MACRONAME (udf_name, описываемые переменные)*, где первый аргумент в скобках название *UDF*, которое назначается пользователем. Также в макрос *DEFINE* входят аргументы, которые передаются в *UDF*-функцию от решателя программы *ANSYS Fluent*.

Например, макрос:

```
DEFINE_PROFILE (inlet_x_velocity, thread, index)
```

определяет *thread* профиль граничного условия с именем *inlet_x_velocity* с двумя переменными *thread* и *index*, которые передаются в *UDF*-функцию из программы *ANSYS Fluent*. Эти передаваемые переменные являются идентификатором зоны граничных условий (как указатель *thread*) и индекс определения переменной, которая должна быть сохранена.

После того как *UDF*-функция интерпретирована или скомпилирована, её название (*inlet_x_velocity*) появится в соответствующем диалоговом окне задания граничных условий (например, *Velocity Inlet* (скорость на входе)) в программе *ANSYS Fluent*.

При использовании *UDF*-функций необходимо помнить следующее:

- Все аргументы макроса *DEFINE* должны быть размещены на одной строке в исходном коде. Запись названия макроса *DEFINE* в несколько строк приведет к ошибке компиляции.
- Также в название не должно быть пробелов между названием макроса (например, *DEFINE_PROFILE*), в который записываются аргументы, так как это приведет к ошибке.

Применение *udf.h* файла в исходном коде *UDF*-функции:

файл *udf.h* содержит:

- определение макросов *DEFINE*;

- оператор *#include*, который компилирует указания для наименований файлов библиотеки функций;

- названия файлов (например, *mem.h*) для других макросов и функций *ANSYS Fluent*.

Таким образом, необходимо включать упоминание *udf.h* файла в начале каждого исходного кода *UDF*-функции за счет использования оператора *#include*:

```
# include "udf.h".
```

Например, включение *udf.h* в исходный код, содержащий название макроса *DEFINE*:

```
# include "udf.h"
```

```
DEFINE_PROFILE (inlet_x_velocity, inlet_x_velocity, thread, index).
```

После компиляции макрос будет расширяться следующим образом:

```
void inlet_x_velocity (Thread *thread, int index)
```

1.3 Компиляция и интерпретирование *UDF*-функций

а) Компиляция *UDF*-функций

Компилируемые *UDF*-функции построены следующим образом: оператор *Makefile* используется для вызова системного компилятора языка программирования *C*, необходимого для создания библиотеки объектного кода. Для этого в диалоговом окне *Compiled UDFs* необходимо нажать кнопку *Build* (Создать). Затем для загрузки *UDF*-функции необходимо нажать кнопку *Load*. Таким образом, компиляция *UDF*-функций осуществляется в две стадии.

б) Интерпретирование *UDF*-функций

Интерпретирование *UDF*-функций осуществляется с помощью графического интерфейса. Процесс, который происходит во время выполнения данной операции, необходимо активизировать в диалоговом окне *Interpreted UDFs*. Внутри программы *ANSYS Fluent* исходный код компилируется в промежуточный машинный код, зависящий от его

архитектуры, используя препроцессор языка программирования C. Этот машинный код выполняется внутренним эмулятором, в момент вызова *UDF*-функций. Если скорость выполнения медленная, то интерпретируемые *UDF*-функции могут быть загружены с помощью процедуры компиляции. Процедура интерпретирования обладает меньшими возможностями по сравнению с компиляцией. В частности, интерпретируемая *UDF*-функция не может содержать следующие элементы языка программирования C:

- операции `go to`;
- прямые ссылки на структурные данные;
- обозначение локальных структур;
- указатели функций;
- массивы функций;
- многомерные массивы.

1.4 Виды переменных в программе *ANSYS Fluent*

В дополнение к стандартным типам переменных языка программирования C, таких как *real*, *int* и пр., которые возможно использовать для определения данных в создаваемой *UDF*-функции, в программе *ANSYS Fluent* существуют специальные виды данных, которые относятся к решателю. Эти виды данных представляют вычислительный блок для расчетной сетки (Рисунок 1). Значения, определяемые через эти виды данных, обычно предоставляются в качестве аргумента в макрос *DEFINE*, а также и к другим специальным функциям, которые имеют доступ к базе данных решателя программы *ANSYS Fluent*.

Ниже представлены некоторые часто используемые типы переменных в программе *ANSYS Fluent*:

Node - Структурный тип данных, который содержит информацию об узле сетки.

face_t - Целое значение, которое указывает конкретную поверхность в списке (*thread*) поверхностей.

cell_t - Целое значение, которое определяет конкретную ячейку в списке (thread) клеток.

Thread (Список) - массив данных, который содержит информацию, общую для группы ячеек или поверхностей, которых он представляет. Для применения в многофазной области существуют структурные списки для каждой фазы, так же как и для всей смеси.

Domain (область) - массив данных, который содержит информацию, относящуюся к собранию списков узлов (*node*), поверхностей (*face*) и ячеек (*cell*). Для применения в однофазной области существует только один массив областей. Для применения в многофазной области существуют массивы областей для каждой области, взаимодействия между фазами, так же как и для смеси в целом. Область для смеси – это самый высокоуровневый структурный элемент в многофазной модели.

Когда применяются *UDF*-функции в программе *ANSYS Fluent*, они имеют доступ к данным решателя для каждой конкретной ячейки или поверхности ячейки в потоке или граничных зонах. *UDF*-функции требуют значения таких переменных, как указатель на список (thread) и номер (ID) ячейки или поверхности для доступа к ней.

Некоторые *UDF*-функции используют номер ячейки (*c*) или номер поверхности (*f*) в качестве аргумента (например, *DEFINE_PROPERTY(my_function,c,t)* и *DEFINE_UDS_FLUX(my_function,f,t,i)*).

Списки данных, которые относятся к создаваемому *UDF* (как указатели) зависят от того, какой макрос *DEFINE* используется и свойств или условий, которые необходимо определить. Например, *UDF DEFINE_ADJUST* – это часто используемые функции, которые содержат указатель области (*d*) (например, в *DEFINE_ADJUST(my_function, d)*). *UDF DEFINE_PROFILE* использует указатель списка *t* к граничной зоне, к которой функция привязана (например, *DEFINE_PROFILE(my_function, thread, i)*).

Некоторые *UDF* (например, *DEFINE_ON_DEMAND*) не содержат никаких указателей к спискам информации, в то время как остальные не

содержат указатель, который требуется в *UDF*-функции. Если создаваемой *UDF*-функции требуется доступ к указателю списка или области, который напрямую не используется решателем в качестве аргумента, то в этом случае необходимо использовать специальный поддерживающий программу *ANSYS Fluent* макрос. Например, *DEFINE_ADJUST* использует только указатель области, и если создаваемой *UDF*-функции необходим указатель к списку, то следует указать конкретную переменную и затем получить её при помощи макроса *Lookup_Thread*. Исключения составляют случаи, когда *UDF*-функции необходим указатель списка для того, чтобы охватить все списки ячеек и поверхностей в области (для этого используется *thread_c_loop(c,t)* или *thread_f_loop(f,t)*, соответственно) и он не содержится в макросе *DEFINE*. Так как *UDF* будет охватывать все списки в области, то поэтому следует использовать *Lookup_Thread* для получения указателя области и передачи его охватывающему макросу, при этом необходимо указать список (и номера поверхности и ячейки) перед вызовом охвата.

В случае использования макроса *DEFINE_ON_DEMAND* (который не содержит никакого указывающего аргумента) для выполнения асинхронных *UDF*-функций требуется указать область, в которой функция должна получить её значение через операцию *Get_Domain*.

2. МЕТОДИКА МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ОДНО - И ДВУХФАЗНЫХ КРИОГЕННЫХ СИСТЕМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ CFD-ПАКЕТОВ

2.1 Построение 2D модели ёмкости с криогенной заправкой

1. Запуск программы *ANSYS Gambit* 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 1. В нем в поле *Working Directory* необходимо выбрать папку, в которой будут сохраняться модели в данной сессии.

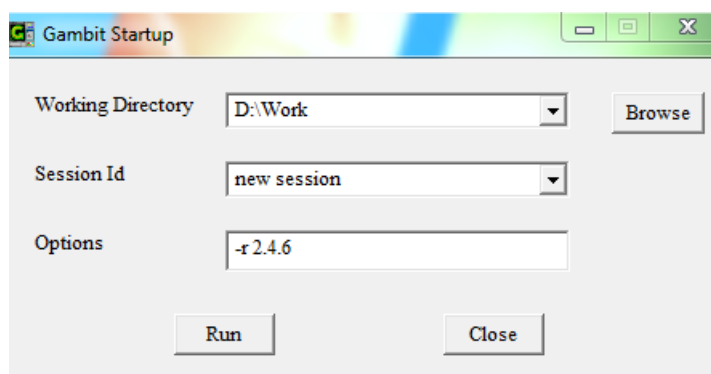


Рисунок 1 – Стартовое окно программы *ANSYS Gambit*

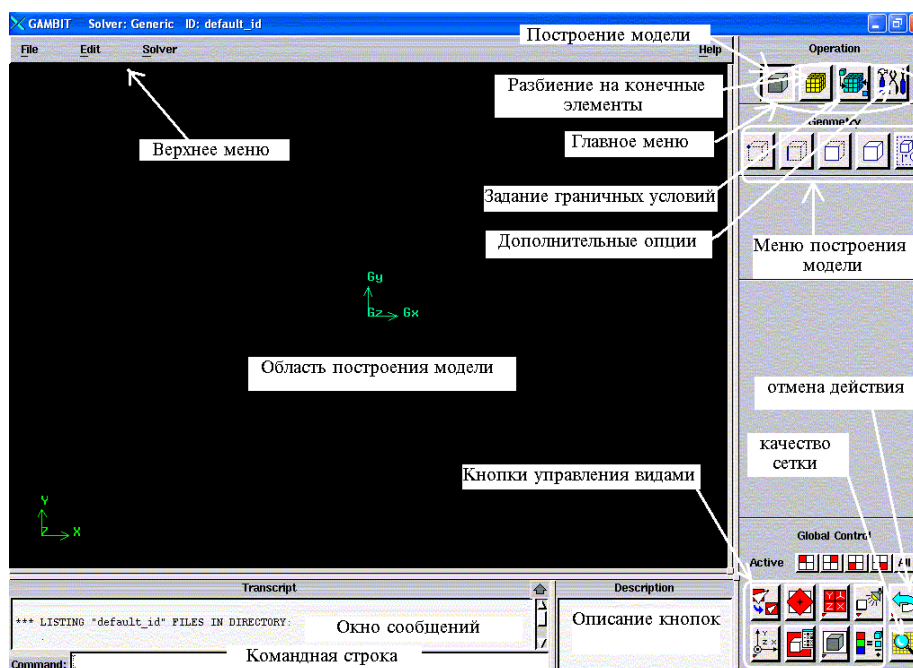


Рисунок 2 – Рабочее окно программы *ANSYS Gambit*

После этого следует нажать кнопку *Run*. Это приведет к появлению окна программы *ANSYS Gambit*. Оно показано на рисунке 2.

2. Создание новой модели в *ANSYS Gambit*. Для создания новой модели в верхнем меню нужно выбрать следующие пункты:

BM: File → New.

Появится диалоговое окно, изображенное на рисунке 3:

- в графе *ID* набирается имя модели;
- выбор имени подтверждается нажатием кнопки «*Accept*».

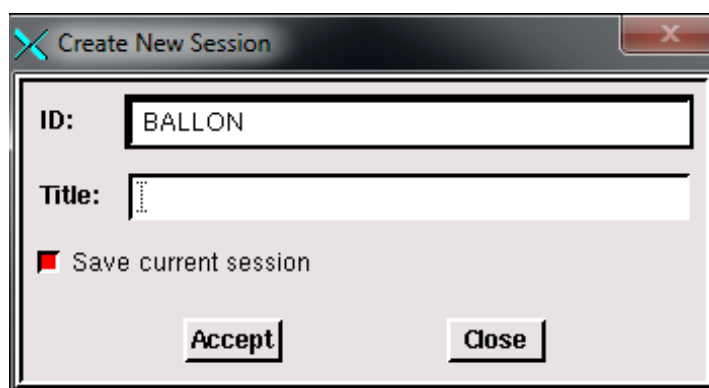


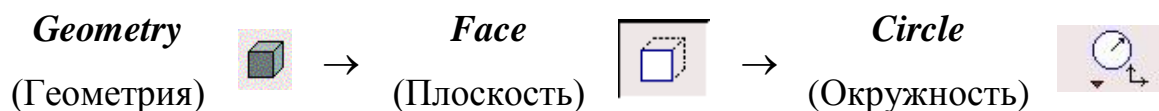
Рисунок 3- Меню создания новых моделей (*File → New*)

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

3. Назначение программы, в которой будет происходить решение рассматриваемой задачи. От этого выбора 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.

4. Построение расчётной модели. Для построения модели ёмкости с криогенной заправкой воспользуемся тремя окружностями и прямоугольником. Для построения окружностей в главном меню выбираем:



Появится диалоговое окно изображенное на рисунке 4:

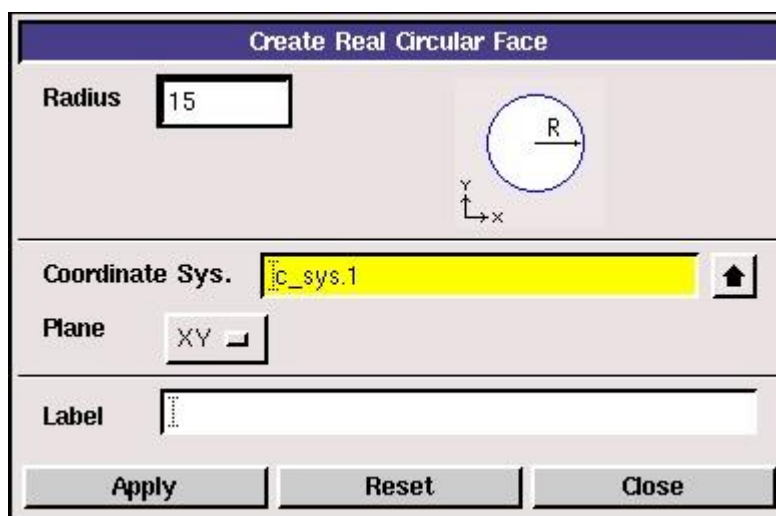




Рисунок 4 - Меню построения окружности

В появившемся меню в поле *Radius* следует ввести радиус 15 мм. Подтверждается построение окружности нажатием кнопки «*Apply*». Аналогичным образом следует построить окружность радиусом 16 мм и 50 мм.

В случае совершения ошибки, действие можно отменить с помощью кнопки  («отмена»). Увидеть все построенные окружности можно с помощью кнопки  («вписать в экран»). Результат построения изображен на рисунке 5:

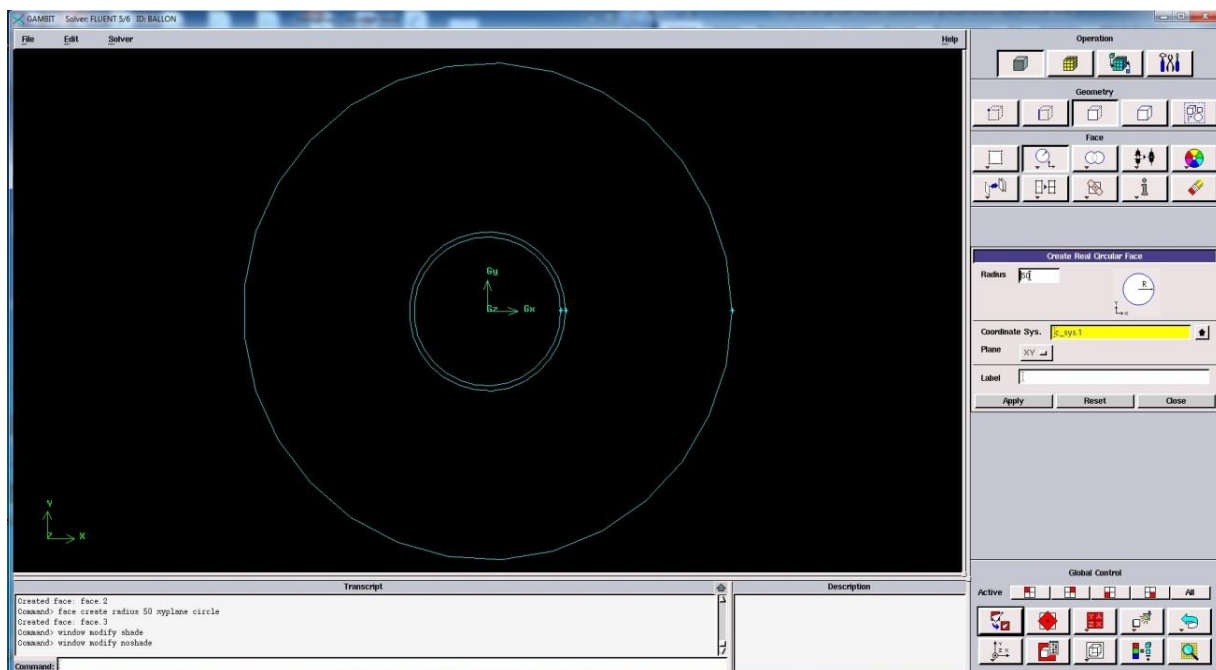
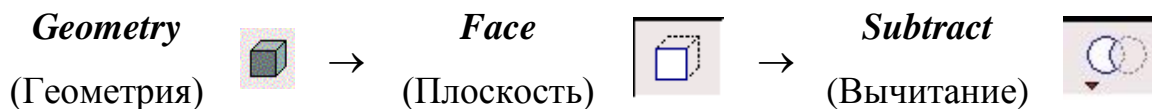


Рисунок 5 - Построенные стенки ЕКЗ

Для формирования полости в которой будет находиться криогенная жидкость необходимо из окружности радиусом 50 мм вычесть окружность радиусом 16 мм. Для этого воспользуемся командой:



Появится диалоговое окно изображенное на рисунке 6:

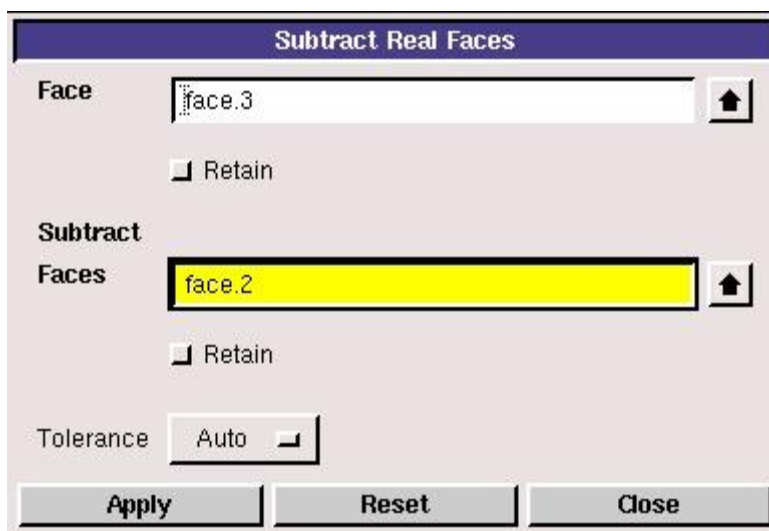



Рисунок 6 - Меню вычитания поверхностей

В поле *Face* выбираем окружность диаметром 50 мм, затем в поле *Subtract Face* выбираем окружность диаметром 16 мм. Вычитание подтверждается нажатием кнопки «*Apply*».

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 7).

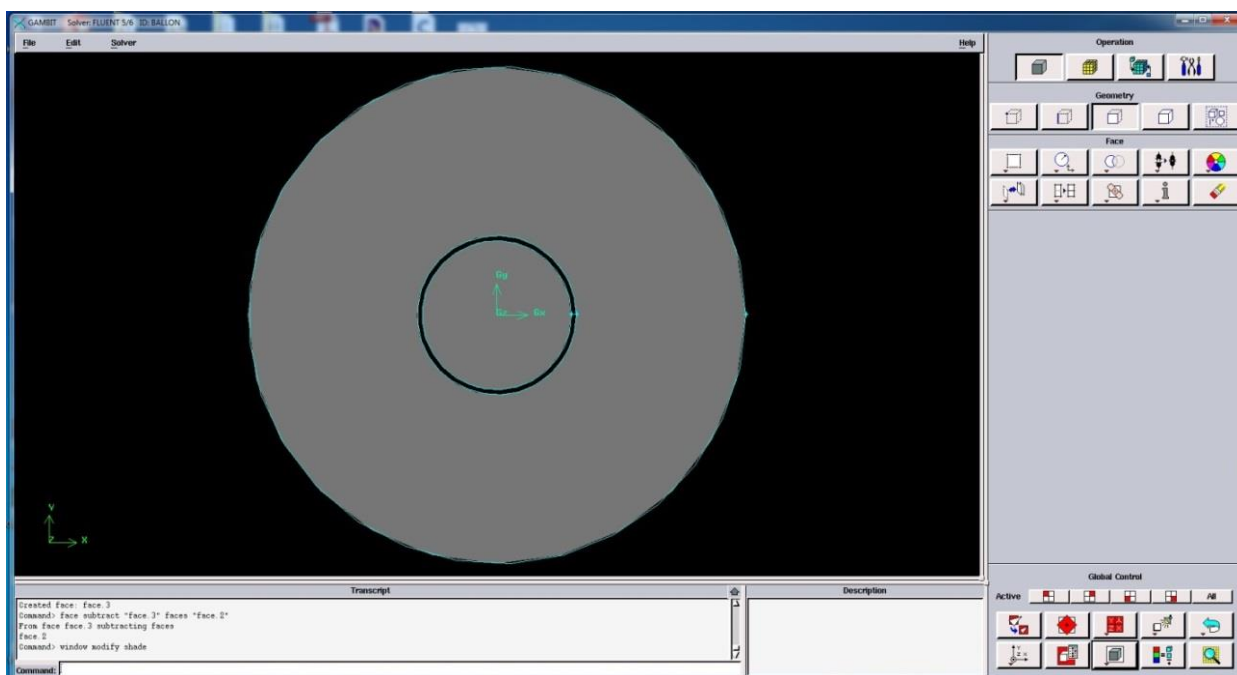

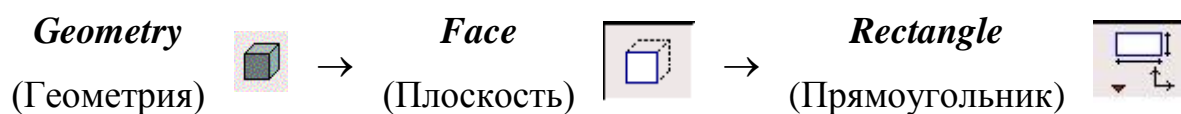


Рисунок 7- Результат вычитания поверхности

Для того чтобы вновь увидеть модель в виде каркаса следует щелкнуть на той же кнопке правой клавишей мыши и из трех появившихся кнопок выбрать .

Далее построим прямоугольник шириной 10 мм и высотой 30 мм (рисунок 8), чтобы соединить газовую полость с полостью с криогенной жидкостью. Для этого воспользуемся командой:



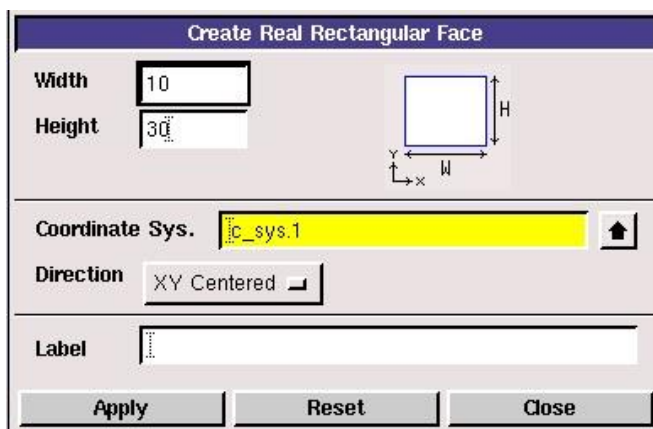
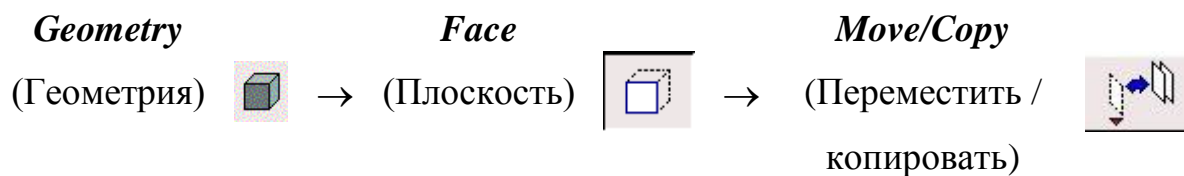


Рисунок 8 - Меню построения прямоугольника

Подтверждается построение прямоугольника нажатием кнопки «Apply».

Для смещения прямоугольника воспользуемся командой:



Смещение производим вдоль оси y на 10 мм (Рисунок 9)

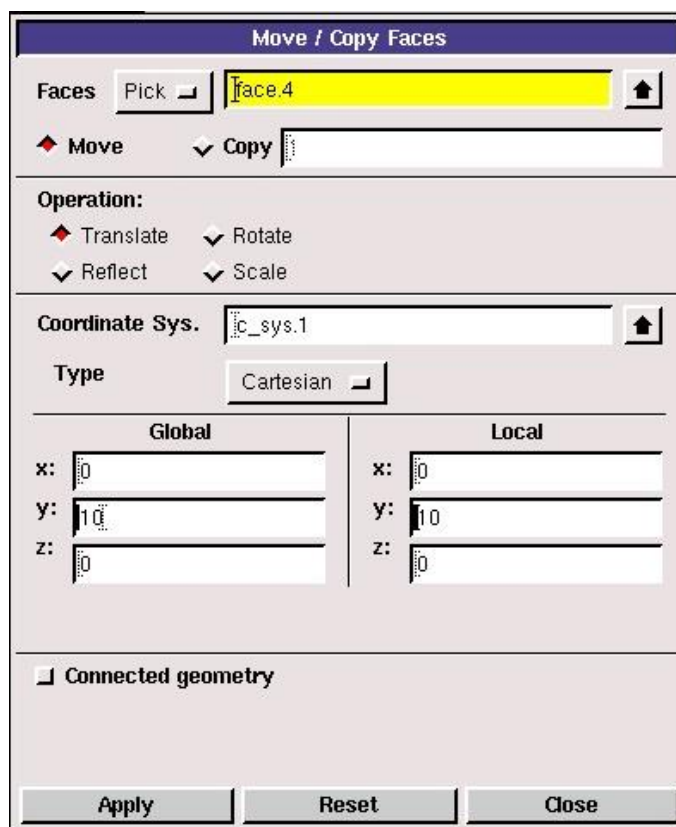


Рисунок 9 - Меню перемещения/копирования

Результат смещения прямоугольника представлен ниже на рисунке 10

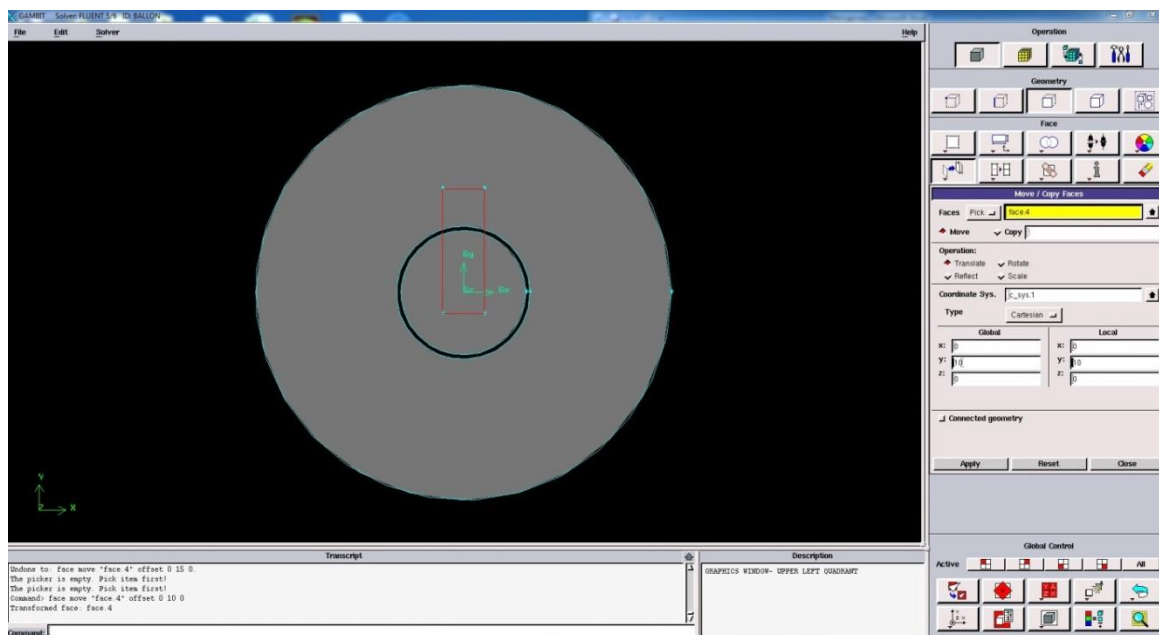
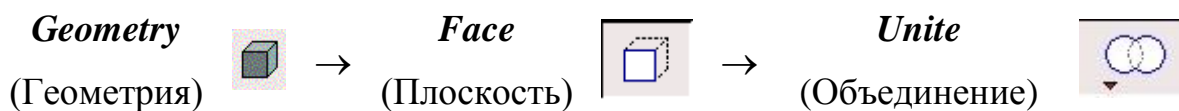


Рисунок 10 - Результат смещения прямоугольника

Теперь необходимо объединить внешнюю и внутреннюю полость баллона с помощью построенного прямоугольника. Для этого воспользуемся командой:



Появится меню *Unite Faces* (рисунок 11)

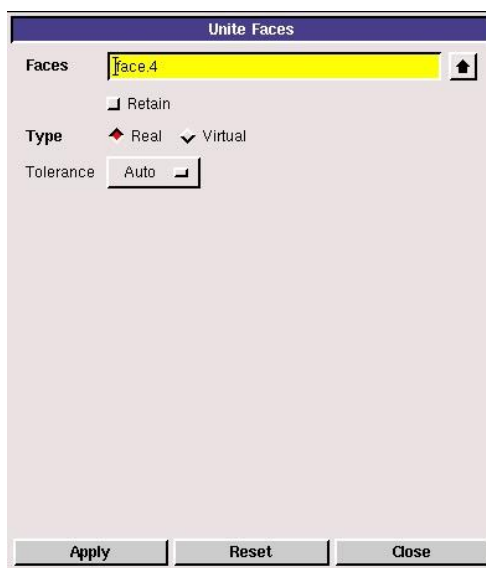


Рисунок 11 - Меню объединения поверхностей

Зажав клавишу *Shift* последовательно выбираем все три поверхности, после чего нажимаем кнопку «*Apply*». Результат объединения представлен ниже на рисунке 12.

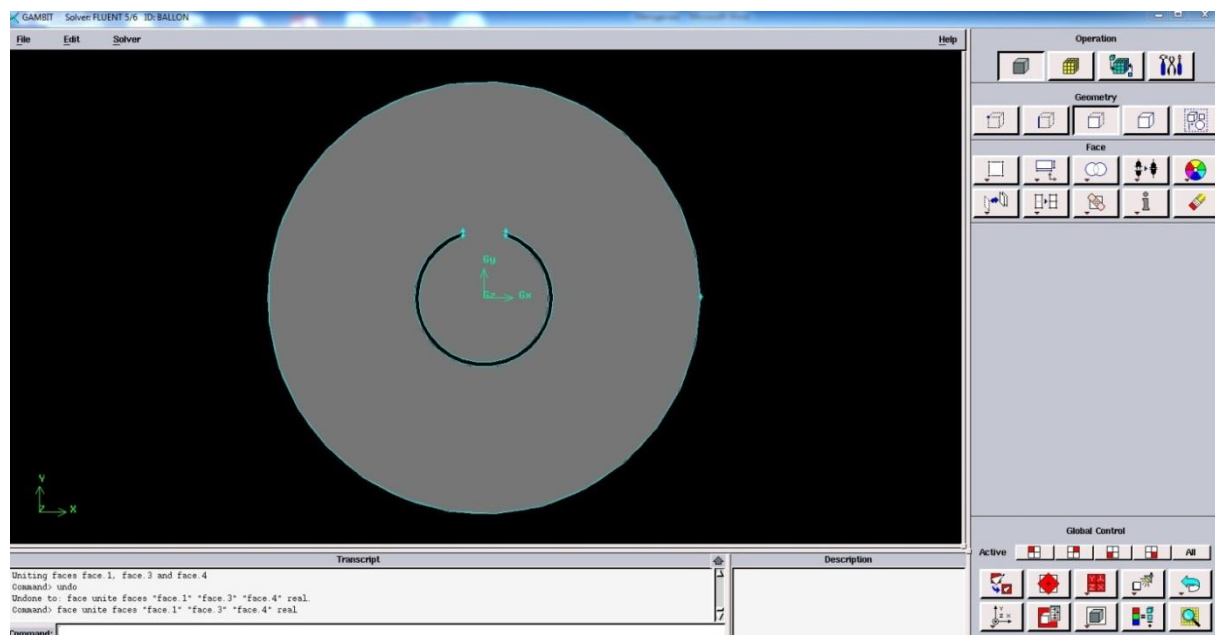
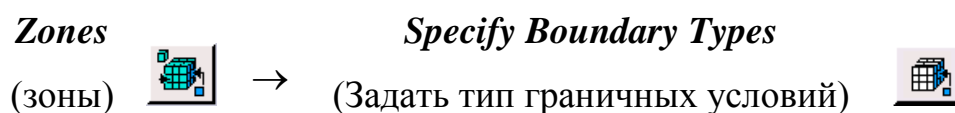


Рисунок 12 - Результат объединения поверхностей

5. 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 выхода в меню задания граничных условий (рисунке 13) следует нажать следующие кнопки в главном меню:



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.

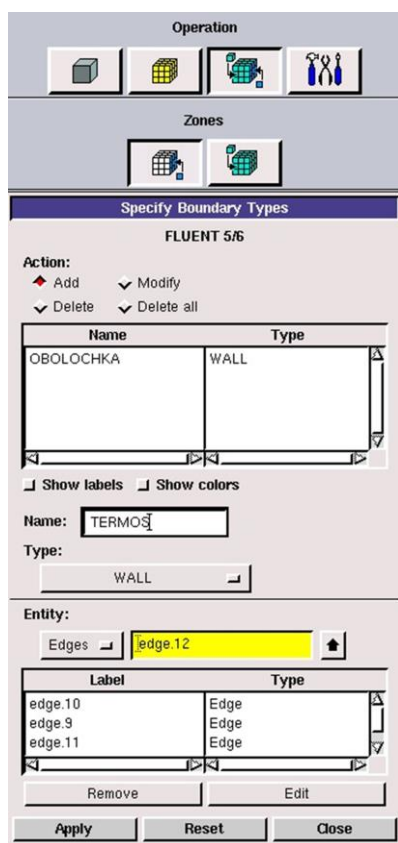


Рисунок 13 - Меню задания граничных условий

– 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.

– Здесь необходимо отдельно выделить внешнюю оболочку баллона и термоса.

– 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 внешнюю оболочку баллона (окружность радиусом 50 мм). Если произошла ошибка, то удалить линию из списка можно, нажав кнопку *Remove*.

- Выбранные настройки границы подтверждаются нажатием кнопки «Apply».

В результате выполнения команды в списке в верхней части меню появится название созданного граничного условия, а в области построения оно будет выделено цветом и высветится его имя.

Аналогично выбираются линии принадлежащие термосу (рисунок 14).

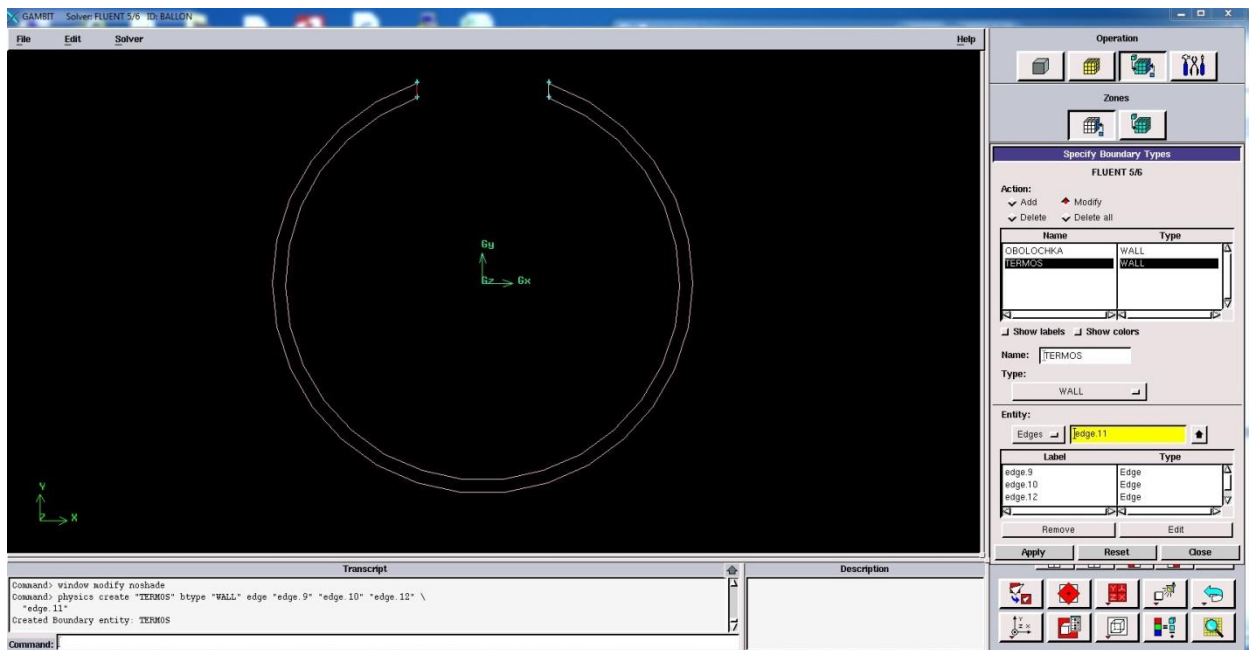


Рисунок 14 - Выбор граничных условий

6. Построение конечно-элементной сетки.

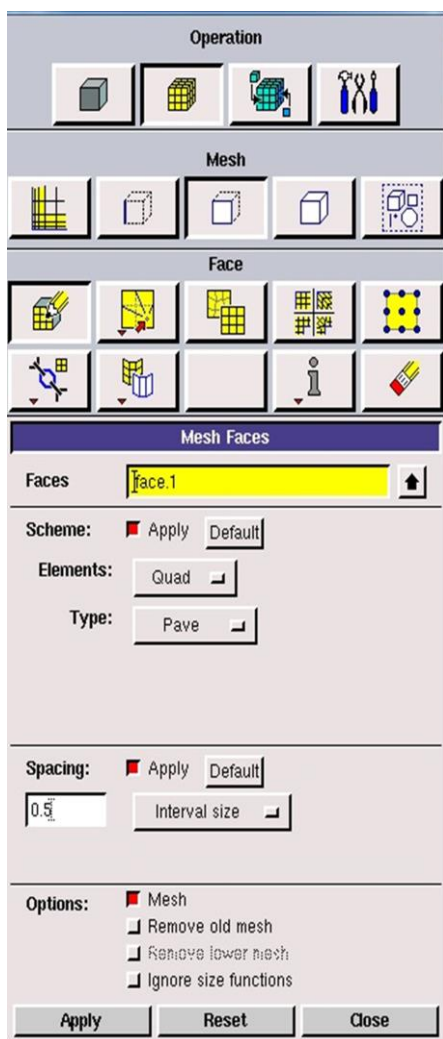
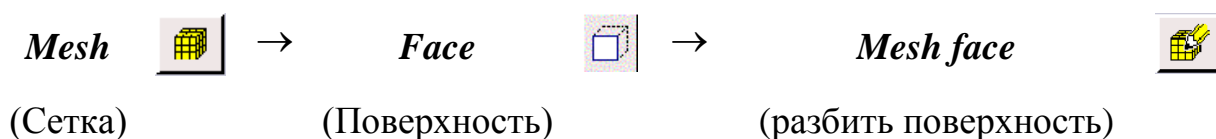


Рисунок 15 - Меню разбиения поверхности

В программном комплексе *ANSYS Gambit* 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.

Решение рассматриваемой задачи течения газа в первом приближении целесообразно провести на неструктурированной конечно-элементной сетке, поскольку такое разбиение не составит большого труда и не займет много времени.

Разбиение поверхности осуществляется с помощью команды:



В результате появится меню, изображенное на рисунке 15.

В нем следует провести следующие манипуляции:

- В поле *Face* надо выбрать поверхности, которые будут разбиваться.
- 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 *Pave*).
- В поле *Spacing* (рисунок 15) вводится требуемый размер конечного элемента (например, *0.5 мм*).

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

Результат построения конечно-элементной сетки приведен на рисунке 16.

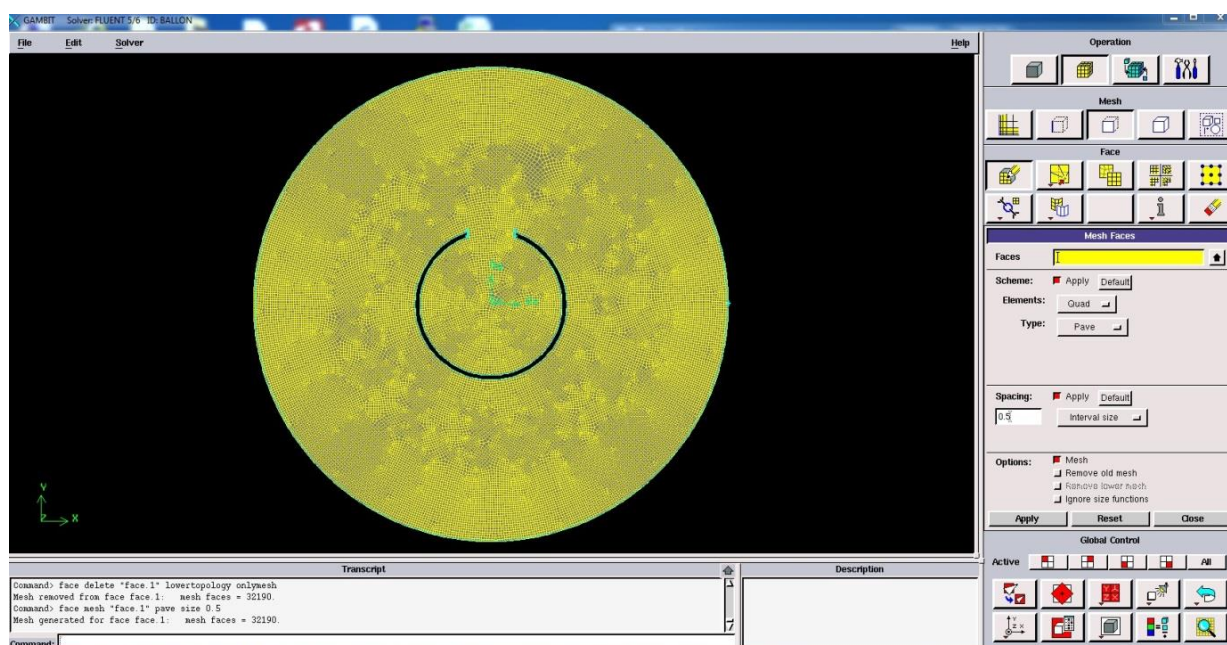


Рисунок 16 - Результат построения конечно-элементной сетки

7. Передача построенной расчетной модели в 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, *BALLON.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) Mash*. Запись файла обмена подтверждается нажатием кнопки *Accept*. Если файл обмена был успешно записан, то в окне сообщений появится надпись *mash was successfully written to <имя файла>.msh*.

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

8. Сохранение модели *ANSYS Gambit*.

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

BM: File → Save.

9. 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.

2.2 Моделирование теплофизических процессов в одно - и двухфазных криогенных системах с использованием пакета *ANSYS Fluent*.

2.2.1 Запуск программы *ANSYS Fluent* и ее особенности

Дальнейшими действиями с расчетной моделью, которые производятся в программе *ANSYS Fluent*, являются задание граничных условий, настройка параметров решателя, решение и обработка результатов.

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

Пуск → *Все программы* → *ANSYS 14.5* → *Fluid Dynamics* → *Fluent*

Перед открытием рабочего окна программы появится меню (рисунок 17), предлагающее выбрать параметры для решения задачи:

2D, 3D, Working directory, Display options, Параметры обработки (Выбрать *Parallel* в случае расчета на многоядерном процессоре).

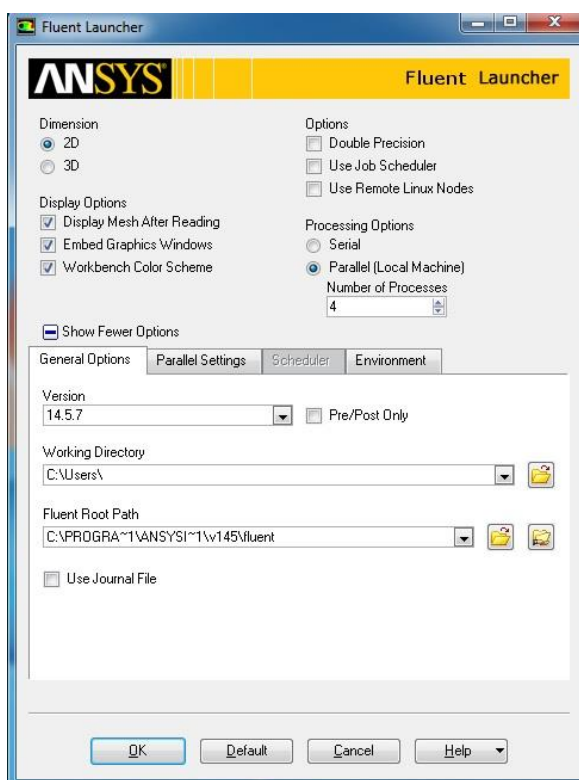


Рисунок 17 – Меню запуска программы *ANSYS Fluent* (*Fluent Launcher*)

В рассматриваемом случае задача является двухмерной. После выбора нужно нажать кнопку *OK*. В результате на экране компьютера появляется рабочее 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. Число графических окон может быть любым.

2.2.2 Настройка решения задачи. Проверка качества сетки

1. Загрузка файла сетки - *BALLON.msh*

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.

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 (рисунок 18), 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.

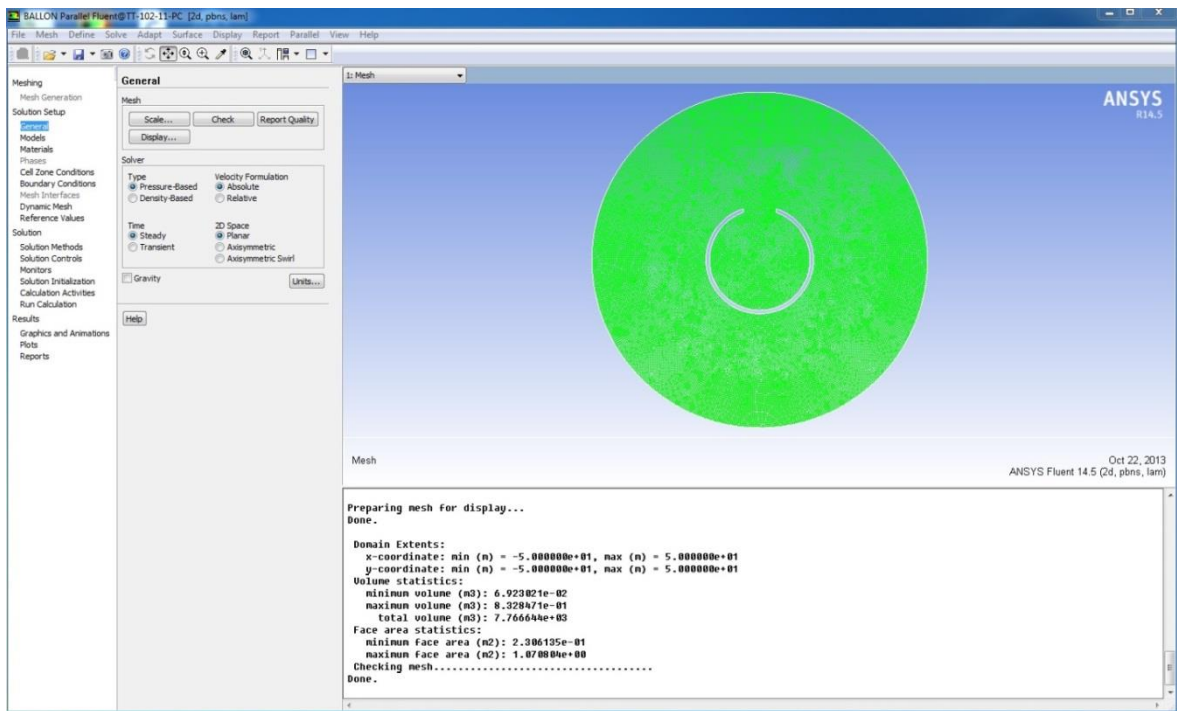


Рисунок 18 – Отображение сетки (*Mesh Display*)

3. Масштабирование конечно-элементной сетки

Размеры расчетных моделей в программе *ANSYS Fluent* должны быть обязательно заданы в метрах. Так как рассматриваемая модель ёмкости с криогенной заправкой была создана в миллиметрах, то поэтому построенную сетку нужно уменьшить в *1000* раз. Для этого в программе есть удобная команда масштабирования *Scale Mesh* (рисунок 19). Она вызывается из главного меню командой:

ГМ: Mesh → Scale

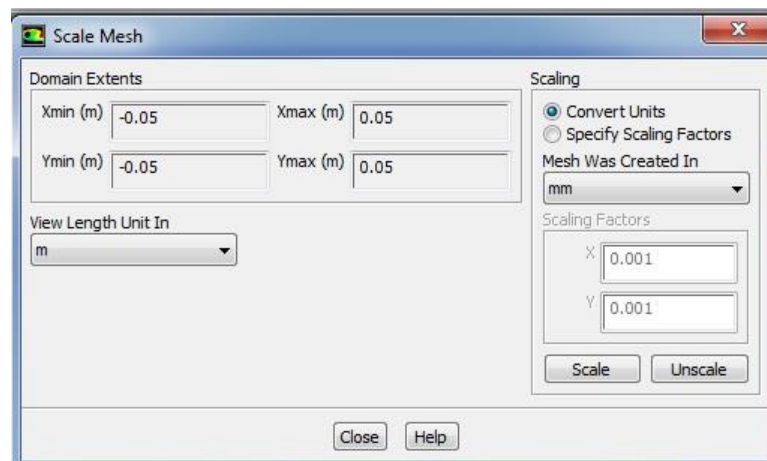


Рисунок 19 – Меню настройки масштаба (*Scale Mesh*)

В поле *Domain Extents* меню приведены максимальные координаты модели. В меню *Scale Mesh* в поле *Grid 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 приведена в соответствующий масштаб. 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*.

4. Просмотр конечно-элементной сетки

Просмотреть конечно-элементную сетку загруженной модели можно с помощью команды:

ГМ: Mesh→Display

В появившемся меню *Mesh Display* (рисунок 20) в окне *Surfaces* требуется выбрать все граничные поверхности, которые пользователь хочет просмотреть. Следует обратить внимание на то, что имена в списке совпадают с именами граничных условий, заданных в *ANSYS Gambit*. Для просмотра выбранных элементов сетки нужно нажать кнопку *Display*.

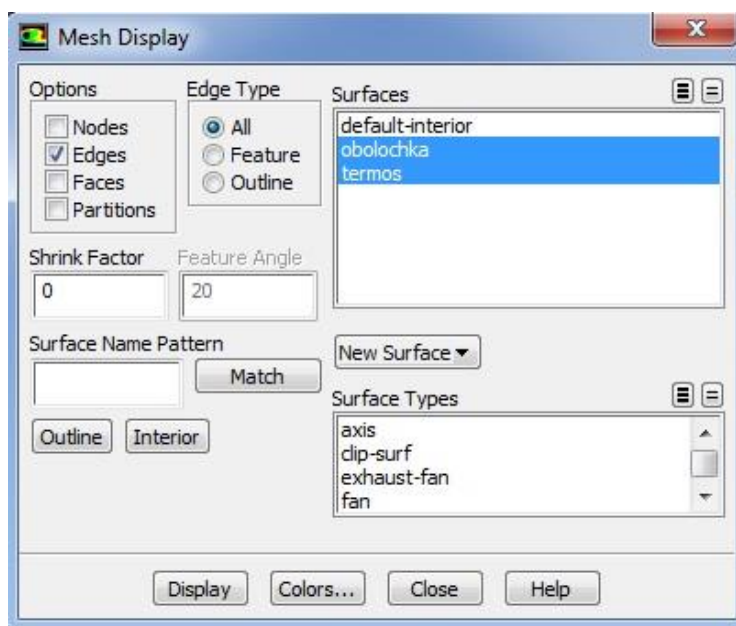


Рисунок 20 – Отображение сетки (*Mesh Display*)

В результате выполнения команды появится графическое окно, в котором будет изображена расчетная сетка или выбранные элементы модели.

Примечание: В результате масштабирования, модель может не отобразиться на экране, так как имеет малый размер. Для того, чтобы изучить конечно-элементную сетку внимательнее, 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.

2.2.3 Настройка параметров модели расчета

1. 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 в меню *Solver*:

ГМ: Solver

В меню *Solver* (рисунок 21) нужно обратить внимание на следующие моменты. Программа *ANSYS Fluent* позволяет использовать два алгоритма решений: *Pressure Based* (алгоритмом установления) или *Density Based* (алгоритм расщепления). Первый из них изначально разрабатывался для низкоскоростных потоков, но впоследствии был модифицирован и распространен и на другие течения. Алгоритм установления создавался для расчетов высокоскоростных транс- и сверхзвуковых потоков. Для решения рассматриваемой задачи целесообразно выбрать *Pressure Based*.

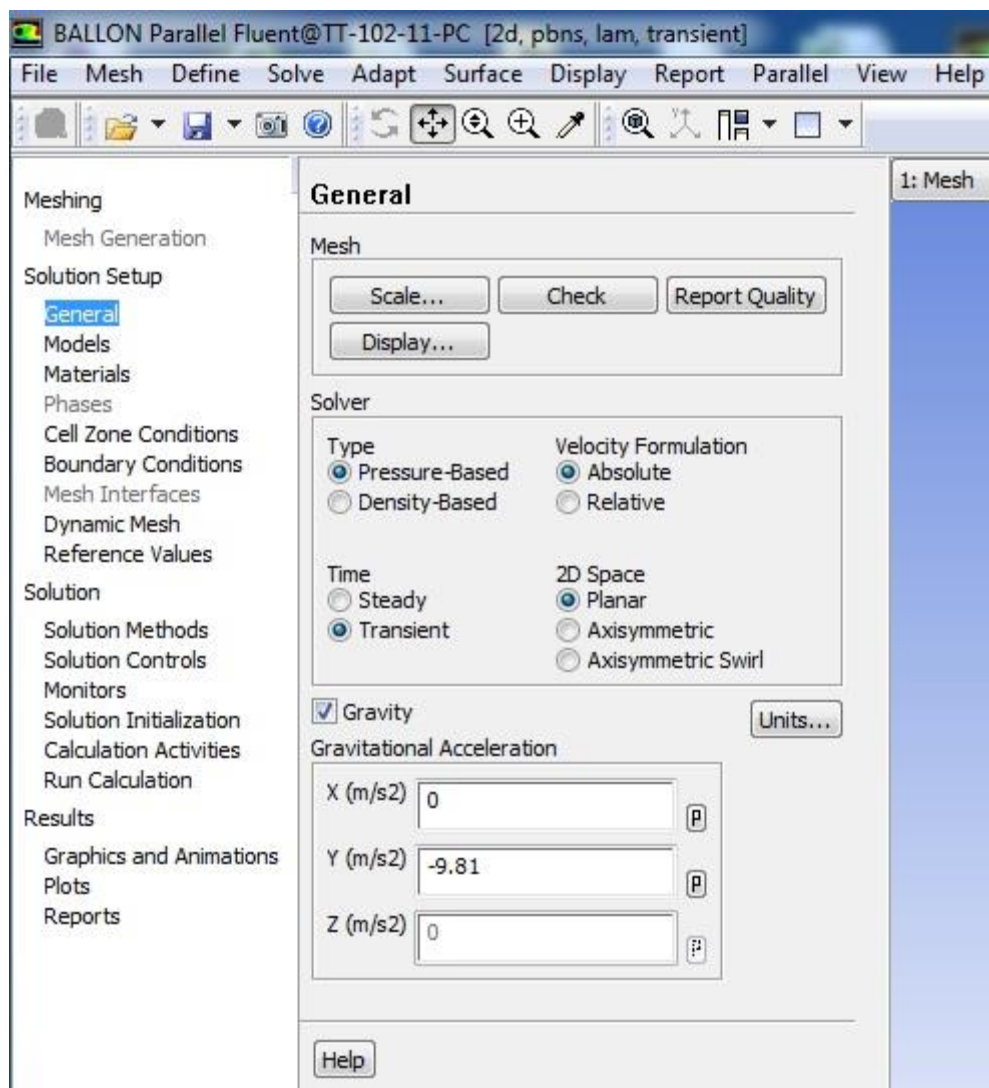


Рисунок 21 – Меню настройки решателя (*Solver*)

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 двухмерной нестационарной. Вводим значения ускорения свободного падения в поле *Gravitational Acceleration* для оси *Y* равное -9.81.

2. Подключение уравнения энергии

При решении данной задачи необходимо учитывать теплообмен и теплопередачу. Для этого к решению подключается уравнение энергии (рисунок 22) с помощью команды:

GM: Models → *Energy*.

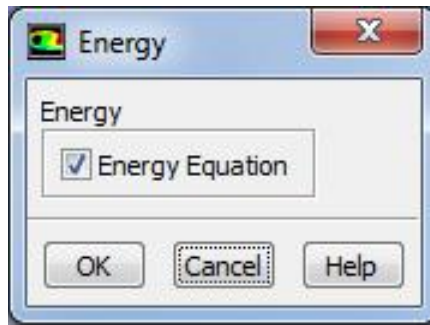


Рисунок 22 – Меню включения уравнения энергии (Energy)

3. Выбор модели турбулентности

Течение газа внутри газовой полости баллона будет *ламинарным* – течение, при котором жидкость или газ перемещается слоями без перемешивания и пульсаций (то есть беспорядочных быстрых изменений скорости и давления). При исследовании регазификации газа в баллоне целесообразно использовать модель турбулентности *Laminar* (рисунок 23).

ГМ: Models → Viscous.

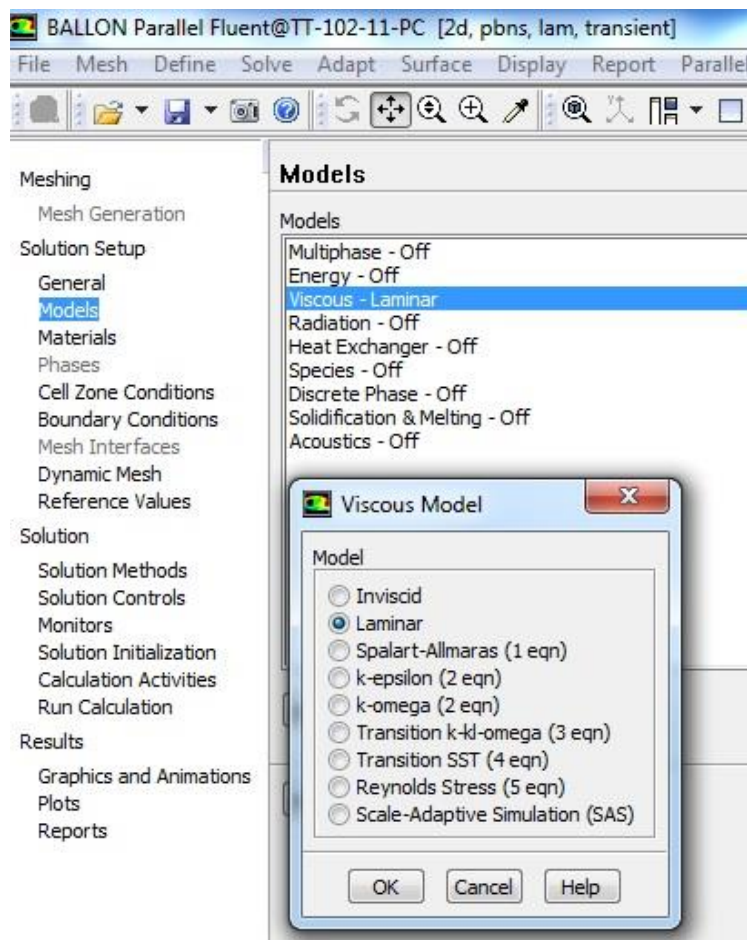


Рисунок 23 – Настройка параметров турбулентности (*Viscous*)

4. Настройка параметров двухфазного состояния

В рассматриваемой задаче будут присутствовать две фазы состояния – жидкость и газ (рисунок 24).

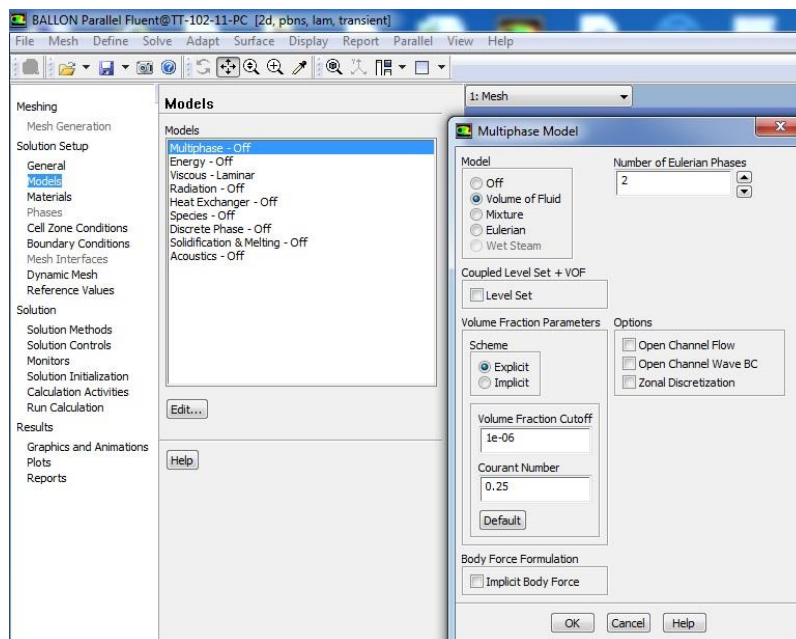


Рисунок 24 – Меню настройки параметров двухфазного состояния (*Multiphase*)

Опция активируется в меню *Multiphase*. Модель многофазности выбирается *Volume of Fluid*, где количество фаз (*Number of Eulerian Phases*) задается равной двум.

ГМ: Models → Multiphase

5. Интерпретация пользовательских функций (*UDF*)

Пользовательские функции используются для определения массообмена между фазами и задания свойств азота при криогенных температурах.

Для интерпретации пользовательских функций необходимо воспользоваться командой:

ГМ: Define → User-Defined → Functions → Interpreted...

В строке *Source File Name* указываем путь к *UDF* файлу *udf.c*. *Stack Size* указываем 10000, включаем опцию *Use Contributed CPP* (рисунок 25). Затем нажимаем *Interpret*. Процесс компиляции может занять некоторое время. Когда компиляция закончится, нажмите кнопку *Close*. В случае ошибки в

окне сообщений будет отображена строка в которой возникла ошибка, необходимо проверить правильность написания *UDF*.

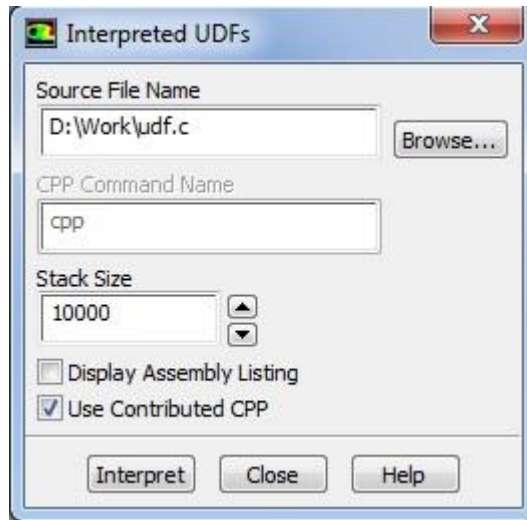


Рисунок 25 – Меню интерпретации *UDFs*

2.2.4 Задание свойств рабочего тела

Задание свойств рабочего тела осуществляется в меню *Materials* (рисунок 26), которое вызывается командой:

ГМ: Define → Materials

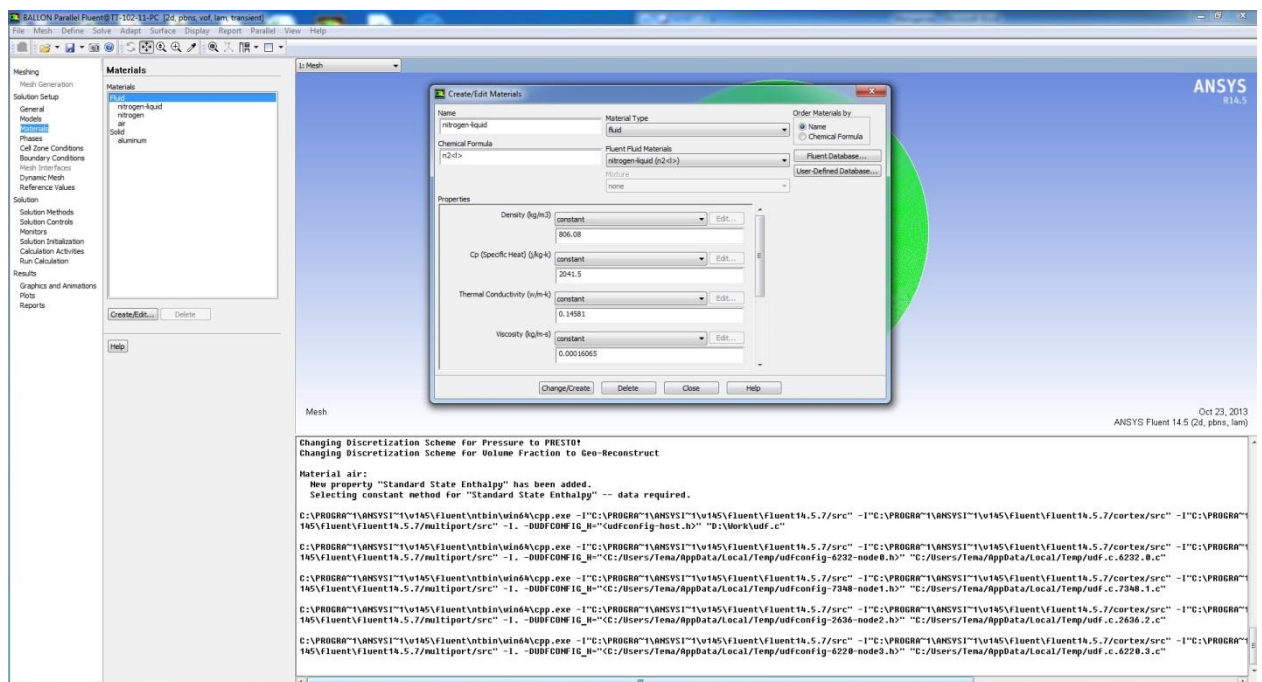


Рисунок 26 – Меню материалы (*Materials*)

В рассматриваемой задаче в качестве рабочего тела используется азот в различных фазовых состояниях. Для того, чтобы осуществить эту установку, в меню *Materials* необходимо нажать кнопку *Fluent Data Bases*, далее в появившемся списке *Fluent Fluid Materials* выбрать необходимые материалы:

1. nitrogen

Для свойств *nitrogen* зададим следующие параметры:

В разделе плотности (*Density*) выбираем идеальный газ. Для изобарной теплоёмкости (*Cp*) выберем *user-defined (cp_g)* из ранее скомпилированной *UDF* (Рисунок 27).

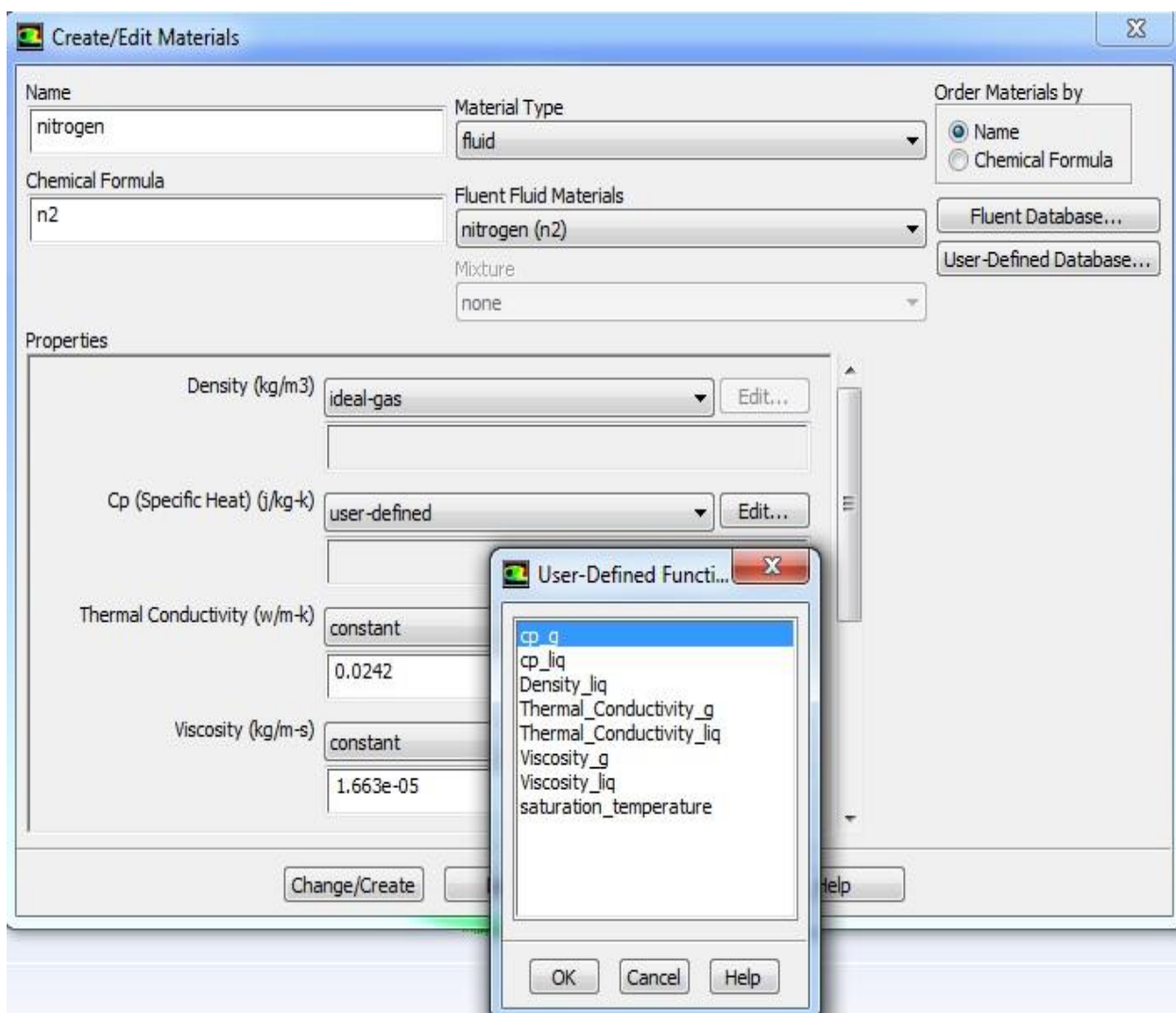


Рисунок 27 – Меню настройки свойств *nitrogen*

Аналогичным образом задаём пользовательские функции для теплопроводности (*Thermal Conductivity*) - *Thermal_Conductivity_g*, вязкости (*Viscosity*) - *Viscosity_g*.

2. nitrogen-liquid

Для свойств *nitrogen-liquid* зададим следующие параметры:

В разделе плотности (*Density*) выбираем *user-defined* (*Density_liq*). Для изобарной теплоёмкости (*Cp*) выберем *user-defined* (*cp_liq*), теплопроводность (*Thermal Conductivity*) - *Thermal_Conductivity_liq*, вязкость (*Viscosity*) - *Viscosity_liq* (рисунок 28).

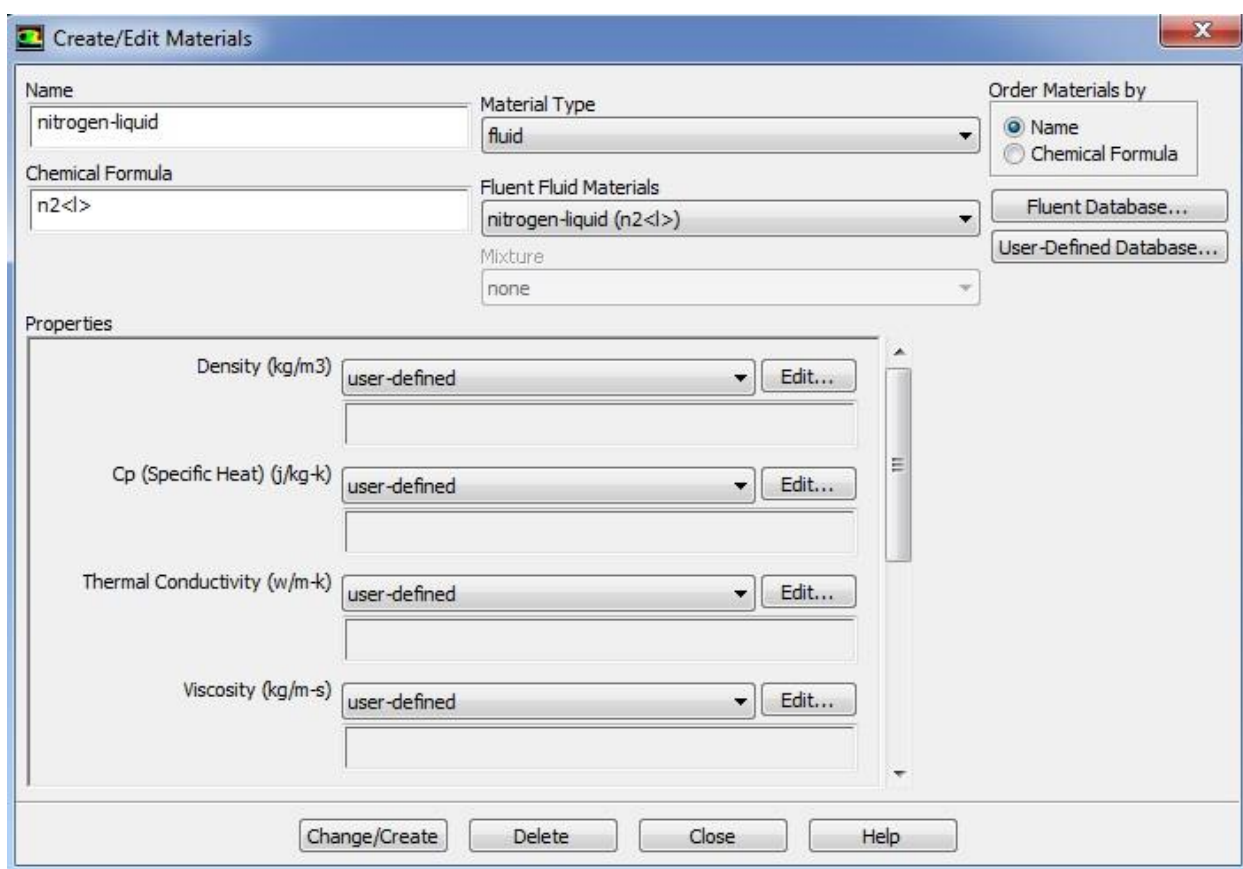


Рисунок 28 – Меню настройки свойств nitrogen-liquid

2.2.5 Установка модели испарения-конденсации

Для настройки данного процесса необходимо присвоить заданным рабочим средам соответствующие фазы:

ГМ: Define → Phases

Далее необходимо выполнить следующие действия:

- установить *phase-1 – nitrogen* (рисунок 29);
- установить *phase-2 – nitrogen - liquid*.

Затем необходимо определить взаимодействие между фазами. Для этого выполняется следующая последовательность действий:

- чтобы открыть панель взаимодействия фаз *Interaction...*, проводится манипуляция:

ГМ: Define → Phases → Interaction...

- выбираем вкладку *Mass* выбирается испарение-конденсация (*cavitation*);
- в графе *Number of Mass Transfer Mechanisms* ставим 1;
- в *From Phase* выбираем *Phase-2*, в *To Phase* выбираем *Phase-1*;
- во вкладке *Mechanism* выбирается испарение-конденсация (*evaporation-condensation*);
- темп испарения (*Evaporation Frequency*) и темп конденсации (*Condensation Frequency*) приравниваем к 0.1;
- для температуры кипения (*Saturation Temperature*) используем пользовательскую функцию (*user-defined*) – *saturation_temperature* (рисунок 30).

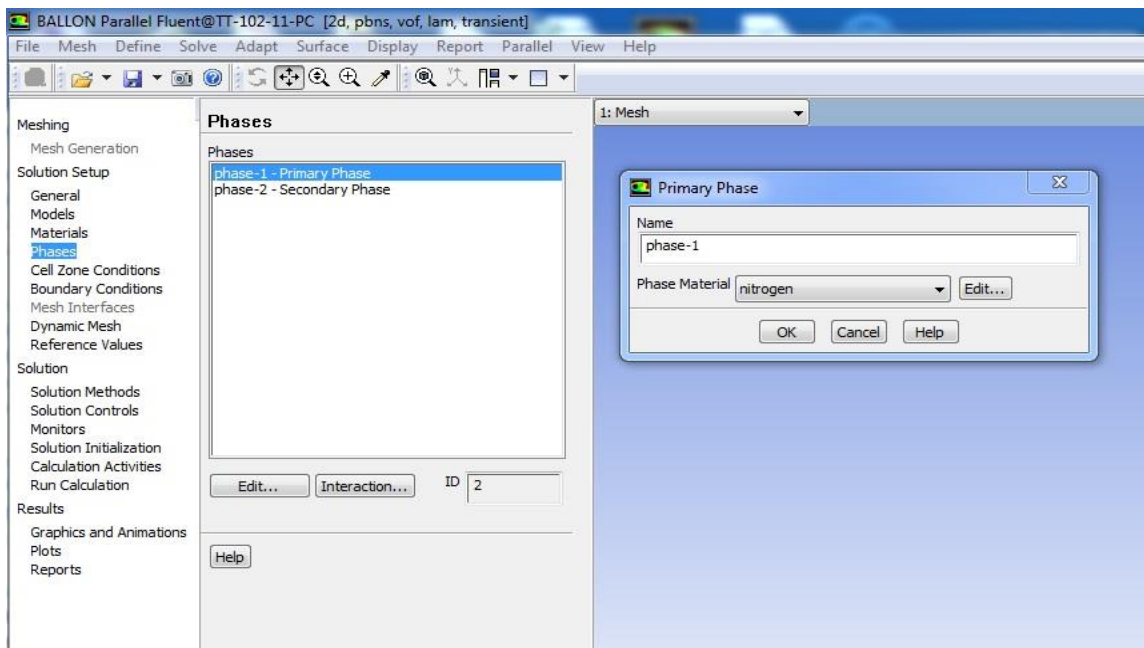


Рисунок 29 – Выбор и установка фаз (*Phases*)

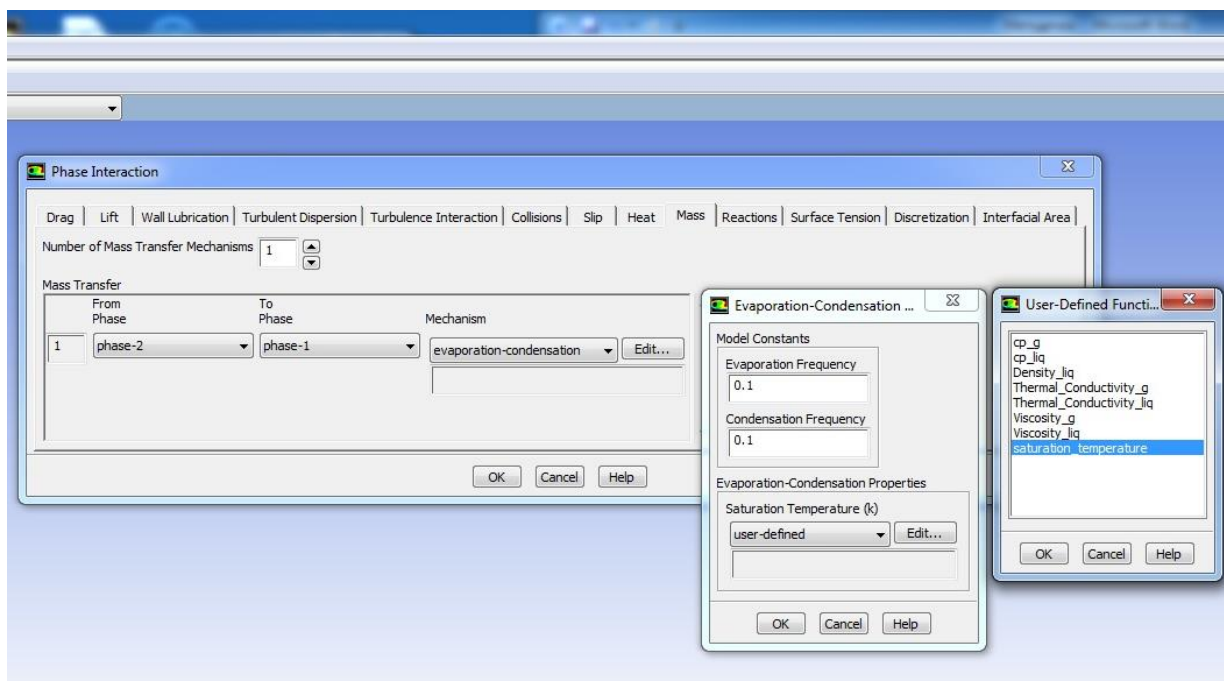


Рисунок 30 – Панель взаимодействия фаз (*Phase Interaction*)

2.2.6 Граничные условия

Затем вызывается меню задания граничных условий (рисунок 31) вызывается командой:

ГМ: Define → Boundary Conditions

В поле *Zone* находится список всех граничных условий, определенных в *ANSYS Gambit*. Если выбрать имя одного из них, например *obolochka*, 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 затем нажать *Edit...* После этого выполняются следующие действия:

1. Устанавливаются параметры для внешней оболочки баллона (*obolochka*), согласно рисунку 32:
 - выбирается вкладка *Thermal*;
 - в разделе *Thermal Conditions* выбираем *Temperature*;

- температуру стенки приравняем к 300 К;
- нажимаем кнопку ОК.

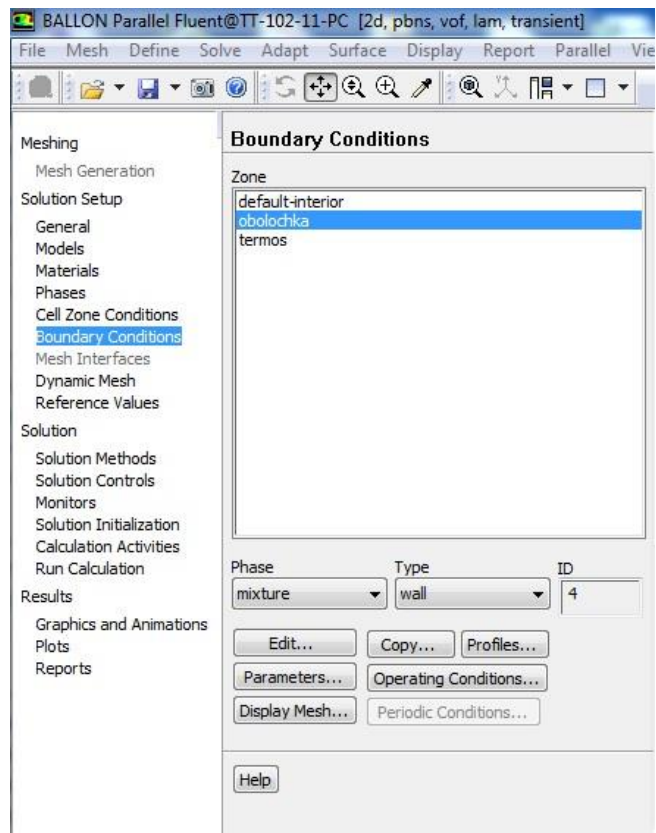


Рисунок 31 – Граничные условия (*Boundary Conditions*)

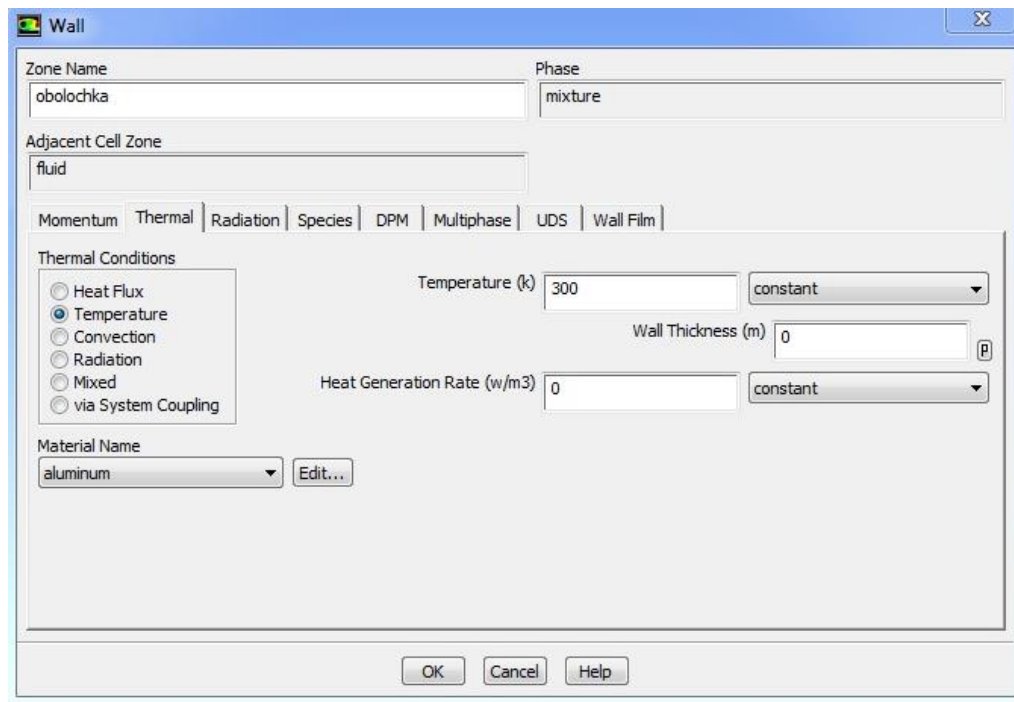


Рисунок 32 – Настройка граничных условий для оболочки баллона (obolochka)

2. Затем проводятся настройки параметров термоса баллона (*termos*), согласно рисунку 33:

- выбирается вкладка *Thermal*;
- в разделе *Thermal Conditions* удостоверьтесь, что во всех типах условий (*Heat Flux*, *Temperature* и т.д.) все значения равны 0;
- нажимаем кнопку *OK*.

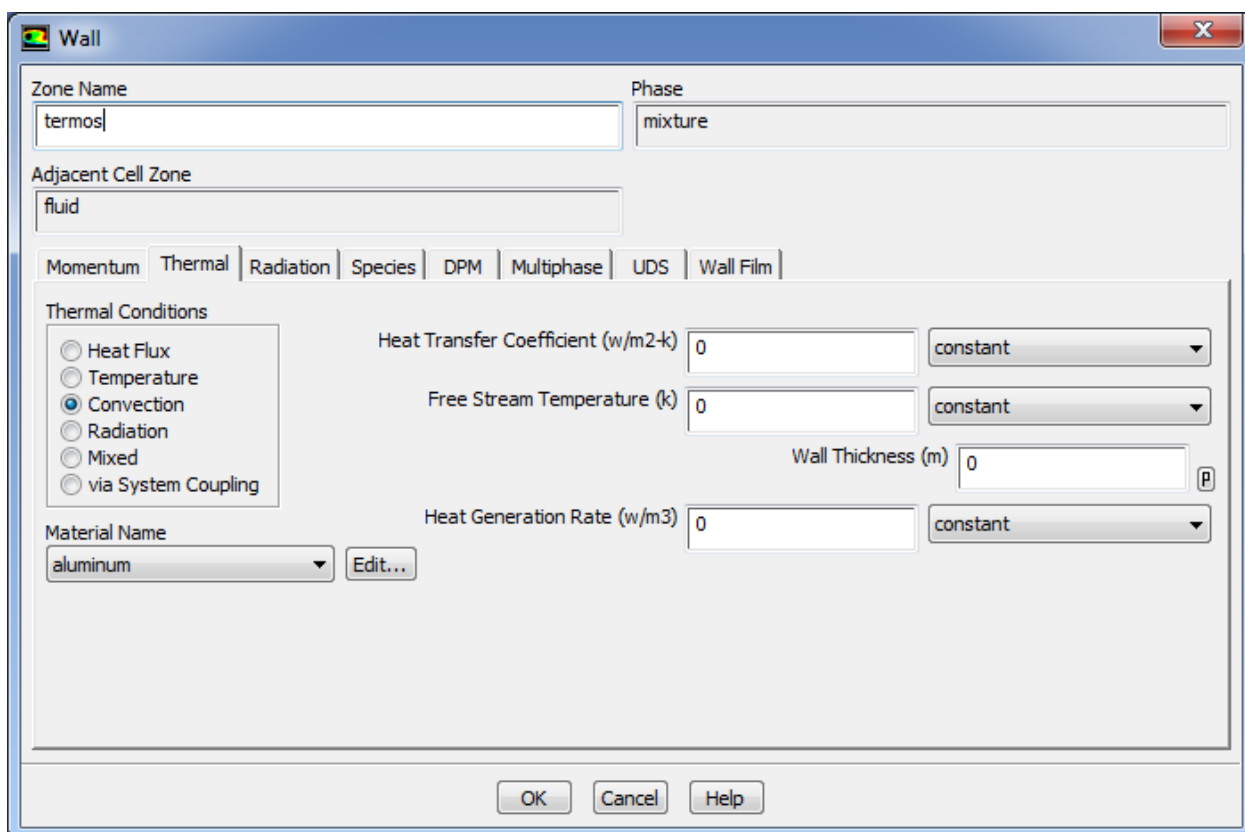


Рисунок 33 – Настройка параметров термоса баллона (*termos*)

Так как испарение азота будет происходить в закрытом объеме необходимо подключить изменяющееся рабочее давление (*Floating Operating Pressure*). Для этого воспользуемся командой:

ГМ: Define → *Operating Conditions*

Также здесь подключается гравитация (*Gravity*). Вводим значение -9.81 по оси *Y* (рисунок 34).

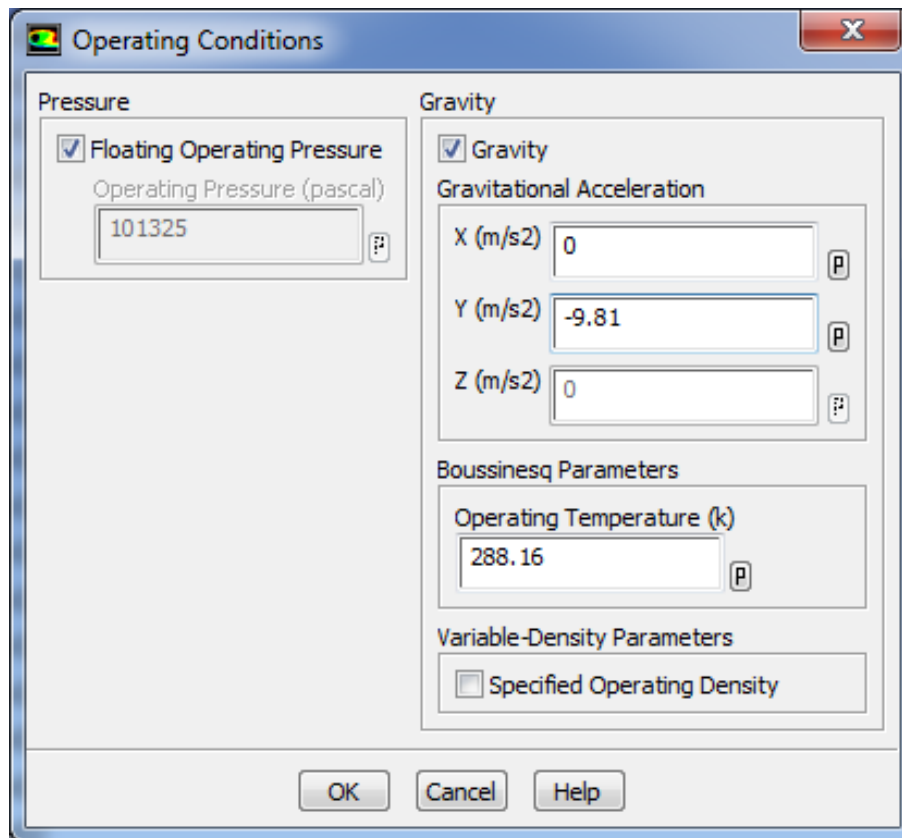


Рисунок 34 – Настройка параметров *Operating Conditions*

2.2.7 Настройка процесса решения задачи

1. Установка параметров расчета

Доступ к меню установки параметров расчета осуществляется с помощью команды:

ГМ: Solve → *Solution Methods*

В результате на экране появится меню *Solution Methods* (рисунок 35).

Данное меню состоит из трех основных групп настраиваемых параметров:

- *Spatial Discretization*;
- *Pressure-Velocity Coupling*;
- *Transient Formulation*.

В зоне *Spatial Discretization* определяются схемы дискретизации соответствующих уравнений, то есть описывается алгоритм построения

дискретного аналога дифференциального уравнения в узле конечно-элементной сетки.

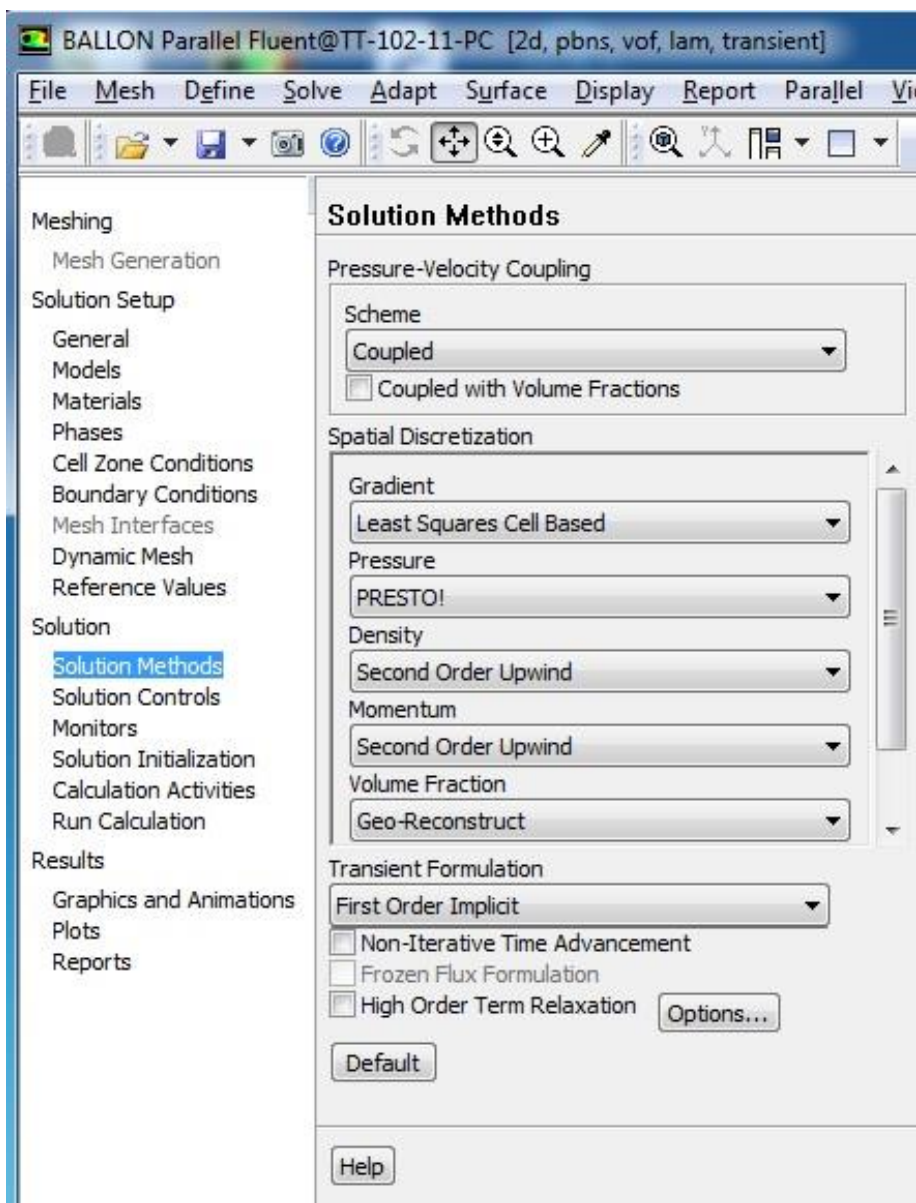


Рисунок 35 – Настройка параметров расчета (*Solution Methods*)

Для получения точных решений необходимо использовать дискретизацию второго и выше порядков точности.

В зоне *Pressure-Velocity Coupling* выбирается алгоритм решения связки уравнения движения и неразрывности для корректного определения полей давления и скорости. Для решения задач испарения-конденсации целесообразно выбирать алгоритм *Coupled*.

2. Установить факторы релаксации, как показано на рисунке 36 с помощью команды:

ГМ: Solve → Solution Controls

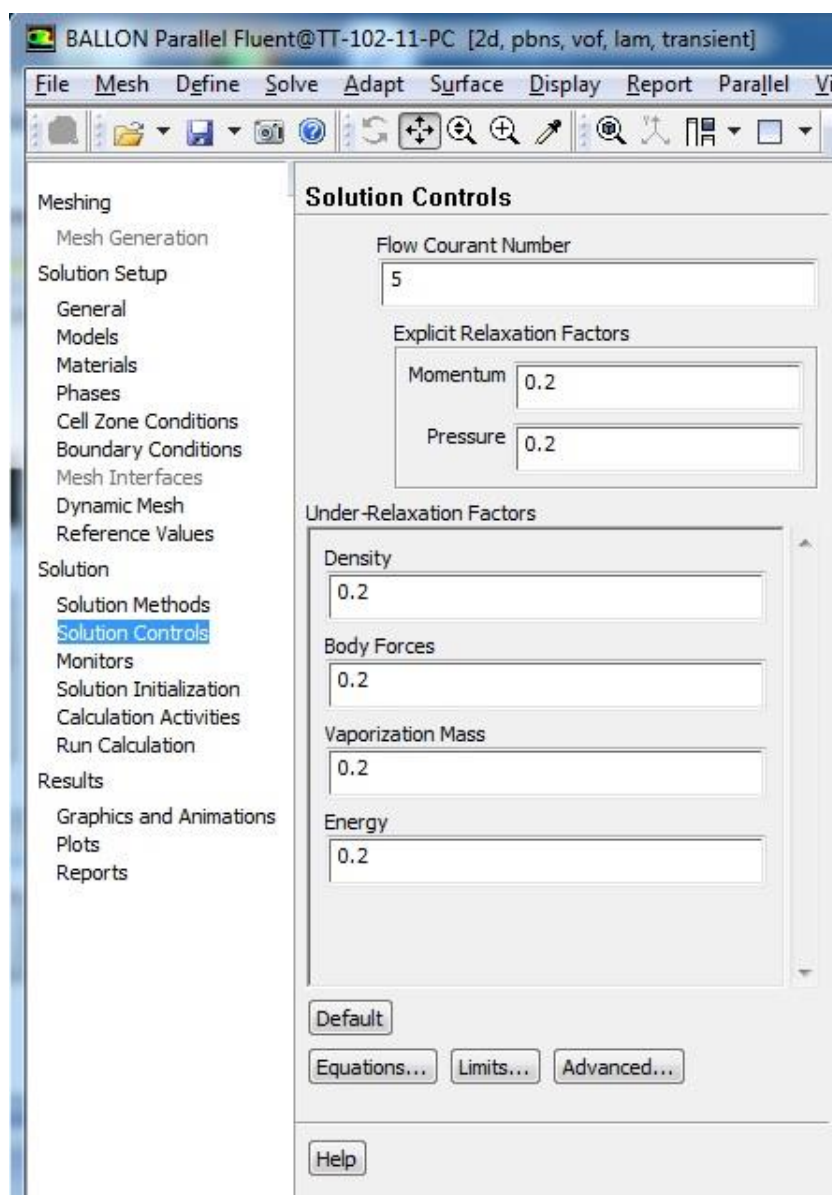


Рисунок 36 – Меню настройки контроля процесса расчета (*Solution controls*)

Для улучшения устойчивости и сходимости число Куранта (*Courant number*) уменьшить до 5 в окне меню *Solution Controls*.

В области настройки параметров *Under-Relaxation Factors* задаются коэффициенты релаксации при решении соответствующих уравнений. Уменьшение коэффициентов улучшает сходимость решения, но заметно увеличивают время счета. Снижение коэффициента релаксации широко

применяется при проблемах с запуском расчета задачи, но их выбор требует определенного опыта.

3. Установка начальных значений параметров расчета (инициализация процесса расчета).

При решении задач газовой динамики численными методами перед запуском решения необходимо установить начальные значения параметров в расчетной области. Меню установки начальных условий (рисунок 37) вызывается командой:

ГМ: Solve → Solution Initialization

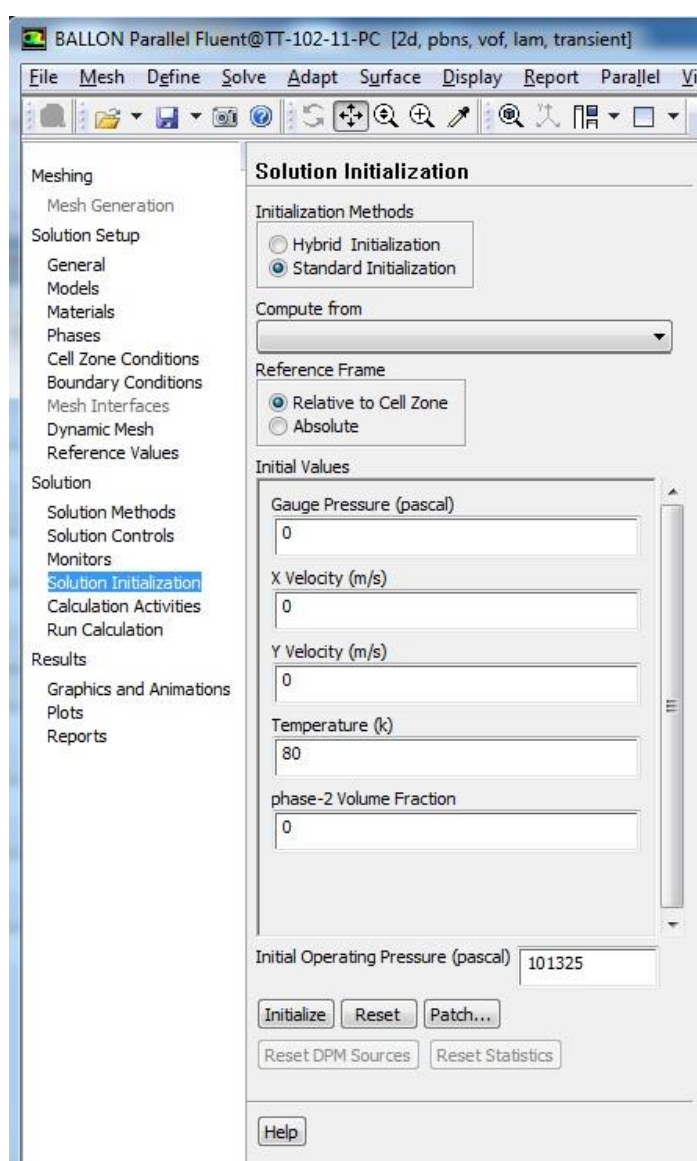


Рисунок 37 – Инициализация процесса расчета (*Solution Initialization*)

В поле данного меню *Compute From* необходимо выбрать все зоны (*all-zones*). В результате рекомендуемые значения начальных параметров будут рассчитаны по входным граничным условиям. Для их принятия следует нажать *Initialize*.

Затем необходимо указать, что в термосе находится жидкий азот. Для этого необходимо вызвать меню *Region Adaption* (рисунок 38) с помощью команды:

ГМ: Adapt → Region...

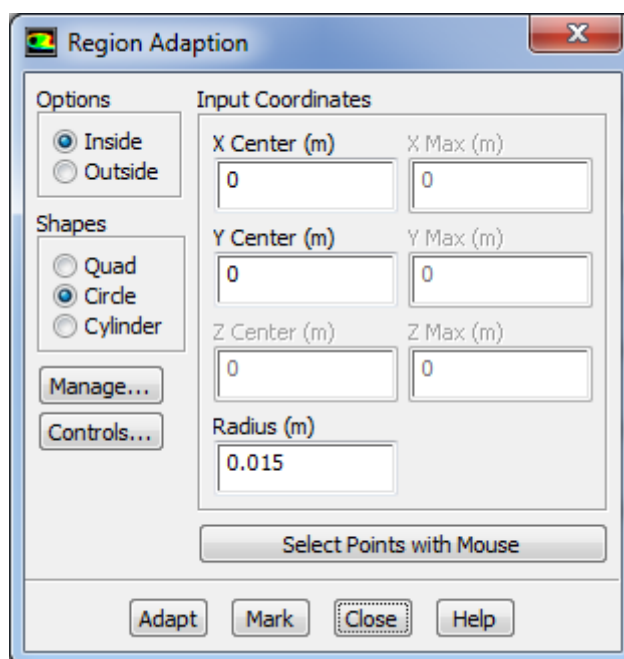


Рисунок 38 – Выделение области (*Region Adaption*)

В разделе опции (*Options*) выбираем внутри (*inside*). В разделе формы выбираем окружность (*Circle*). Радиус указываем равный 0.015 м (радиус внутренней полости термоса). Для завершения операции нажимаем кнопку *Mark*.

После чего снова переходим в меню инициализации и нажимаем кнопку *Patch* (рисунок 39):

ГМ: Solve → Solution Initialization → Patch...

В разделе *Phase* выбираем *phase-2*. В разделе переменной (*Variable*) выделяем объёмная доля (*Volume Fraction*). Значение (*Value*) приравниваем к

единице. В разделе списка областей (*Registers to Patch*) выделяем ранее созданную с помощью меню *Region Adaption* область. Для завершения операции нажимаем кнопку *Patch*.

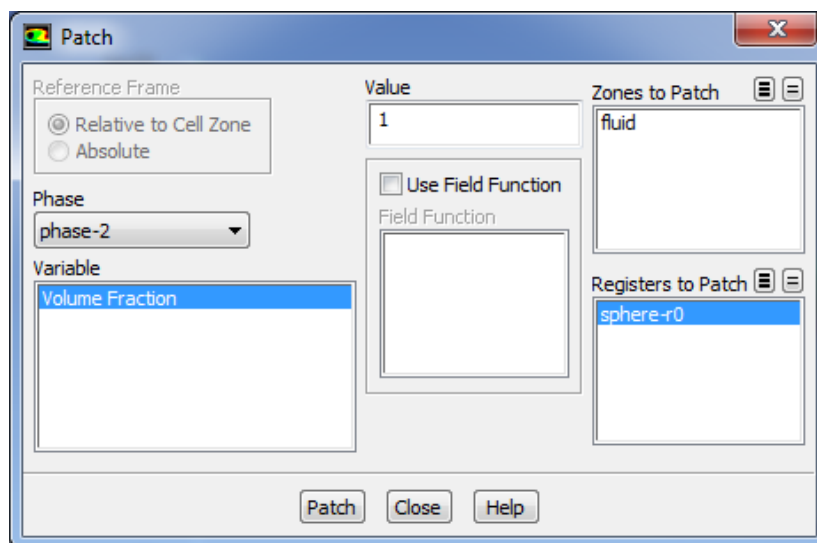


Рисунок 39 – Меню задания свойств отдельной области (*Patch*)

После этого необходимо проверить наличие жидкого азота в указанной области. Для этого воспользуемся меню *Graphics and Animations* (рисунок 40):

ГМ: Display → Graphics and Animations...

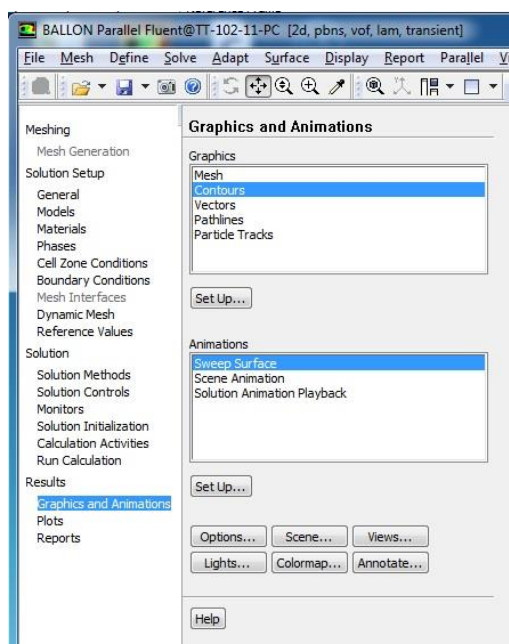


Рисунок 40 – Меню отображения результатов расчёта (*Graphics and Animations*)

В разделе *Graphics* выбираем *Contours* и нажимаем кнопку *Set Up*.
Появится меню *Contours* (рисунок 41).

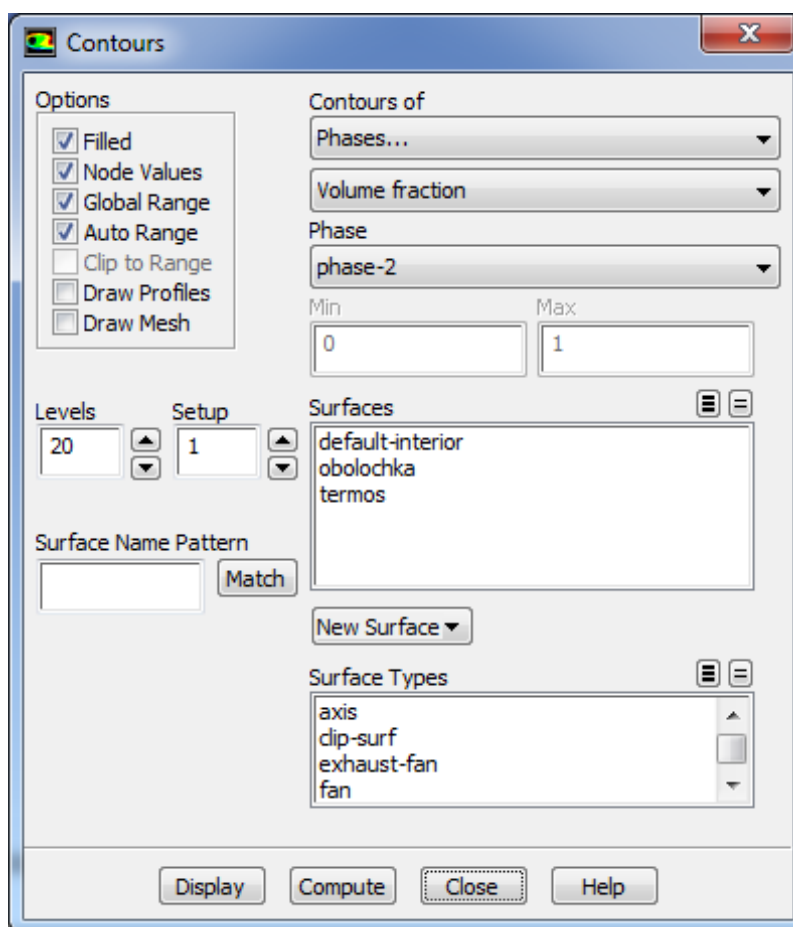


Рисунок 41 – Меню *Contours*

В разделе *Contours of* выбираем *Phases*, ниже по умолчанию оставляем *Volume fraction*. В разделе *Phase* выбираем *phase-2*. Затем нажимаем кнопку *Display*. После этого на экране должно появиться распределение жидкой фазы азота (рисунок 42). Перед началом расчёта весь жидкий азот должен находиться в термосе.

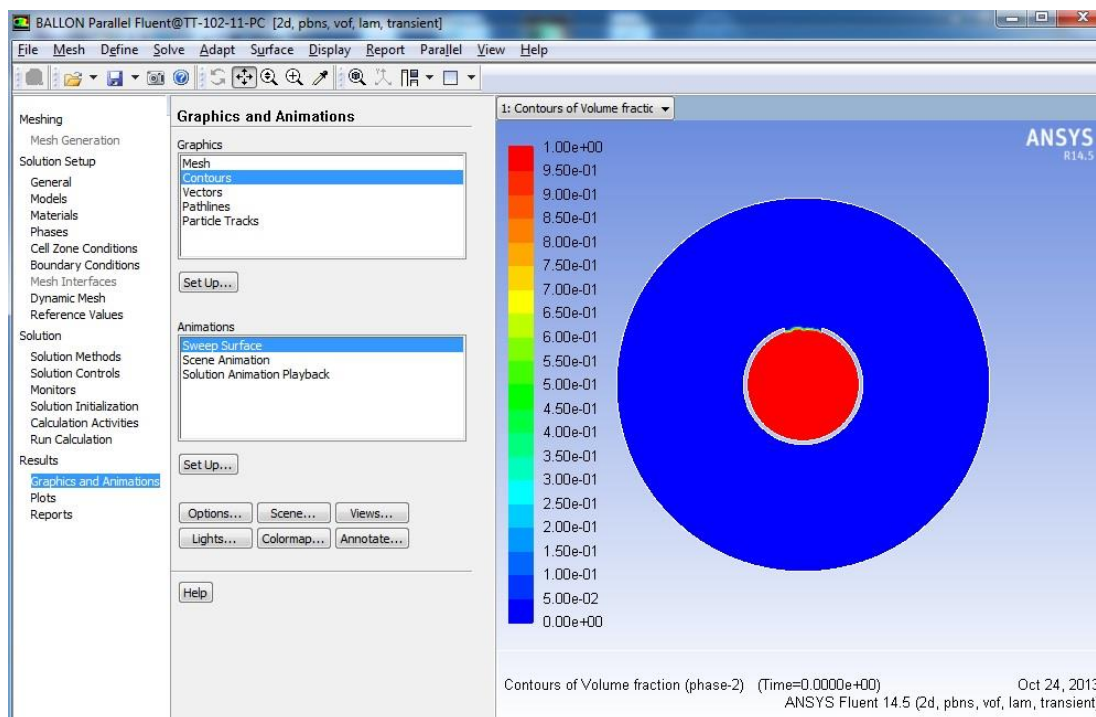


Рисунок 42 – Поле распределения жидкой фазы азота перед началом расчёта

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

ГМ: File → Write → Case.

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

- Запускаем расчет с помощью следующих действий (рисунок 43):

ГМ: Solve → Run Calculation

Размер временного шага (*Time Step Size*) следует указать не более 0.01 секунды. Число временных шагов следует задать не менее 1000. Расчёт можно в любое время остановить и посмотреть результаты или продолжить его до полного испарения азота и выравнивания температуры. Вначале азот будет конденсироваться из за увеличения давления, затем дойдя до критической точки начнет испаряться. Расчёт может занять очень длительное время.

Если в процессе расчёта число Куранта превысит 250, то необходимо уменьшить размер временного шага.

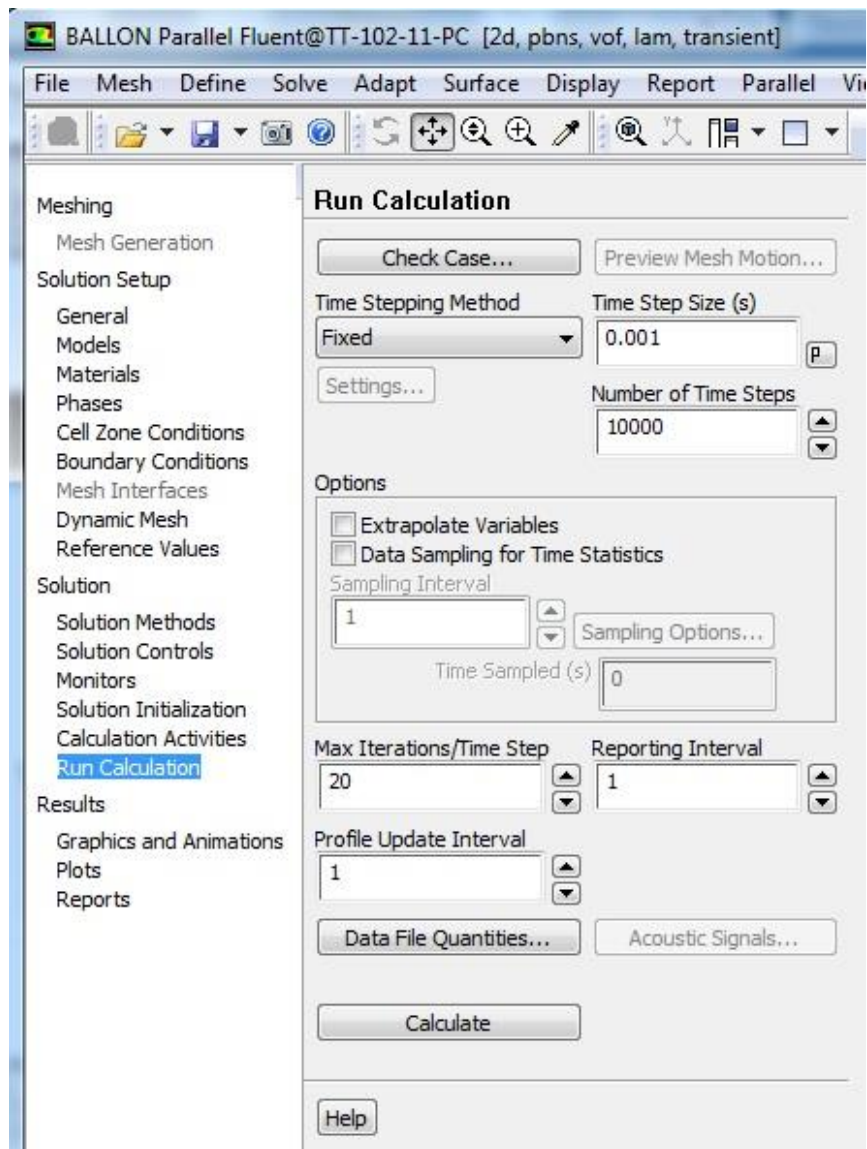


Рисунок 43 – Запуск процесса расчета (*Run Calculation*)

6. Сохраняем *case* и *data* файлы.

2.2.8 Обработка результатов расчета

На данном этапе следует отобразить контуры абсолютного давления, статической температуры, соотношения жидкой и газообразной фазы в баллоне. Для просмотра полей распределения параметров необходимо запустить команду:

FM: Display → *Graphics and Animations* → *Contours*

В результате ее выполнения появится меню *Contours* (рисунок 44). Чтобы распределение параметров отображалось в виде полей, необходимо в окошке *Filled* поставить галочку. В противном случае распределения

параметров будут изображаться в виде изолиний. Параметр, изменение которого требуется отобразить, выбирается в поле *Contours of*. Оно состоит из двух ниспадающих списков. В верхнем выбирается группа, к которой принадлежит нужный параметр (например, давление). В нижнем списке уточняется, какой именно параметр группы требуется определить (например, абсолютное давление). Это типовая и часто используемая процедура выбора отображаемого параметра в программе *ANSYS Fluent*. Аналогичным образом, определяется параметр при определении среднеинтегральных значений. В поле *Surfaces* задаются поверхности, на которых строятся поля распределений параметров. В случае, если в этом окне ничего не выбирать, то поле будет построено по всей расчетной области.

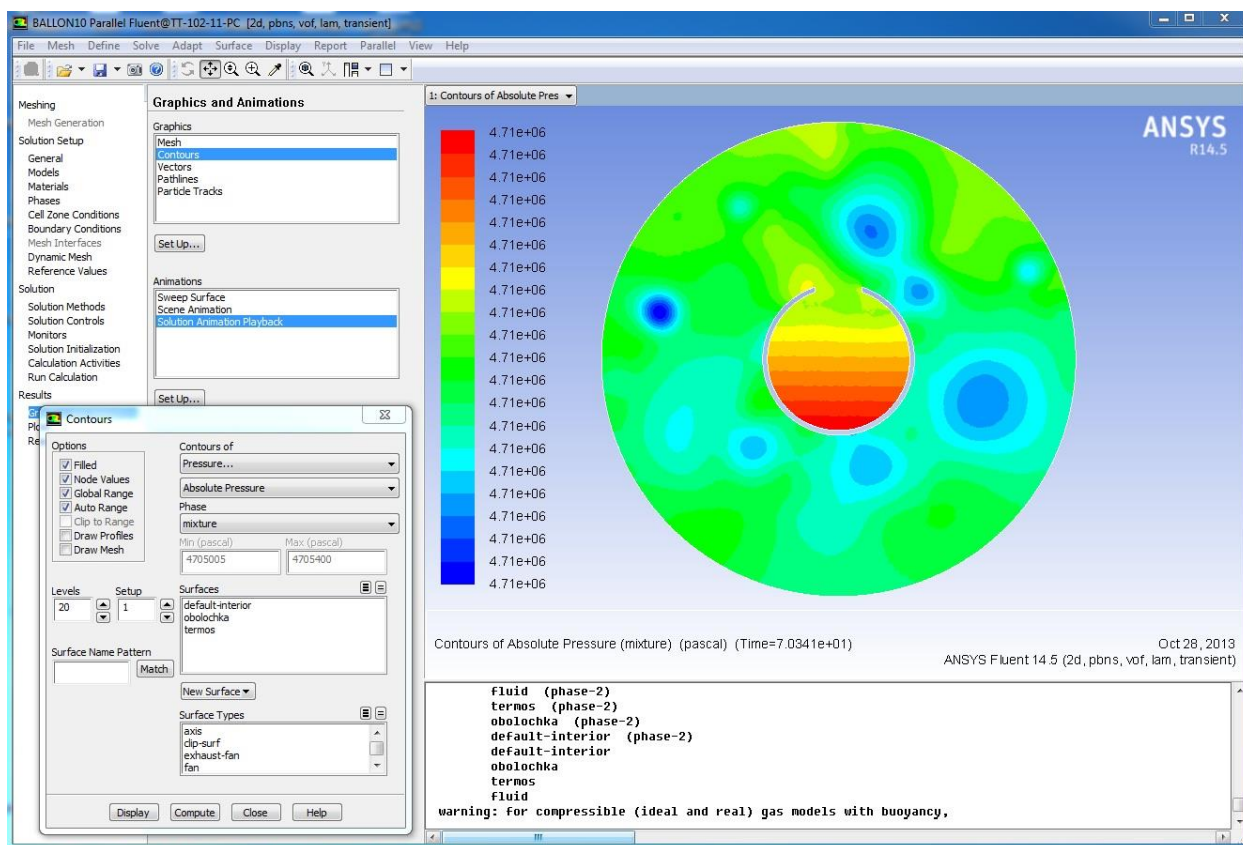


Рисунок 44 – Отображение полей абсолютного давления (*Contours*)

Аналогичным образом отображаем поля статической температуры (рисунок 45) и поля содержания жидкой фазы (рисунок 46).

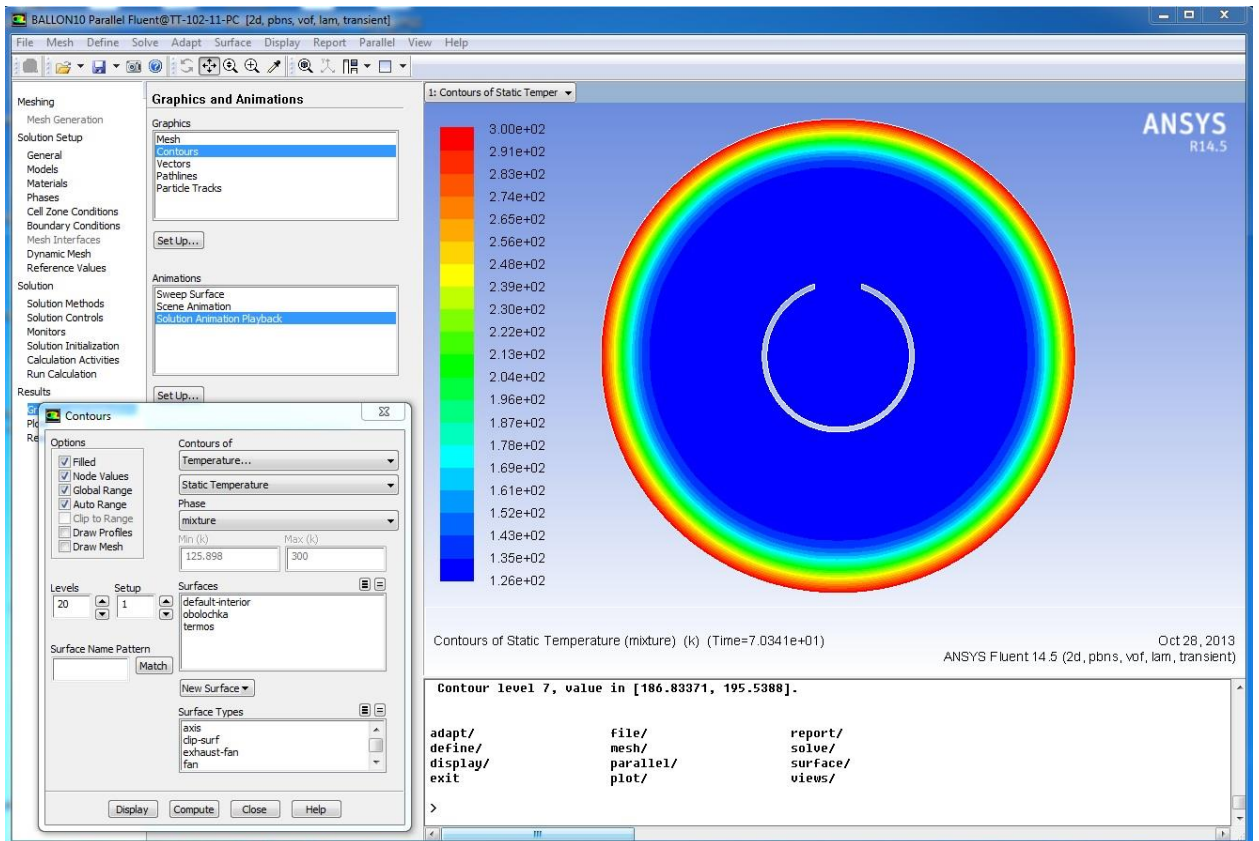


Рисунок 45 – Отображение полей статической температуры (*Contours*)

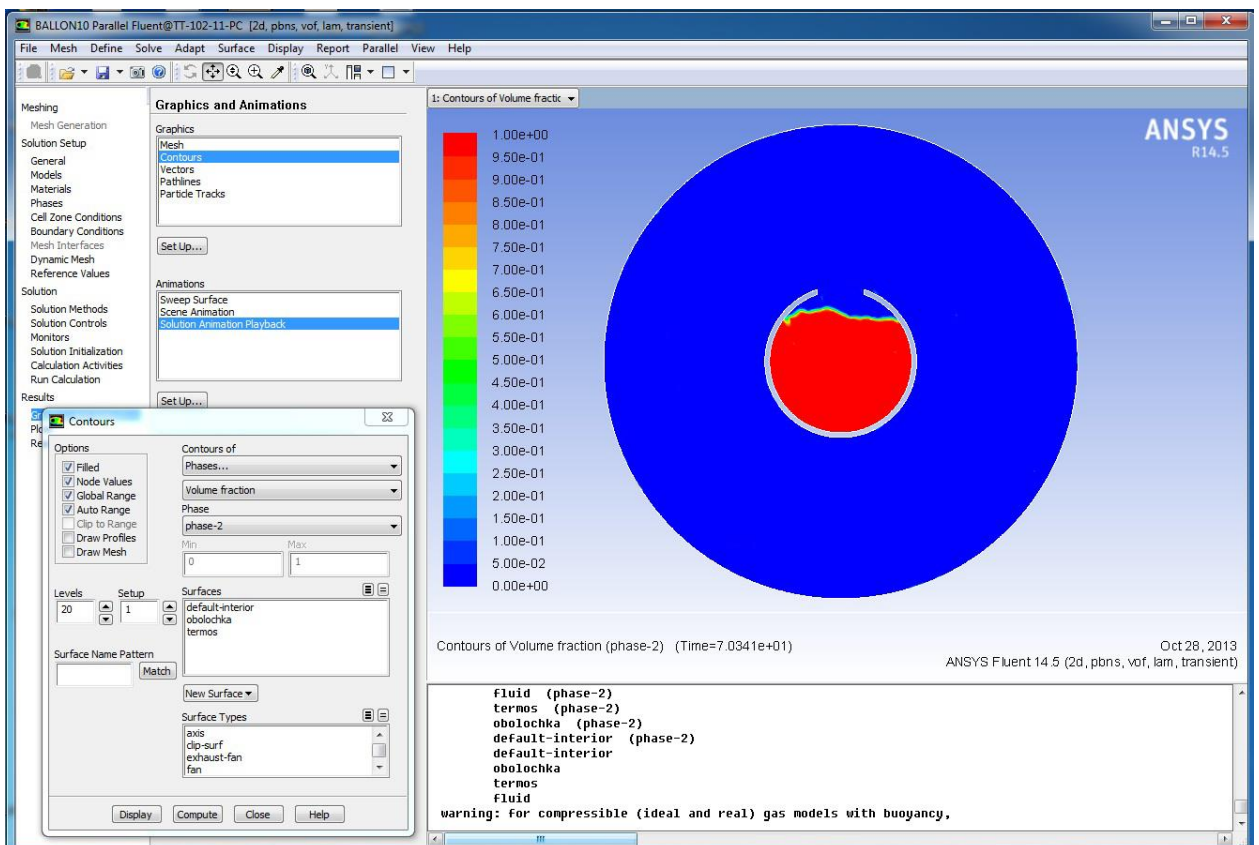


Рисунок 46 – Отображение полей содержания жидкой фазы (*Contours*)

После этого проводится визуализация векторов скоростей в расчетной области. Для этого необходимо запустить команду:

ГМ: Display → *Vectors*.

В результате ее выполнения появится меню *Vectors*. В этом меню в поле *Surfaces* нужно выбрать поверхность или границу, где необходимо отобразить векторы. В зоне *Color by* задается закономерность окраски векторов. Цвет вектора в каждой точке расчетной области будет соответствовать величине параметра, определенного в зоне *Color by*. Если размеры векторов окажутся маленькими, их можно увеличить, задав большее число в поле *Scale* (рисунок 47).

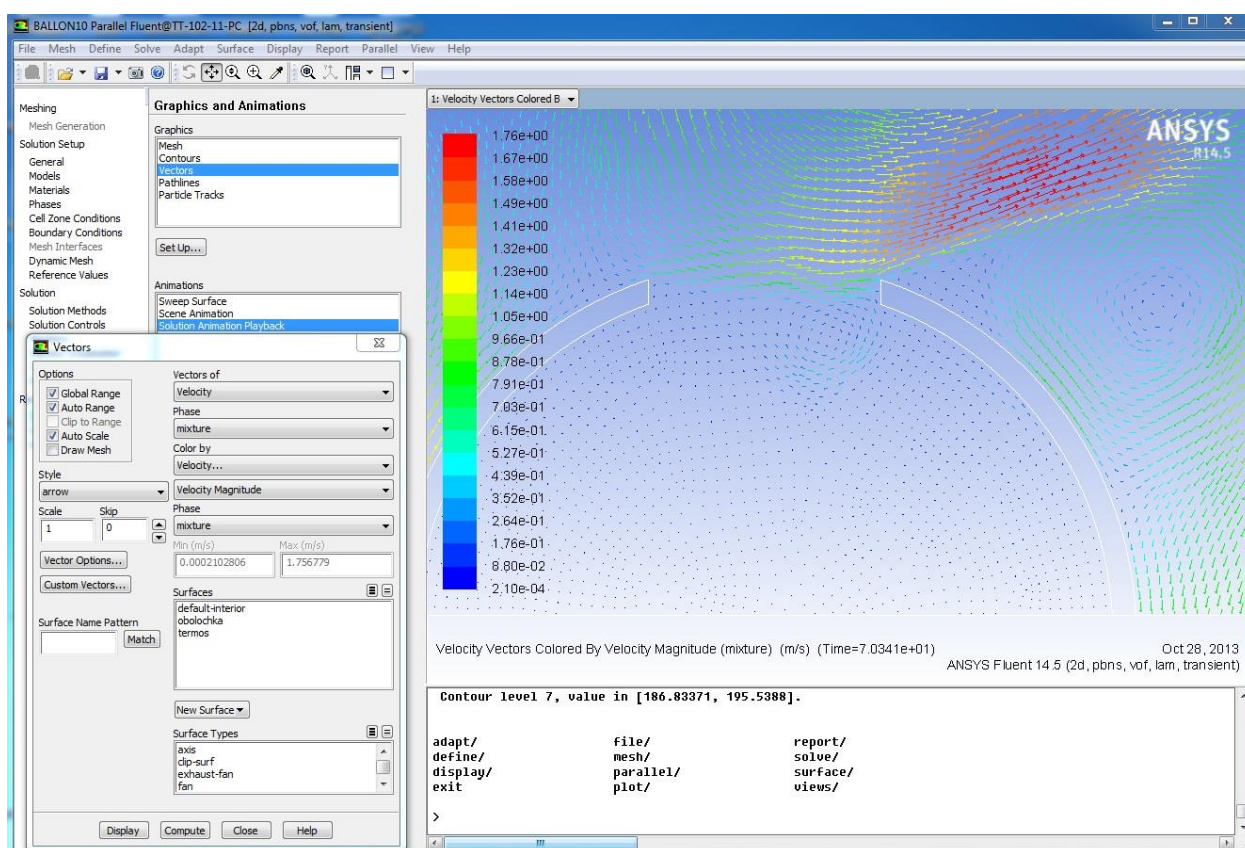


Рисунок 47 – Визуализация векторов скорости

Если векторов будет слишком много и они будут мешать анализу результатов, то их количество можно уменьшить, задав в поле *Skip* число, отличное от нуля. Это число определяет, сколько векторов не будет отображаться. Например, если в поле *Skip* стоит число 2, то это значит, что два из трех векторов не будут показаны в графическом окне.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам выполненной работы можно сделать следующие выводы:

1. Применение CAD/CAE – технологий для моделирования теплофизических процессов в одно - и двухфазных криогенных систем позволяет снизить сроки проектирования за счет ускорения процесса расчета.

2. Высокая информативность результатов численного моделирования способствует более глубокому анализу процессов, происходящих в одно - и двухфазных криогенных систем.

3. Использование пользовательских функций (*UDF*) в программном пакете *ANSYS Fluent* может значительно расширить возможности моделирования поведения криогенных жидкостей при их испарении и конденсации.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Архаров, А.М. Криогенные системы: основы теории и расчёта [Текст] / А.М. Архаров. – М.: Машиностроение, 1988. – 464 с.
2. Архаров, А.М. Низкотемпературные газовые машины (криогенераторы) [Текст] / А.М. Архаров. – М.: Машиностроение, 1969. – 224с.
3. Бродянский, В.М. Методика расчёта схем криогенных установок [Текст] : учеб. пособие / В.М. Бродянский, А.Г. Тащина. – М.: Моск. энергетич. инст., 1972. – 86 с.
4. Новотельнов, В.Н. Криогенные машины [Текст] / В.Н. Новотельнов, А.Д. Суслов, В.Б. Полтараус. – Спб.: Политехника, 1991. – 335 с.
5. Пат. 2163690 Российская Федерация, МПК7F17C9/02, F17T10/06. Топливный баллон [Текст] / Довгялло А.И., Лукачев С.В. и др.; заявитель и патентообладатель Самарский государственный аэрокосмический университет. - № 99114577/06; заявл. 02.07.1977; опубл. 27.02.2001, Бюл. №6. – 6 с.
6. Михеев, М. А. Основы теплопередачи [Текст] / М. А. Михеев, И. М. Михеева. – М.: Энергия, 1977. – 336 с.
7. Исаченко, В.П. Теплопередача [Текст]: учеб. пособие / В.А. Осипова, А.С Сукомел.– М.: Энергия, 1975.–488 с.
8. Варгафтик, Н.Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей [Текст] / Н.Б. Варгафтик. – М.: Наука, 1972. – 716с.
9. Батулин О.В. Расчет течений жидкостей и газов с помощью универсального программного комплекса. Часть 2. Построение расчетных моделей в препроцессоре Gambite / О.В. Батулин, И.И. Морозов, В.Н. Матвеев – Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2008. - 125с.

ПРИЛОЖЕНИЕ

```
#include "udf.h"

DEFINE_SPECIFIC_HEAT(cp_g, T, Tref, h, yi)
{real cp;

  if((T>=80.0)&&(T<100.0))
  {cp=1792;
  return cp;
  }

  if((T>=100.0)&&(T<110.0))
  {cp=1985;
  return cp;
  }

  if((T>=110.0)&&(T<120.0))
  {cp=2262;
  return cp;
  }

  if((T>=120.0)&&(T<130.0))
  {cp=3005;
  return cp;
  }

  if((T>=130.0)&&(T<140.0))
  {cp=4073;
  return cp;
  }

  if((T>=140.0)&&(T<150.0))
  {cp=2837;
  return cp;
  }

  if((T>=150.0)&&(T<160.0))
  {cp=2425;
  return cp;
  }

  if((T>=160.0)&&(T<170.0))
  {cp=2294;
  return cp;
  }

  if((T>=170.0)&&(T<180.0))
  {cp=2029;
  return cp;
  }

  if((T>=180.0)&&(T<190.0))
  {cp=1850;
  return cp;
  }

  if((T>=190.0)&&(T<200.0))
  {cp=1713;
  return cp;
  }
}
```



```

if((T>=200.0)&&(T<210.0))
{cp=1578;
return cp;
}

if((T>=210.0)&&(T<220.0))
{cp=1433;
return cp;
}

if((T>=220.0)&&(T<230.0))
{cp=1400;
return cp;
}

if((T>=230.0)&&(T<240.0))
{cp=1356;
return cp;
}

if((T>=240.0)&&(T<300.0))
{cp=1257;
return cp;
}

cp=1000.0;
return cp;
}

DEFINE_SPECIFIC_HEAT(cp_liq, T, Tref, h, yi)
{real cp;

if((T>=65.13)&&(T<=126.25))
{cp=(0.0011*pow(T,2)-0.1843*T+9.1952)*1000;
return cp;
}

cp=1765;
return cp;
}

DEFINE_PROPERTY(Density_liq, c, t)
{real ro;
real T;

if((T>=65.13)&&(T<=126.25))
{ro=((-0.00009*pow(C_T(c,t),2)+0.0106*C_T(c,t)+0.5435)*1000);
return ro;
}
ro=808.0;
return ro;
}

DEFINE_PROPERTY(Thermal_Conductivity_g, c, t)
{real ll;
real p_bar;
real p_op = 0.0;
p_op = RP_Get_Real("operating-pressure");

p_bar=(C_P(c,t)+p_op)/100000.0;

```

```

if((C_T(c,t)>=80.0)&&(C_T(c,t)<100.0))
{
  if((p_bar>0.999)&&(p_bar<=15))
  {ll=(7.4907*p_bar+1.1393)/1000;
  return ll;
  }

  if((p_bar>15)&&(p_bar<=400))
  {ll=(-0.00004*p_bar*p_bar+0.1473*p_bar+110.74)/1000;
  return ll;
  }
}

if((C_T(c,t)>=100)&&(C_T(c,t)<120))
{
  if((p_bar>0.999)&&(p_bar<=15))
  {ll=(2.4786*p_bar+7.9214)/1000;
  return ll;
  }

  if((p_bar>15)&&(p_bar<=400))
  {ll=(0.000005*pow(p_bar,3)-0.0033*pow(p_bar,2)+0.7504*p_bar+48,828)/1000;
  return ll;
  }
}

if((C_T(c,t)>=120)&&(C_T(c,t)<140))
{
  if((p_bar>0.999)&&(p_bar<=15))
  {ll=(0.1521*p_bar+11.842)/1000;
  return ll;
  }

  if((p_bar>15)&&(p_bar<=400))
  {ll=(29.721*log(p_bar)-70.277)/1000;
  return ll;
  }
}

if((C_T(c,t)>=140)&&(C_T(c,t)<160))
{
  if((p_bar>0.999)&&(p_bar<=400))
  {ll=(4*pow(10, -7)*pow(p_bar,3)-0.0007*pow(p_bar,2)+0.4277*p_bar+10.488)/1000;
  return ll;
  }
}

if((C_T(c,t)>=160)&&(C_T(c,t)<180))
{
  if((p_bar>0.999)&&(p_bar<=400))
  {ll=(-0.0002*pow(p_bar,2)+0.2408*p_bar+13.1)/1000;
  return ll;
  }
}

if((C_T(c,t)>=180)&&(C_T(c,t)<200))
{
  if((p_bar>0.999)&&(p_bar<=400))
  {ll=(-7*pow(10, -5)*pow(p_bar,2)+0.1691*p_bar+15.64)/1000;
  }
}

```



```

    return ll;
}
}

if((C_T(c,t)>=200)&&(C_T(c,t)<220))
{
    if((p_bar>0.999)&&(p_bar<=400))
    {ll=(-8*pow(10,-6)*pow(p_bar,2)+0.1221*p_bar+17.943)/1000;
    return ll;
    }
}

if((C_T(c,t)>=220)&&(C_T(c,t)<240))
{
    if((p_bar>0.999)&&(p_bar<=400))
    {ll=(5*pow(10,-6)*pow(p_bar,2)+0.1003*p_bar+19.51)/1000;
    return ll;
    }
}

if((C_T(c,t)>=240)&&(C_T(c,t)<260))
{
    if((p_bar>0.999)&&(p_bar<=400))
    {ll=(2*pow(10,-5)*pow(p_bar,2)+0.0819*p_bar+21.456)/1000;
    return ll;
    }
}

if((C_T(c,t)>=260)&&(C_T(c,t)<280))
{
    if((p_bar>0.999)&&(p_bar<=400))
    {ll=(3*pow(10,-5)*pow(p_bar,2)+0.0648*p_bar+23.296)/1000;
    return ll;
    }
}

if((C_T(c,t)>=280)&&(C_T(c,t)<300))
{
    if((p_bar>0.999)&&(p_bar<=400))
    {ll=(3*pow(10,-5)*pow(p_bar,2)+0.0542*p_bar+24.913)/1000;
    return ll;
    }
}

ll=0.035;
return ll;

}

DEFINE_PROPERTY(Thermal_Conductivity_liq, c, t)
{real ll;
  real p_bar;
  real p_op = 0.0;
  p_op = RP_Get_Real("operating-pressure");

  p_bar=(C_P(c,t)+p_op)/100000.0;
  if((p_bar>10)&&(p_bar<20))
  {
    if((C_T(c,t)>=80)&&(C_T(c,t)<90))
    {ll=(0.1*p_bar+124.5)/1000;
    return ll;
    }
  }
}

```

```

    }

    if((C_T(c,t)>=90)&&(C_T(c,t)<100))
    {ll=(-0.003*pow(p_bar,2)+0.25*p_bar+101.9)/1000;
    return ll;
    }

    if((C_T(c,t)>=100)&&(C_T(c,t)<110))
    {ll=(-0.003*pow(p_bar,2)+0.33*p_bar+82.45)/1000;
    return ll;
    }
}

if((p_bar>20)&&(p_bar<30))
{
    if((C_T(c,t)>=110)&&(C_T(c,t)<=120))
    {ll=(0.13*p_bar+68.15)/1000;
    return ll;
    }
}

ll=0.1016;
return ll;
}

DEFINE_PROPERTY(Viscosity_g, c, t)
{real vi;
  real p_bar;
  real p_op = 0.0;
    p_op = RP_Get_Real("operating-pressure");

  p_bar=(C_P(c,t)+p_op)/100000.0;

  if((C_T(c,t)>=80)&&(C_T(c,t)<=100))
  {
    if((p_bar>=0.999)&&(p_bar<=1))
    {vi=(0.68*C_T(c,t)+0.8)/pow(10,7);
    return vi;
    }

    if((p_bar>30.0)&&(p_bar<=400.0))
    {vi=(0.019*pow(p_bar,2)+2.28945*p_bar+1019.86)/pow(10,7);
    return vi;
    }
  }

  if((C_T(c,t)>100)&&(C_T(c,t)<=115))
  {
    if((p_bar>0.999)&&(p_bar<=10))
    {vi=(0.0005*pow(C_T(c,t),2)+0.5095*C_T(c,t)+16,2475)/pow(10,7);
    return vi;
    }

    if((p_bar>30)&&(p_bar<=400))
    {vi=(5*pow(10,-6)*pow(p_bar,3)-0.00215*pow(p_bar,2)+1.9162*p_bar+564.11)/pow(10,7);
    return vi;
    }
  }
}

if((C_T(c,t)>115)&&(C_T(c,t)<125))

```

```

{
  if((p_bar>0.999)&&(p_bar<=20))
  {vi=(0.497*C_T(c,t)+28.47)/pow(10,7);
  return vi;
  }

  if((p_bar>30)&&(p_bar<=400))
  {vi=(-15.5*pow(10,-8)*pow(p_bar,4)+pow(10,-5)*pow(p_bar,3)-
0.056*pow(p_bar,2)+8.8965*p_bar+102.1)/pow(10,7);
  return vi;
  }
}

if((C_T(c,t)>=125)&&(C_T(c,t)<=150))
{
  if((p_bar>0.999)&&(p_bar<=50))
  {vi=(0.0025*pow(p_bar,3)-0.117*pow(p_bar,2)+1.6165*p_bar+90.89)/pow(10,7);
  return vi;
  }

  if((p_bar>50)&&(p_bar<=400))
  {vi=(8.5*pow(10,-6)*pow(p_bar,3)-0.008*pow(p_bar,2)+3.496*p_bar+104.855)/pow(10,7);
  return vi;
  }
}

if((C_T(c,t)>=150)&&(C_T(c,t)<=180))
{
  if((p_bar>0.999)&&(p_bar<=50))
  {vi=(2.5*pow(10,-5)*pow(p_bar,3)-0.002*pow(p_bar,2)+0.3595*p_bar+108.95)/pow(10,7);
  return vi;
  }

  if((p_bar>50)&&(p_bar<=400))
  {vi=(3*pow(10,-6)*pow(p_bar,3)-0.004*pow(p_bar,2)+2.3575*p_bar+25.065)/pow(10,7);
  return vi;
  }
}

if((C_T(c,t)>=180)&&(C_T(c,t)<=210))
{
  if((p_bar>0.999)&&(p_bar<=400))
  {vi=(-5*pow(10,-6)*pow(p_bar,3)+0.003*pow(p_bar,2)+0.2835*p_bar+124.5)/pow(10,7);
  return vi;
  }
}

if((C_T(c,t)>=210)&&(C_T(c,t)<=240))
{
  if((p_bar>0.999)&&(p_bar<=400))
  {vi=(-2.5*pow(10,-
6)*pow(p_bar,3)+0.0015*pow(p_bar,2)+0.1805*p_bar+142.25)/pow(10,7);
  return vi;
  }
}

if((C_T(c,t)>=240)&&(C_T(c,t)<=270))
{
  if((p_bar>0.999)&&(p_bar<=400))
  {vi=(-1.5*pow(10,-6)*pow(p_bar,3)+0.001*pow(p_bar,2)+0.1535*p_bar+157.3)/pow(10,7);
  return vi;
  }
}

```

```

    }
}

if((C_T(c,t)>=270)&&(C_T(c,t)<=300))
{
    if((p_bar>0.999)&&(p_bar<=400))
    {vi=(-8.5*pow(10,-
7)*pow(p_bar,3)+0.0005*pow(p_bar,2)+0.1415*p_bar+171.4)/pow(10,7);
    return vi;
    }
}

vi=0.00005576;
return vi;
}

DEFINE_PROPERTY(Viscosity_liq, c, t)
{real vi;
  real p_bar;
  real p_op = 0.0;
    p_op = RP_Get_Real("operating-pressure");

  p_bar=(C_P(c,t)+p_op)/100000.0;

  if((p_bar>0.999)&&(p_bar<30))
  {
    if((C_T(c,t)>=65)&&(C_T(c,t)<75))
    {vi=(-0.000354*pow(p_bar,3)+0.01735*pow(p_bar,2)+4.29*p_bar+2150.7)/pow(10,7);
    return vi;
    }
  }

  if((p_bar>1)&&(p_bar<30))
  {
    if((C_T(c,t)>=75)&&(C_T(c,t)<100))
    {vi=(-0.000004*pow(p_bar,3)-0.001*pow(p_bar,2)+2.86805*p_bar+1184.4)/pow(10,7);
    return vi;
    }
  }

  if((p_bar>10)&&(p_bar<30))
  {
    if((C_T(c,t)>=100)&&(C_T(c,t)<115))
    {vi=(-0.00125*pow(p_bar,2)+2.2525*p_bar+551.6)/pow(10,7);
    return vi;
    }
  }

  if((p_bar>20)&&(p_bar<30))
  {
    if((C_T(c,t)>=115)&&(C_T(c,t)<=120))
    {vi=(1.38*p_bar+402.4)/pow(10,7);
    return vi;
    }
  }

  vi=0.00015872;
  return vi;
}

```

```
DEFINE_PROPERTY(saturation_temperature,c,t)
{
    real P = C_P(c,t);
    real p_op = 0.0;
    real t_sat;
    p_op = RP_Get_Real("operating-pressure");
    P += p_op;
    if(P <=3396000.0)
    {
        t_sat = 11.546*log(P)-53.844;
        return t_sat;
    }
    if(P >3396000.0)
    {
        t_sat = 126.25;
        return t_sat;
    }
}
```