

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

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

Л.В. РОДИОНОВ, С.А. ГАФУРОВ

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА ШЕСТЕРЕННОГО НАСОСА

Рекомендовано редакционно-издательским советом федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королева (национальный исследовательский университет)» в качестве учебного пособия для студентов, обучающихся по программам высшего образования укрупненных групп направлений и специальностей 13.00.00 Электро- и теплоэнергетика и 15.00.00 Машиностроение

САМАРА
Издательство СГАУ

2015

УДК СГАУ: 6(075)

P605

Рецензенты: д-р техн. наук, проф. В. Б. Б а л я к и н,
канд. техн. наук, доц. Е. И. Т а т а р е н к о

Родионов Л.В.

P605 **Моделирование рабочего процесса шестеренного насоса:** учеб. пособие / *Л.В. Родионов, С.А. Гафуров.* – Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2015. – 116 с.

ISBN 978-5-7883-1046-6

В учебном пособии описаны технология моделирования рабочего процесса шестеренного насоса и методы перестроения динамических сеток для решения этой задачи. Разобран учебный пример расчета шестеренного насоса в двумерной и трехмерной постановках.

Учебное пособие предназначено для студентов, обучающихся по программам высшего образования укрупненных групп направлений и специальностей 13.00.00 Электро- и теплоэнергетика и 15.00.00 Машиностроение.

УДК СГАУ: 6(075)

ISBN 978-5-7883-1046-6

© СГАУ, 2015

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	6
1 ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПЕРЕСТРАИВАЕМЫХ СЕТОК ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ЧИСЛЕННЫХ РАСЧЕТОВ ШЕСТЕРЕННОГО НАСОСА.....	7
1.1 Методы сглаживания.....	9
1.1.1 Метод упругого сглаживания.....	9
1.1.2 Диффузионный метод сглаживания.....	11
1.2 Метод динамического расслоения.....	15
1.3 Метод динамического перестроения.....	17
1.3.1 Метод местного перестроения сетки.....	19
1.3.2 Метод зонального перестроения сетки.....	19
1.3.3 Метод местного перестроения поверхности.....	19
1.3.4 Метод перестроения поверхности.....	20
1.3.5 Метод перестроения зон обрыва.....	21
1.3.6 Метод перестроения 2,5D поверхностей.....	23
2 ТЕХНОЛОГИЯ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА ШЕСТЕРЕННОГО НАСОСА.....	24
2.1 Алгоритм виртуального моделирования рабочего процесса шестеренного насоса.....	24
2.2 Построение двухмерной геометрической модели шестеренного насоса.....	28
2.3 Построение двухмерной модели расчетной области шестеренного насоса.....	29
2.4 Формирование сеточной модели расчетной области шестеренного насоса.....	30
2.4.1 Подготовка геометрической модели шестеренного насоса.....	30
2.4.2 Построение сеточной модели расчетной области шестеренного насоса.....	38
2.4.3 Назначение зон граничных условий.....	43
2.4.4 Передача построенной расчетной модели в программу ANSYS Fluent.....	47
2.5 Решение численной модели рабочего процесса шестеренного насоса с использованием CAE - систем.....	48
3 УЧЕБНЫЙ ПРИМЕР ПО РАСЧЕТУ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА ШЕСТЕРЕННОГО НАСОСА.....	72
3.1 Построение геометрической трехмерной модели основных узлов шестеренного насоса.....	72
3.2 Построение трехмерной модели расчетной области шестеренного насоса.....	76

3.3 Формирование сеточной модели трехмерной расчетной области шестеренного насоса.....	77
3.3.1 Подготовка трехмерной расчетной модели.....	77
3.3.2 Построение трехмерной сеточной модели расчетной области шестеренного насоса.....	83
3.3.3 Назначение зон граничных условий.....	88
3.3.4 Передача построенной трехмерной расчетной модели в программу ANSYS Fluent.....	94
3.4 Решение трехмерной численной модели рабочего процесса шестеренного насоса с использованием CAE - систем.....	95

ВВЕДЕНИЕ

Многие задачи гидродинамики, с которыми в настоящее время приходится сталкиваться исследователям и инженерам, не поддаются аналитическому решению, и единственная возможность их анализа - получение численного решения.

Часто наиболее надежную информацию о физическом процессе можно получить путем непосредственных измерений с помощью экспериментального исследования на полномасштабной установке. В большинстве случаев такие эксперименты дороги и зачастую невозможны, особенно если речь идет об установлении предельных (разрушающих) нагрузок. Выходом из сложившейся ситуации является проведение численного моделирования, которое обладает рядом преимуществ. Это низкая стоимость, скорость получения результатов, полнота информации, возможность моделирования как реальных, так и идеальных условий.

Создание и модернизация современных конструкций невозможны без совершенствования и автоматизации процесса проектирования. Прогресс в разработке численных методов позволил существенно расширить круг задач, доступных анализу. Полученные на их основе результаты используются практически во всех областях техники. Особенно велика их роль в таких областях, как ракетная техника, авиация и энергетика.

Важную роль в определении динамических нагрузок в шестеренных насосах объемного типа играет знание структуры течения потока.

Ещё несколько лет назад исследователи сталкивались с проблемой численного моделирования рабочего процесса объемной гидромашины, поскольку сам принцип работы таких машин подразумевает постоянное изменение рабочего объема. И, как следствие, сетка расчетной области должна изменяться при каждом последующем шаге. В настоящее время в программном комплексе ANSYS FLUENT существует возможность применения динамической перестраиваемой сетки.

1 ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПЕРЕСТРАИВАЕМЫХ СЕТОК ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ЧИСЛЕННЫХ РАСЧЕТОВ ШЕСТЕРЕННОГО НАСОСА

Шестеренный насос относится к типу объемных гидромашин. При моделировании рабочего процесса объемных гидромашин одной из основных проблем является применение типа расчетной сетки. Это связано с тем, что сам рабочий процесс объемных гидромашин представляет собой постоянное изменение объема рабочей жидкости. И, как следствие, с каждым поворотом шестерен требуется перестроение сеточной модели. Для таких случаев следует использовать специальные модели деформации сетки. Данный тип сетки реализован в коммерческом пакете ANSYS FLUENT.

Процесс создания любой CFD-модели состоит из нескольких этапов, главными из которых являются следующие:

- выбор физической модели исследуемого процесса;
- выбор и обоснование допущений и упрощений физической и геометрической моделей задачи;
- создание или импорт геометрической модели в сеточный генератор (GAMBIT, ICEM CFD и др.);
- импорт расчетной сеточной модели в расчетный пакет, задание граничных и начальных условий, а также параметров решателя;
- получение результатов решения;
- анализ результатов и верификация модели.

Интерес представляет пункт, касающийся сеточной модели. Модель деформаций сетки во FLUENT может быть использована для моделирования потоков, у которых форма области изменяется со временем из-за движения границ области. Движение может быть любым заданным перемещением (например, возможно определить линейные и угловые скорости относительно центра тяжести твердого тела во времени) или незадаанным движением, где последующее движение определено через предварительно созданную пользователем функцию (UDF – user defined function). Перестроение сетки и определение положения границ на новом i -том шаге выполняются автоматически программой FLUENT, на основе $i-1$ шага.

Моделирование с использованием динамической сетки может быть применено к объектам авиационной (насосы объемного типа) и автомобильной (двигатели внутреннего сгорания, клапаны, форсунки) областей, а также к объектам индустриальной промышленности.

Существует три основные группы моделей деформации сетки в ANSYS FLUENT, позволяющих перестраивать сетку в деформирующихся местах под воздействием движущихся границ:

- Smoothing (сглаживание);
- Layering (расслоение);
- Local remeshing (местное перестроение).

Для использования требуемой модели деформации сетки нужно во вкладке "Mesh Methods" выбрать тип подвижной сетки: "Smoothing", "Layering" и/или "Remeshing" и нажать кнопку "Settings". Откроется диалоговое окно "Mesh Method Settings" (настройки метода перестроения сетки), где есть возможность определить настройки выбранных методов (рисунок 1.1).

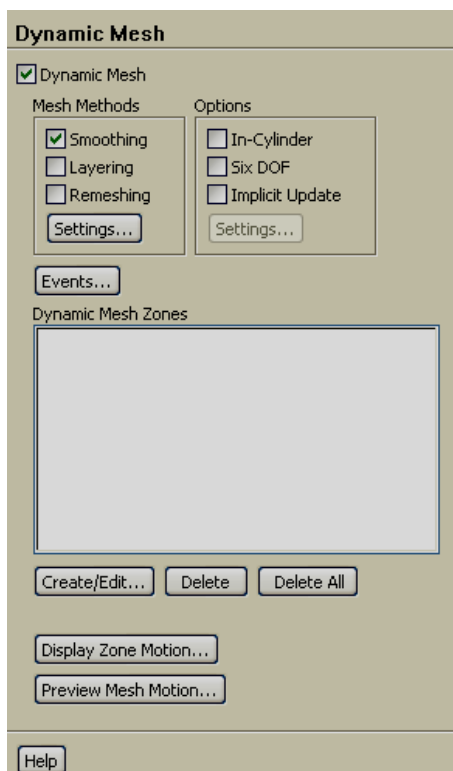


Рисунок 1.1 – Окно выбора типа метода

1.1 Методы сглаживания

Методы сглаживания подразделяются на два метода:

- метод упругого сглаживания;
- диффузионный метод сглаживания.

Также существует метод сглаживания Лапласа в случае 2,5D моделирования. Для того чтобы использовать метод сглаживания, нужно выбрать "Smoothing" в разделе "Mesh Methods" в диалоговом окне "Dynamic Mesh" (рисунок 1.1). Сам метод сглаживания и соответствующие параметры можно настроить в закладке "Smoothing", которая появляется после нажатия кнопки "Settings" (рисунок 1.2).

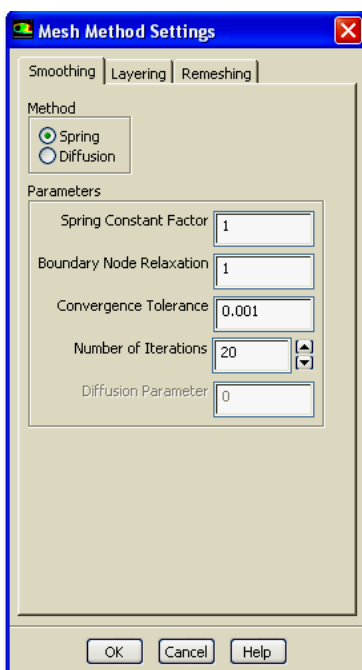


Рисунок 1.2 – Закладка "Smoothing" в диалоговом окне "Mesh Method Settings"

При движении границ связи в сетке не изменяются, а изменяется размер элементов. Метод сглаживания используется при треугольных и тетраэдральных элементах сетки.

1.1.1 Метод упругого сглаживания

В методе упругого сглаживания ребра между любыми двумя узлами сетки представляются как сеть взаимосвязанных пружин. В первоначальный момент сетка находится в равновесном состоянии. Расстояния от ребер до любой подвижной границы определены. Изменение положения в определенном граничном узле генерирует силы, пропорциональные смещению по всем связям (пружинам) узла с другими элементами. Используя закон Гука, сила, действующая на узел сетки, может быть записана в виде

$$\bar{F}_i = \sum_j^{n_i} k_{ij} (\Delta \bar{x}_j - \Delta \bar{x}_i), \quad (1.1)$$

где $\Delta \bar{x}_i$ и $\Delta \bar{x}_j$ перемещение i -го узла и соседнего с ним j -го узла;

n_i – число узлов, соседних с i -м узлом;

k_{ij} – коэффициент жесткости упругой связи (пружины) между i -м узлом и соседним с ним j -м узлом.

Коэффициент жесткости между i -м узлом и соседним с ним j -м узлом может быть определен из следующего уравнения:

$$k_{ij} = \frac{I}{\sqrt{|\bar{x}_i - \bar{x}_j|}}. \quad (1.2)$$

В равновесии суммарная сила в узле вследствие действия сил по всем связям должна быть равна нулю. Это условие получается путем решения итерационного уравнения

$$\Delta \bar{x}_i^{-m+1} = \frac{\sum_j^{n_i} k_{ij} \Delta \bar{x}_j^{-m}}{\sum_j^{n_i} k_{ij}}. \quad (1.3)$$

Так как перемещения границ известны (после изменения положения граничного узла), то уравнение (1.3) может быть решено для всех "внутренних" узлов. При конвергенции позиции обновляются по следующей зависимости:

$$x_i^{-n+1} = x_i^{-n} + \Delta x_i^{-m, converged},$$

где $n+1$ и n используются для обозначения позиции следующего шага по времени и текущего шага по времени соответственно.

Метод упругого сглаживания для цилиндрической зоны ячеек, где один конец цилиндра движется, представлен на рисунке 1.3.

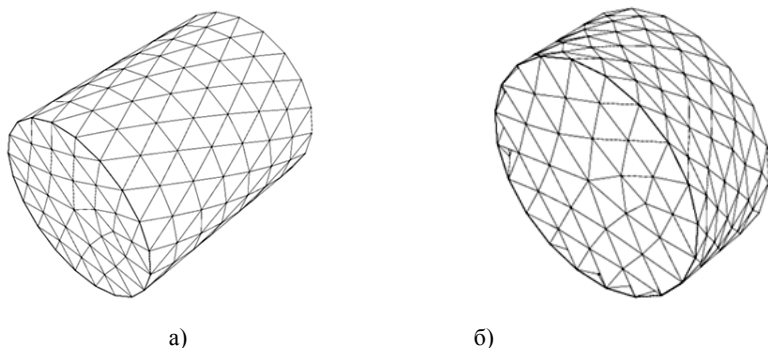


Рисунок 1.3 – Метод упругого сглаживания для ячеек цилиндра:
а – начало деформации, б – конец деформации

Вы можете контролировать жесткость связей "пружины", задавая значение "Spring Constant Factor" между 0 и 1. Значение "0" указывает на то, что нет демпфирования по упругим связям и смещение границ узла значительно влияет на движение внутренних узлов. Значение "1" устанавливает по умолчанию уровень затухания на внутренних перемещениях узла, определяемый путем решения уравнения (1.3).

Эффект коэффициента "Spring Constant Factor" представлен на рисунке 1.4. Использование коэффициента, равного "0", приводит к упорядочиванию структуры сетки за счет жесткой связи между узлами на границе деформируемой области.

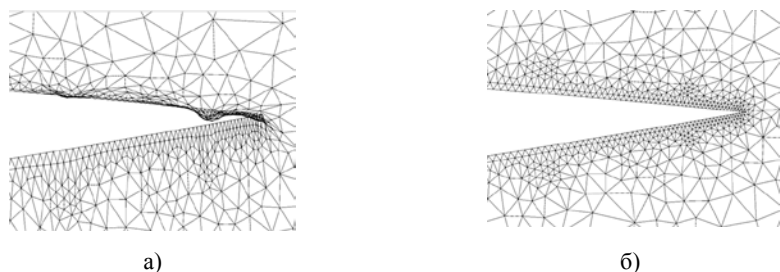


Рисунок 1.4 - Вид перестроенной сетки при факторе "Spring Constant Factor", равном:
а – 1, б – 0

На рисунке 1.4 представлена задняя кромка крыла после поворота на 2,3 градуса против часовой стрелки, что привело к перестроению сетки.

Метод упругих связей можно использовать для ячеек или поверхностей, чьи границы движутся или деформируются.

Если форма ячеек нететраэдральная (нетреугольная для двумерной задачи), то для использования метода упругих связей рекомендуется выполнение следующих условий:

- границы зоны ячеек движутся преимущественно в одном направлении, т.е. нет излишнего анизотропного растяжения или сжатия ячейки;
- движение преимущественно происходит по нормали к границе зоны.

Если условия не выполняются, то ячейки будут обладать высокой степенью асимметрии, что может привести к развалу решения из-за разрыва сетки.

По умолчанию метод упругих связей для нететраэдральных и нетреугольных ячеек отключен. Для использования этого метода для ячеек любого типа нужно выполнить действия в определенной последовательности: `define`→ `dynamic mesh`→ `controls`→ `smoothing-parameters`→ `spring-on-all-shapes`.

1.1.2 Диффузионный метод сглаживания

В диффузионном методе сглаживания движение сетки определяется уравнением диффузии

$$\bar{V}(\gamma \bar{V}u) = 0, \quad (1.4)$$

где u – скорость перемещения сетки; γ – коэффициент диффузии.

Граничные условия для уравнения (1.4) определяются пользователем или вычисляются при движении границы. На деформирующейся границе граничные условия таковы, что движение сетки осуществляется по касательной к границе (то есть нормальная составляющая скорости равна нулю). Уравнение Лапласа (1.4) описывает, как движущаяся граница проникает вглубь деформирующейся сетки.

Коэффициент диффузии γ в уравнении (1.4) может быть использован для регулирования влияния движения границы на внутреннее движение сетки. Постоянный коэффициент означает, что движение границы рассеивается равномерно по всей сетке. Если

коэффициент диффузии изменяется, то узлы сетки в зонах с высокой диффузией имеют тенденцию двигаться вместе (то есть с меньшим относительным движением). Коэффициент диффузии в ANSYS FLUENT имеет вид

$$\gamma = \frac{1}{d^\alpha}, \quad (1.5)$$

где d – безразмерное граничное расстояние, $\alpha \geq 0$ – параметр, определяемый пользователем.

Увеличение коэффициента диффузии вблизи границ позволит исключить значительное движение сетки около границ и лучше сохранить качество сетки вблизи границы. Это особенно полезно, когда движущиеся границы имеют ярко выраженные геометрические особенности, такие как острые углы, и когда движение границы является преимущественно вращательным.

Граничным расстоянием d в уравнении (1.5) является либо нормализованное стандартное расстояние до стены (ближайшее расстояние до всех стен, рассчитанное по модели турбулентности – y^+), либо обобщенное граничное расстояние, где все границы (в том числе входы, выходы, симметрии), не определенные как деформируемые, включены. В любом случае расстояние отнесено к наибольшему расстоянию, существующему во всех зонах деформируемой сетки.

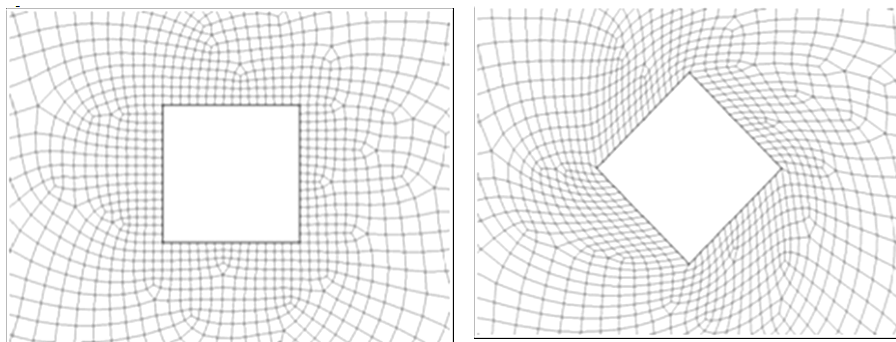
Векторное уравнение (1.4) дискретизировано с использованием стандартного метода конечных объемов ANSYS FLUENT, и результирующая матрица решается итеративно с использованием алгебраического многосеточного решателя. Если обобщенное граничное расстояние используется как расстояние d в уравнении (1.5), то дополнительное скалярное уравнение должно быть решено для оценки граничного расстояния.

Решение для скорости перемещения центра ячейки u интерполируется на узлы и положения узла перестраиваются в соответствии с

$$\bar{x}_{new} = \bar{x}_{old} + \bar{u}\Delta t. \quad (1.6)$$

С вычислительной точки зрения диффузионный метод сглаживания, как правило, более трудоемкий, чем метод упругого сглаживания. Однако сетка получается лучшего качества и часто больше деформируется до разрушения. На рисунке 1.5 представлены

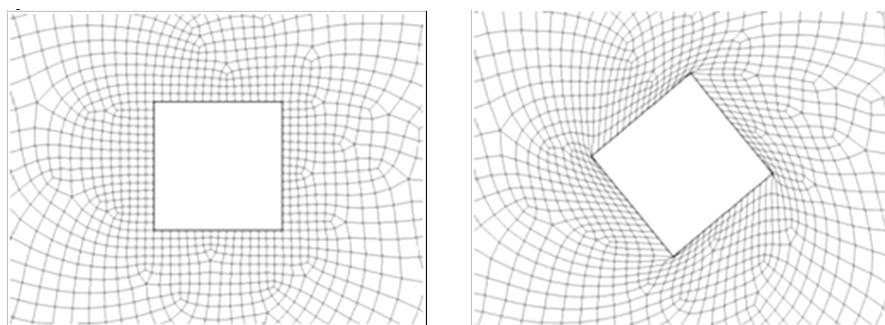
сетки до и после поворота границы на 45 градусов с помощью диффузионного метода сглаживания. С использованием метода упругого сглаживания та же сетка начинает разрушаться после поворота на 40 градусов (рисунок 1.6).



а)

б)

Рисунок 1.5 – Перестроение сетки с использованием диффузионного метода сглаживания: а – исходная сетка, б – поворот на 45 градусов



а)

б)

Рисунок 1.6 – Перестроение сетки с использованием метода упругого сглаживания: а – исходная сетка, б – поворот на 40 градусов

Следует отметить, что при диффузионном методе сглаживания внутреннее движение сетки определяется решением уравнения (1.4) и заданным движением границы.

Также следует отметить, что характер диффузионного уравнения таков, что результат решения и скорость перемещения u зависят от масштаба задачи и типа движения границы. Для поступательного движения (движение поршня) границ с помощью α в уравнение (1.5) можно контролировать, где движение границы должно перейти во внутреннюю часть сетки. Для вращательного движения распад решения происходит вдали от границы, т.к. перестроение сетки сложно даже вблизи границы. По этой причине предпочтительнее использовать метод сглаживания для поступательно движущихся границ, а не для вращательного движения границ.

Если требуется указать различные параметры диффузии в пространственной области, то нужно изменять коэффициент диффузии γ (1.5) в первую очередь за счет изменения параметра диффузии α (1.5). На практике данный параметр изменяется в диапазоне от 0 до 2. Если $\alpha = 0$ (по умолчанию), то $\gamma = 1$ и происходит равномерная диффузия внутрь сетки при движении границы. Более высокое значение параметра диффузии α ведет к тому, что сетка строится ближе к границе и движется вместе с границей, а граница деформации располагается дальше от границы движения. На рисунке 1.7 представлен принцип действия параметра диффузии при поступательном движении границы (поршень). Здесь первоначально недеформированная прямоугольная расчетная область деформируется за счет движения левой границы в правую сторону. Для вращательного движения границ рекомендуется задавать параметр диффузии $\alpha = 1,5$.

Возможно определить два различных граничных расстояния путем расчета γ . По умолчанию ANSYS FLUENT использует стандартное расстояние стенки для d . Все остальные границы (такие как входы, выходы и пр.) не участвуют при определении граничного расстояния. В программе доступно альтернативное обобщение граничных расстояний, когда все границы, не обозначенные как деформируемые, принимаются в рассмотрение при расчете. В примере на рисунке 1.7 только левая граница была использована для расчета расстояния.

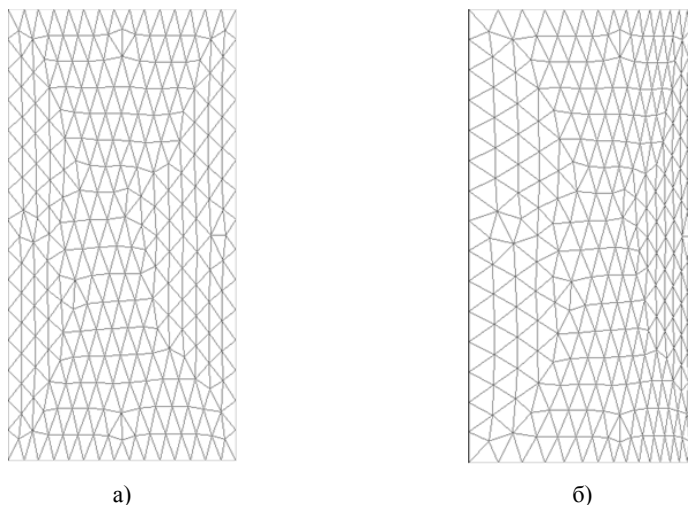


Рисунок 1.7 – Влияние параметра диффузии α на перемещение внутренних узлов сетки: а – $\alpha = 0$, б – $\alpha = 1$

Метод диффузионного сглаживания является альтернативой методу упругого сглаживания. Он доступен для элементов любого типа и может быть использован при перестроении любых зон ячеек, чьи границы движутся или деформируются.

Метод диффузионного сглаживания более трудоемкий, чем метод упругого сглаживания, но обеспечивает получение сетки лучшего качества, особенно для нететраэдральных (нетреугольных в 2D постановке) элементов для зон ячеек и допускает большие деформации до того, как сетка «разорвется».

Как и метод упругого сглаживания, метод диффузионного сглаживания лучше работает при поступательных деформациях, чем при вращательных.

1.2 Метод динамического расслоения

При использовании Layering происходит создание и разрушение ячеек сетки на границе расчетной области. Ячейки добавляются или удаляются в зависимости от того, растет расчетная область или уменьшается. После каждого изменения количества ячеек сетка перестраивается.

Данный метод может быть использован для элементов типа призмы, гексаэдр или клиновидный элемент. Динамическая сеточная

модель в ANSYS FLUENT позволяет назначить постоянную (идеальную) высоту слоя для каждой движущейся границы.

Слой ячеек, расположенный на движущейся границе (слой j на рисунке 1.8), расслаивается или объединяется с последующим слоем (слой i на рисунке 1.8) в зависимости от текущей высоты h ячеек этого слоя.

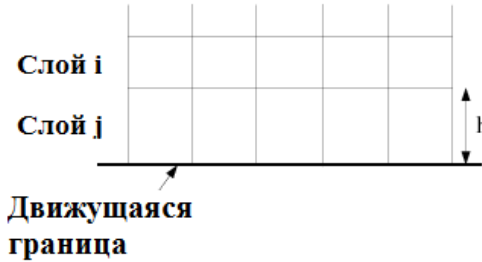


Рисунок 1.8 – Пример динамического расслоения

Если ячейки в слое j растягиваются, то их высота будет увеличиваться до момента выполнения неравенства

$$h_{\min} > (1 + \alpha_s) h_{ideal}, \quad (1.7)$$

где h_{\min} – минимальная высота ячеек j-го слоя; h_{ideal} – идеальная высота слоя; α_s – фактор расслоения.

Следует отметить, что в ANSYS FLUENT можно задавать параметр h_{ideal} как постоянным, так и как функцию от времени или угла поворота.

Пока выполняется условие (1.7), ячейки расслаиваются по заданному закону. Закон расслоения может быть определен в зависимости от высоты или отношения.

При использовании расслоения "по высоте" ячейки на границе расслаиваются, создавая слой ячеек с постоянной высотой h_{ideal} и слой ячеек с высотой $h - h_{ideal}$.

При использовании расслоения "по отношению" ячейки на границе расслаиваются таким образом, что коэффициент отношения высоты вновь образовавшихся ячеек везде равен α_s .

На рисунке 1.9 показан результат расслоения ячеек над клапаном, используя расслоение "по высоте" и "по отношению".

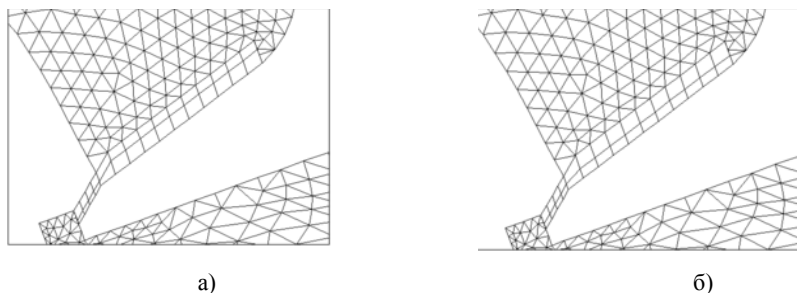


Рисунок 1.9 – Результат перестроения ячеек с использованием разных законов расслоения: а – по высоте, б – по отношению

Если происходит процесс сжатия слоя ячеек j (рисунок 1.8), то ячейки будут сжиматься до момента выполнения неравенства:

$$h_{\min} < \alpha_c h_{ideal}, \quad (1.8)$$

где α_c – коэффициент разрушения.

Когда неравенство (1.8) выполняется, то ячейки сжимающегося слоя j поглощаются соседним слоем i (рисунок 1.8).

Метод динамического расслоения выбирается в разделе "Mesh Methods" в диалоговом окне "Dynamic Mesh", закладка "Layering" (рисунок 1.1).

Данный метод задания динамической сетки может быть использован для линейного и вращательного движения.

1.3 Метод динамического перестроения

В случае если зона ячеек состоит из треугольных или тетраэдральных элементов, то можно использовать метод сглаживания. Однако когда перемещение границы сравнительно велико по отношению к размеру неподвижных ячеек, то данное условие может сильно снизить качество сетки либо вообще привести к её разрушению (за счет образования отрицательных объемов) в момент расчета.

Для решения данной проблемы ячеек, которые не соответствуют критериям асимметрии или размера, объединяются и перестраиваются. Если вновь полученные ячейки или поверхности удовлетворяют заданным критериям, то происходит перестроение сетки с использованием новых ячеек (решение интерполируется из старых ячеек). В противном случае вновь созданные ячейки удаляются.

В ANSYS FLUENT есть несколько методов перестроения сетки:

- local cell remeshing (местное перестроение сетки);
- zone remeshing (зональное перестроение сетки);
- local face remeshing (местное перестроение поверхности (только для трехмерного моделирования));
- face region remeshing (перестроение поверхности);
- Cut Cell zone remeshing (перестроение зон обрыва (только для трехмерного моделирования));
- 2.5D surface remeshing (перестроение 2,5D поверхностей (только для 3D потоков)).

Большинство из доступных в ANSYS FLUENT методов перестроения сетки работают с треугольными и тетраэдральными типами элементов, а также в смешанных зонах, где нетреугольные и нететраэдральные элементы пропускаются. Исключение составляют "Cut Cell zone remeshing method" (работает со всеми типами элементов, кроме полиэдров) и "2.5D surface remeshing method" (работает только на гексагональной сетке или клиновидных элементах, полученных путем выдавливания из треугольных элементов поверхности).

Метод динамического перестроения назначается в разделе "Mesh Methods" в диалоговом окне "Dynamic Mesh", закладка "Remeshing" (рисунок 1.10).

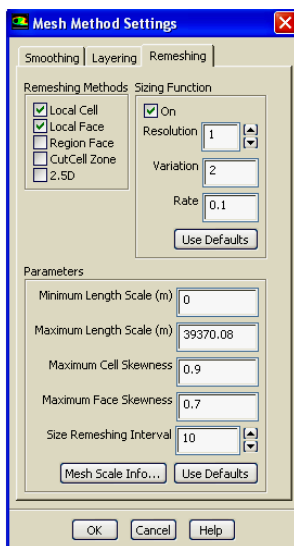


Рисунок 1.10 – Закладка " Remeshing " в диалоговом окне "Mesh Method Settings"

В данном окне можно просмотреть статистику по сетке, нажав "Mesh Scale Info".

В результате будет выведена информация о минимальном и максимальном размерах элементов, скошенности элементов, а также о максимальном количестве ячеек и коэффициенте асимметрии.

1.3.1 Метод местного перестроения сетки

При использовании этого метода в ANSYS FLUENT оцениваются ячейки, расположенные на границе, по следующим параметрам: асимметрия, минимальный и максимальный размеры ячейки.

Выделенная ячейка изменяется, если её коэффициент асимметрии больше заданного, размер меньше или больше заданного, высота не соответствует заданной (при движении поверхностей (например, поршня)).

По умолчанию максимальная асимметрия ячейки равна 0,9 для трехмерного моделирования и 0,6 для двухмерного.

1.3.2 Метод зонального перестроения сетки

Данный метод используется в случае, если метод местного перестроения не дал ожидаемого результата. При использовании этого метода перестраиваются все ячейки зоны и поверхности, смежные с движущимися поверхностями. Такое перестроение позволяет решателю Ansys Fluent создавать полностью новую сетку лучшего качества по сравнению с локальным перестроением.

Метод имеет ряд ограничений:

- зоны с фиксированными узлами не перестраиваются;
- при перестроении зона ячеек переносится в оперативную память, соответственно её недостаточный объем является ограничением.

1.3.3 Метод местного перестроения поверхности

Этот метод применим только для трехмерной геометрии. ANSYS FLUENT отбирает поверхности (и прилегающие к ним ячейки) на деформируемых границах в зависимости от коэффициента асимметрии поверхности. Таким образом, есть возможность провести локальное перестроение ячеек на деформируемых поверхностях, однако нельзя выполнить перестроение нескольких поверхностей.

Если в модели определены деформируемые поверхности и используется метод местного перестроения для прилегающих ячеек, то поверхности на деформируемых поверхностях могут быть перестроены в случае выполнения следующих условий:

- элементы поверхности - треугольники;
- нет пересечения поверхностей.

1.3.4 Метод перестроения поверхности

Перестроение объемных сеток в ANSYS FLUENT возможно для треугольных элементов сетки и плоских поверхностей. Для перестроения ANSYS FLUENT выбирают деформируемые граничные поверхности в зависимости от условия движения и границ соединения этих поверхностей.

В этом методе ANSYS FLUENT выбирает области поверхностей на деформируемых границах от движущихся границ на основе минимальных и максимальных заданных размеров. Затем происходит перестроение сетки поверхностей и смежных ячеек для создания упорядоченной сетки на деформируемой границе от движущейся границы (рисунок 1.11). При этом методе возможно перестроение сетки, проходящей через несколько поверхностей.

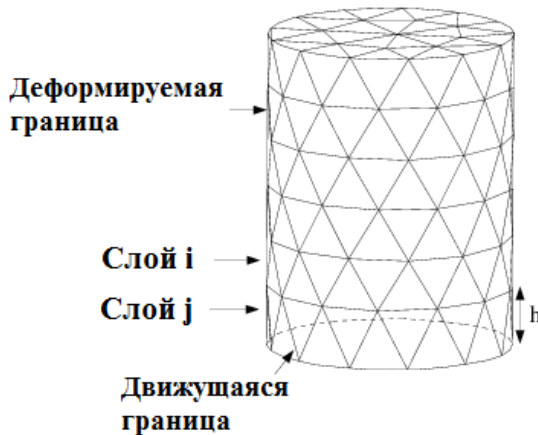


Рисунок 1.11 – Перестроение деформируемой границы под действием движущейся границы

Для трехмерных расчетов возможно перестроение сетки при симметричных граничных условиях и нескольких пересекающихся

поверхностей, которые включают сохранение характеристик не только между разными поверхностями, но и в самих поверхностях.

ANSYS FLUENT автоматически создает петли на границе поверхности, чьи узлы движутся или деформируются. На рисунке 1.11 простая тетраэдральная сетка цилиндра деформируется за счет движения его нижней части. На деформируемой границе создается одна петля в нижней части цилиндра (где движутся узлы). ANSYS FLUENT анализирует высоту поверхностей, присоединенных к узлам на петле, и соответственно расслаивает или объединяет поверхности в зависимости от заданной максимальной и минимальной высоты.

Если поверхности в слое j расширяются, то они будут расти до момента достижения заданного максимального размера. И наоборот, если слой сжимается, то он будет продолжать уменьшаться до момента достижения заданного минимального размера. Когда эти условия выполняются, сжатый слой поверхности поглощается в смежный слой. Перестроение поверхности представлено на рисунке 1.12.

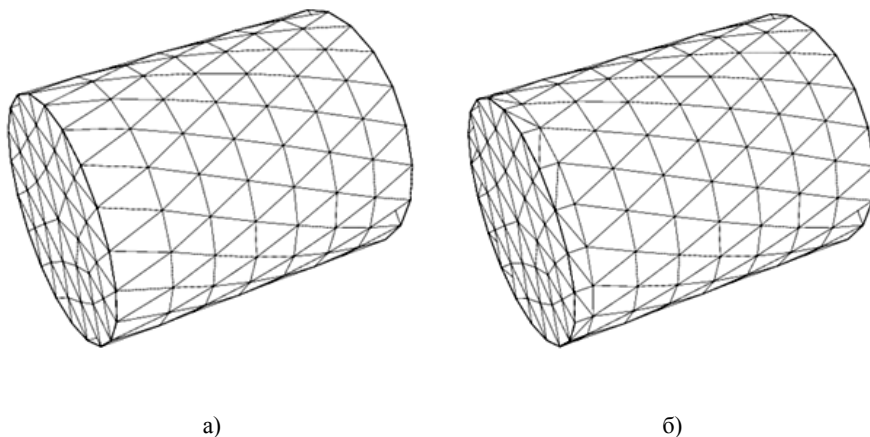


Рисунок 1.12 – Использование метода перестроения поверхности: а – до, б – после

Данный метод можно использовать только для зон ячейки, которые имеют форму тетраэдра или треугольника.

1.3.5 Метод перестроения зон обрыва

Метод используется для полного перестроения зоны ячеек (включая все граничные зоны). Он доступен только при трехмерном моделировании. Существующий объемный элемент сетки заменяется

на прямоугольный элемент. При использовании в переходных процессах перестроение происходит в определенных интервалах и качество сетки считается неудовлетворительным. Пример сетки до и после использования метода представлен на рисунке 1.13.

При данном методе перестроения единая прямоугольная сетка локально перестраивается в зависимости от размеров, в общем случае перестраивается исходная сетка с большей точностью. Финальная сетка в основном состоит из гексаэдральных элементов, которые снижают количество ячеек по сравнению с неструктурированной тетраэдральной сеткой. Для описания сложных поверхностей на границах используются дополнительные элементы. Перестроение происходит через заданные интервалы, либо каждый раз, когда качество сетки ухудшается в результате её движения.

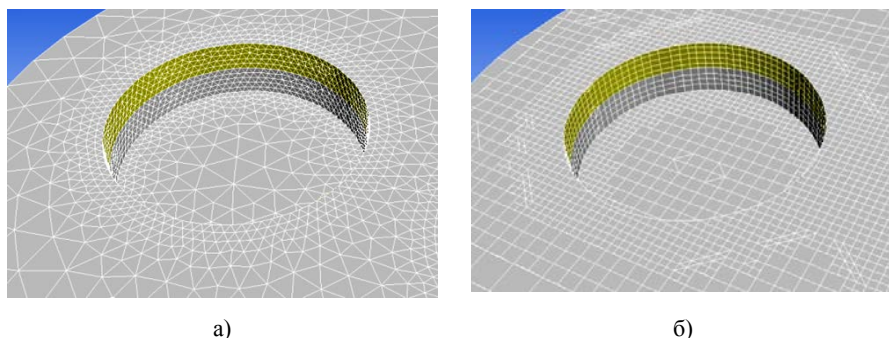


Рисунок 1.13 – Использование метода перестроения зон обрыва: а – до, б – после

При методе перестроения зон обрыва не только заменяются объемные ячейки, но также заменяются целиком поверхности перестроенных зон. Следовательно, этот метод может быть использован только для перестроения зон ячеек, которые расположены на отдельных поверхностях или соединены с другими зонами через несогласованный интерфейс.

Основные ограничения метода:

- применим только для трехмерной геометрии;
- зона ячеек не должна содержать полиэдральных элементов;
- зона ячеек не должна быть соединена с другими зонами через согласованный интерфейс.

1.3.6 Метод перестроения 2,5D поверхностей

Метод применим только для трехмерной геометрии, полученной из двумерной путем булевой операции вытягивания, и схож с методом локального перестроения для двумерной треугольной сетки. Поверхности на деформируемой границе отмечаются для перестроения, основанного на коэффициенте асимметрии, минимальном и максимальном размерах. Данный метод также позволяет отбирать ячейки, используя функцию размера.

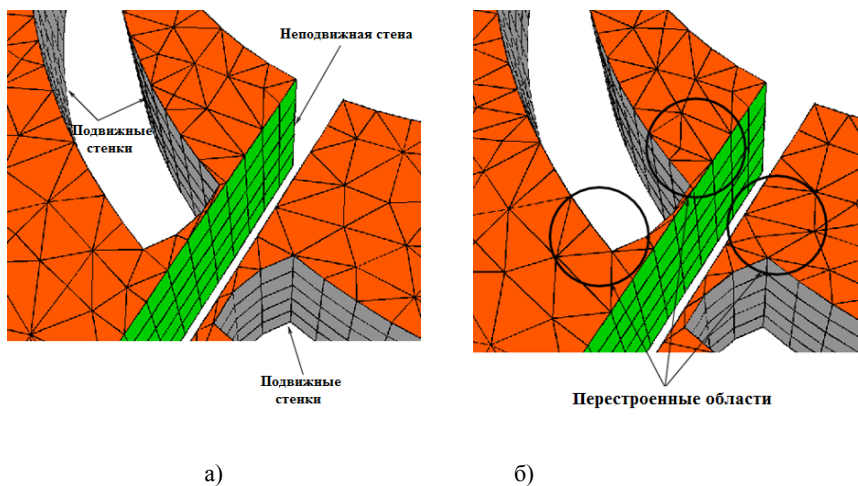


Рисунок 1.14 – Применение метода перестроения 2,5D поверхностей: а – до, б – после

При моделировании рабочего процесса шестеренного насоса используется метод перестроения сетки.

2 ТЕХНОЛОГИЯ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА ШЕСТЕРЕННОГО НАСОСА

2.1 Алгоритм виртуального моделирования рабочего процесса шестеренного насоса

Под виртуальным моделированием понимается создание комплекса компьютерных CAD- (Computer-Aided Design) и CAE- (Computer Aided Engineering) моделей, необходимых для конструирования различных машин и механизмов. В отличие от CAD-систем, решающих задачи геометрического проектирования, CAE-системы моделируют физические процессы исследуемого объекта: как правило, это оценка напряженно-деформированного состояния и/или расчет термогазодинамических параметров. В результате исследований оптимизируются соответствующие конструктивные или рабочие характеристики, повышаются ресурс и долговечность объекта, а также обеспечиваются рабочие параметры объекта.

На рисунке 2.1 приведена общая схема совместного использования CAD- и CAE-систем применительно к задаче проектирования какого-либо объекта. Разрабатываемые в CAD-системе конструкторские решения подвергаются исследованиям с помощью CAE-систем. По результатам исследований могут изменяться конструкция или рабочие параметры объекта. При необходимости выполняются повторные исследования и т. д., до получения приемлемого результата.

Шестеренный насос относится к насосам объемного типа. В данной работе рассмотрен шестеренный насос с внешним зацеплением. При работе насоса ведущая шестерня находится в постоянном зацеплении с ведомой и приводит ее во вращение (рисунок 2.2).

Алгоритм виртуального моделирования рабочего процесса шестеренного насоса представлен на рисунках 2.1 и 2.3. Перед началом численного расчета необходимо определить его тип. Определение типа основывается на том, что именно необходимо рассчитать: течение между зубьями насоса, течение на выходе из него, определить влияние конструктивных параметров насосного агрегата на рабочие характеристики, определить наличие кавитации и пр.

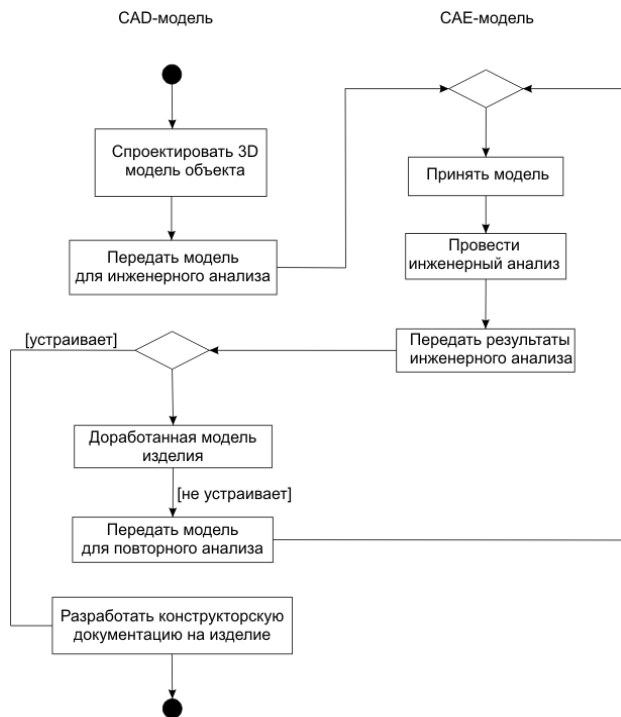


Рисунок 2.1 – Схема совместного использования CAD - и CAE - систем

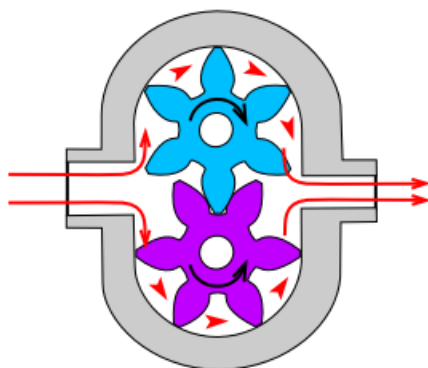


Рисунок 2.2 – Схема работы шестеренного насоса внешнего зацепления



Рисунок 2.3 – Технологическая последовательность решения задачи моделирования рабочего процесса в шестеренном насосе

Таким образом, существует несколько подходов к расчету шестеренных насосов – двухмерный 2D и трехмерный 3D анализы. Также существует промежуточный 2,5D анализ, но его рассматривать не будем. Обычно 2D расчет проводят тогда, когда необходимо провести предварительные оценочные расчеты. Наибольшей достоверностью за счет более точного учета конструктивных параметров шестеренного насоса обладают полноценные 3D расчеты.

Как правило, входной информацией для проведения численного расчета шестеренного агрегата является двухмерный чертеж. На основе него строятся необходимые трехмерные модели элементов насоса, а далее расчетные области. В данном случае под расчетной областью понимаются области, где протекает жидкость. После этого построенная расчетная область в одном из форматов *.stp, *.x_t, *.x_b, *.igs и т.д. передается в программу - сеткогенератор (например, ANSYS ICEMCFD, Gambit). Более подробно данные шаги алгоритма будут описаны ниже.

Численный расчет проводится в лицензионном коммерческом САЕ-пакете FLUENT. Последовательность подготовки задачи для ее решения во FLUENT приведена на рисунке 2.4.

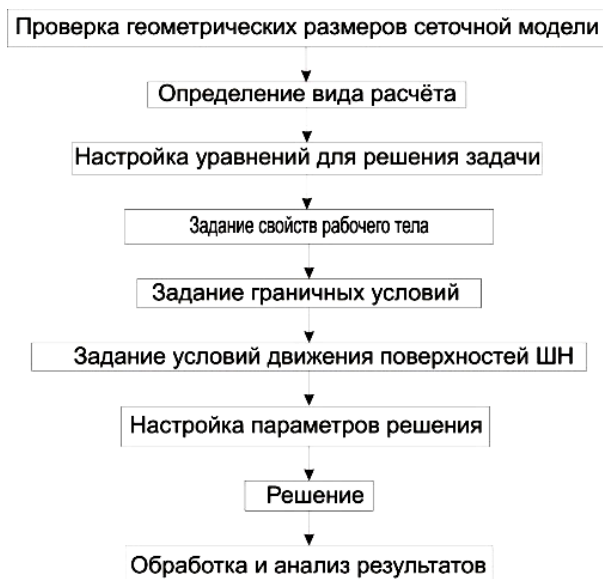


Рисунок 2.4 – Технологическая последовательность решения задачи моделирования рабочего процесса в шестеренном насосе

Особенностью данного пакета является то, что перед выполнением основных функций необходимо проверить геометрические размеры и правильность установки единиц измерения. Для проведения расчета шестеренного насоса необходимо выбрать вид анализа "Transient". После чего задаются уравнения, используемые для решения задачи, а также свойства рабочих тел и граничные условия. В пакете FLUENT существует несколько видов задания движения поверхностей. В нашем случае необходимым условием является задание движения шестерен. Важным этапом является задание свойств параметров решателя и выбор схемы решения. После проведения данных процедур проводится решение и обработка его результатов.

2.2 Построение двухмерной геометрической модели шестеренного насоса

Часто для проведения предварительного анализа структуры течения в проточной части шестеренного насоса, а также возможности возникновения кавитации в нем применяют так называемый 2D и 2,5D численный анализ. В этом случае достаточно двухмерного чертежа шестерен и корпуса насоса. На рисунке 2.5 изображена двухмерная геометрическая модель шестеренного насоса для проведения 2D и 2,5D численного анализа, которая представляет собой набор поверхностей, линий и точек. В данном случае важен учет количества зубьев – Z ; геометрических параметров профилей зубьев (профиль может быть эвольвентным, прямоугольным или иным) и внутренней геометрии корпуса; межцентрового расстояния между шестернями – A_c ; ширины входного и выходного каналов – D_{in} и D_{out} , длины входного и выходного каналов – L_{in} и L_{out} , расположения подводящей и отводящей магистралей. Всю эту информацию можно получить из рабочего чертежа шестеренного насоса.

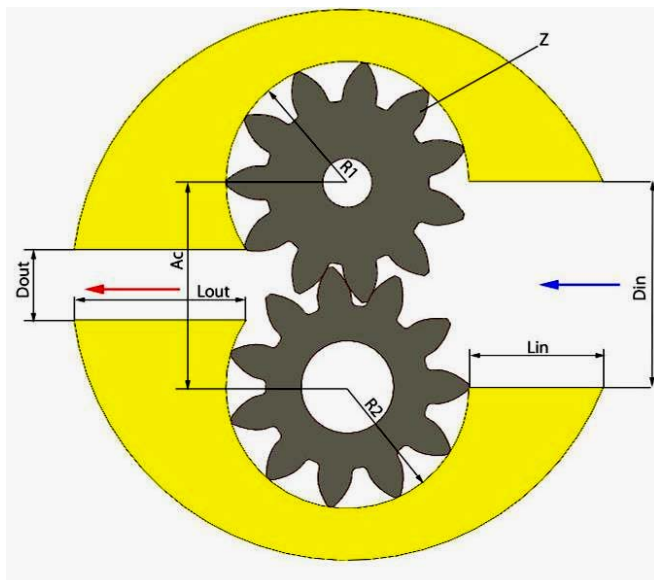


Рисунок 2.5 – Двухмерная модель шестерен и корпуса

2.3 Построение двумерной модели расчетной области шестеренного насоса

Геометрическую модель расчетной области шестеренного насоса (рисунок 2.6) можно получить путем булевых операций с исходной геометрией насосного агрегата.

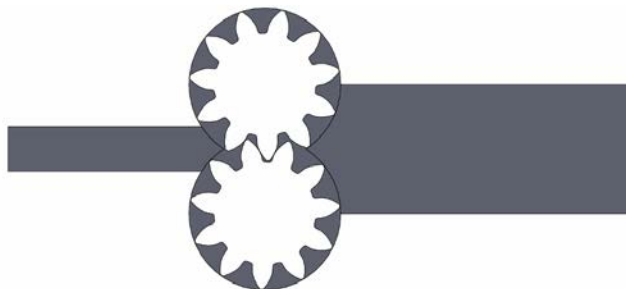


Рисунок 2.6 – Геометрическая модель расчетной области шестеренного насоса с внешним зацеплением



Рисунок 2.7 – Влияние точности задания граничного условия на структуру потока

Однако для некоторых CAE-пакетов, например ANSYSCFX, для более точного моделирования физических процессов, протекающих в насосе, с точки зрения задания граничных условий необходимо учесть, что длины питающего и напорного трубопроводов должны быть не менее 5-7 диаметров входа в насосный агрегат.

Влияние важности точного задания граничных условий (г.у.) с точки зрения протекания физического процесса проиллюстрировано на рисунке 2.7.

2.4 Формирование сеточной модели расчетной области шестеренного насоса

2.4.1 Подготовка геометрической модели шестеренного насоса

Построение двухмерной модели шестеренного насоса осуществляется в программе *ANSYS Gambit*, либо в любом CAD редакторе (*Solid Works*, *KOMIAC*) с последующим экспортом модели в *ANSYS Gambit* в формате *Parasolid Text (.x_t)*. Данный формат является универсальным среди CAD/CAE-систем и имеет низкий шанс возникновения ошибок в результате операций импорта/экспорта.

Создайте папку, которая будет вашей рабочей директорией, назовите ее, например *Gear Pump*. Скопируйте в нее файл модели *Gearpump.x_t*.

Запустите программу *ANSYS Gambit*. В результате этого действия появится окно, изображенное на рисунке 2.8. В нем в поле *Working Directory* необходимо выбрать папку, в которой будет сохраняться модель. После этого следует нажать кнопку *Run*.

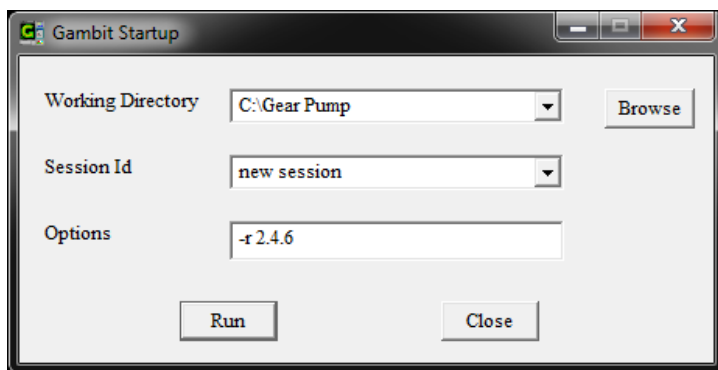


Рисунок 2.8 – Стартовое окно программы ANSYS Gambit

Для импортирования модели в *ANSYS Gambit* необходимо выполнить следующие действия.

File → *Import* → *Parasolid...*

В появившемся окне *Import Parasolid File* (рисунок 2.9) нажмите *Browse...* .

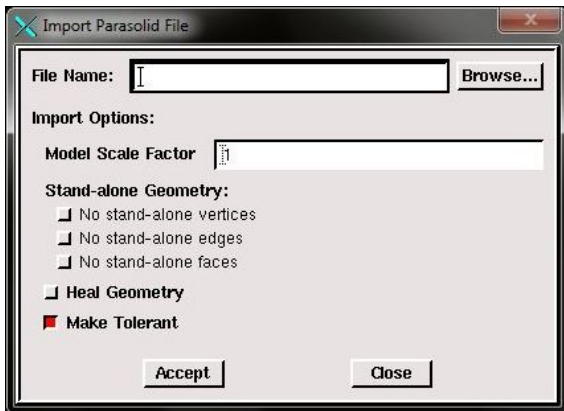


Рисунок 2.9 – Окно импорта файла

В окне *Select File* (рисунок 2.10) в столбце *Files* выделите *Gearpump.x_t*, кликнув по нему левой кнопкой мыши один раз. Нажмите *Accept*. Для подтверждения выбора модели нажмите *Accept* в *Import Parasolid File*.

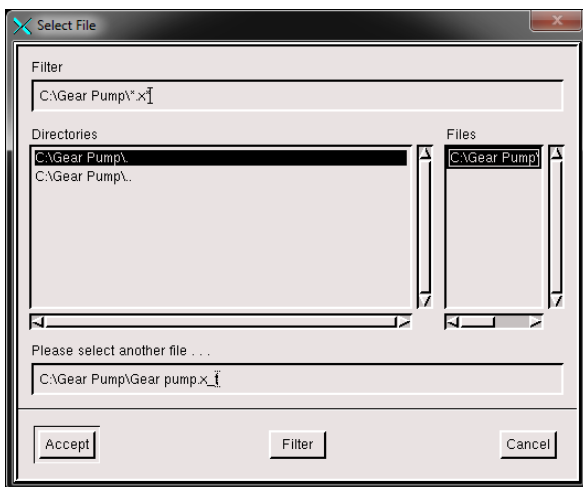


Рисунок 2.10 – Окно выбора файла модели

Как видно из информационного окна, модель шестеренного насоса состоит из 320 отрезков. Результат импортирования модели представлен на рисунке 2.11.

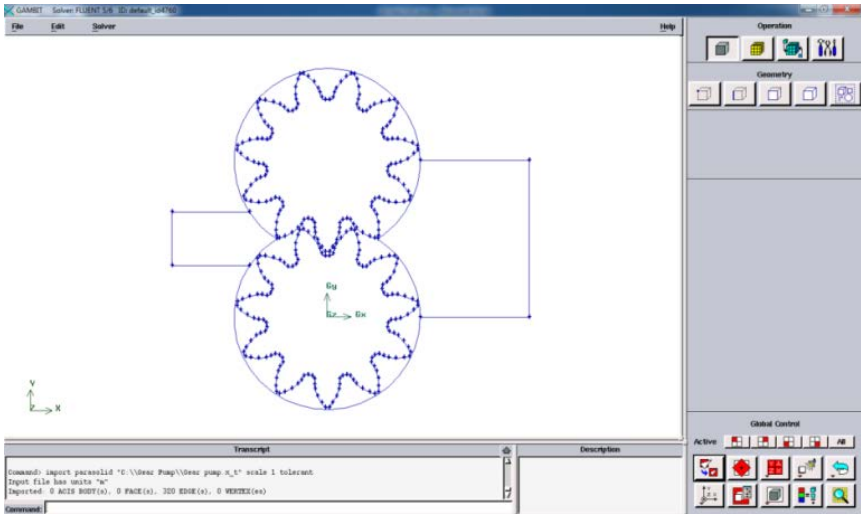
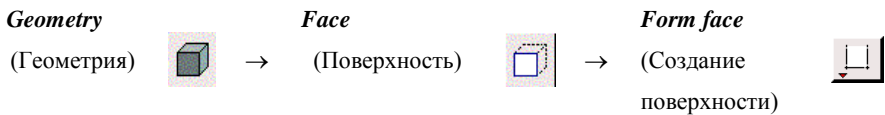


Рисунок 2.11 – Двухмерная модель шестеренного насоса

Для создания поверхности входного канала необходимо выполнить следующие действия:



В появившемся меню *Create Face from Wire frame* нажмите на стрелочку справа от меню *Edges*, появится окно *Edge List (Multiple)*, в котором показаны доступные (*Available*) для выбора отрезки и выбранные (*Picked*). С помощью мыши выберите линии, образующие замкнутый контур поверхности входного канала, как показано на рисунке 2.12. Для построения поверхности следует нажать кнопку *Apply*, в результате линии контура модели поменяют цвет (рисунок 2.13).

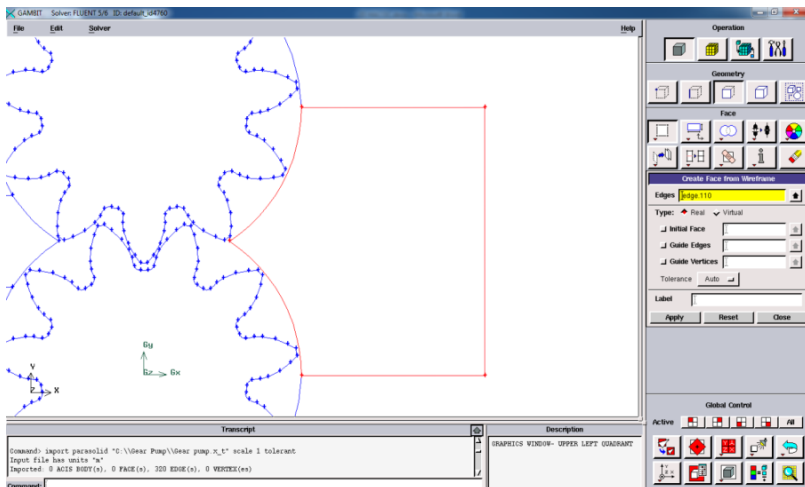


Рисунок 2.12 – Построение поверхности входного канала

Создание поверхности выходного канала производится аналогично. С помощью мыши выберите отрезки, образующие замкнутый контур поверхности выходного канала, как показано на рисунке 2.13. Для построения поверхности следует нажать кнопку *Apply*, в результате линии контура модели поменяют цвет (рисунок 2.14).

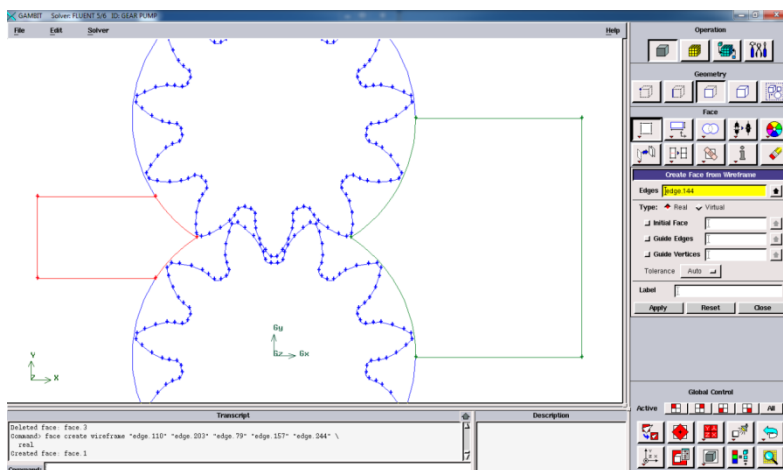


Рисунок 2.13 – Построение поверхности выходного канала

Далее создается поверхность рабочего объема шестеренного насоса, которая будет получена путем вычитания из заполненной поверхности колодцев поверхностей шестерен. Для этого сначала необходимо создать поверхность колодцев шестерен, с помощью мыши выбрав отрезки, образующие замкнутый контур поверхности колодцев шестерен, как показано на рисунке 2.14.

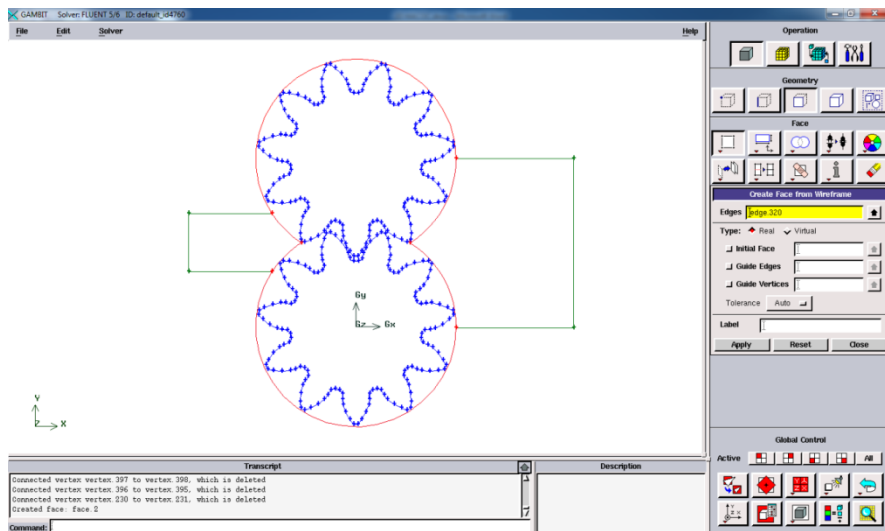


Рисунок 2.14 – Построение поверхности колодцев шестерен

Для завершения операции построения поверхности следует нажать кнопку *Apply*, в результате линии контура модели меняют цвет (рисунок 2.15).

Для создания поверхности одной шестерни выберите с помощью мыши отрезки, образующие замкнутый контур поверхности этой шестерни, как показано на рисунке 2.15. Для построения поверхности следует нажать кнопку *Apply*, в результате линии контура модели меняют цвет (рисунок 2.16).

Создание поверхности второй шестерни производится аналогично. С помощью мыши выберите отрезки, образующие замкнутый контур поверхности второй шестерни. Для построения поверхности нажмите кнопку *Apply*, в результате линии контура модели меняют цвет (рисунок 2.16).

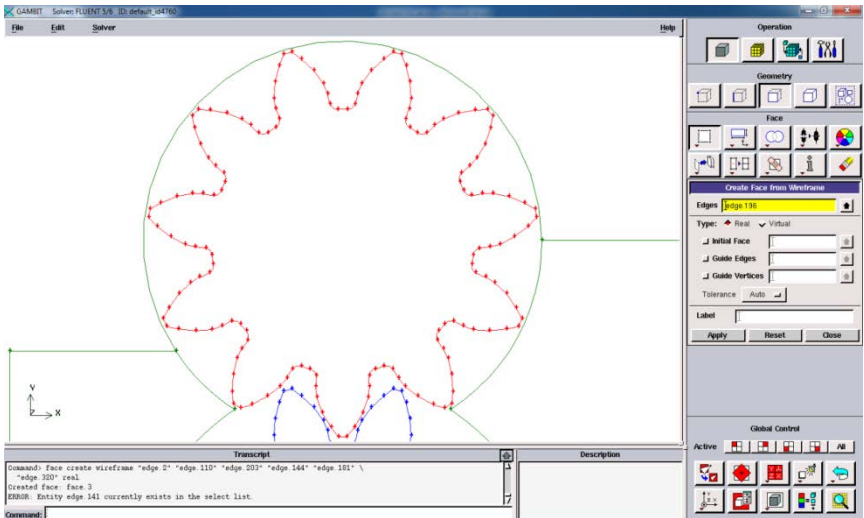


Рисунок 2.15 – Построение поверхности одной из шестерен

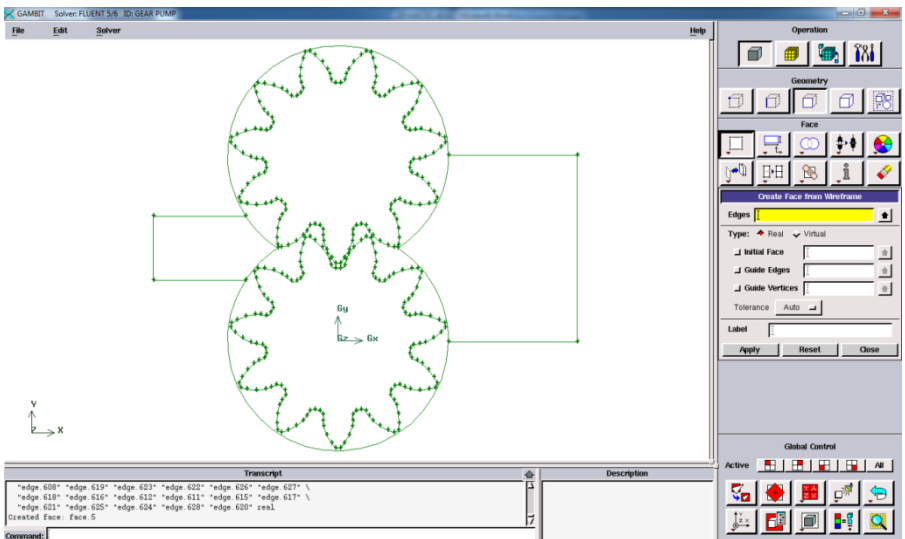



Рисунок 2.16 – Результат построения поверхностей шестерен

Далее для облегчения восприятия вычитания поверхностей необходимо включить заливку объектов. Для этого нужно нажать

клавишу  в меню общей настройки (*Global Control*). Результат этой операции представлен на рисунке 2.17.

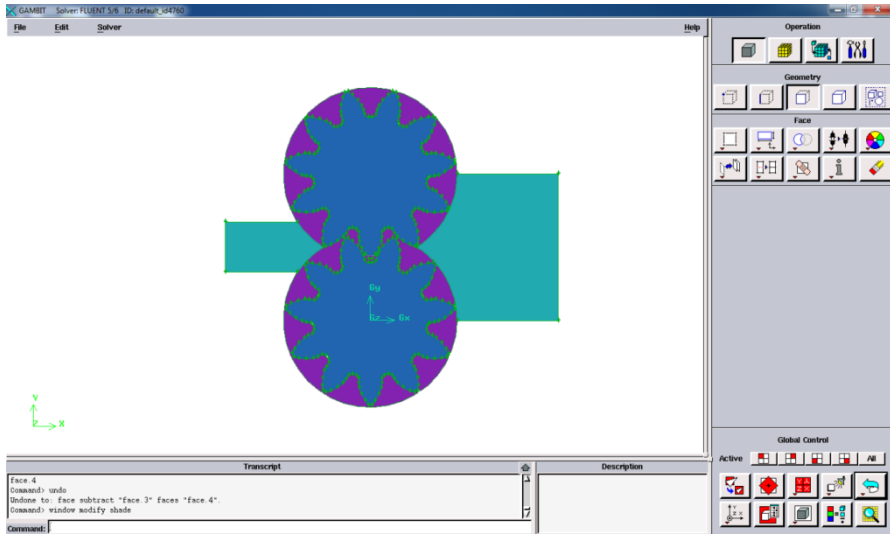





Рисунок 2.17 – Результат включения опции заливки объектов

Затем для проведения булевой операции по вычитанию поверхностей нужно выполнить следующие действия:

	<i>Subtract real</i>		<i>face</i>	
<i>Geometry</i> (Геометрия)	→	<i>Face</i> (Поверхность)	→	(Вычитание реальных поверхностей)
				

В появившемся меню *Subtract real face* поставьте курсор в окошко *Face* и выберите поверхность колодцев шестерен, далее поставьте курсор в окошко *Subtract face* и выберете поверхность одной шестерни, как показано на рисунке 2.18. Для выполнения операции следует нажать кнопку *Apply*, в результате поверхность этой шестерни должна исчезнуть (рисунок 2.19).

Далее следует вычесть поверхность второй шестерни, для этого аналогично в меню *Subtract real face* поставьте курсор в окошко *Face*

и выберите оставшуюся поверхность колдцев шестерен, далее поставьте курсор в окошко *Subtract face* и выберите поверхность второй шестерни, как показано на рисунке 2.19. Для выполнения операции следует нажать кнопку *Apply*, в результате поверхность этой шестерни должна исчезнуть (рисунок 2.20).

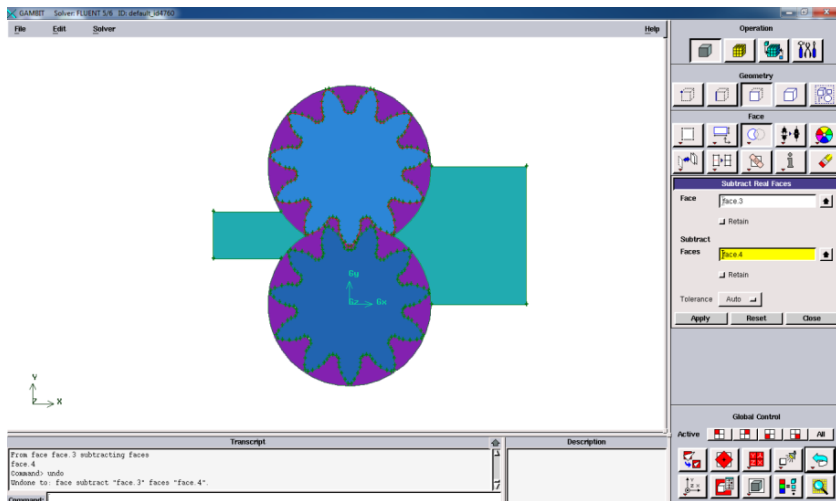


Рисунок 2.18 – Выполнение операции вычитания поверхности одной шестерни

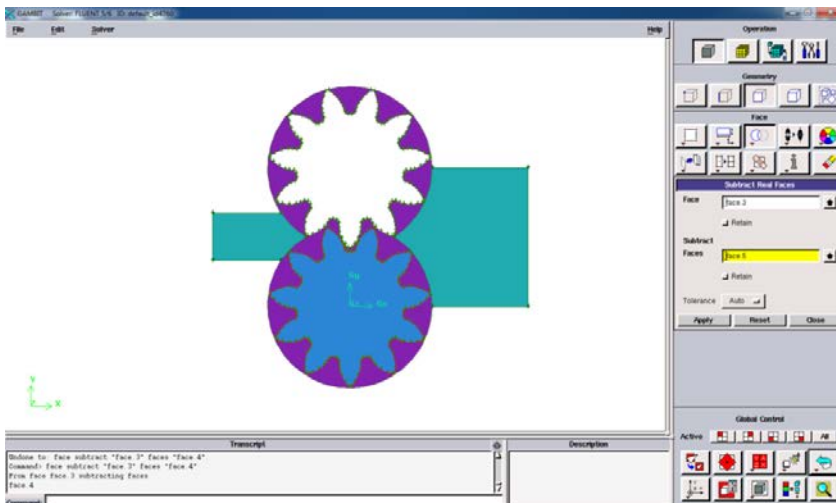


Рисунок 2.19 – Выполнение операции вычитания поверхности второй шестерни

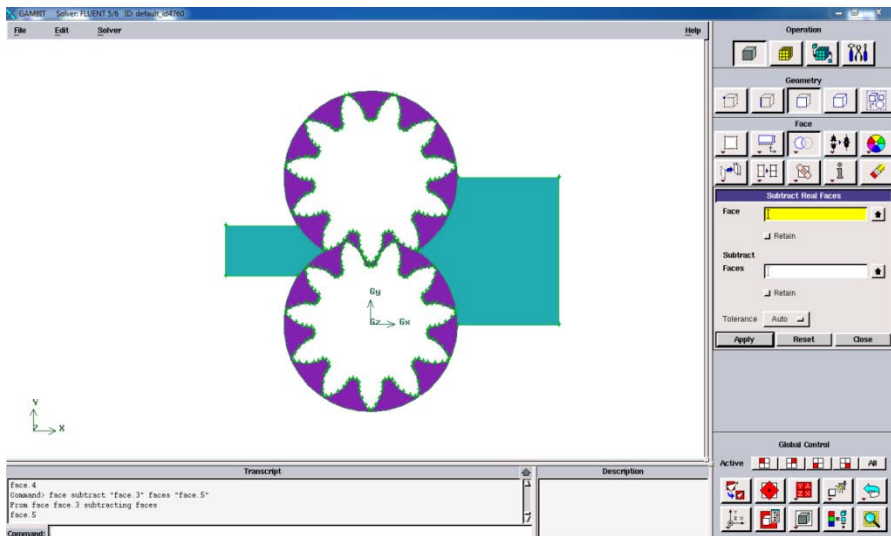


Рисунок 2.20 – Результат выполнения вычитания поверхности второй шестерни

2.4.2 Построение сеточной модели расчетной области шестеренного насоса

Так как постановка задачи нестационарная и движение шестерен будет вращательное, то необходимо учитывать, что сетка обязательно должна состоять из треугольных элементов. Только такой тип элементов позволяет использовать «перестраиваемую» сетку.

Рабочий процесс шестеренного насоса подразумевает наличие постоянного зацепления зубьев шестерен. За счет этого осуществляется передача крутящего момента от ведущей шестерни на ведомую. В зависимости от изготовления шестерен (отрицательное, нулевое, положительное перекрытие) возможны случаи одновременного нахождения в зацеплении двух пар зубьев. В этом случае образуется «запертый объем». В результате чего давление в нем резко возрастает.

Однако для нормального функционирования САЕ-системы есть еще одно обязательное условие для правильного перестроения сетки во время расчета. Этим условием является наличие зазора между зубьями шестерен, для того чтобы сетка не разрывалась в месте контакта зубьев. Причем для двухмерной постановки задачи необходимо учитывать, что минимальное количество элементов в

самом узком месте (между зубами и между вершиной зуба и корпусом) должно быть не менее двух элементов, как показано на рисунке 2.21. Для трехмерной постановки задачи минимальное количество элементов в самом узком месте должно быть не менее трех элементов, как показано на рисунке 2.22.

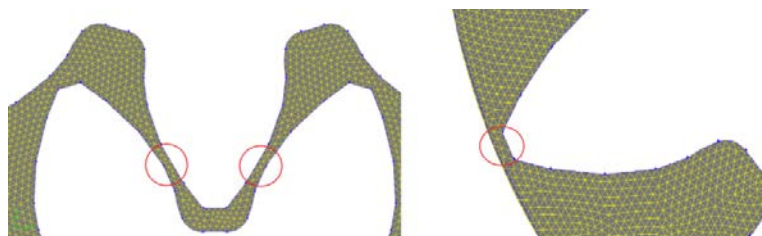


Рисунок 2.21 – Сетка в узких областях модели для двумерной задачи

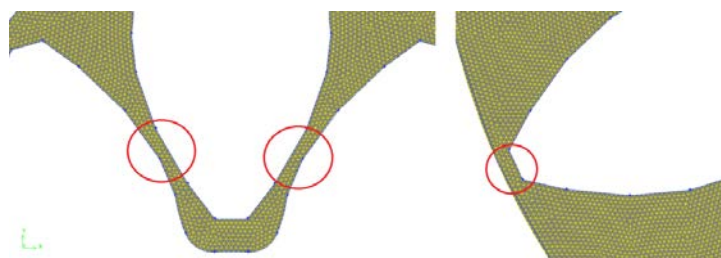
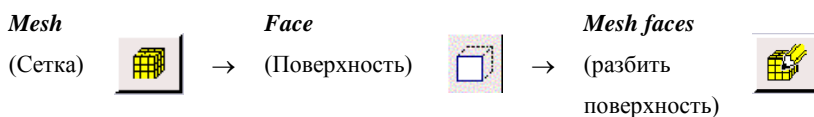


Рисунок 2.22 – Сетка в узких областях модели для трехмерной задачи

Разбиение поверхности осуществляется с помощью команды:



В появившемся меню необходимо поставить курсор в окно *Faces* и с помощью мыши выбирать поверхность рабочей области насоса. Назначить треугольный элемент, выбрав *Tri* во вкладке *Elements*. Выбрать тип разбиения (*Type*) *Pave*. Для выбора размера конечного элемента, равного 0,5мм, в окне *Spacing* вводится 0,5 (рисунок 2.23).

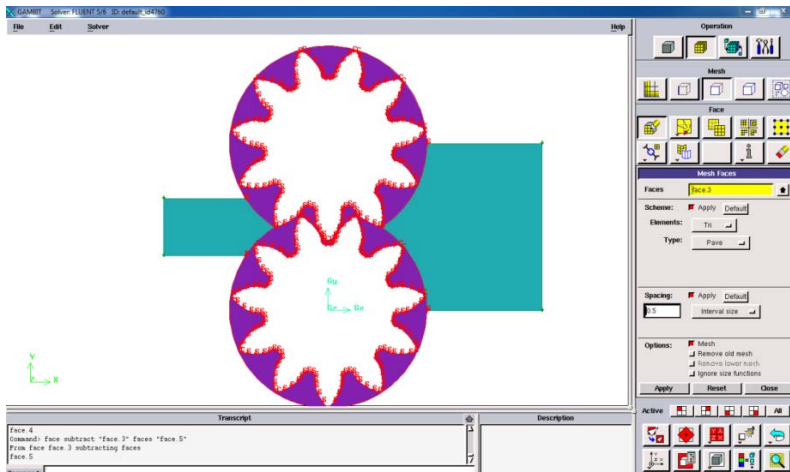


Рисунок 2.23 – Построение сетки на поверхности рабочей области

Размер конечного элемента выбран исходя из условия получения двух элементов в самом узком месте между зубьями, равном 0,7 мм. Для построения сетки следует нажать кнопку *Apply*, в результате на выделенной поверхности появится сетка (рисунок 2.24).

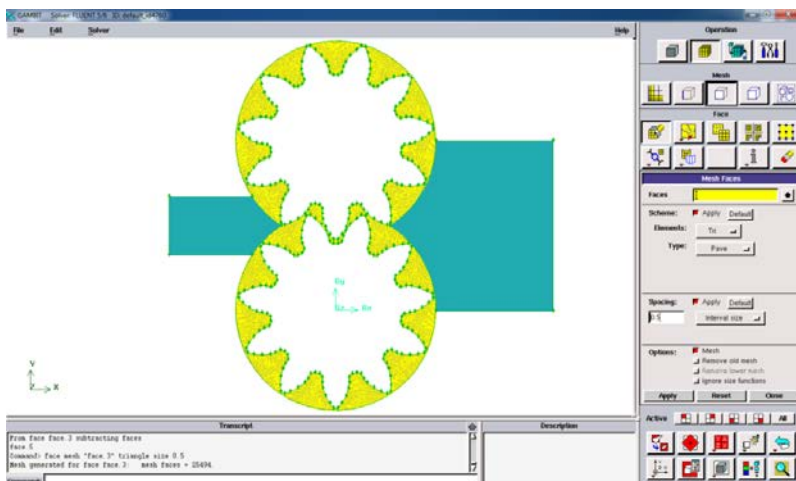


Рисунок 2.24 – Результат построения сетки на поверхности рабочей области

Поскольку области входа и выхода не требуют применения «перестраиваемой» сетки, то поверхность выходного канала разбивается сеткой из четырехугольных элементов *Quad* с размером конечного элемента, равным 1 мм, с типом разбиения *Pave* (рисунок 2.25). Применение четырехугольной сетки сократит время решения задачи за счет меньшего количества элементов по сравнению с треугольной сеткой и улучшит достоверность результатов за счет геометрической формы элементов.

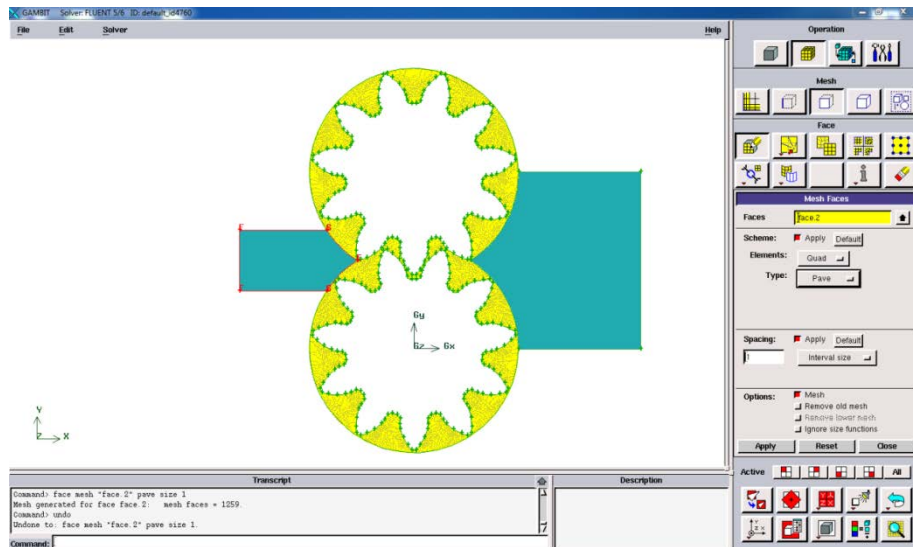


Рисунок 2.25 – Построение сетки на поверхности выходного канала

Результат построения четырехугольной сетки на поверхности выходного канала представлен на рисунке 2.26.

Разбиение поверхности входного канала осуществляется аналогично, сеткой из четырехугольных элементов *Quad* с размером конечного элемента, равным 1мм, с типом разбиения *Pave*. Размер конечного элемента выбран исходя из размеров входного канала и размера элементов в зоне рабочей области, так как в зоне рабочей области размер 0,5мм, то размер элементов входного канала не должен значительно превышать это число, в противном случае нельзя гарантировать необходимую сходимость решения в ANSYS Fluent. Результат построения сетки на поверхности модели представлен на рисунке 2.27.

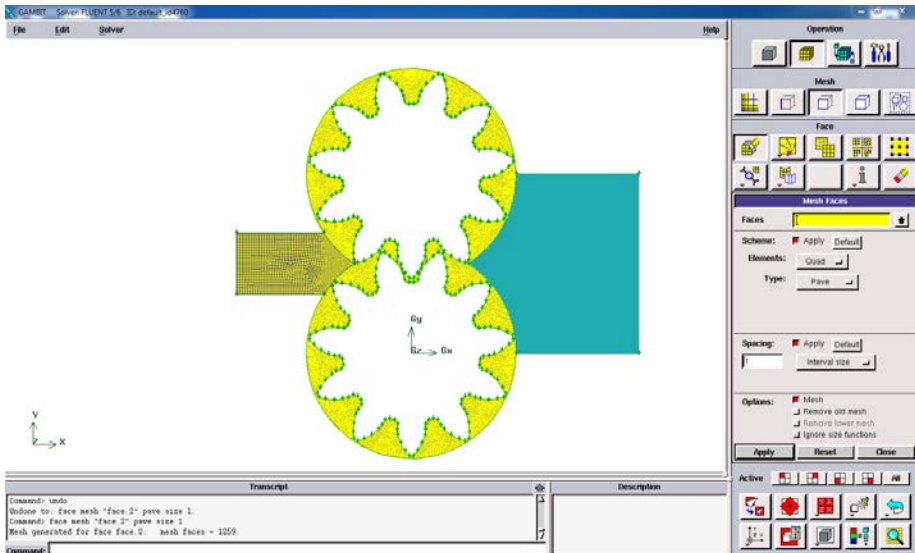


Рисунок 2.26 – Результат построения сетки на поверхности выходного канала

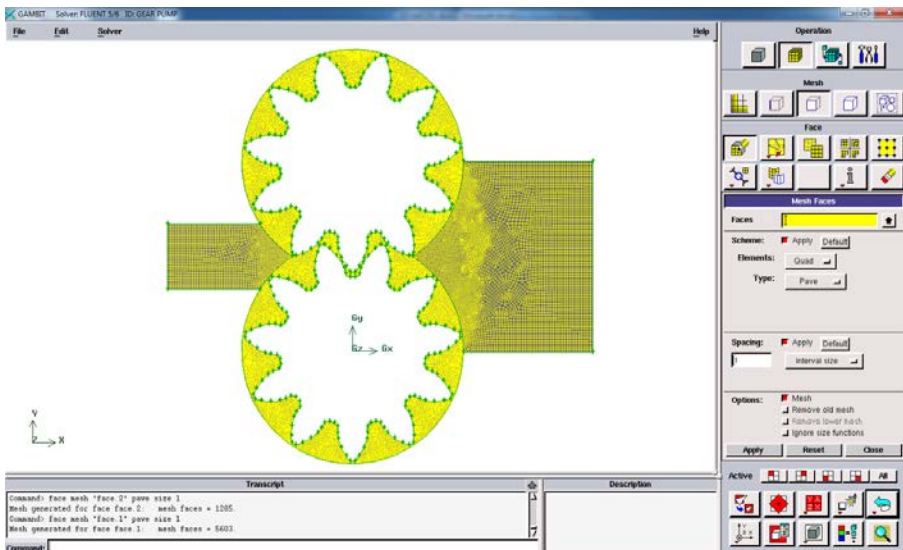


Рисунок 2.27 – Результат построения сетки на всей поверхности модели

2.4.3 Назначение зон граничных условий

После того как сетка построена и ее качество удовлетворяет условиям моделирования, нужно задать граничные условия. Для входа в меню задания граничных условий нажмите следующие кнопки в главном меню:

Zones



(Зоны)



Specify Boundary Types

(Задать тип граничных условий)



В появившемся меню необходимо поставить курсор в окно *Edges* и с помощью мыши выбрать отрезок во входном канале, соответствующий входной границе. В окне *Name* ввести название *Pressure_inlet*. Во вкладке *Type* необходимо выбрать *PRESSURE_INLET* (рисунок 2.28). Для применения граничного условия необходимо нажать кнопку *Apply*.

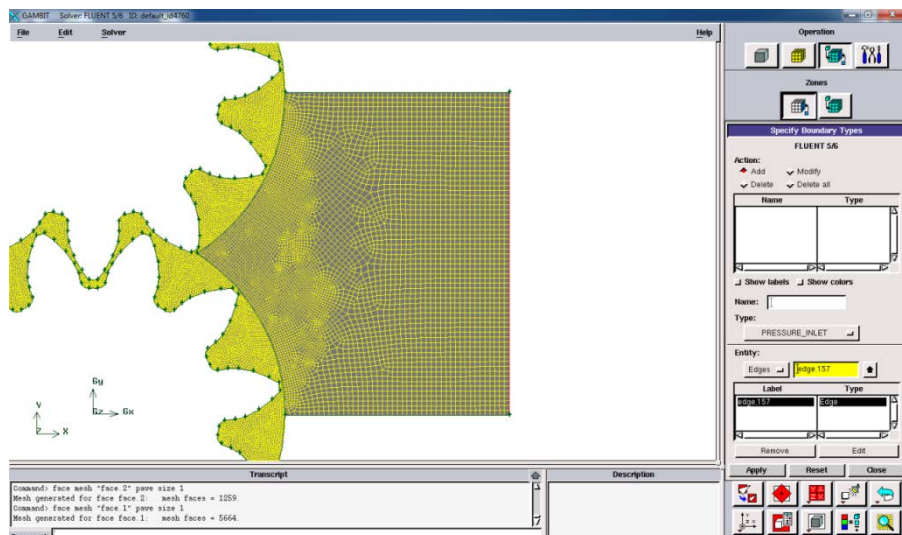


Рисунок 2.28 – Назначение граничного условия *Pressure_inlet*

Аналогично задается граничное условие *Pressure_outlet*. Необходимо, поставив курсор в окно *Edges*, с помощью мыши выбрать отрезок в выходном канале, соответствующий выходной границе, в окне *Name* вводится название *Pressure_outlet*. Во вкладке

Тип необходимо выбрать *PRESSURE_OUTLET*. Для применения граничного условия необходимо нажать кнопку *Apply*.

Далее необходимо задать граничное условие проницаемой стенки *interior* для границ между сетками с различными типами элементов. Для задания этого условия в выходном канале следует поставить курсор в окно *Edges*, с помощью мыши выбрать соответствующий отрезок, в окне *Name* ввести название *Interior_out*. Во вкладке *Type* необходимо выбрать *INTERIOR* (рисунок 2.29). Для применения граничного условия необходимо нажать кнопку *Apply*.

Задание условия проницаемой стенки во входном канале осуществляется аналогично. В окне *Name* введите название *Interior_in*. Во вкладке *Type* необходимо выбрать *INTERIOR*. Для применения граничного условия необходимо нажать кнопку *Apply*.

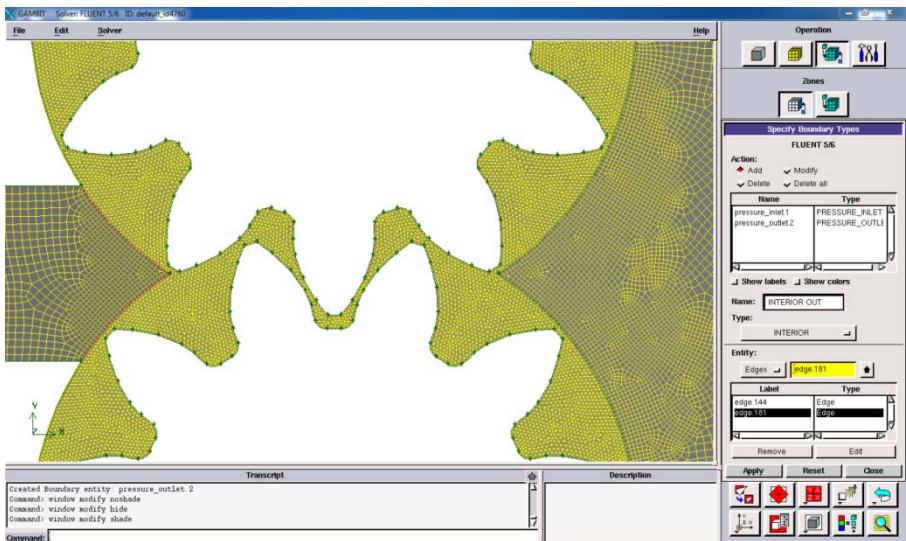


Рисунок 2.29 – Назначение граничного условия *Interior_out*

Для задания движения шестерен в программе *ANSYS Fluent* необходимо, чтобы отрезки, составляющие шестерни, имели название. Для этого нужно поставить курсор в окно *Edges* и с помощью мыши выбрать соответствующие отрезки первой шестерни, составляющие замкнутый контур. В окне *Name* ввести название *Gear1*. Во вкладке *Type* необходимо выбрать *Wall* (рисунок 2.30). Для применения граничного условия нужно нажать кнопку *Apply* (рисунок 2.31).

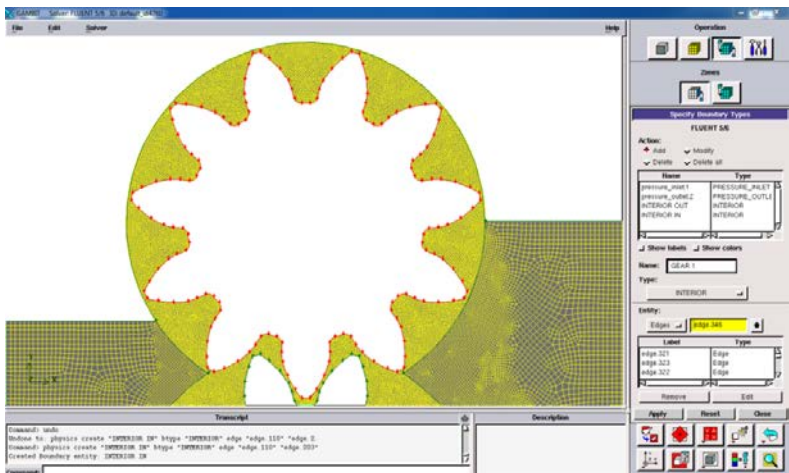


Рисунок 2.30 – Назначение граничного условия для одной шестерни (Gear1)

Для задания названия второй шестерни необходимо поставить курсор в окно *Edges* и с помощью мыши выбрать соответствующие отрезки второй шестерни, в окне *Name* ввести название *Gear2*. Во вкладке *Type* выберите *Wall*. Для применения граничного условия нажмите кнопку *Apply*. Результат задания граничных условий представлен на рисунке 2.31.

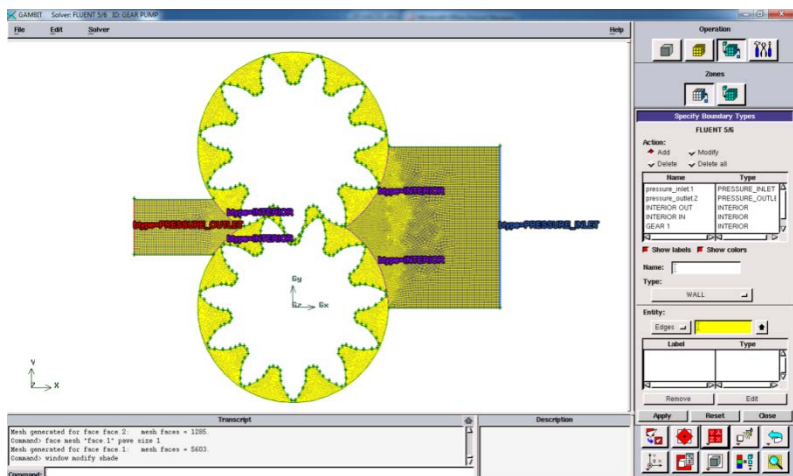


Рисунок 2.31 – Результат задания граничных условий

Далее будет произведено назначение типов зон. Это необходимо для дальнейшей настройки параметров этих зон в программе *ANSYS Fluent*. Например, для задания перестроения сетки в зоне шестерен.

Для входа в меню задания типа зон необходимо нажать следующие кнопки в главном меню:

Zones



(Зоны)



Specify Continuum Types

(Задать тип зон)



В появившемся меню необходимо поставить курсор в окно *Faces* и с помощью мыши выбрать поверхность выходного канала. В окне *Name* ввести название *Fluid out*. Во вкладке *Type* необходимо выбрать *FLUID*(рисунок 2.32). Для применения задания типа зоны необходимо нажать кнопку *Apply*.

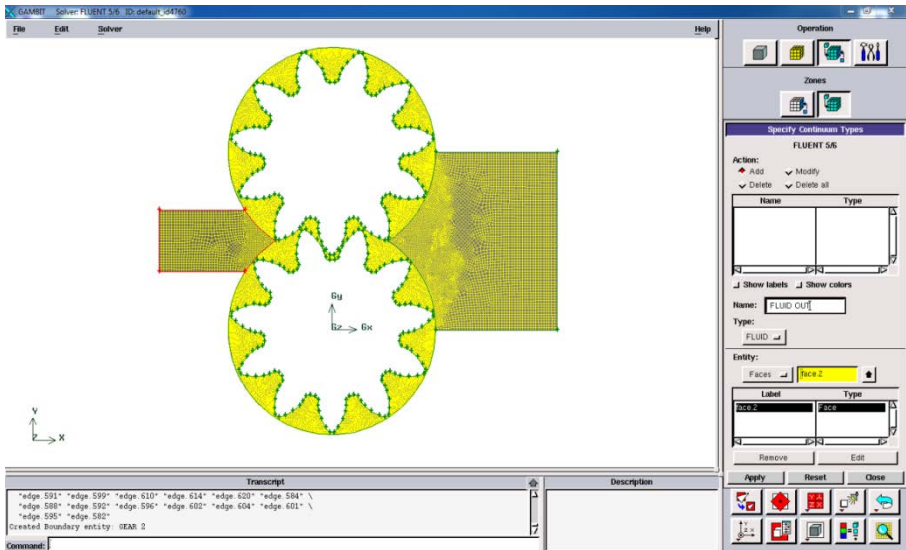


Рисунок 2.32 – Задание зоны *Fluid out*

Для задания зоны входного канала необходимо поставить курсор в окно *Faces* и с помощью мыши выбрать поверхность входного канала. В окне *Name* ввести название *Fluid in*. Во вкладке *Type* нужно выбрать *FLUID*. Для применения задания типа зоны нажмите кнопку *Apply*.

Для задания зоны рабочей области нужно поставить курсор в окно *Faces* и с помощью мыши выбрать поверхность рабочей области. В окне *Name* ввести название *Fluid gear*. Во вкладке *Type* выберите *FLUID*. Задание типа зоны осуществляется после нажатия кнопки *Apply*. Результат выполнения задания типов зон представлен на рисунке 2.33.

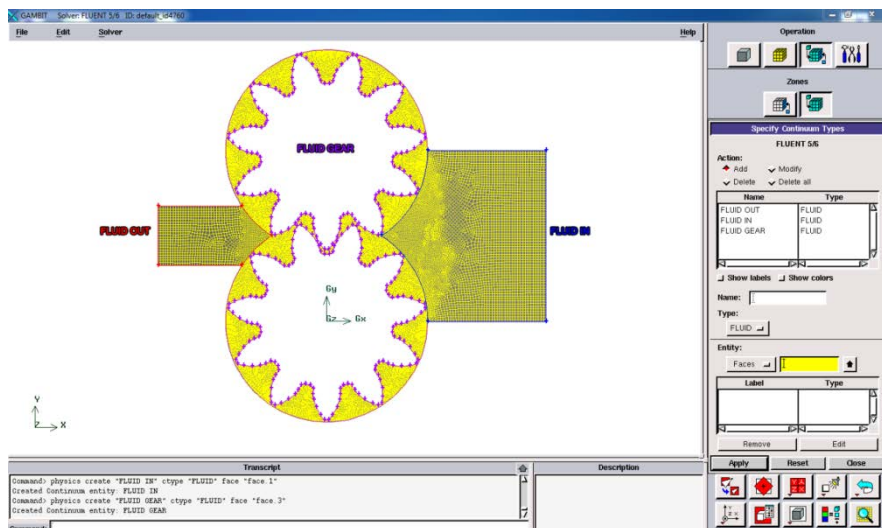


Рисунок 2.33 – Результат задания типов зон

В результате определения зон назначены области всасывания, нагнетания и рабочий «подвижный» объем.

2.4.4 Передача построенной расчетной модели в программу ANSYS Fluent

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

File → *Export* → *Mesh*.

В появившемся окне нужно ввести имя файла обмена (например, *Gearpump.msh*). По умолчанию оно совпадает с именем файла модели. С помощью кнопки *Browse* можно выбрать место, где требуется сохранить файл. Поскольку расчетная модель двумерная, то обязательно следует нажать кнопку *Export 2D (X-Y) Mesh* (рисунок 2.34). Запись файла обмена подтверждается нажатием кнопки *Accept*.

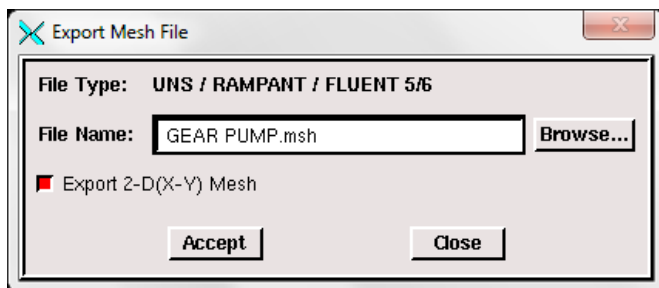


Рисунок 2.34 – Окно экспорта сетки

Если файл обмена был успешно записан, то в окне сообщений появится надпись *mesh was successful y written to Gear pump.msh*.

В указанном месте появится файл *Gear pump.msh*.

2.5 Решение численной модели рабочего процесса шестеренного насоса с использованием CAE-систем

Решение численной модели осуществляется в коммерческом CAE-пакете ANSYSFLUENT.

Принципиальная схема шестеренного насоса в двухмерной постановке приведена на рисунке 2.35.

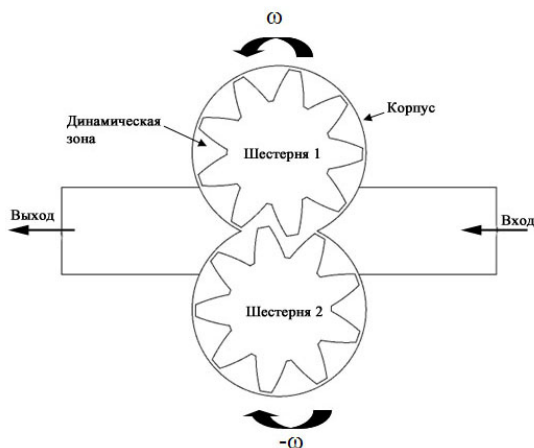


Рисунок 2.35 – Принципиальная схема шестеренного насоса

Запустите программу. В результате этого на экране появится окно, изображенное на рисунке 2.36.

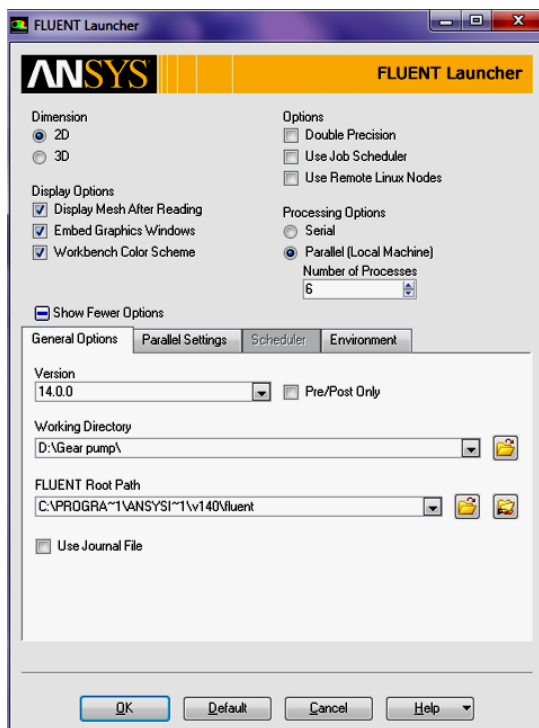


Рисунок 2.36 – Стартовое окно ANSYS FLUENT

В этом окне в поле *Working Directory* необходимо выбрать рабочую папку, например *D:\Gearpump*. Также необходимо задать размерность решаемой задачи *Dimension* – 2D или 3D (двухмерная и трехмерная задачи соответственно). Алгоритм решения будем рассматривать на примере двухмерной задачи. В этом же окне нужно выбрать количество ядер процессора компьютера, которые будут использоваться при решении. Также здесь можно настроить параметры параллельного режима во вкладке *Parallel Settings*.

Далее откроется рабочее окно программы, изображенное на рисунке 2.37.

После проведения всех описанных выше предварительных операций необходимо произвести импортирование сеточной модели

шестеренного насоса с помощью команды верхнего меню *File*→*Read*→*Mesh*. После чего нужно выбрать заранее построенную сеточную модель расчетной области шестеренного насоса в формате *.msh. Далее на экране появится изображение импортированной сеточной модели (рисунок 2.38).

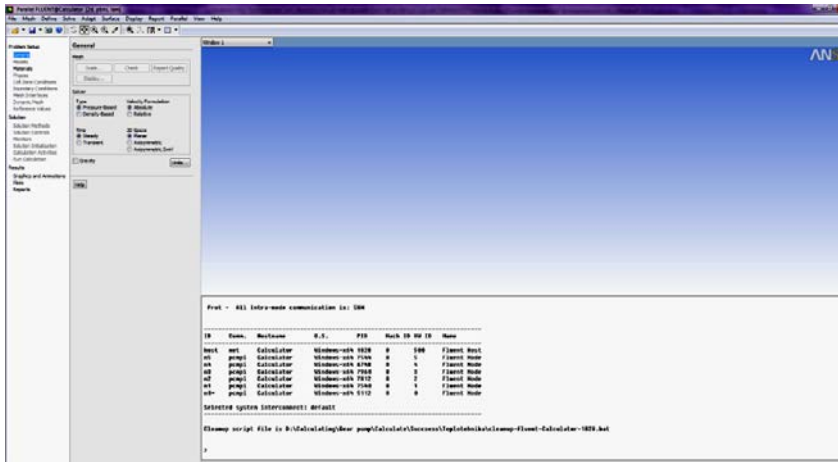


Рисунок 2.37 – Рабочее окно программы ANSYS FLUENT

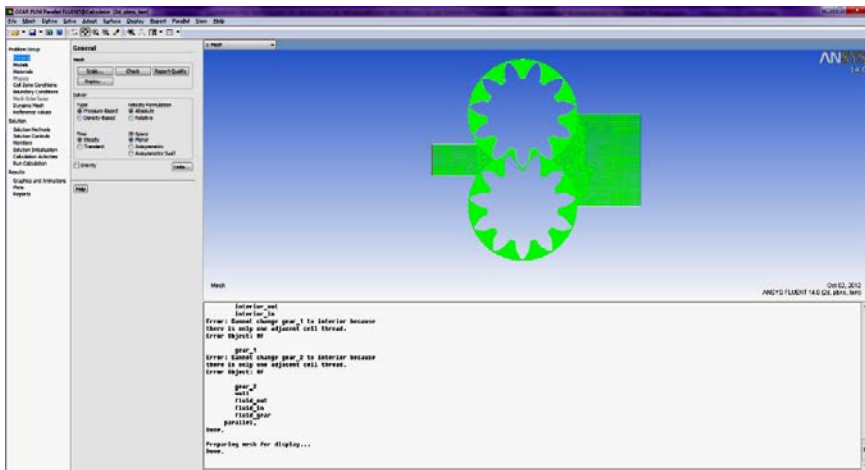


Рисунок 2.38 – Рабочее окно программы после импортирования сеточной модели шестеренного насоса

После импортирования сеточной модели проведем проверку геометрических параметров модели. Для этого с помощью команды *Mesh*→*Scale* перейдем в пункт настройки единиц измерения (рисунок 2.39).

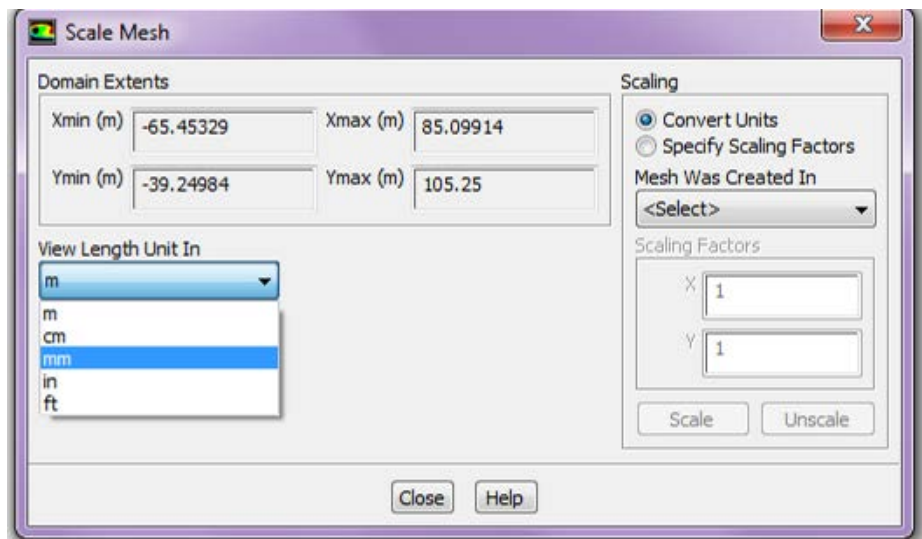


Рисунок 2.39 – Пункт настройки единиц измерения

В поле "*Mesh Was Created in*" необходимо указать единицы измерения, в которых строилась сеточная модель расчетной области, после чего следует нажать на *Scale*.

При проведении численных расчетов различают два типа расчетов: *Transient* (нестационарный анализ) или *Steady* (*стационарный анализ*). Нестационарный тип анализа используют тогда, когда необходимо отследить изменение какого-либо параметра с течением времени. Выполнение такого типа расчета, как правило, требует большего количества машинного времени. В большинстве случаев стационарный расчет проводится для предварительного анализа.

В данном случае будем проводить нестационарный расчет, для этого нужно поставить галочку в соответствующем поле меню *General*, которое можно найти, выполнив *Define*→*General* (рисунок 2.40).

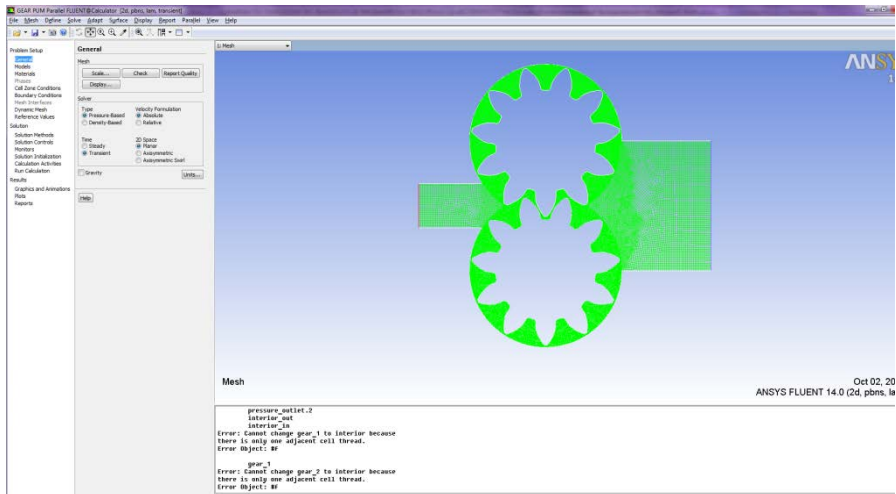


Рисунок 2.40 – Настройка параметров в меню *General*

Далее необходимо указать уравнения, которые будут использоваться при решении задачи. Для этого необходимо выполнить команду верхнего меню *Define*→*Models*. Рассмотрим некоторые из них:

- мультифазную модель нужно включать при решении задач с присутствием кавитации либо при многокомпонентной рабочей жидкости;
- уравнение энергии нужно учитывать при решении задач, в которых присутствует передача тепла;
- в моделях вязкости есть описание моделей турбулентности (рисунок 2.41).

Во FLUENT существует несколько классов моделей турбулентности (k -epsilon, k -omega, Reynolds Stress и т.д.). Подробное описание моделей турбулентности можно найти во встроенном справочном пособии *Fluent*.

В окне выбора модели турбулентности можно настроить модель турбулентности по своему усмотрению, что является чрезвычайно важным при проведении исследовательских работ.

После настройки необходимых уравнений можно перейти к заданию типа и свойств рабочей жидкости. По умолчанию в качестве

рабочего тела задан воздух. Выбор иного рабочего тела можно произвести, выполнив команду *Define*→*Materials*. Окно задания рабочей жидкости и ее свойств показано на рисунке 2.42.

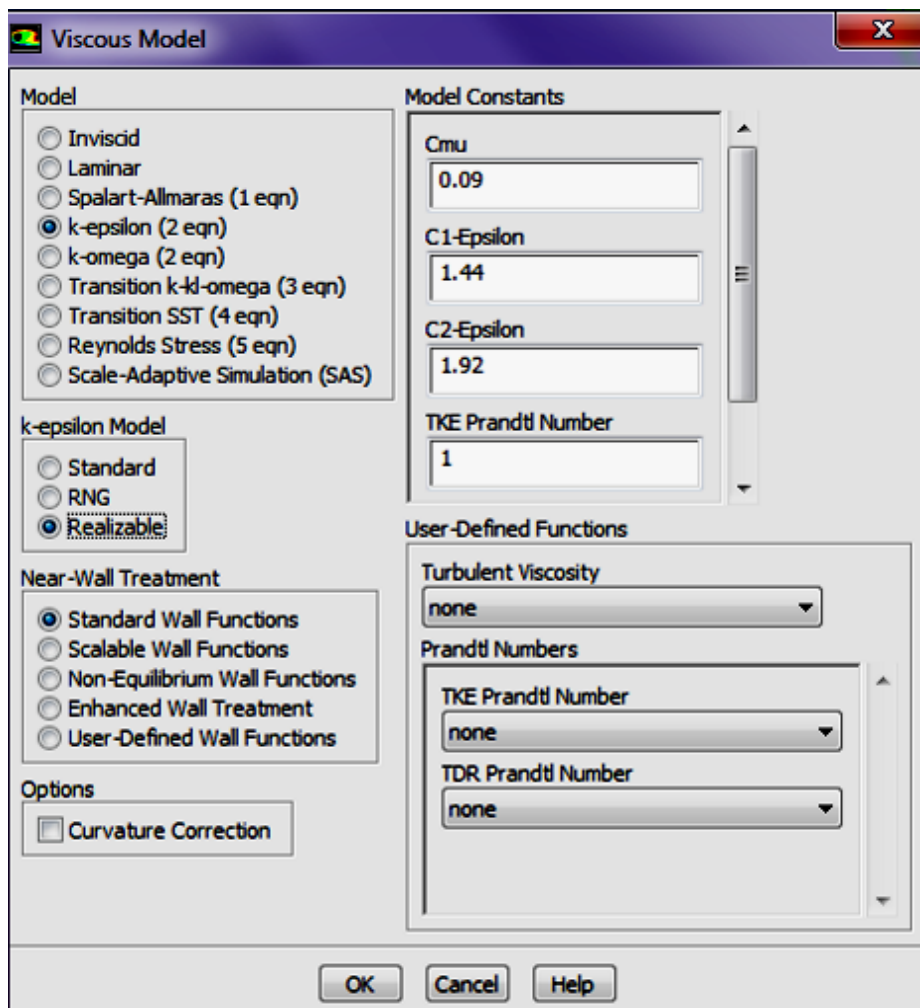


Рисунок 2.41 – Меню списка моделей турбулентности

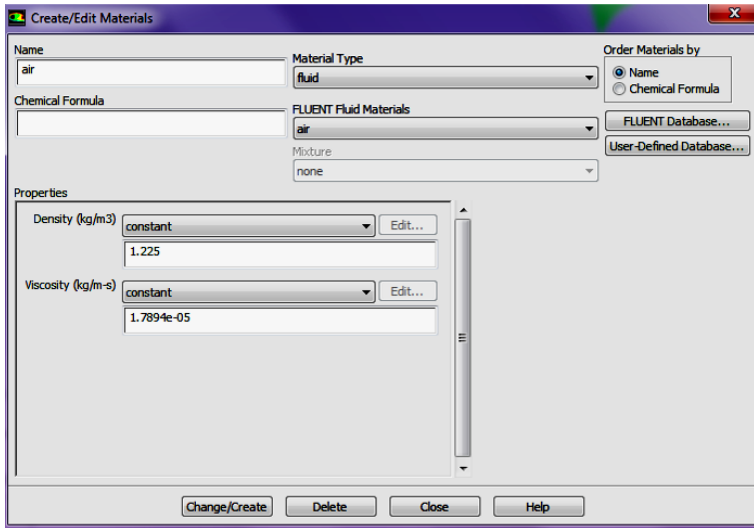


Рисунок 2.42 – Меню создания и редактирования свойств рабочей жидкости

После выбора в качестве рабочего тела, например воды, окно редактирования примет вид, изображенный на рисунке 2.43.

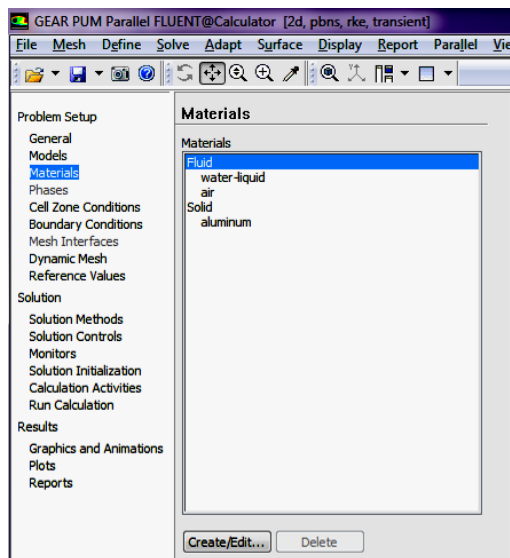


Рисунок 2.43 – Меню выбора рабочего тела

Далее, выполнив команду *Define*→*Cell Zone Conditions*, для всех расчетных доменов модели шестеренного насоса нужно указать тип (твердое тело - *solid*, жидкость – *fluid*, или газ- *gas*) рабочего тела (рисунок 2.44).

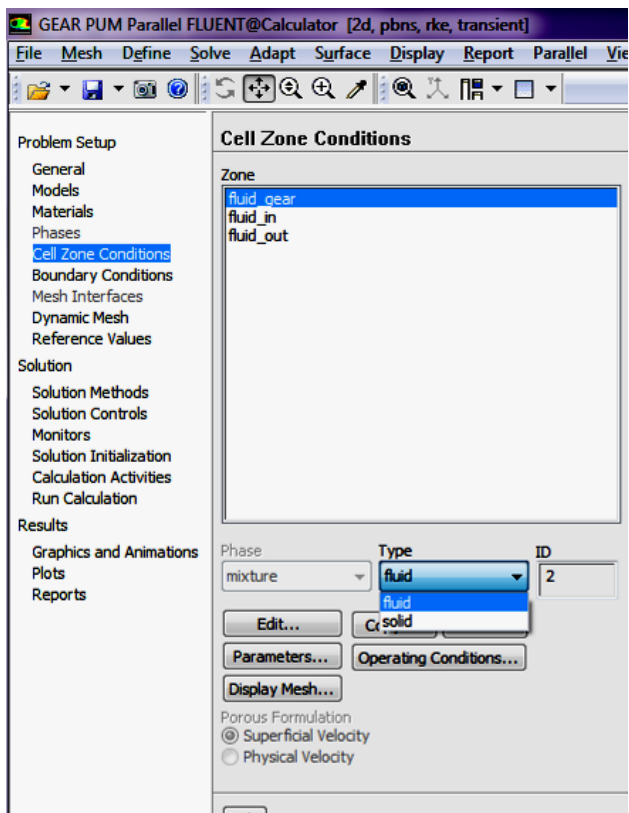


Рисунок 2.44 – Меню задания типа рабочего тела

Важнейшим пунктом алгоритма решения задачи течения в шестеренном насосе является задание граничных условий. Граничные условия можно задать в меню *Define* → *Boundary Conditions* (рисунок 2.45).

В этом меню для адекватного решения задачи необходимо задать граничные условия для входа и выхода из шестеренного насоса. Для этого на входе в насос можно задать либо массовый расход

(рисунок 2.46,а), либо скорость (рисунок 2.46,б), либо полное давление (рисунок 2.46,в). Во всех перечисленных случаях следует обратить внимание на направление течения потока рабочего тела. Для этого, например, в случае задания давления на входе в насосный агрегат следует задать перепад давления на границе входа путем задания величины *Initial Gauge Pressure*.

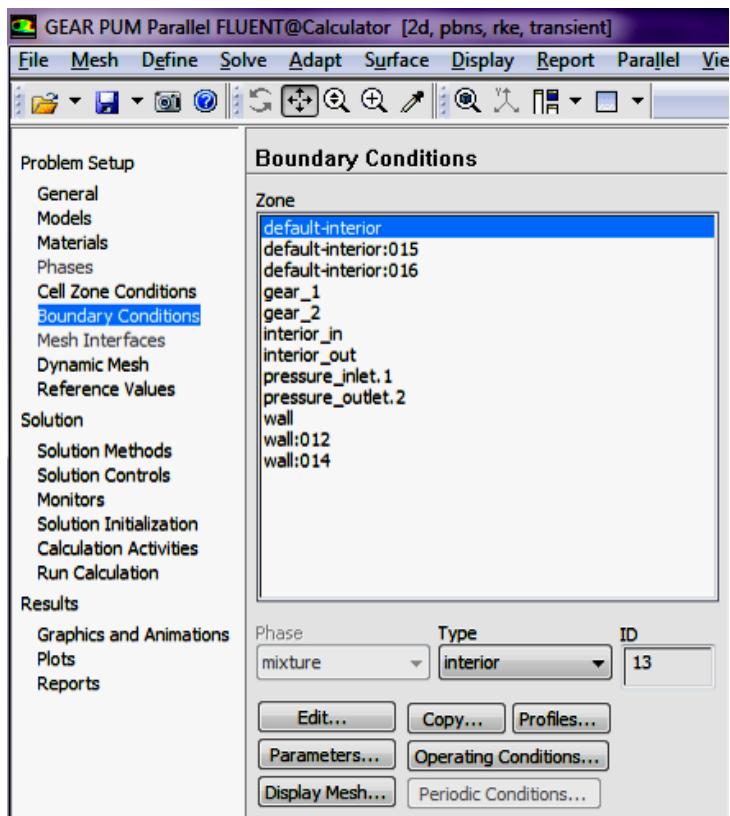
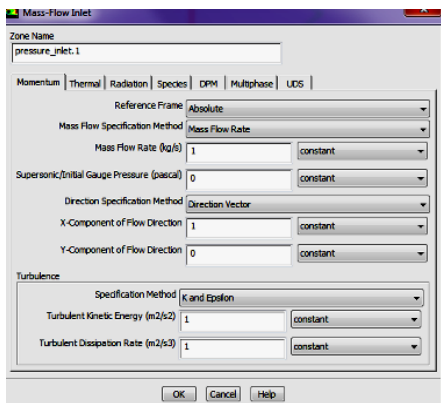
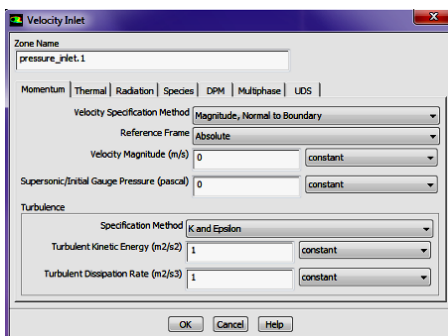


Рисунок 2.45 – Меню задания граничных условий

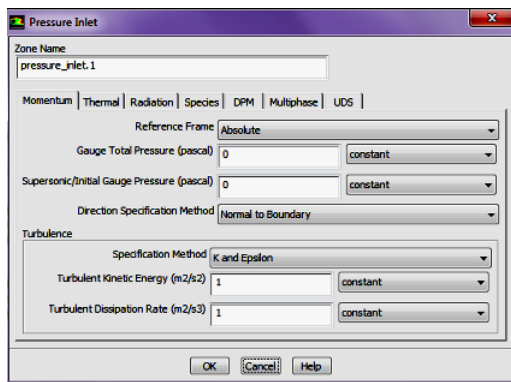
В этом случае оно должно быть меньше величины, указанной в поле *Gauge Total Pressure*. Также следует задать направление потока относительно поверхности, к которой применяется граничное условие (компоненты скорости V_x , V_y).



a)



б)



в)

Рисунок 2.46 – Меню задания граничного условия на входной поверхности в насос:
 а – задание массового расхода; б – задание скорости потока;
 в – задание статического давления

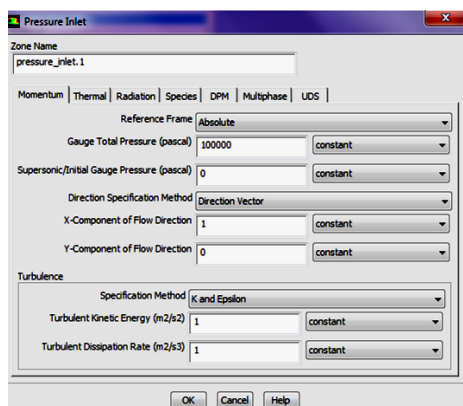
Для задания параметров турбулентности возможны следующие методы: *k* and *epsilon*; *Intensity and Length Scale*; *Intensity and Viscosity Ratio*; *Intensity and Hydraulic Diameter*. Наиболее простым способом является задание интенсивности и гидравлического диаметра. Для этого следует в списке *Specification method* меню настройки граничных условий для входа и выхода выбрать *Intensity and Hydraulic Diameter*. При неизвестном уровне интенсивности начальной турбулентности потока рекомендуется задавать ее на уровне 5%.

Гидравлический диаметр соответствует проходному диаметру питающего трубопровода. Гидравлический диаметр рассчитывается

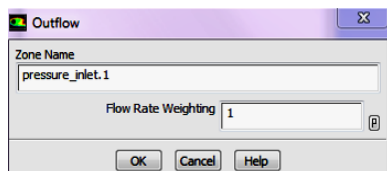
по формуле:
$$D_{hyd} = \frac{4S}{P},$$

где S – площадь поперечного сечения потока жидкости; P – смоченный периметр поперечного сечения потока.

Для определения граничных условий на выходе из насоса также существует несколько типов граничных условий: задание статического давления на выходе (рисунок 2.47,а) и массовый расход (рисунок 2.47, б).



а)



б)

Рисунок 2.47 – Меню задания граничных условий на выходе из насоса
а – статическое давление; б – массовый расход

Если сеточная модель расчетной области построена правильно (нет пересекающихся элементов геометрии, не потеряны линии и поверхности), то к внутренним областям, выделенным на рисунке 2.48, Fluent автоматически применяет граничное условие *Interior*, которое означает проницаемость для течения жидкости через эти области.

Шестеренный насос является сложной системой, в которой присутствует вращение шестерен. Таким образом, для адекватного моделирования рабочего процесса в шестеренном насосе необходим учет вращения шестерен. В этом случае исходная сеточная модель

должна перестраиваться в соответствии с движением геометрии. Для задания перестроения сеточной модели необходимо активизировать поле *Dynamic Mesh*. После чего указать метод деформации сетки: *Smoothing* и/или *Layering*, и/или *Remeshing*. Подробное описание данных методов можно найти во встроенном справочном пособии *Fluent*. Для моделирования течения в шестеренном насосе необходимо использовать одновременно два метода деформации сетки – *Smoothing* и *Remeshing*.

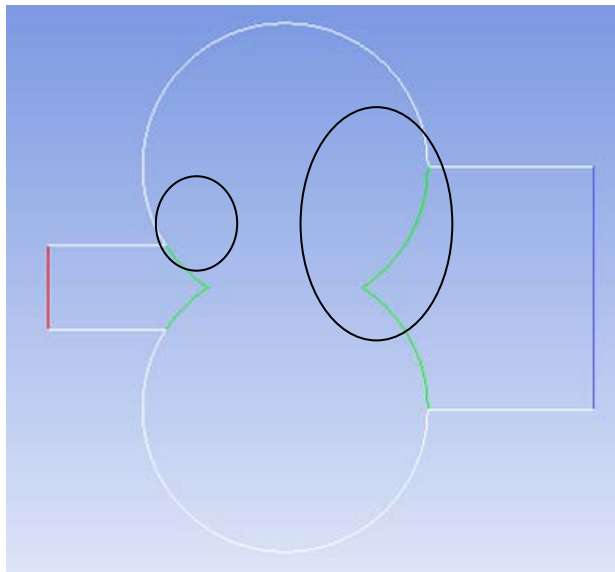
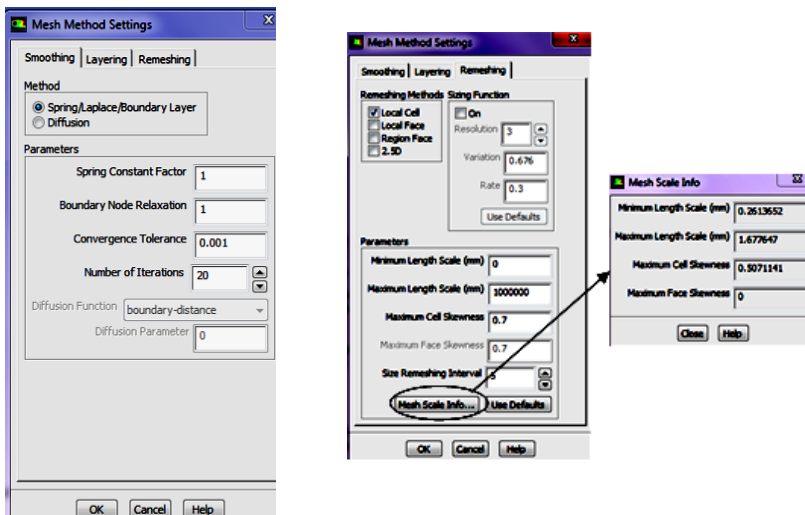


Рисунок 2.48 – Области с граничным условием *Interior*

После выбора требуемых методов деформации сетки необходимо настроить их параметры в разделе *Setting* меню *Dynamic Mesh*. Для метода *Smoothing* необходимо настроить параметры *Spring Constant Factor*, *Boundary Node Relaxation*, *Convergence Tolerance* и *Number of Iterations* (рисунок 2.49, а). Для метода *Remeshing* необходимо настроить значения *Minimum Length Scale*, *Maximum Length Scale*, *Maximum Cell Skewness*, исходя из значений соответственно минимальной и максимальной длин ячейки сетки, а также максимальной скошенности элементов сетки (рисунок 2.49, б).



а)

б)

Рисунок 2.49 – Меню настройки параметров методов деформации сетки

Настроить параметры *Remeshing* метода можно, нажав кнопку меню *Mesh Scale Info*, которая даст необходимую информацию о перечисленных параметрах. При этом в меню настройки параметров *Remeshing* метода значение минимального значения деформации – *Minimum Length Scale*, нужно указать большим (на 0,001...1), чем значение *Minimum Length Scale* в меню *Mesh Scale Info*, а значение максимального значения деформации сетки – *Maximum Length Scale*, нужно указать несколько меньшим (на 0,001...1), чем соответствующее значение меню *Mesh Scale Info*. В качестве значения максимальной скошенности элементов – *Maximum Cell Skewness*, можно выбрать то, которое указано в поле *Maximum Cell Skewness* в меню *Mesh Scale Info*. Все это делается для того, чтобы в процессе перестройки (деформации) сеточной модели не возникало ошибок в решателе FLUENT. Неудовлетворительные параметры величин деформации сетки могут приводить в процессе решения к возникновению отрицательных объемов сеточных элементов, что в свою очередь приведет к развалу решения.

Далее необходимо задать условия движения шестерен с помощью заранее написанной пользовательской функции – UDF. В ней прописываются центры и направления вращения шестерен, а также угловая скорость или частота вращения. Для работы с UDF

необходим установленный компилятор C++. Загрузка UDF производится в меню *Dynamic Mesh*, которое можно найти, выполнив команду *Define* → *Dynamic Mesh*(рисунок 2.50).

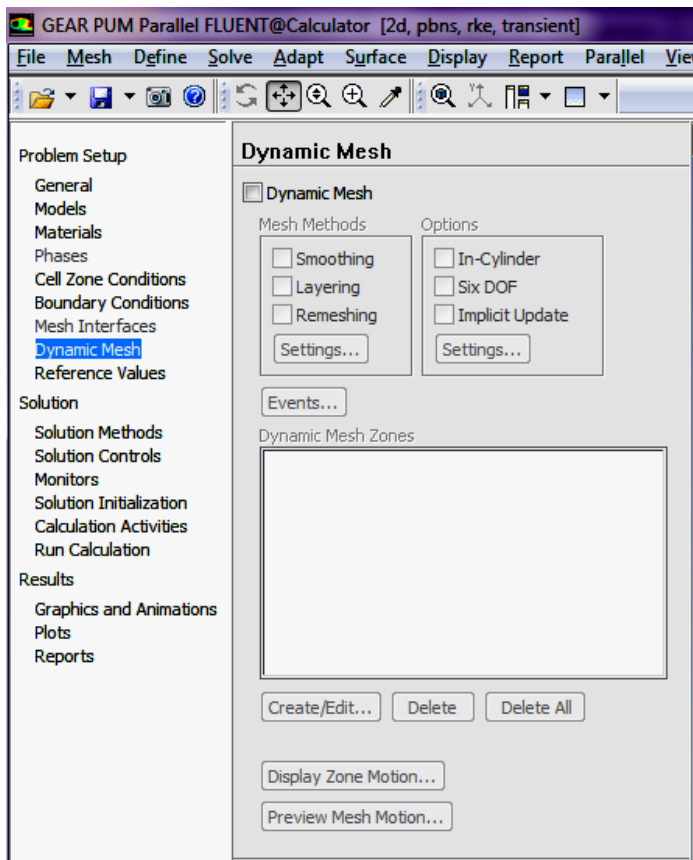


Рисунок 2.50 – Меню задания движения сетки

Для компилирования UDF файла необходимо зайти в меню *Compiled UDF* (рисунок 2.51), выполнив команду *Define* → *User Defined* → *Functions* → *Compiled*. Далее необходимо указать в подменю *Source files* место расположения UDF файла, нажав на *Add*. Затем необходимо скомпилировать файл, для чего следует нажать на кнопку *Build*. Процесс компиляции будет отражаться в консоли программы. После успешной компиляции следует нажать на кнопку *Load*.

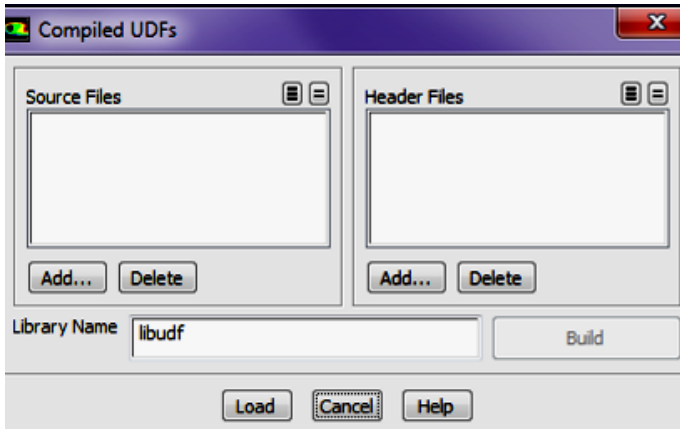


Рисунок 2.51– Меню компиляции UDF файла

После успешной компиляции UDF файла можно приступить к созданию областей, которые будут двигаться (шестерни), а также областей, сеточные модели которых в процессе моделирования перестраиваются вследствие деформации, причиной которой является движение областей. Для создания движущихся и деформируемых областей необходимо нажать на кнопку *Create/Edit* меню *Dynamic Mesh*. После этого откроется меню, изображенное на рисунке 2.52.

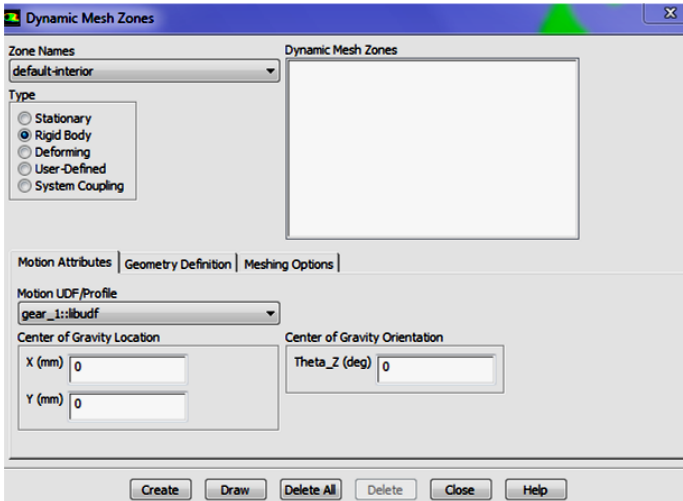


Рисунок 2.52 – Меню создания движущихся и деформируемых областей

Далее в списке *Zone Names* необходимо выбрать профиль одной из шестерен (рисунок 2.53) и применить к ней условие движения из списка *Motion UDF/Profile*, созданного на основе скомпилированного UDF файла. После этого нужно нажать на кнопку *Create*. Далее то же самое нужно сделать для второго профиля шестерни (рисунок 2.53). Также для каждой из шестерен в поле *Center of Gravity Location* необходимо задать их центр вращения. Таким образом, задается движение шестерен.

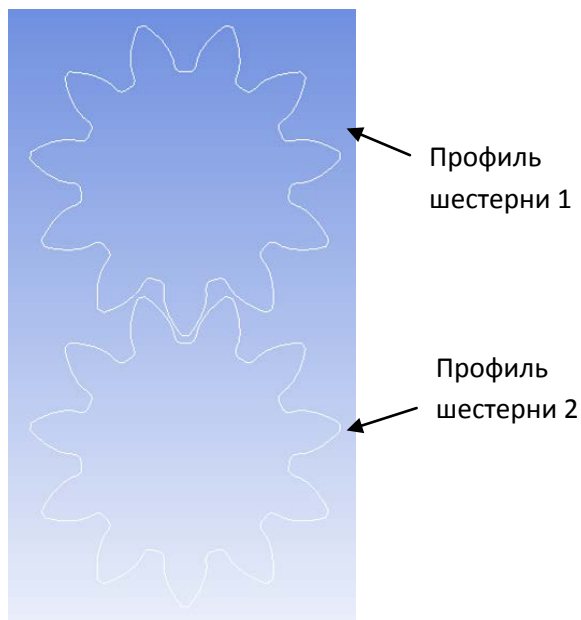


Рисунок 2.53 – Контуры профилей зубьев шестерни

Далее нужно указать области сеточной модели, которые будут подвергаться деформированию и, как следствие, в которых будет перестраиваться сетка. В 2D постановке для этого достаточно указать область колодцев шестерен (рисунок 2.54).

После проведения описанных операций по определению движения областей можно проверить их правильность. Для этого в меню *Dynamic Mesh* необходимо нажать на кнопку *Display Zone Motion*. Временной шаг в поле *Time Step* можно указать равным $5 \cdot 10^{-6}$ с, количество шагов *Number of Steps* – 100.

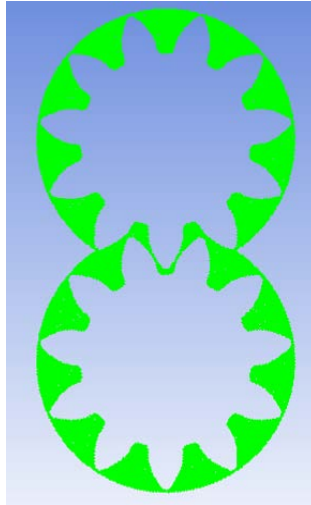


Рисунок 2.54 – Область течения жидкости в колодцах шестерен

Движение областей и перестраивание сеточной модели можно просмотреть с помощью меню *Preview Mesh Motion*. Для этого в меню *Dynamic Mesh* следует нажать на соответствующую кнопку, после чего откроется окно, изображенное на рисунке 2.55.

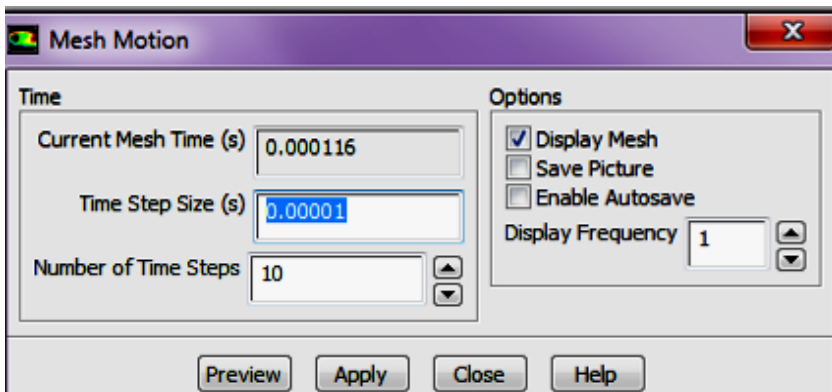


Рисунок 2.55 – Окно меню настройки просмотра движения сетки

В поле значения величины шага по времени, *Time Step Size*, следует ввести величину порядка $5 \cdot 10^{-6}$ с, количество шагов следует поставить равным 10...50. Данные величины выбираются из соображений обеспечения правильности перестраивания сетки в процессе. Если временной шаг выбран большим, то в процессе перестройки сетки будут возникать ее большие деформации, что в свою очередь будет приводить к созданию ячеек сетки с отрицательным объемом.

Если настройки решения выполнены правильно, то далее можно переходить к настройкам метода решения. Подробное описание различных методов решения можно найти во встроенном справочном пособии FLUENT. Выбор схемы решения задачи производится в меню *Solution Methods*, которое можно найти, выполнив команду *Solve* → *Method*. Для решения задач течения в шестеренном насосе достаточно использовать *SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked)* схему решения, что означает полуявный метод для связываемых давлением уравнений. Все остальные параметры пространственной дискретизации *Spatial Discretization* для проведения начальных расчетов можно оставить по умолчанию. Для повышения точности последующих расчетов, например для расчета изменения давления, можно использовать второй порядок точности вычислений.

Для настройки параметров автосохранения следует открыть меню *Calculation Activities* из меню *Solve*. Здесь в поле *Autosave Every (Time Steps)* следует задать количество шагов, через которое будет выполняться сохранение результатов расчета.

Настройка параметров, контроль которых позволит судить о точности и качестве расчета, производится в меню *Monitors* (рисунок 2.56).

Целесообразно в поле *Surface Monitors* задавать мониторинг некоторых параметров, например, полного давления на входе и/или выходе из шестеренного насоса, массового расхода и т.п. Для этого необходимо нажать на кнопку *Create*, после чего откроется окно меню настройки параметров мониторинга (рисунок 2.57). Здесь необходимо задать:

- *Report Type* – тип расчета величины (осреднение по массе, осреднение по расходу, массовый расход и т.д.);
- *Field Variable* – переменную для мониторинга;
- *Surfaces* – поверхности, на которых будут контролироваться выбранные для мониторинга переменные;

- путь и имя файла для сохранения результатов мониторинга в поле *File Name*;
- *Window* - порядковый номер окна для вывода на экран значений мониторинга (первое окно зарезервировано системой для отображения величин невязок);
- *Get Data Every* - параметры отображения результатов (показывать по итерациям либо по временным шагам)

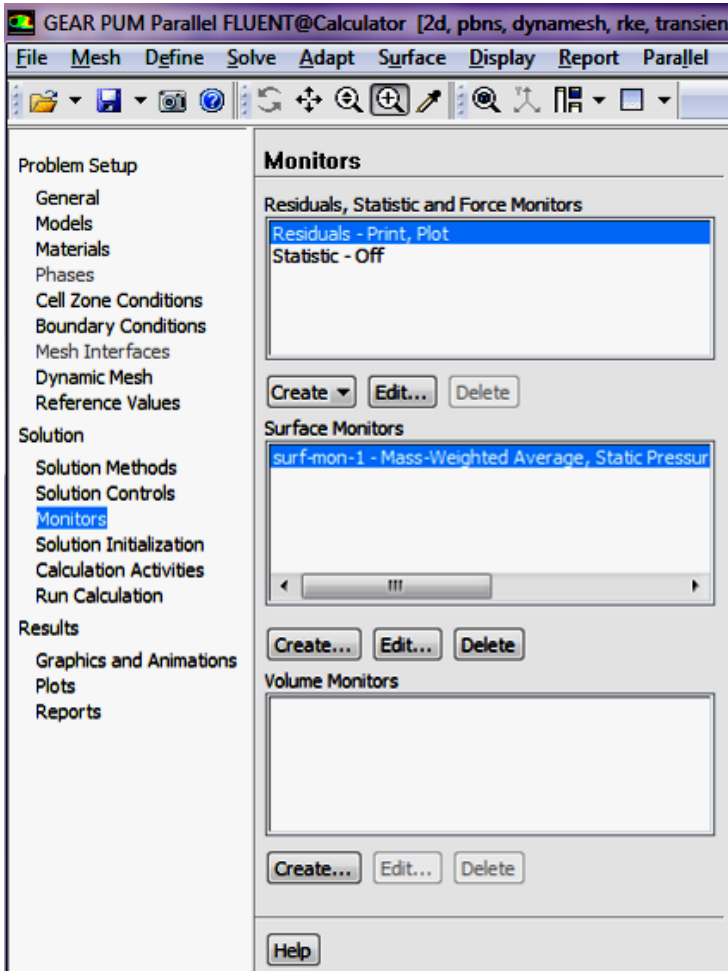


Рисунок 2.56 – Окно меню Monitors

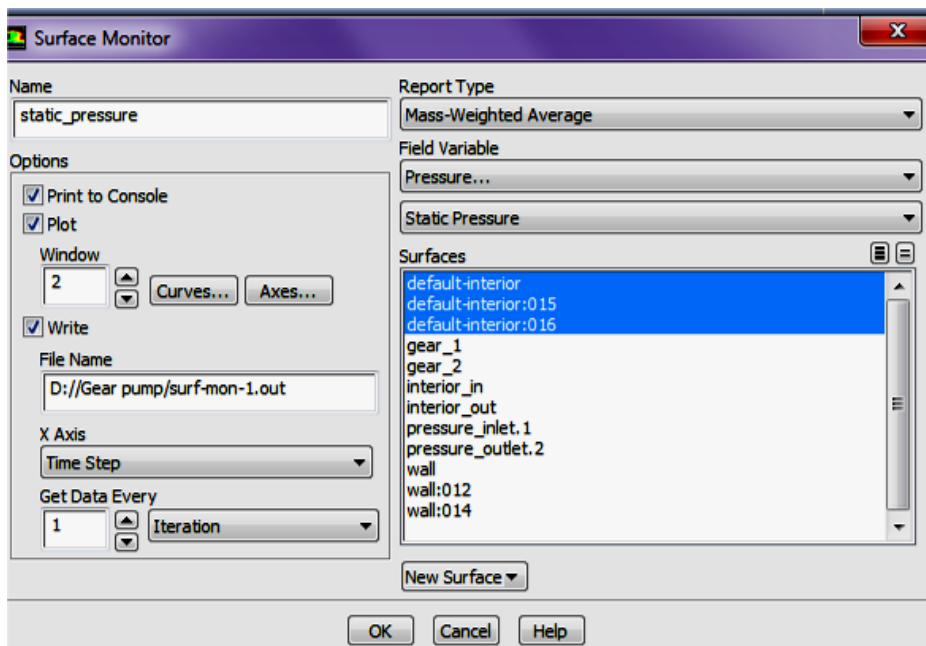


Рисунок 2.57 – Окно меню настройки параметров мониторинга

По завершению настройки всех параметров следует нажать на кнопку *Ok*.

Далее необходимо провести начальную инициализацию для получения начального поля течений. Для этого необходимо выполнить команду *Solve* → *Initialization*. После чего откроется окно меню *Solution Initialization* (рисунок 2.58). Существует два вида инициализации – гибридная (*Hybrid Initialization*) и стандартная (*Standard Initialization*). Подробнее о них можно прочитать во встроенном справочном пособии FLUENT. При использовании *Standard Initialization* начальное поле течений получается на основе заданных значений физических параметров (граничные условия) на той поверхности, которая указывается в поле *Compute From*.

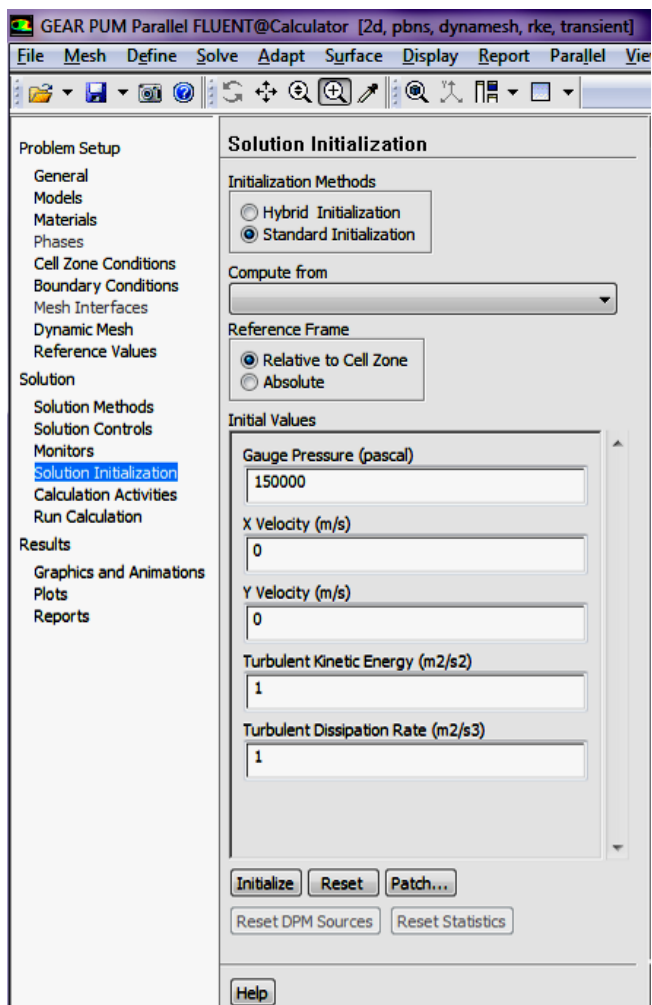


Рисунок 2.58 – Окно меню Solution Initialization

При использовании *Hybrid Initialization* поле течений рассчитывается автоматически на основе всех заданных значений граничных условий.

Далее можно приступать к настройке параметров решения. Настройку можно провести с помощью меню *Run Calculation* (рисунок 2.59), выполнив команду *Solve*→*Run Calculation*.

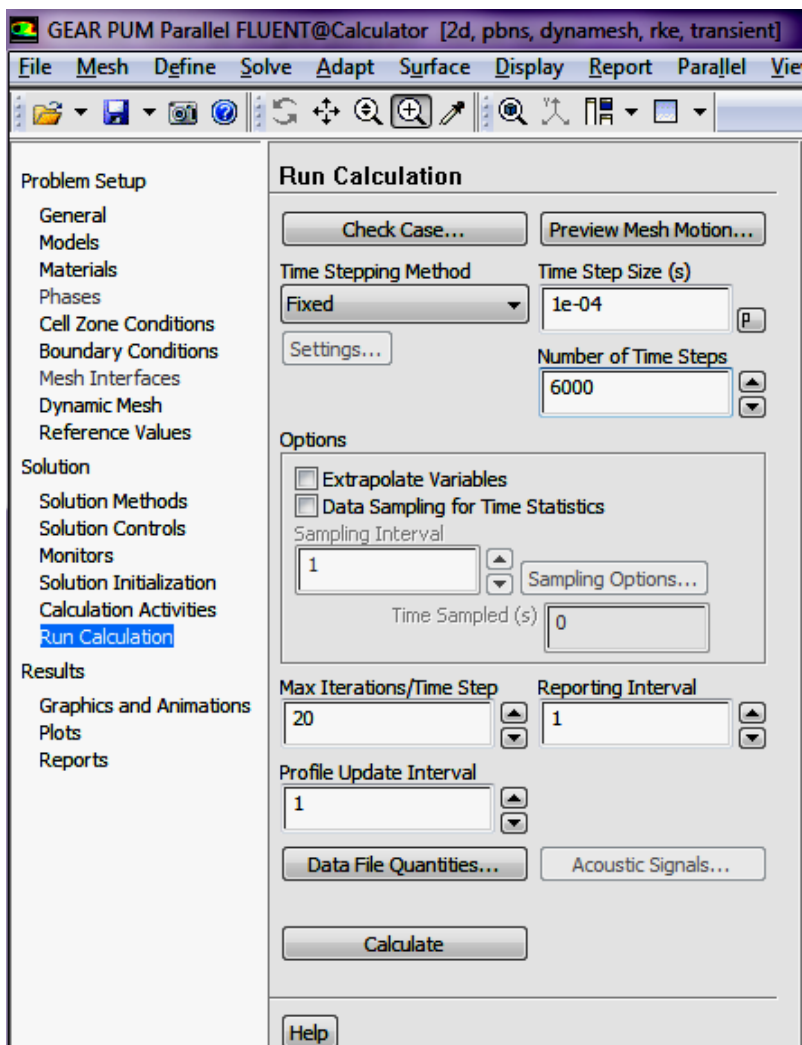


Рисунок 2.59 – Окно настройки параметров решения

Количество шагов, используемых для достижения требуемой точности выполнения расчета – *Number of Time Steps*, следует выбирать на основе частоты оборотов шестерен. Временной шаг – *Time Step Size*, как и в случае с проверкой правильности перестроения сеточной модели в меню *Preview Mesh Motion*, выбирается из

соображений обеспечения перестроения сеточной модели вследствие деформации, возникающей из-за движения шестерен. После введения значений всех необходимых параметров данного меню необходимо нажать на кнопку *Calculate*. Далее начинается процесс решения задачи (рисунок 2.60).

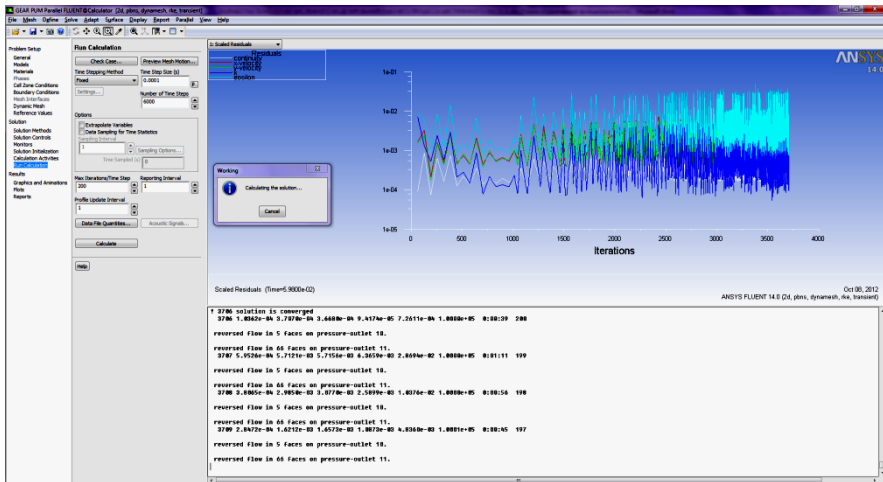


Рисунок 2.60 – Рабочее окно FLUENT в процессе расчета задачи

Обработку результатов можно вести как в самом FLUENT, так и в модуле ANSYSCFX-Post.

Рассмотрим обработку результатов расчета с помощью встроенных инструментов FLUENT. Для вывода результатов расчета во FLUENT можно воспользоваться меню *Graphics and Animations*. Данное меню можно найти в верхнем меню *Display*. Для просмотра результатов распределения, например полного давления по какому-либо сечению шестеренного насоса, необходимо в меню *Graphics* выбрать *Contours*. После чего нажать на кнопку *Setup*. Далее откроется окно настройки вывода результатов. В нем в списке *Contours of* нужно выбрать интересующую физическую величину, а в списке *Surfaces* – поверхности, на которых будет показано распределение выбранной физической величины. После чего рабочее окно программы примет вид, изображенный на рисунках 2.61 и 2.62.

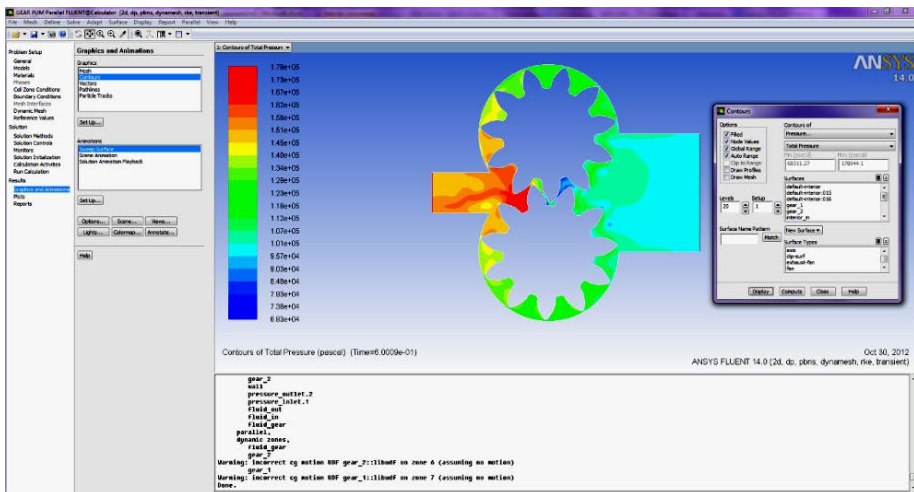


Рисунок 2.61 – Рабочее окно FLUENT при отображении результатов расчета поля распределения полного давления

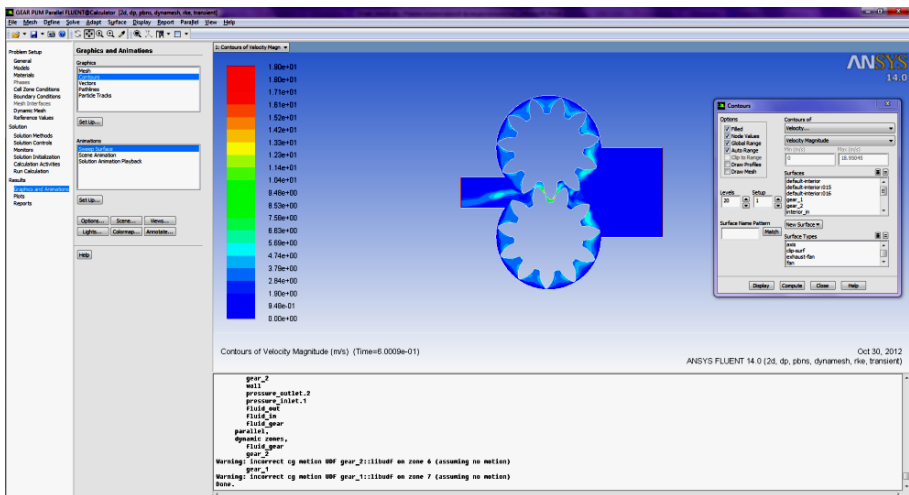


Рисунок 2.62 – Рабочее окно FLUENT при отображении результатов расчета поля скоростей

3 УЧЕБНЫЙ ПРИМЕР ПО РАСЧЕТУ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА ШЕСТЕРЕННОГО НАСОСА

3.1 Построение геометрической трехмерной модели основных узлов шестеренного насоса

В большинстве случаев для оценки влияния конструктивных параметров на рабочие параметры шестеренного насоса необходимо проведение полноценного трехмерного численного анализа, учитывающего особенности подвода и отвода рабочей жидкости, а также конструктивные особенности корпуса ШН, подпятников и т.д. Для этого необходимо построение трехмерной геометрической модели расчетной области шестеренного насоса.

Исходными данными для построения трехмерных моделей основных узлов шестеренного насоса является их чертежная документация (рисунки 3.1 и 3.2).

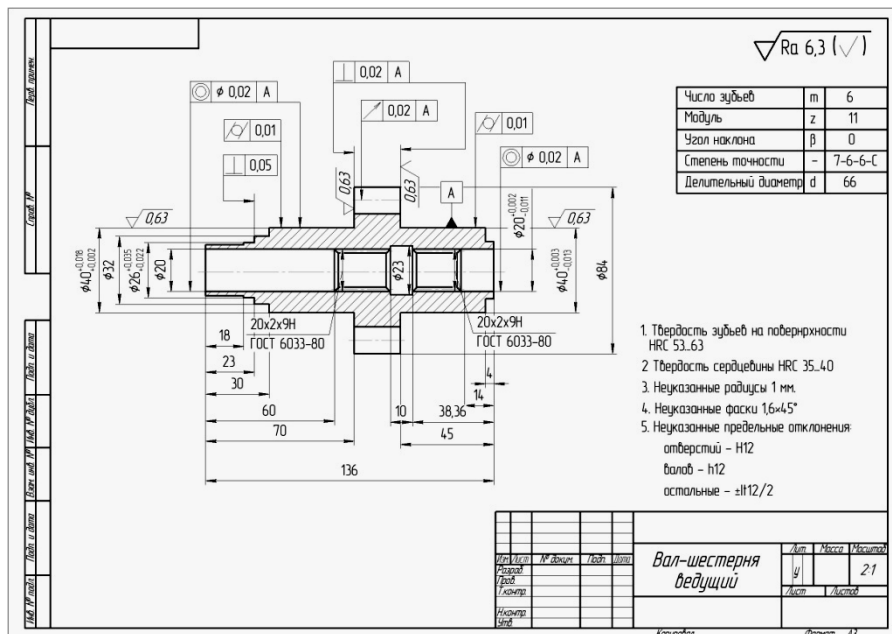


Рисунок 3.1 – Чертеж вала-шестерни шестеренного насоса

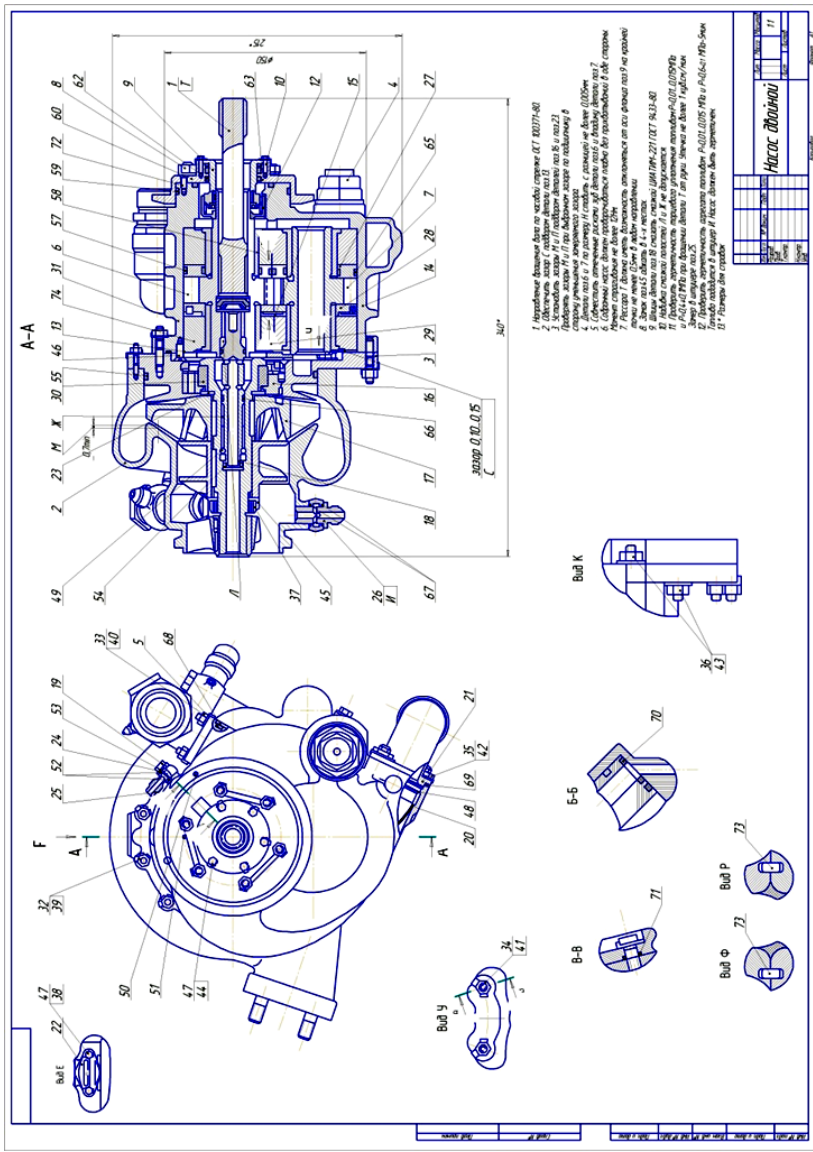


Рисунок 3.2 – Эскиз шестеренного насоса

На основе 2D модели в CAD-системе Solid Works строятся 3D модели основных узлов данного насосного агрегата. Обойма, подвижный и неподвижный подпятники представлены на рисунке 3.3.

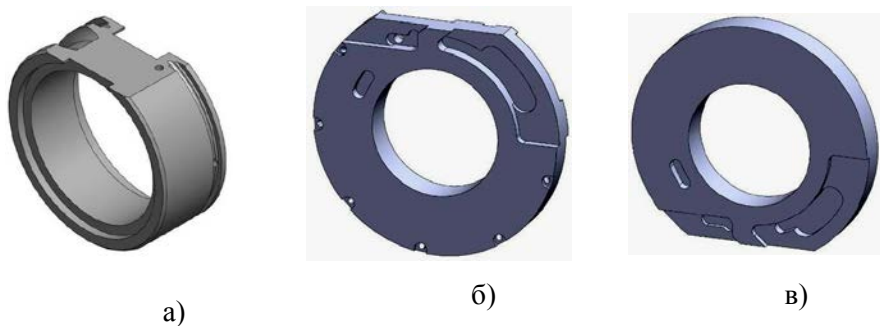


Рисунок 3.3 – Трехмерные модели обоймы (а), подвижного (б) и неподвижного (в) подпятников

Трехмерные модели ведущей и ведомой шестерен изображены на рисунке 3.4.

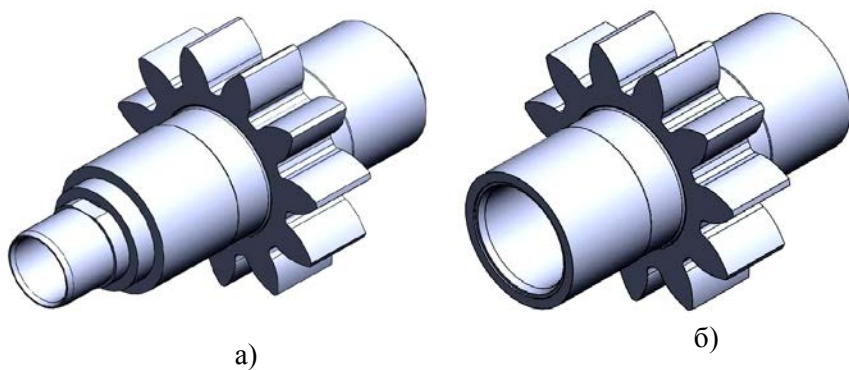


Рисунок 3.4 – Трехмерные модели ведущей (а) и ведомой (б) шестерен

Внешний вид трехмерной модели корпуса шестеренного насоса представлен на рисунке 3.5.

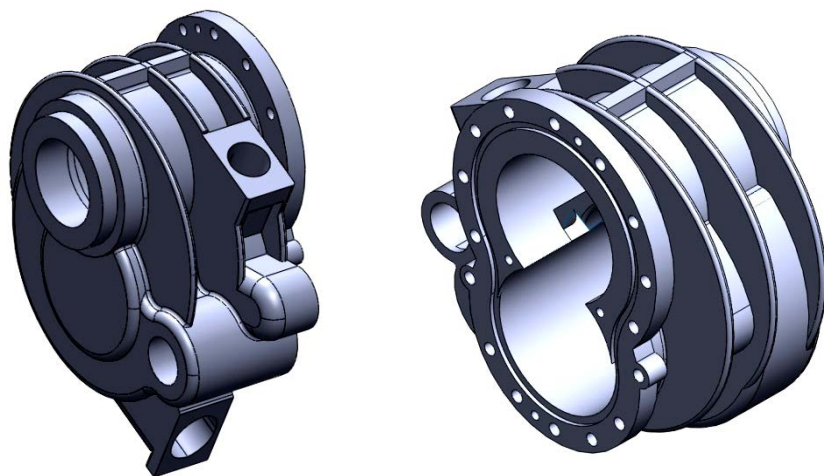


Рисунок 3.5 – Трехмерная модель корпуса шестеренного насоса

Полная 3D модель рассматриваемого шестеренного насоса представлена на рисунках 3.6, 3.7, 3.8.

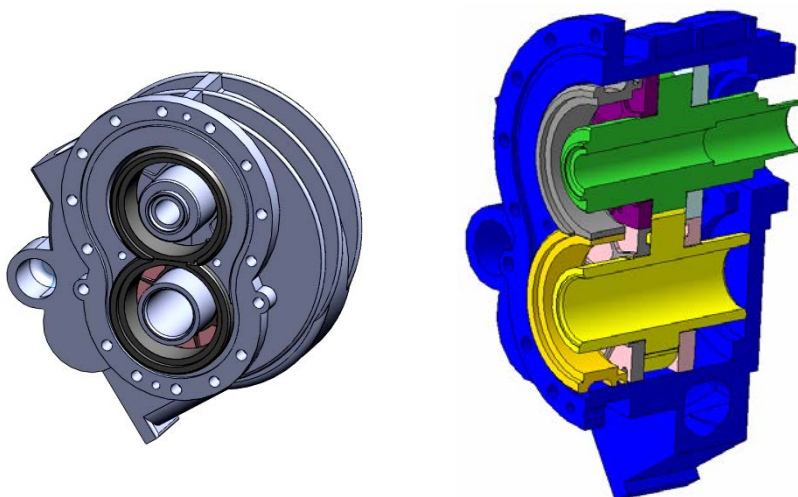


Рисунок 3.6 – Трехмерная модель шестеренного насоса

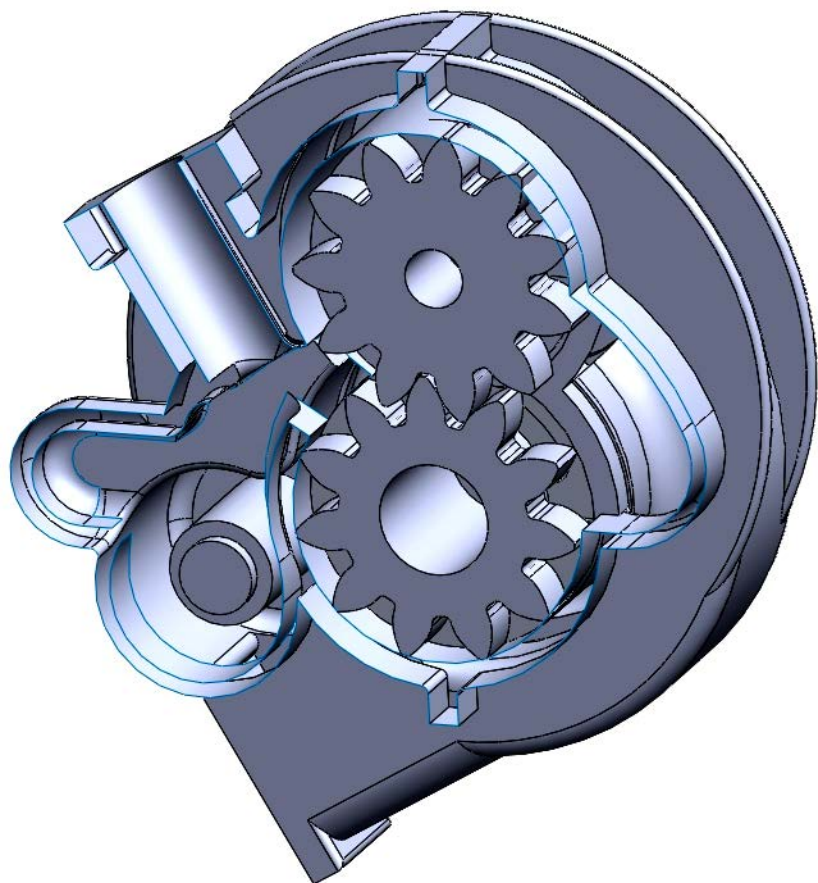


Рисунок 3.7 – Трехмерная модель шестеренного насоса в разрезе

3.2 Построение трехмерной модели расчетной области шестеренного насоса

Геометрическую модель расчетной области шестеренного насоса можно получить с помощью булевых операций, после проведения которых вычленяется внутренняя проточная часть шестеренного насоса (рисунок 3.8). Однако для некоторых решателей необходимо учесть, что длина питающих входных трубопроводов, а также длина выходного трубопровода должны быть не менее 5-7 диаметров входа в насосный агрегат.

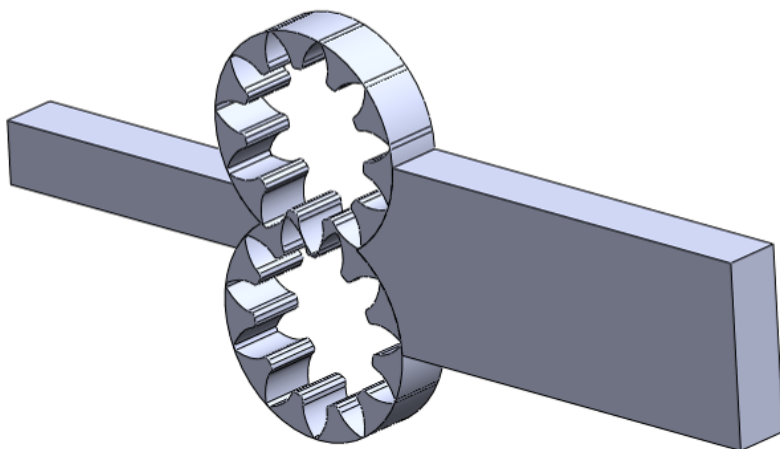


Рисунок 3.8 – Трехмерная геометрическая модель расчетной области шестеренного насоса

3.3 Формирование сеточной модели трехмерной расчетной области шестеренного насоса

3.3.1 Подготовка трехмерной расчетной модели

Построение трехмерной модели шестеренного насоса осуществляется в программе *ANSYS Gambit* на основе ранее построенной двухмерной модели либо в любом CAD редакторе (*Solid Works, КОМПАС*) с последующим экспортом модели в *ANSYS Gambit*.

Создайте папку, которая будет вашей рабочей директорией, назовите ее, например, *Gear Pump 3D*. Скопируйте в нее файлы проекта двухмерной модели. Запустите программу *ANSYS Gambit* и откройте скопированный проект.

Результат открытия модели представлен на рисунке 3.9.

Для создания трехмерной модели из двухмерной необходимо выполнить следующие действия – создать две точки, построить отрезок между ними и, используя инструмент развертки поверхности из трех плоскостей модели, создать три объема, тем самым получив трехмерную геометрию модели.

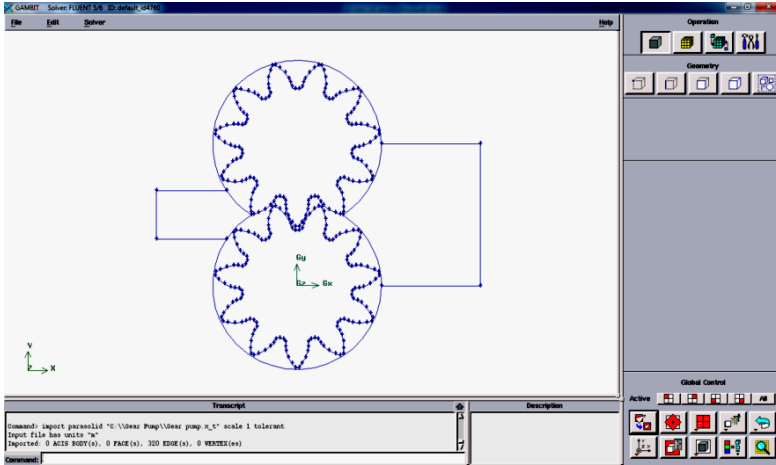


Рисунок 3.9 – Двухмерная модель шестеренного насоса

Для создания точки необходимо выполнить следующие действия:

Geometry

(Геометрия)



Vertex

(Точка)



Create Real Vertex

(Создание реальной точки)



В полях меню *Global* ввести координаты точки $\{0;0;-21\}$, после чего для завершения операции следует нажать кнопку *Apply*. Результат этой операции представлен на рисунке 3.10.

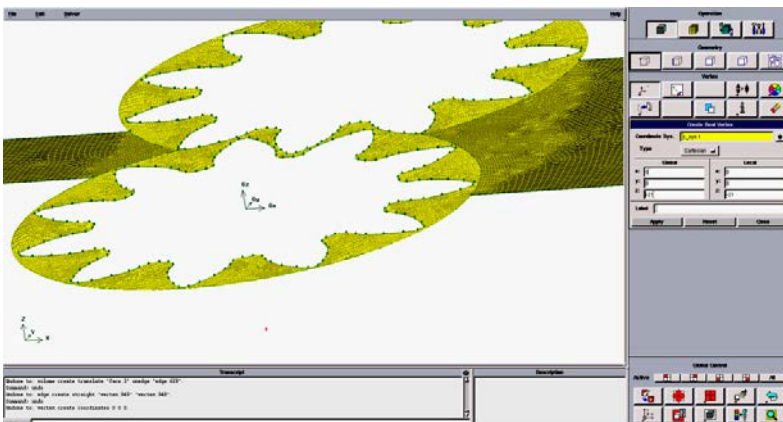


Рисунок 3.10 – Построение точки $\{0;0;-21\}$

Создание второй точки с координатами $\{0;0;0\}$ производится аналогично (рисунок 3.11).

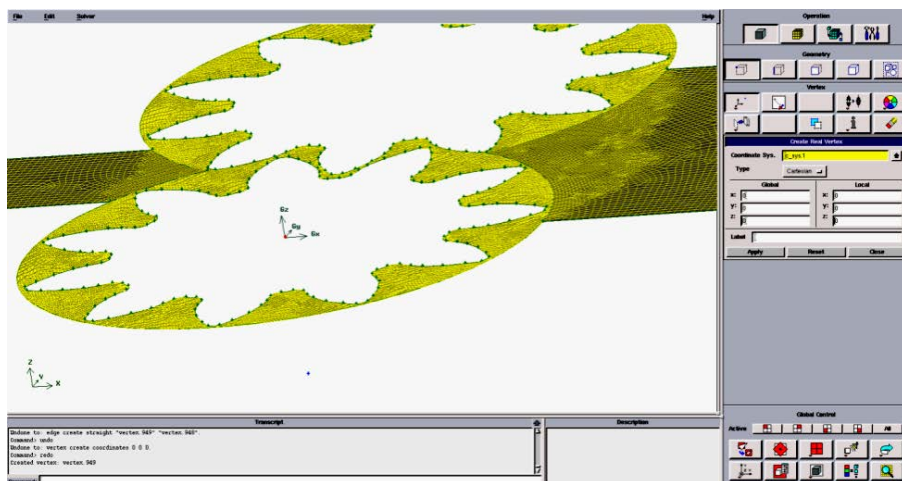
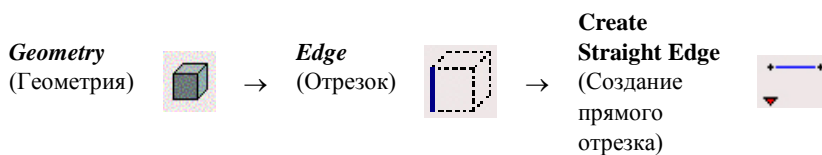


Рисунок 3.11 – Построение точки $\{0;0;0\}$

Для создания отрезка нужно выполнить следующие действия:



В появившемся меню *Create Straight Edge* выбирается опция *Vertex List (Multiple)*, в которой показаны доступные (*Available*) для выбора точки и выбранные (*Picked*). С помощью мыши нужно выбрать созданные точки, после чего для завершения операции нажать кнопку *Apply*. Результат этой операции представлен на рисунке 3.12.

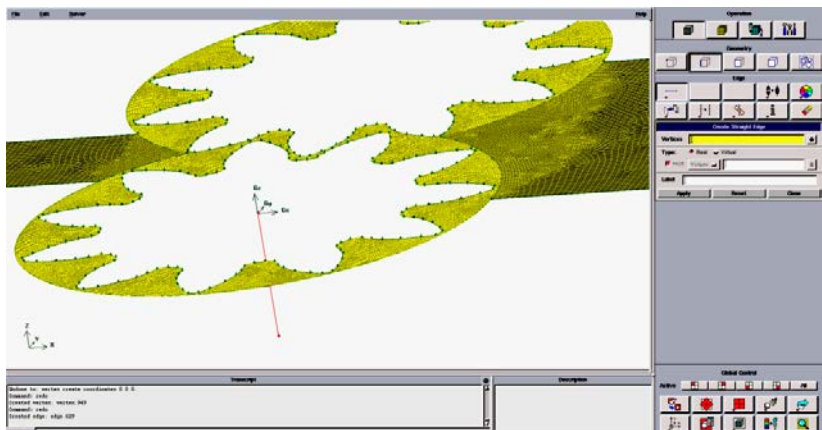


Рисунок 3.12 – Построение отрезка по двум точкам

Создание объема выполняется разверткой поверхности по направлению созданного отрезка:

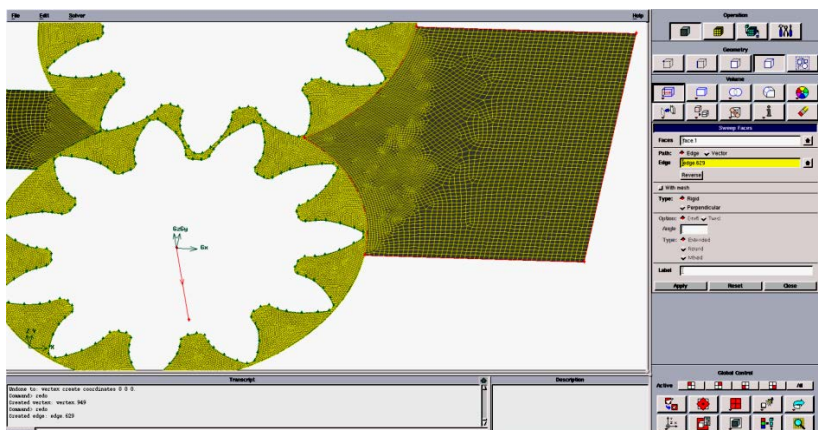
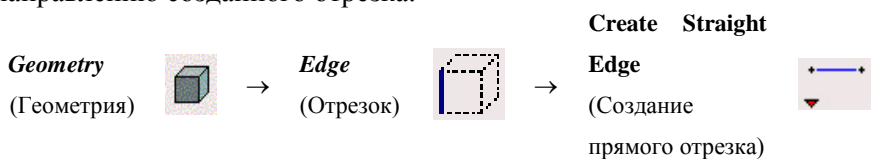


Рисунок 3.13 – Выбор поверхности для развертки и направляющего отрезка

В появившемся меню *Sweep Faces* в поле *Faces* выберите входную поверхность модели (в п.1 FLUIDIN), в поле *Path: Edge* –

созданный отрезок длиной 21мм, на нем появится стрелка, указывающая направление развертки, в данном случае необходимом направлении против оси Z (вниз) (рисунок 3.13). Длина отрезка выбирается в соответствии с шириной шестерни, равной 21мм. Для выполнения операции следует нажать кнопку *Apply* (рисунок 3.14).

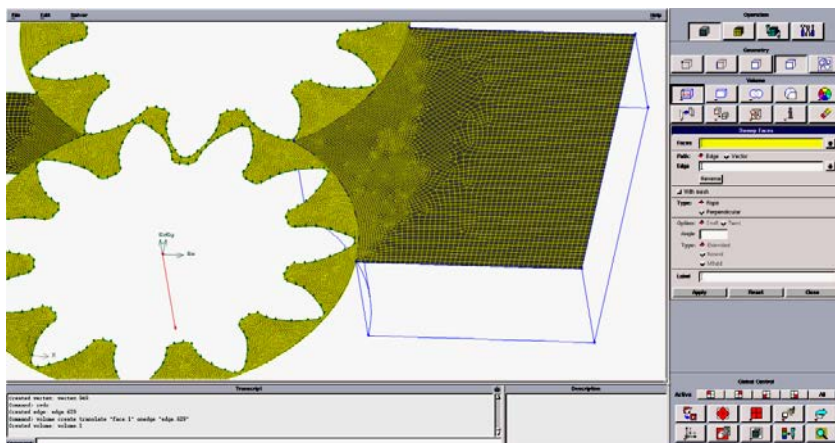


Рисунок 3.14 – Результат построения входного объема модели

Создание выходного объема и объема области шестерен производится аналогично (рисунки 3.15-3.16).

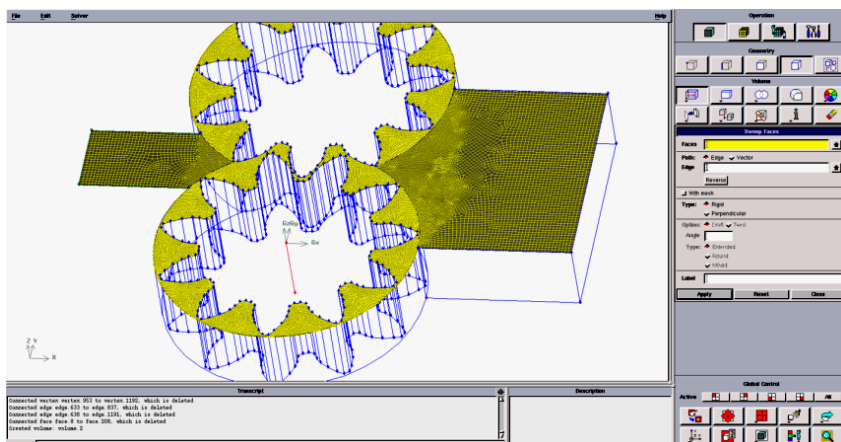


Рисунок 3.15 – Результат построения объема области шестерен модели

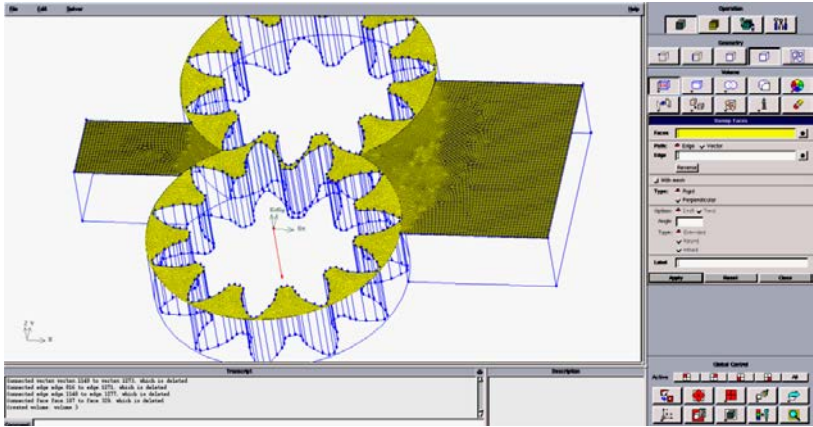
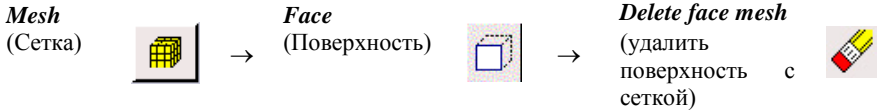


Рисунок 3.16 – Результат построения выходного объема модели

Согласно указаниям по структуре конечно-элементной сетки (пункт 2.4.3) необходимо удалить имеющуюся сетку на плоскостях модели:



В появившемся меню необходимо поставить курсор в окно *Faces* и с помощью мыши выбирать поверхности с конечно-элементной сеткой (рисунок 3.17), затем следует нажать кнопку *Apply*, в результате на выделенных поверхностях будет удалена сетка (рисунок 3.18).

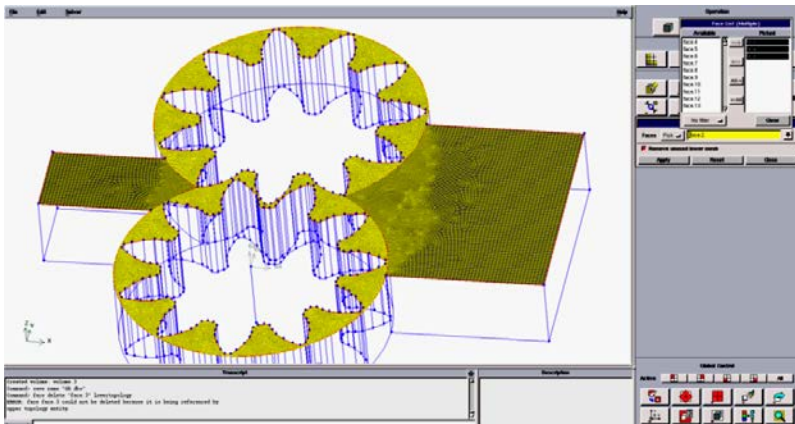


Рисунок 3.17 – Выбор поверхностей для удаления сетки

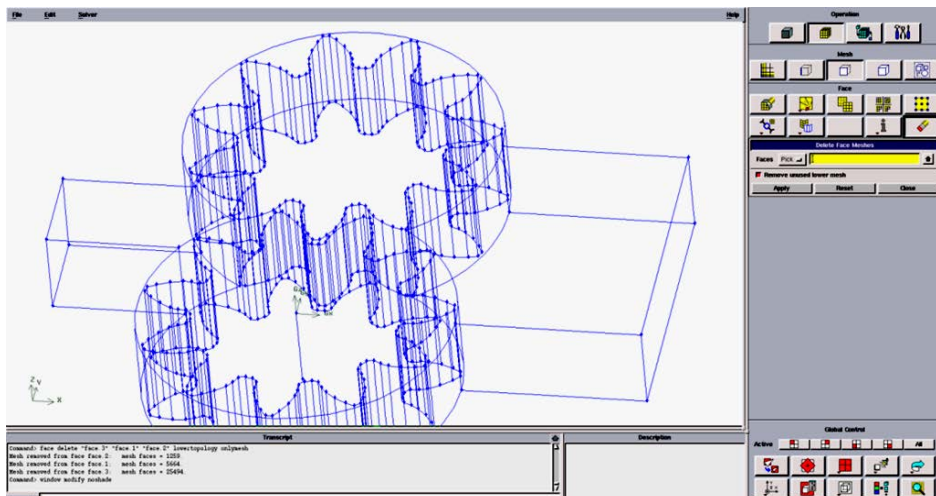
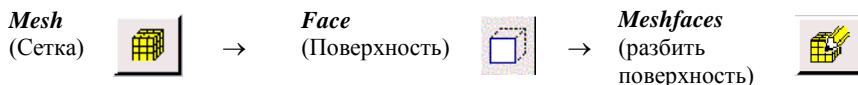


Рисунок 3.18 – Результат удаления сетки

3.3.2 Построение трехмерной сеточной модели расчетной области шестеренного насоса

Разбиение поверхности осуществляется с помощью команды:



В появившемся меню необходимо поставить курсор в окно *Faces* и с помощью мыши выбирать поверхность рабочей области насоса. Сетка рабочей области насоса должна быть перестраиваемой, поэтому назначается треугольный элемент *Tri* во вкладке *Elements*. Далее выбирается тип разбиения (*Type*) *Pave*. Для выбора размера конечного элемента, равного 0,25мм, в окне *Spacing* вводится 0,25 (рисунок 3.19). Размер конечного элемента выбран исходя из условия получения трех элементов в самом узком месте между зубами, равном 0,7 мм. Для построения сетки следует нажать кнопку *Apply*, в результате на выделенной поверхности появится сетка (рисунок 3.20).

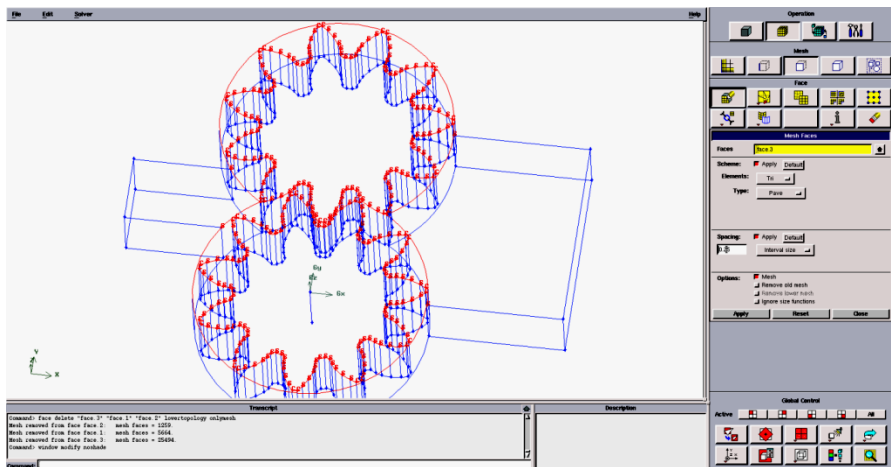


Рисунок 3.19 – Построение сетки на поверхности рабочей области

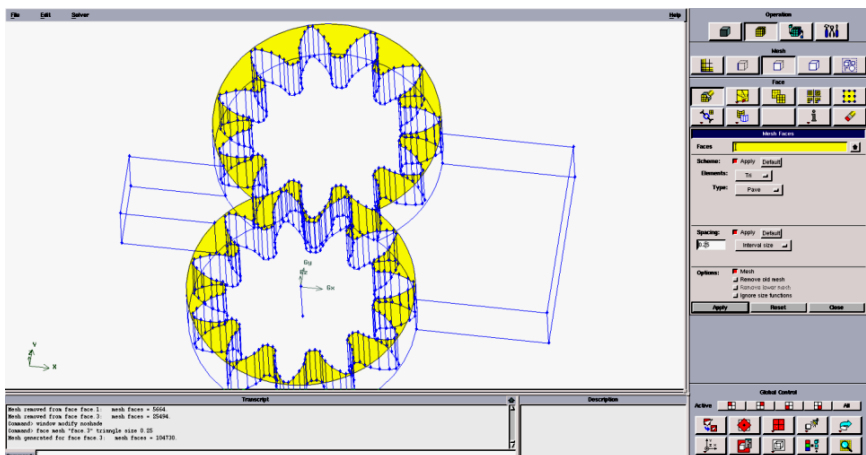


Рисунок 3.20 – Результат построения сетки на поверхности рабочей области

Области входного и выходного каналов не требуют применения «перестраиваемой» сетки, но для оптимального совмещения узлов сетки между соседними поверхностями поверхность входного канала разбивается сеткой из треугольных элементов *Tri* с размером конечного элемент, равным 1 мм, с типом разбиения *Pave* (рисунок 3.21).

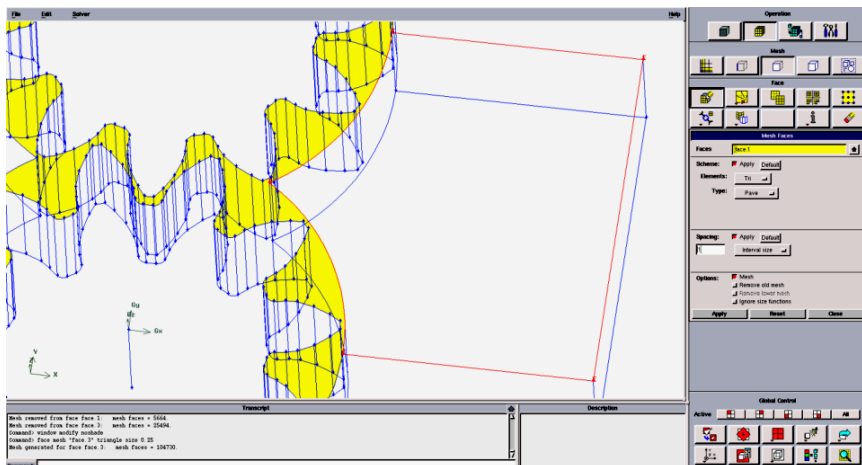


Рисунок 3.21 – Построение сетки на поверхности входного канала

Размер конечного элемента выбран исходя из размеров входного канала и размера элементов в зоне рабочей области, так как в зоне рабочей области размер 0,25м, то размер элементов входной границы не должен значительно превышать это число. В противном случае невозможно гарантировать необходимую сходимость решения в ANSYS Fluent.

Результат построения треугольной сетки на поверхности входного канала представлен на рисунке 3.22.

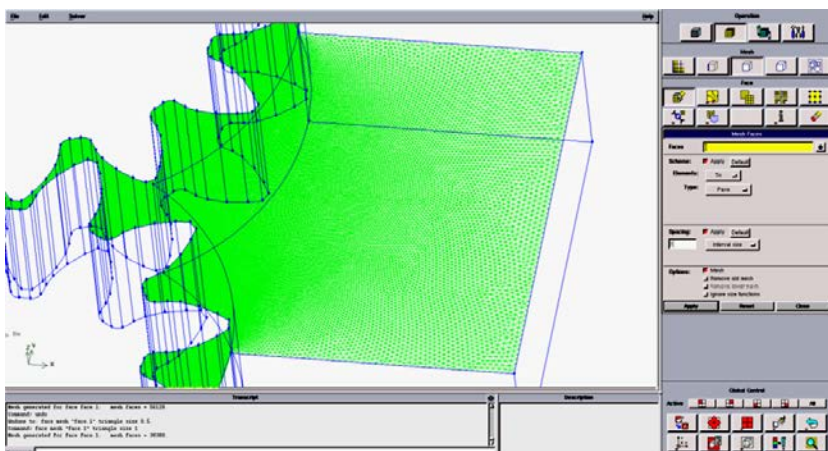


Рисунок 3.22 – Результат построения сетки на поверхности входного канала

Разбиение поверхности выходного канала осуществляется аналогично входному каналу, сеткой из треугольных элементов *Tri* с размером конечного элемента, равным 1мм, с типом разбиения *Pave* (рисунок 3.23).

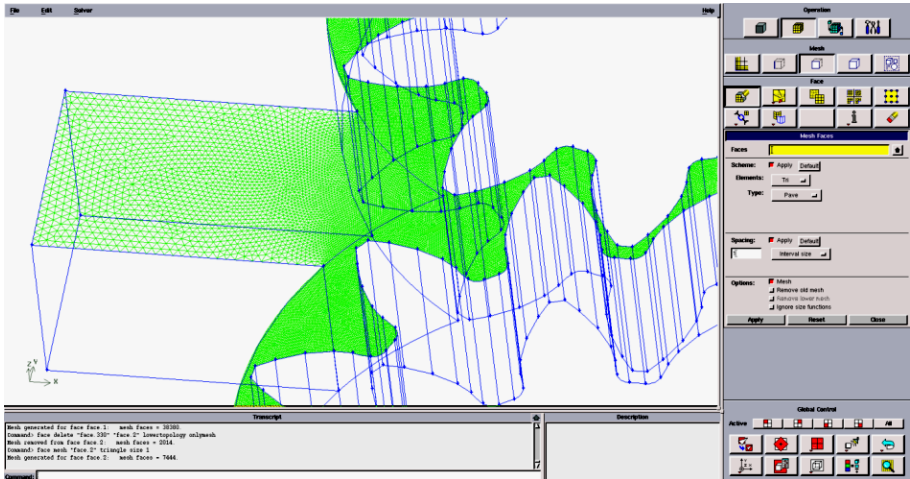


Рисунок 3.23 – Результат построения сетки на поверхностях модели

Далее поочередно необходимо разбить все объемы модели конечно-элементной сеткой:



В появившемся меню *Mesh Volumes* в поле *Volumes* с помощью мыши необходимо выбрать объем рабочей области насоса. Назначить гексагональный элемент *Hex/Wedge* во вкладке *Elements*, тип разбиения (*Type*) *Cooper*. В поле *Spacing* задать размер конечного элемента 1 мм для получения элементов в виде призм с высотой 1мм. Для построения сетки необходимо нажать кнопку *Apply*, в результате операции получаем объем, разбитый сеткой (рисунок 3.24).

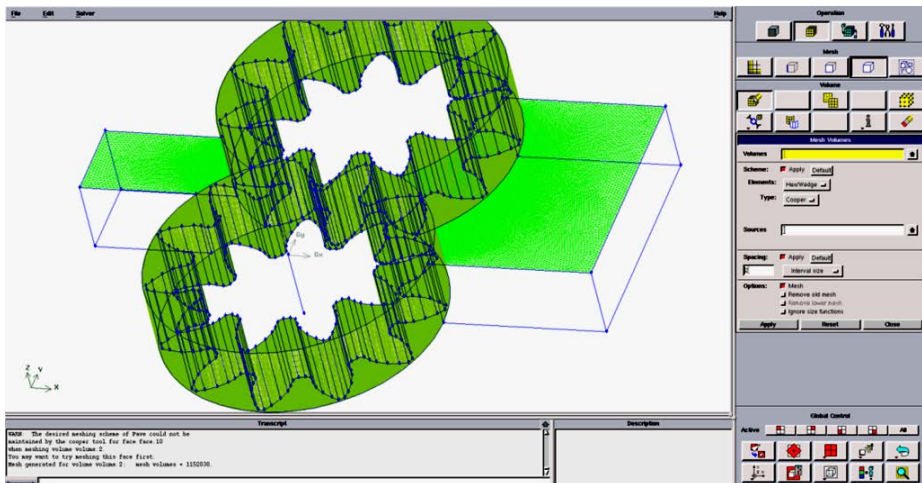


Рисунок 3.24 – Результат разбиения сеткой объема рабочей области насоса

Этим же инструментом разбирается конечно-элементная сетка объемов входного и выходного каналов насоса. Результат разбиения сеткой модели представлен на рисунке 3.25.

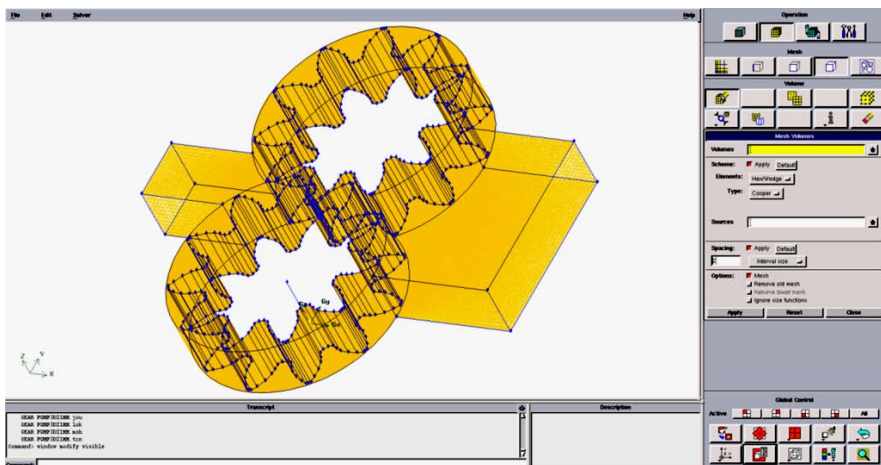


Рисунок 3.25 – Результат разбиения сеткой модели насоса

3.3.3 Назначение зон граничных условий

После того как сетка построена и ее качество удовлетворяет условиям моделирования, нужно задать граничные условия. Для входа в меню задания граничных условий следует нажать следующие кнопки в главном меню:

Zones
(Зоны)



Specify Boundary Types
(Задать тип граничных условий)



В появившемся меню необходимо поставить курсор в окно *Faces* и с помощью мыши выбрать поверхность во входном канале, соответствующую входной границе. В окне *Name* ввести название *Pressure_inlet*. Во вкладке *Type* нужно выбрать *PRESSURE_INLET* (рисунок 3.26). Применение граничного условия осуществляется нажатием кнопки *Apply*.

Аналогично задается граничное условие *Pressure_outlet*. Необходимо поставить курсор в окно *Faces* и с помощью мыши выбрать поверхность в выходном канале, соответствующую выходной границе, в окне *Name* вводится название *Pressure_outlet*. Во вкладке *Type* требуется выбрать *PRESSURE_OUTLET*. Для применения граничного условия нажмите кнопку *Apply*.

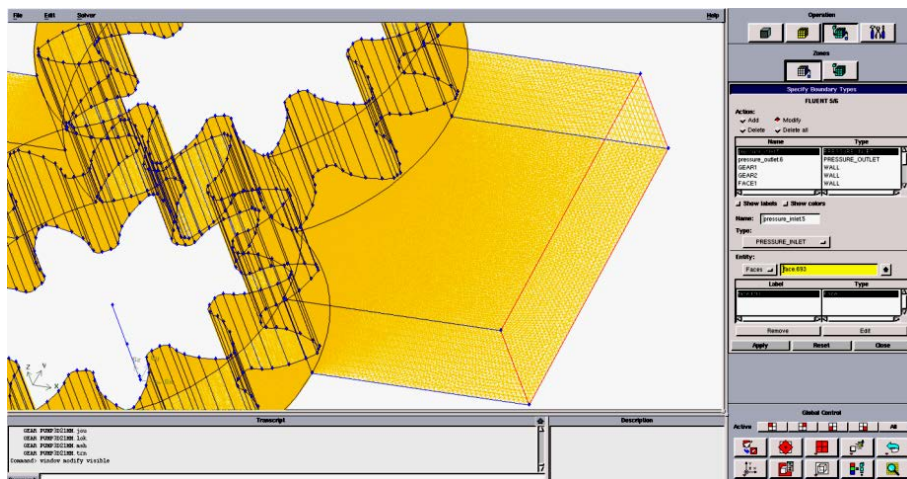


Рисунок 3.26 – Назначение граничного условия *Pressure_inlet*

Далее необходимо задать граничное условие проницаемой стенки *interior* для границ между сетками объемов. Для задания этого условия в выходном канале следует поставить курсор в окно *Faces* и с помощью мыши выбрать соответствующие поверхности, в окне *Name* ввести название *Interior_outlet*. Во вкладке *Type* нужно выбрать *INTERIOR* (рисунок 3.27). Для применения граничного условия нажмите кнопку *Apply*.

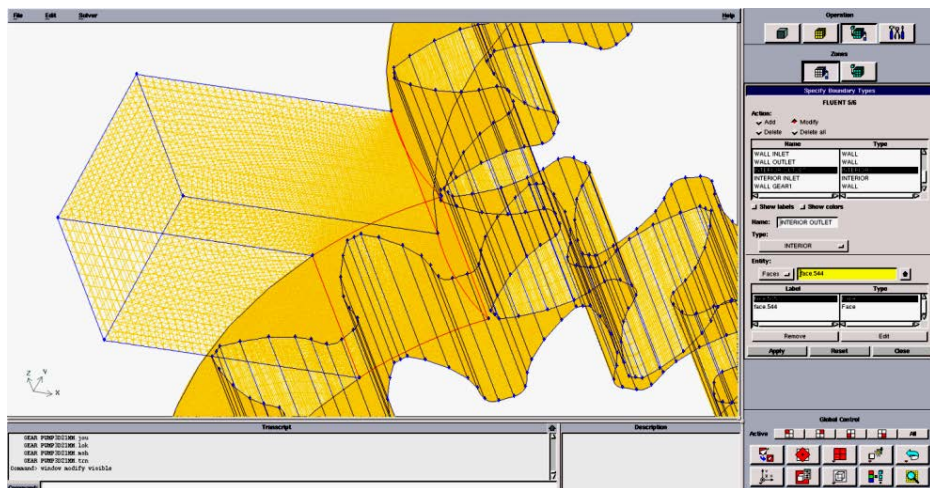


Рисунок 3.27 – Назначение граничного условия *Interior_outlet*

Задание условия проницаемой стенки во входном канале осуществляется аналогично. В окне *Name* введите название *Interior_inlet*. Во вкладке *Type* выберите *INTERIOR*. Для применения граничного условия нажмите кнопку *Apply*.

Для задания движения шестерен в программе *ANSYS Fluent* необходимо, чтобы поверхности, составляющие шестерни, имели название. Для этого нужно поставить курсор в окно *Faces* и с помощью мыши выбрать соответствующие поверхности первой шестерни, составляющие замкнутый контур. В окне *Name* ввести название *Gear1*. Во вкладке *Type* следует выбрать *Wall* (рисунок 3.28). Для применения граничного условия нажмите кнопку *Apply*.

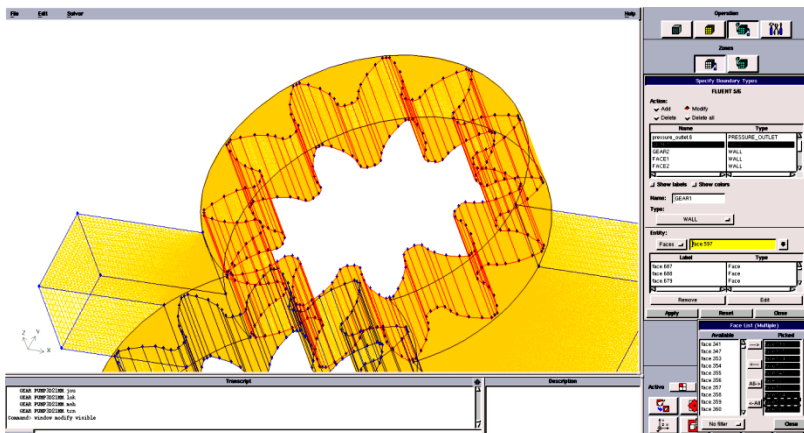


Рисунок 3.28 – Назначение граничного условия для одной шестерни (*Gear1*)

Задание названия (*Gear2*) второй шестерни производится аналогично первой.

Таким же образом называются поверхности объема выходного канала – *WALLOUTLET* (рисунок 3.29), входного канала *WALLINLET* (рисунок 3.30), каждая из боковых поверхностей объема рабочей области – *SIDE_FACE1* и *SIDE_FACE2* (рисунок 3.31), а также верхняя *TOPWALLGEAR1* (рисунок 3.32) и нижняя *BOTTOMWALLGEAR2* (рисунок 3.33) полуокружности объема рабочей области.

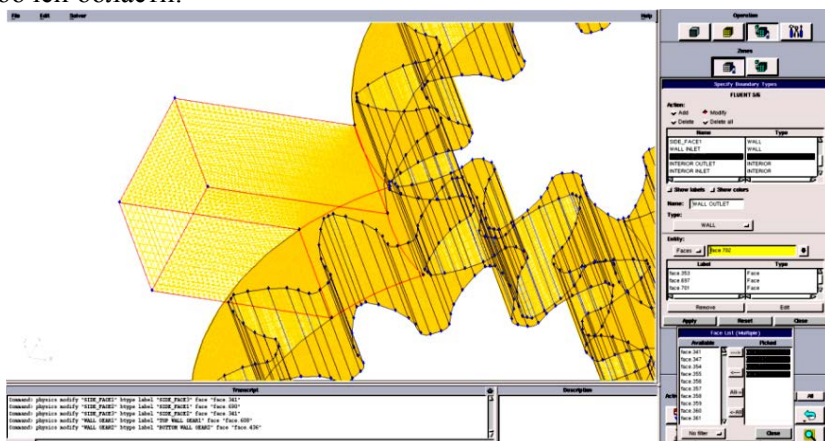


Рисунок 3.29 – Назначение граничного условия стенки для объема выходного канала (*WALLOUTLET*)

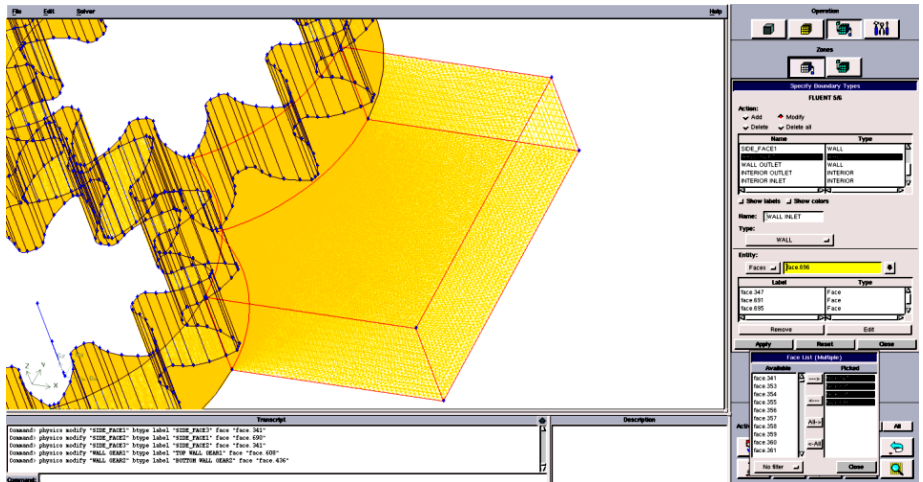


Рисунок 3.30 – Назначение граничного условия стенки для объема выходного канала (*WALLINLET*)

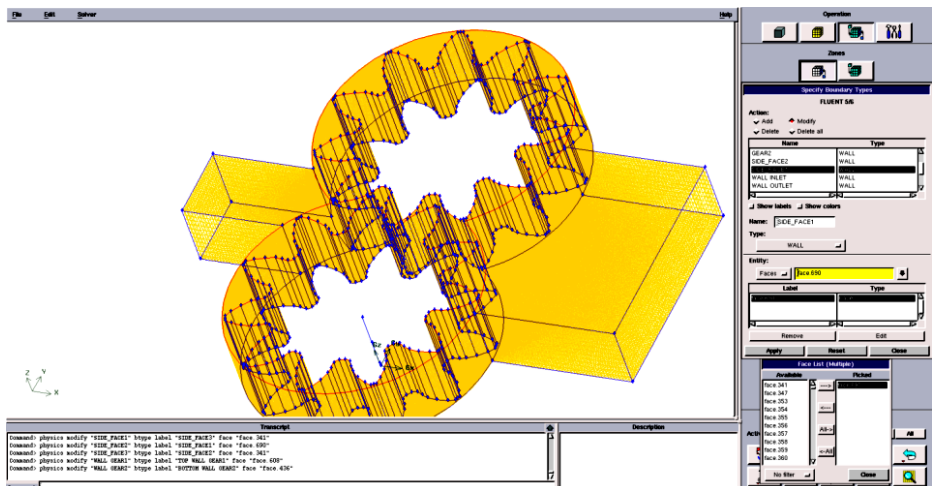


Рисунок 3.31 – Назначение граничного условия стенки для боковых поверхностей объема рабочей области (*SIDE_FACE1*)

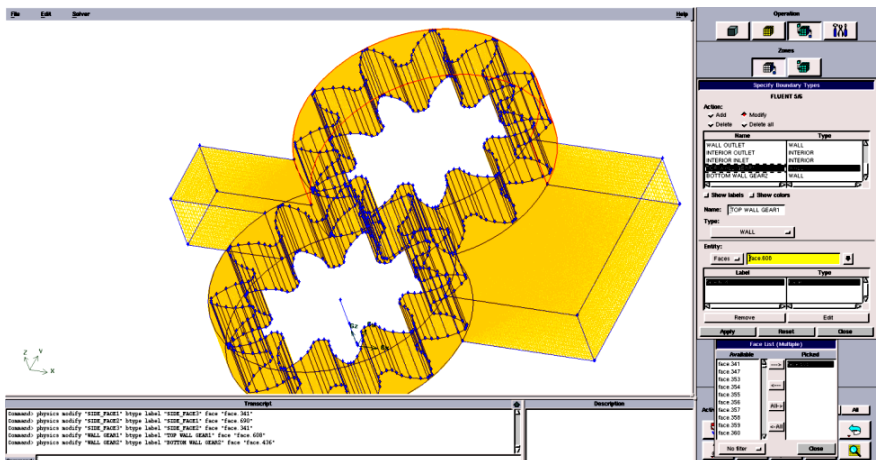


Рисунок 3.32 – Назначение граничного условия стенки для верхней полуокружности объема рабочей области (*TOP WALL GEAR1*)

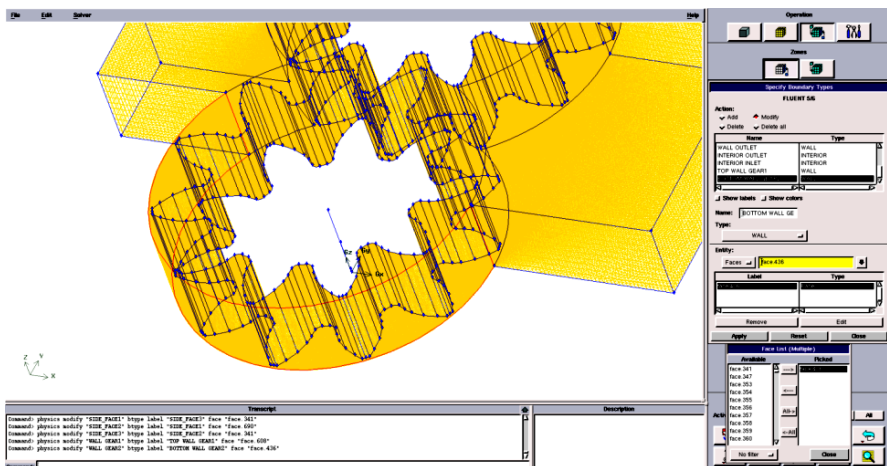


Рисунок 3.33 – Назначение граничного условия стенки для нижней полуокружности объема рабочей области (*BOTTOM WALL GEAR2*)

Далее будет произведено назначение типов зон. Это необходимо для дальнейшей настройки параметров этих зон в программе *ANSYS Fluent*. Например, для задания перестроения сетки в зоне шестерен.

Для входа в меню задания типа зон необходимо нажать следующие кнопки в главном меню:

Zones
(Зоны)



Specify Continuum Types
(Задать тип зон)



В появившемся меню необходимо поставить курсор в окно *Volumes* и с помощью мыши выбрать объем входного канала. В окне *Name* ввести название *FLUID IN*. Во вкладке *Type* следует выбрать *FLUID* (рисунок 3.34). Для применения задания типа зоны нажмите кнопку *Apply*.

Для задания зоны выходного канала необходимо поставить курсор в окно *Volumes* и с помощью мыши выбрать объем выходного канала. В окне *Name* ввести название *FLUIDOUT*. Во вкладке *Type* следует выбрать *FLUID*. Для применения задания типа зоны нажмите кнопку *Apply*.

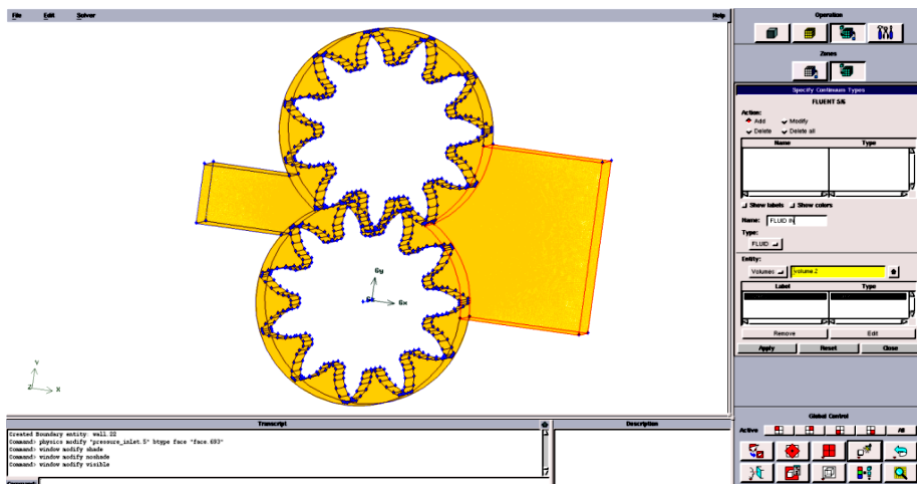


Рисунок 3.34 – Задание зоны *FLUIDIN*

Для задания зоны рабочей области необходимо поставить курсор в окно *Volumes* и с помощью мыши выбрать поверхность рабочей области. В окне *Name* ввести название *FLUIDGEAR*. Во вкладке *Type* следует выбрать *FLUID*. Для применения задания типа зоны нужно нажать кнопку *Apply*. Результат выполнения задания типов зон представлен на рисунке 3.35.

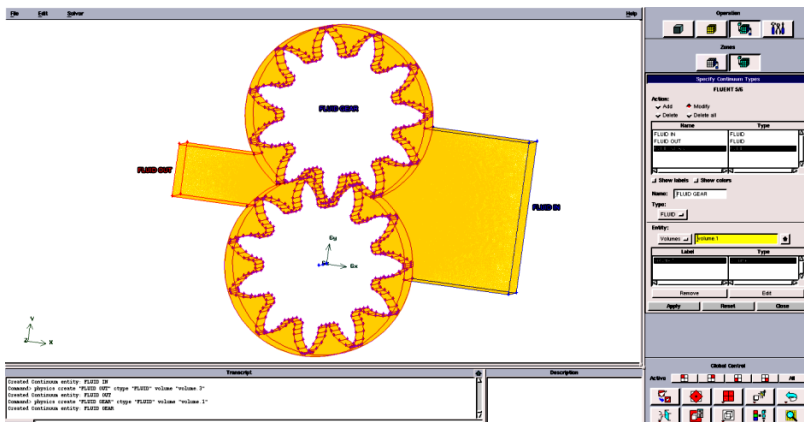


Рисунок 3.35 – Результат задания типов зон

В результате определения зон назначены области всасывания, нагнетания и рабочий «подвижный» объем.

3.3.4 Передача построенной трехмерной расчетной модели в программу ANSYS Fluent

Для экспорта созданной модели в верхнем меню нужно выбрать следующие пункты: *File*→*Export*→*Mesh*.

В появившемся окне нужно ввести имя файла обмена (например, *Gearpump3D.msh*). По умолчанию оно совпадает с именем файла модели. С помощью кнопки *Browse* можно выбрать место, где файл необходимо сохранить. Поскольку расчетная модель трехмерная, то обязательно следует отключить кнопку *Export 2-D(X-Y) Mesh* (рисунок 3.36). Запись файла подтверждается нажатием кнопки *Accept*.

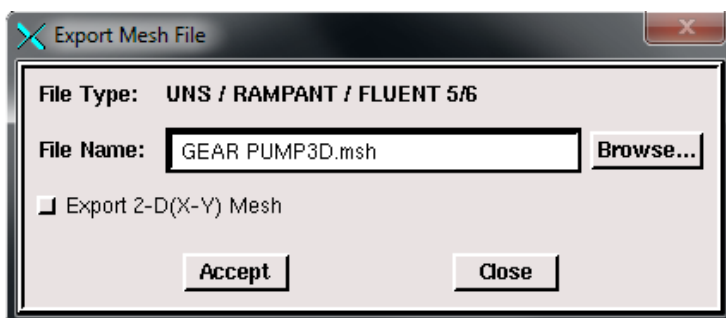


Рисунок 3.36 – Окно экспорта сетки

Если файл обмена был успешно записан, то в окне сообщений появится надпись *mesh was successfully written to Gear pump3D.msh*.

В указанном месте появится файл *Gear pump3D.msh*.

3.4 Решение трехмерной численной модели рабочего процесса шестеренного насоса с использованием CAE - систем

Решение численной модели осуществляется в коммерческом CAE-пакете ANSYSFLUENT.

Запустите программу. В результате этого на экране появится окно, изображенное на рисунке 3.37.

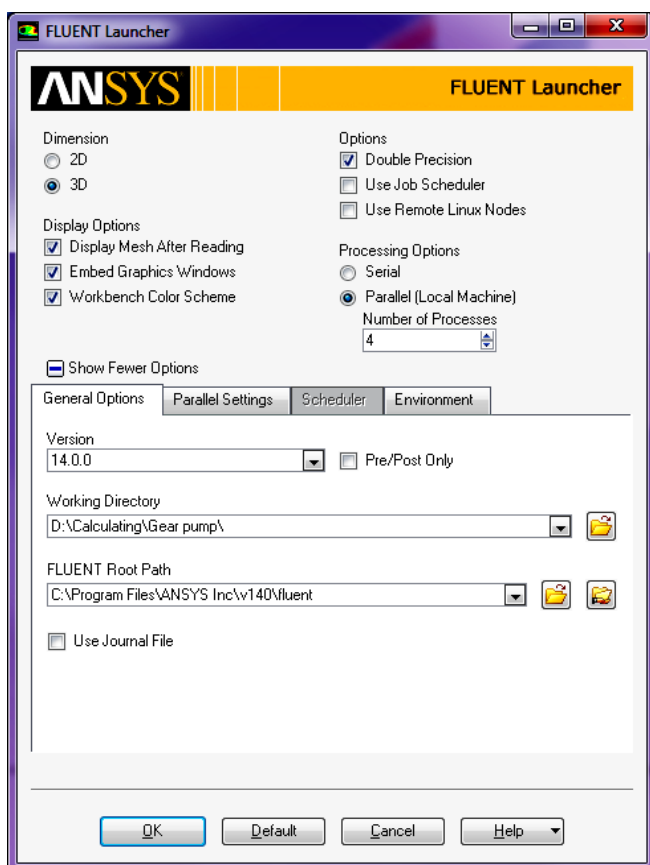


Рисунок 3.37 – Начальное окно ANSYS FLUENT

В этом окне в поле *Working Directory* необходимо выбрать рабочую папку, например *D:\Calculating\Gearpump*. Также необходимо выбрать размерность решаемой задачи *Dimension – 3D*. В этом же окне нужно выбрать количество ядер процессора компьютера, которые будут использоваться при решении. Для повышения точности решения задачи можно активизировать поле *Double Precision* (увеличение количества знаков после запятой). Также здесь можно настроить параметры параллельного режима во вкладке *Parallel Settings*.

Геометрические параметры рассматриваемого шестеренного насоса представлены на рисунке 3.38.

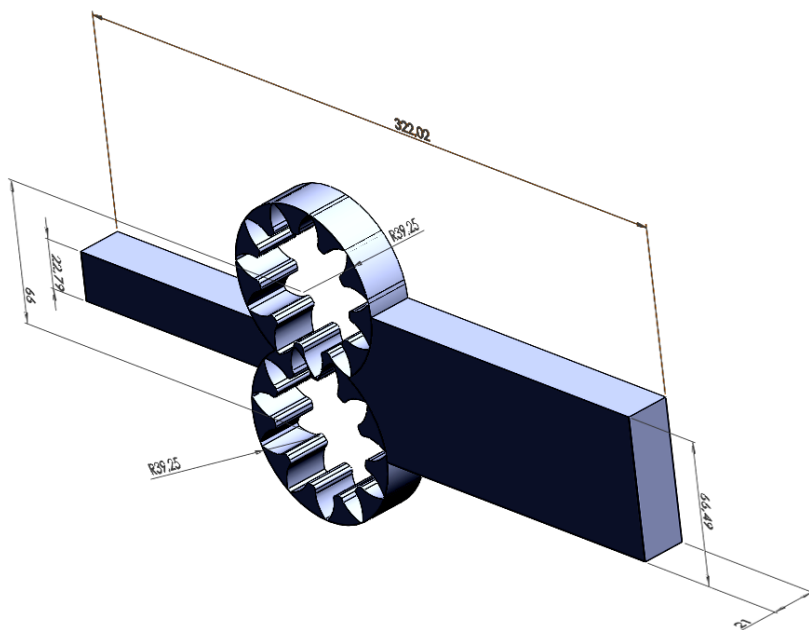


Рисунок 3.38 – Геометрические размеры шестеренного насоса

Далее откроется рабочее окно программы, изображенное на рисунке 3.39.

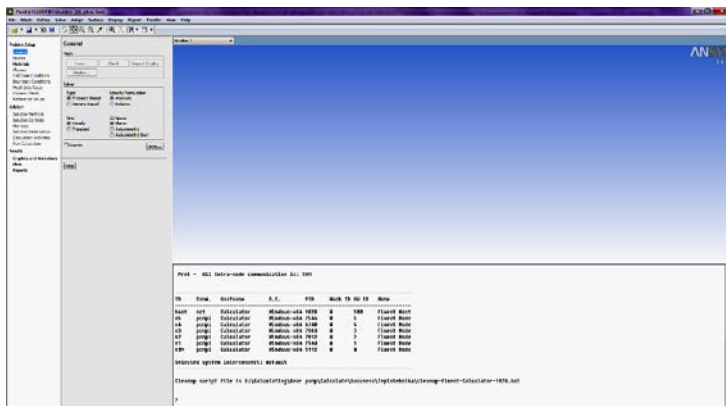


Рисунок 3.39 – Рабочее окно программы ANSYS FLUENT

После проведения всех описанных выше предварительных операций, необходимо произвести импорт модели сеточной модели шестеренного насоса с помощью команды верхнего меню *File→Read→Mesh*. После чего нужно выбрать заранее построенную сеточную модель расчетной области шестеренного насоса в формате *.msh. Далее на экране появится рабочее окно с изображением сеточной модели шестеренного насоса (рисунок 3.40).

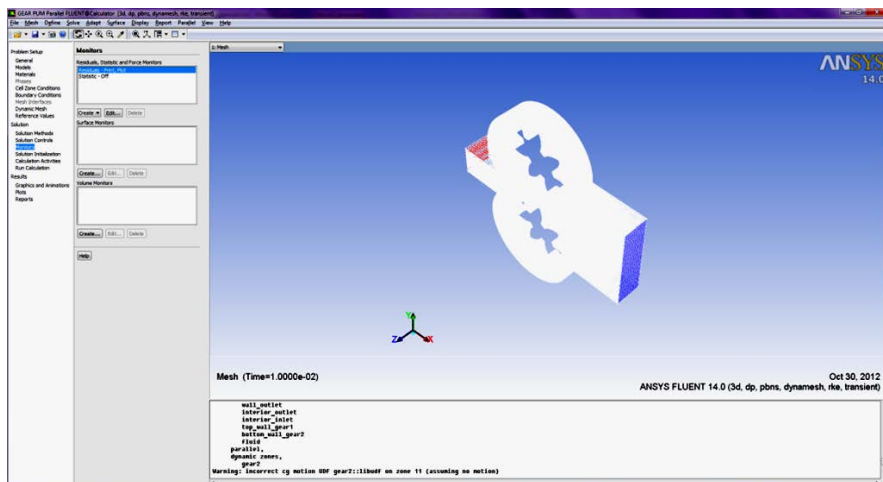


Рисунок 3.40 – Рабочее окно программы после импортирования сеточной модели шестеренного насоса

После импортирования сеточной модели проведем проверку геометрических параметров модели. Для этого с помощью команды *Mesh*→*Scale* перейдем в пункт настройки единиц измерения (рисунок 3.41).

В поле *Mesh Was Created in* необходимо указать единицы измерения, в которых строилась сеточная модель расчетной области. Построение геометрической и сеточной моделей велось в миллиметрах. Таким образом, в качестве единиц указываем миллиметры.

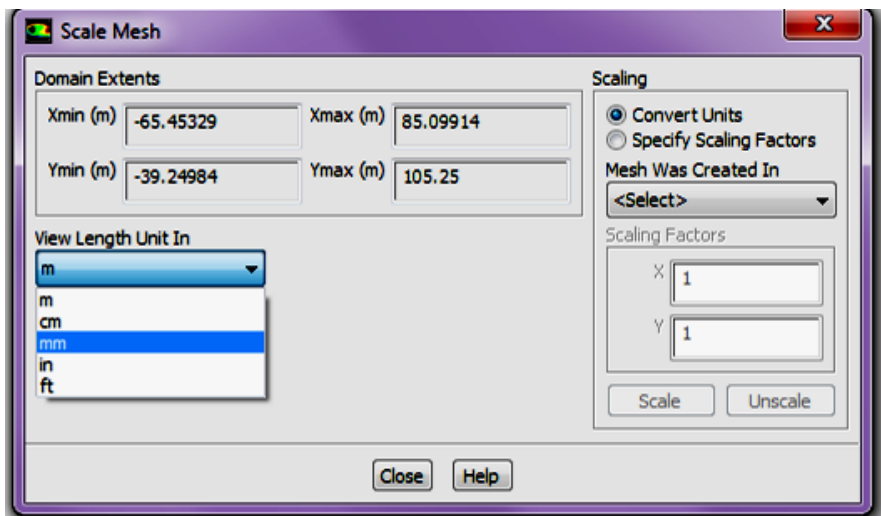


Рисунок 3.41 – Пункт настройки единиц измерения

Для расчета рабочего процесса в шестеренном насосе при движении шестерен необходимо проведение нестационарного типа расчета. Для этого нужно активизировать поле *Transient* в меню *General*, которое можно найти, выполнив *Define*→*General* (рисунок 3.42).

Далее необходимо указать уравнения, которые будут использоваться при решении задачи. Для этого необходимо выполнить команду верхнего меню *Define*→*Models*. Для решения данной задачи следует включить решение уравнения вязкости. В качестве модели турбулентности будем использовать стандартную Realizable ϵ - k модель со стандартной функцией стенки (рисунок 3.43).

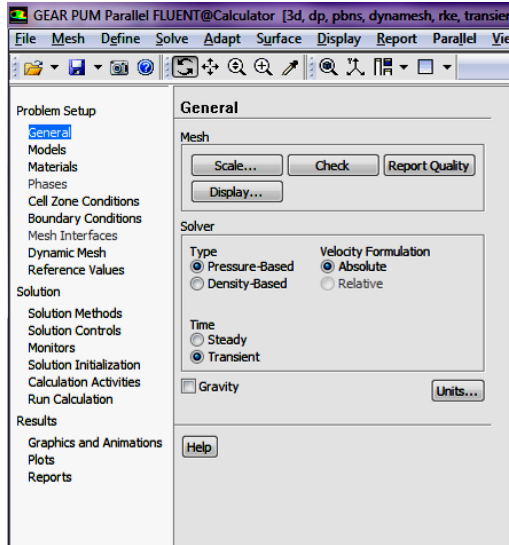


Рисунок 3.42 – Настройка параметров в меню *General*

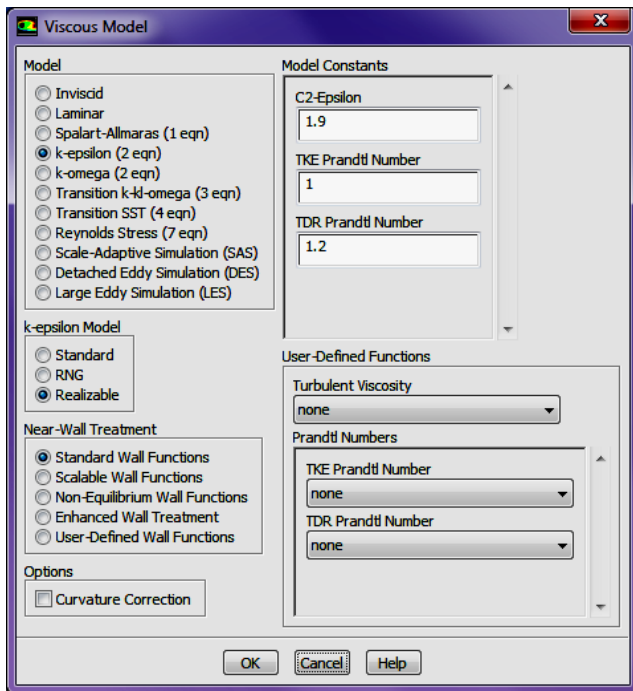


Рисунок 3.43 – Меню настройки моделей турбулентности

В качестве рабочего тела будем использовать воду. Выбор рабочего тела можно произвести, выполнив команду *Define*→*Materials*. Окно задания рабочей жидкости и ее свойств показано на рисунке 3.44.

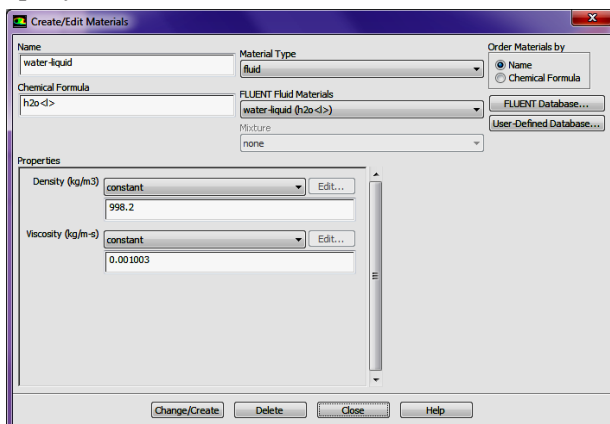


Рисунок 3.44 – Меню создания и редактирования свойств рабочей жидкости

Для данного случая построения расчетной области шестеренного насоса для всех ее расчетных доменов нужно указать, что они являются жидкостью (*fluid*) (рисунок 3.45).

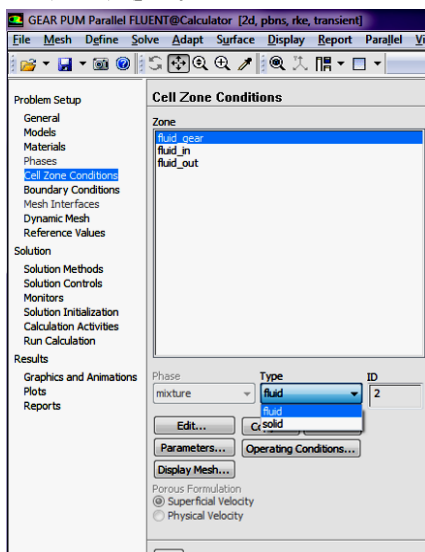


Рисунок 3.45 – Меню задания типа рабочего тела

В качестве граничных условий задаются: полное давление на входе в насос (рисунок 3.46) и статическое давление на выходе из него (рисунок 3.47).

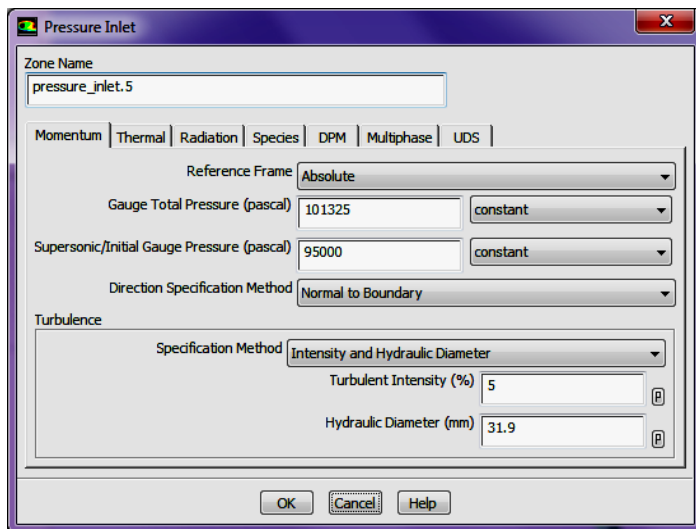


Рисунок 3.46 – Граничное условие на входе в насос

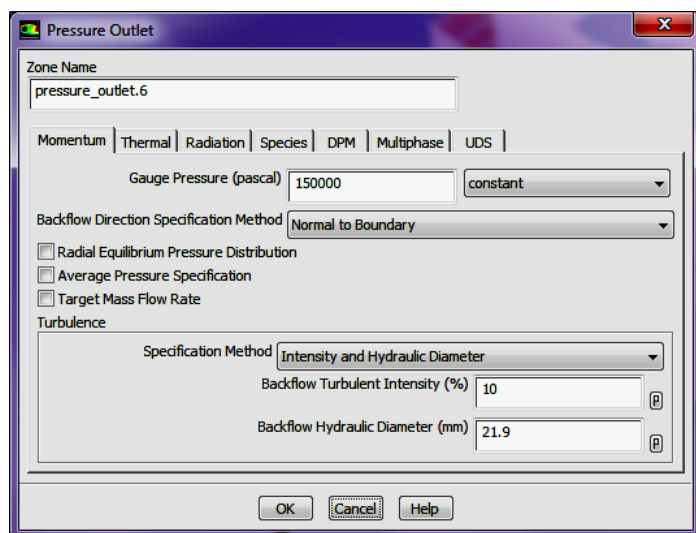


Рисунок 3.47 – Граничное условие на выходе из насоса

Турбулентности в соответствующих областях задаем с помощью задания значения ее интенсивности и гидравлического диаметра питающего и напорного трубопроводов (рисунок 3.46 и 3.47).

После импортирования сеточной модели внутреннего объема (рисунок 3.48,а) расчетной области и внутренним поверхностям (рисунок 3.48,б) присваиваются условия проницаемости – Interior.

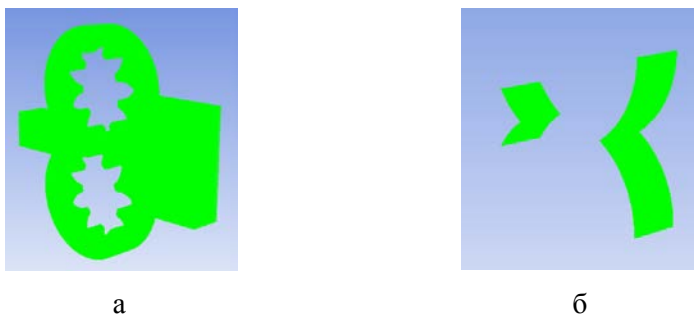


Рисунок 3.48 – Области с граничным условием *Interior*

Для решения задачи необходимо задание движения поверхностей. Для этого активизируем поле *Dynamic Mesh*. После чего указать метод деформации сетки: *Smoothing* и *Remeshing* (рисунок 3.49).

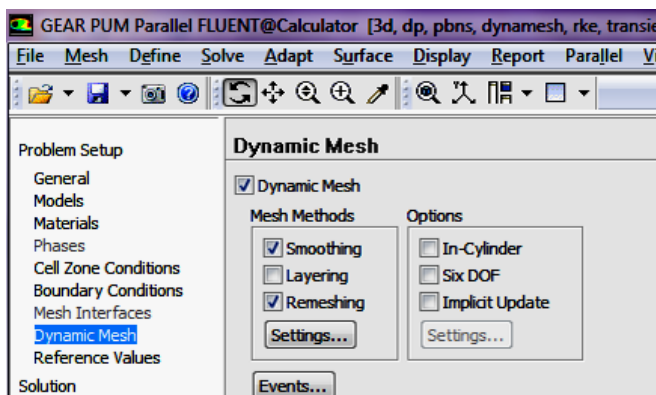
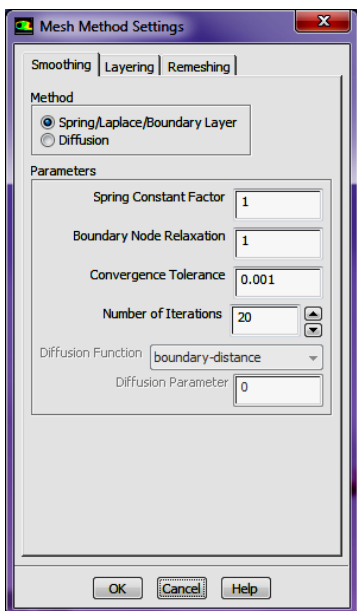
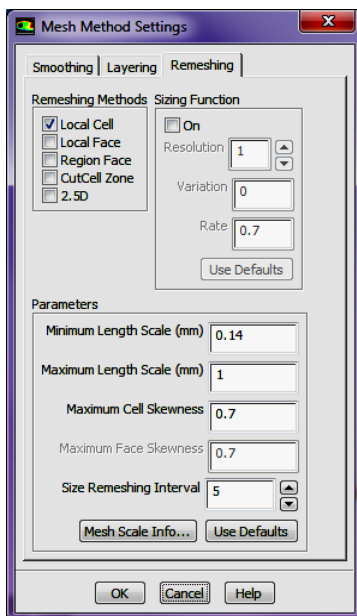


Рисунок 3.49 – Окно выбора способов перестроения сеточной модели

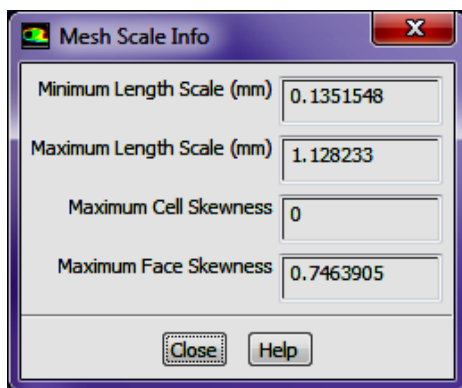
Параметры *Smoothing* метода деформации сетки указаны на рисунке 3.50, а.



а)



б)



в)

Рисунок 3.50 – Параметры методов деформации сеточной модели

Параметры настройки *Remeshing* метода деформации сетки указаны на рисунке 3.50,б, информация о максимальном и минимальном размерах ячеек сетки рассматриваемого примера представлена на рисунке 3.50,в.

Движение шестерен задано с помощью UDF, в которой прописаны центры и направления вращения шестерен, а также угловая скорость вращения. Текст UDF файла приведен ниже.

```
#include "udf.h"
DEFINE_CG_MOTION(gear1, dt, vel, omega, time, dtime)
{Domain *domain;
domain = Get_Domain(1);
omega[2]=100.0;}
DEFINE_CG_MOTION(gear2, dt, vel, omega, time, dtime)
{Domain *domain;
domain = Get_Domain(1);
omega[2]=-100.0;}
```

В тексте UDF файла: gear1, gear2 – название поверхностей профилей зубьев шестерен, для которых задается движение; omega[1], omega [2] – частота вращения в рад/с.

На рисунке 3.51 представлены области, к которым применяется условие деформации сетки (gear1 – профиль шестерни 1; gear2 – профиль шестерни 2; side_face1 и side_face2 – торцевые поверхности колодца шестерен). Поверхности side_face1 и side_face2 представлены на рисунке 3.52.

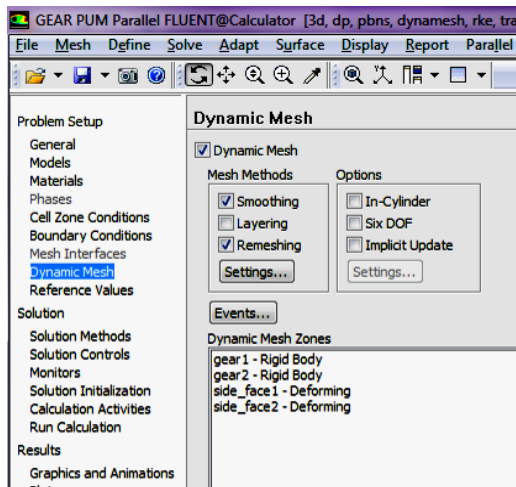
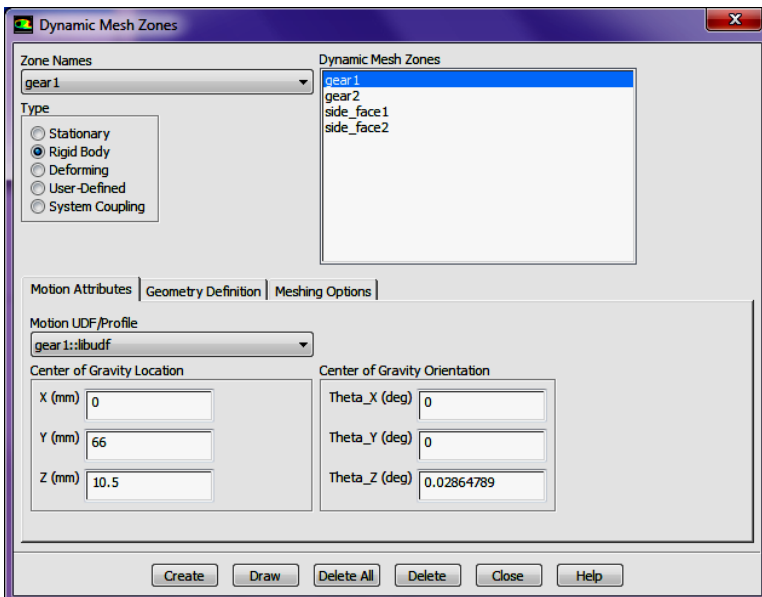


Рисунок 3.51 – Области, в которых происходит деформация сеточной модели

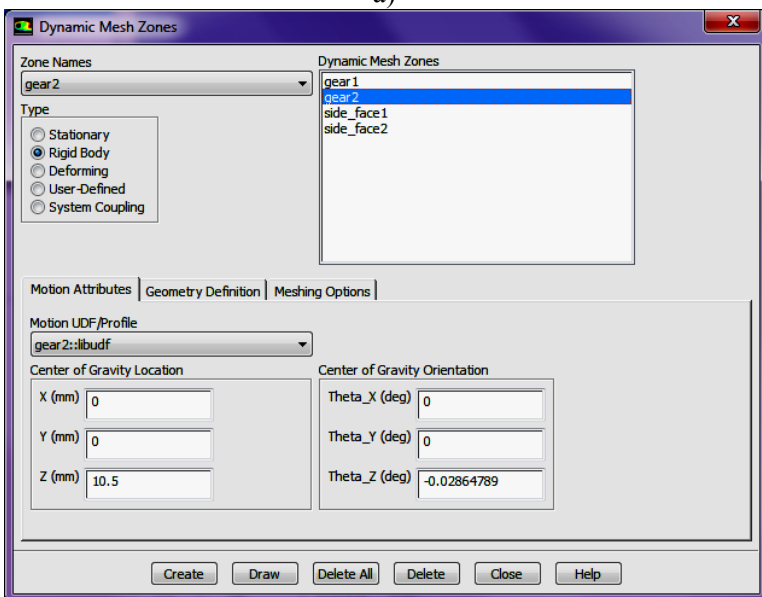


Рисунок 3.52 – Поверхности side_face1 и side_face2

Параметры настройки областей gear1 и gear2 приведены на рисунке 3.53,а и 3.53,б соответственно.



a)



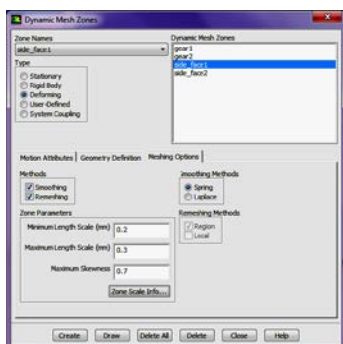
б)

Рисунок 3.53 – Параметры настройки областей gear1 и gear2

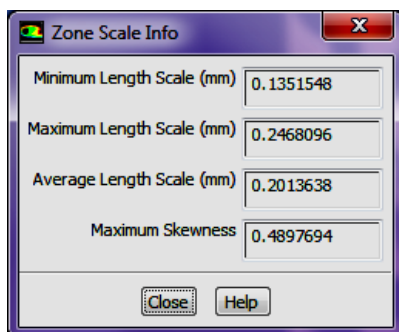
Параметры областей `side_face1` и `side_face2` указаны на рисунке 3.54.

После проведения описанных операций по определению движения областей можно проверить их правильность. Для этого в меню *Dynamic Mesh* необходимо нажать на кнопку *Display Zone Motion*. Временной шаг в поле *Time Step* можно указать равным $5 \cdot 10^{-6}$ с, количество шагов *Number of Steps* – 100.

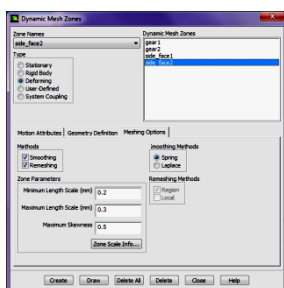
Движение областей и перестраивание сеточной модели можно просмотреть с помощью меню *Preview Mesh Motion*. Для этого в меню *Dynamic Mesh* следует нажать на соответствующую кнопку, после чего откроется окно, изображенное на рисунке 3.55.



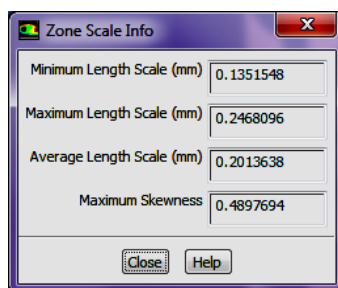
а)



б)



в)



г)

Рисунок 3.54 – Параметры областей `side_face1` и `side_face2`: а – значения параметров деформации области `side_face1`; б – значения скошенности элементов, а также их максимального и минимального размеров в области `side_face1`; в – значения параметров деформации в области `side_face2`; г – значения скошенности элементов, а также их максимального и минимального размеров в области `side_face2`

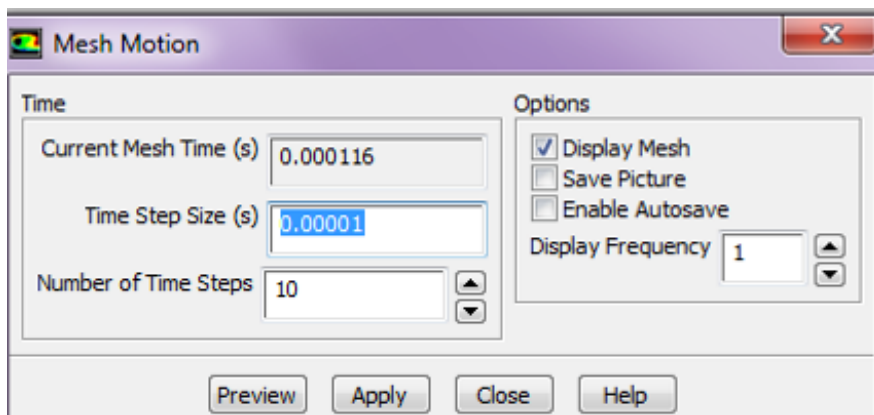


Рисунок 3.55 – Окно меню настройки просмотра движения сетки

В поле значения величины шага по времени, *Time Step Size*, следует ввести величину порядка $5 \cdot 10^{-6}$ с, количество шагов следует поставить равным 10...50. Данные величины выбираются из соображений обеспечения правильности перестраивания сетки в процессе. Если временной шаг выбран большим, то в процессе перестройки сетки будут возникать ее большие деформации, что в свою очередь будет приводить к созданию ячеек сетки с отрицательным объемом.

Если настройки методов деформации сеточной модели выполнены правильно, то далее можно переходить к настройкам метода решения. Для решения данной задачи используем схему решения *SIMPLE*. Все остальные параметры пространственной дискретизации *Spatial Discretization* для проведения начальных расчетов можно оставить по умолчанию (рисунок 3.56).

Для контроля решения на выходной из насоса поверхности настраиваем монитор. Настройка параметров показана на рисунке 3.57.

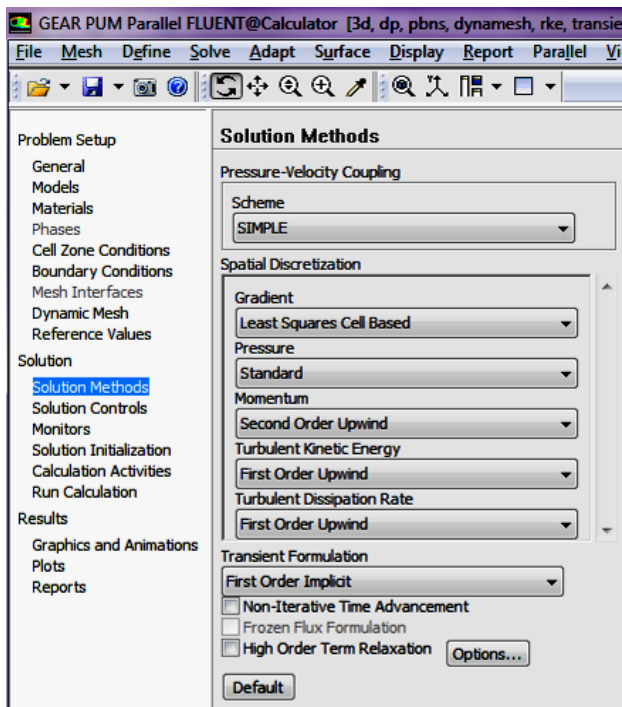


Рисунок 3.56 – Настройка решателя

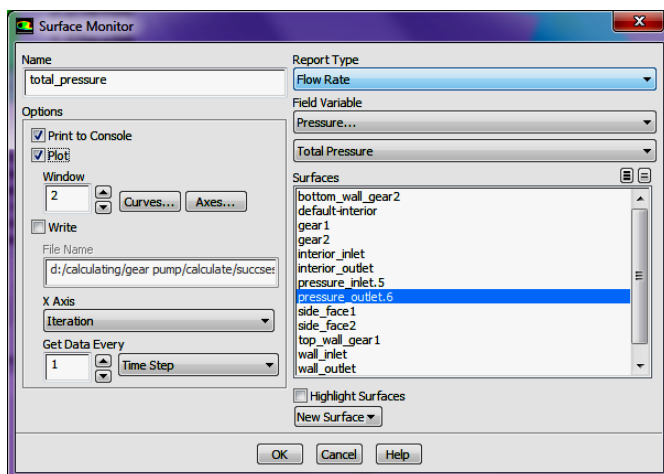


Рисунок 3.57 – Окно меню Monitors

Далее проводим стандартную инициализацию по входной поверхности. Однако осевую скорость (X velocity) в начальный момент времени следует обнулить (рисунок 3.58).

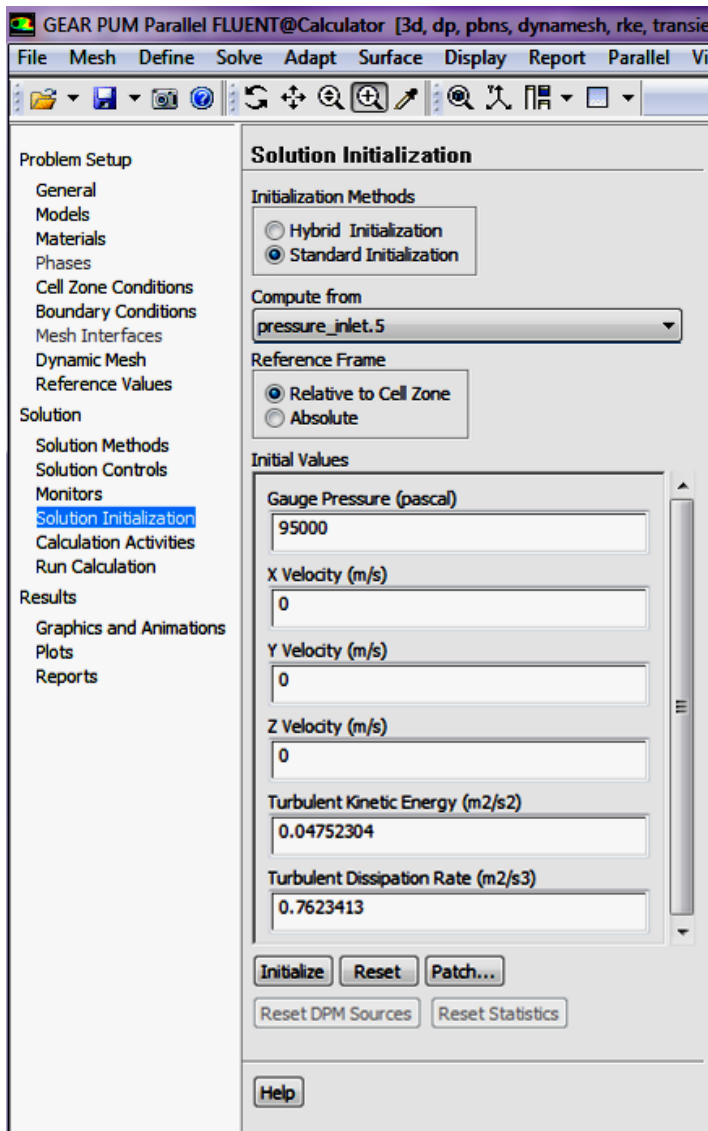


Рисунок 3.58 – Окно меню Solution Initialization

Для описания одного полного оборота шестерен количество шагов для выбранной частоты вращения (100 рад/с) при временном шаге $1e-06$ должно быть равным 62500 (рисунок 3.59).

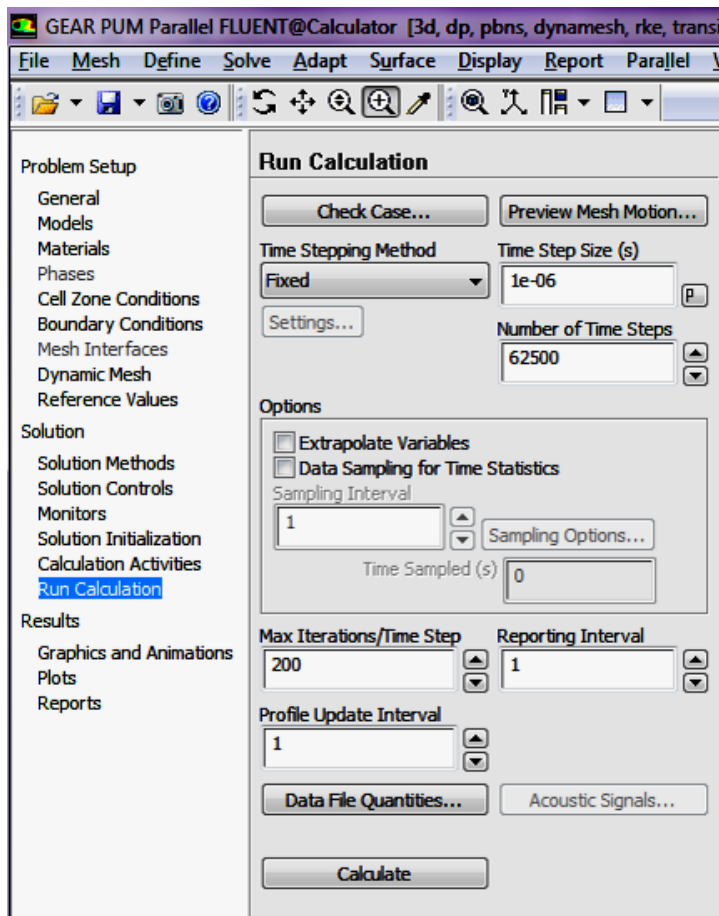


Рисунок 3.59 – Окно настройки параметров решения

После введения значений всех необходимых параметров данного меню необходимо нажать на кнопку *Calculate*. Далее начинается процесс решения задачи (рисунок 3.60).

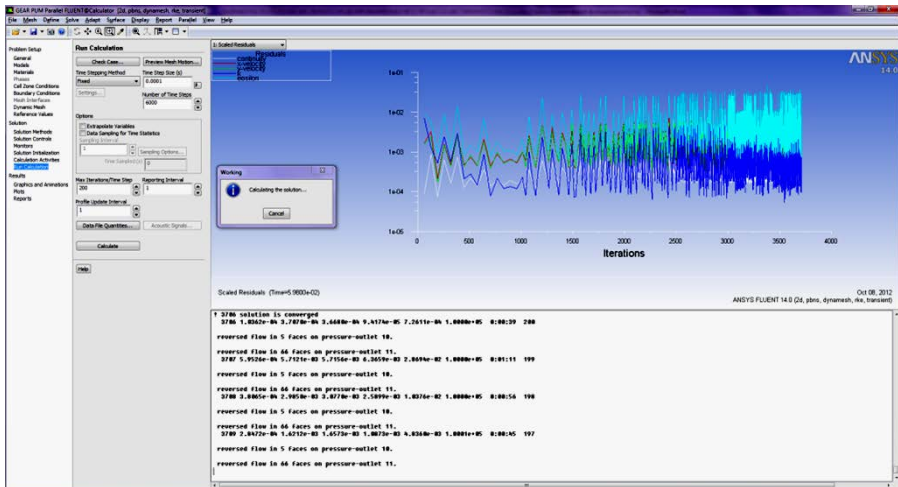


Рисунок 3.60 – Рабочее окно FLUENT в процессе расчета задачи

Обработку результатов можно вести как в самом FLUENT, так и в модуле ANSYSCFX-Post.

На рисунках 3.61 и 3.62 приведено расчетное поле распределения полного и статического давлений по всему расчетному объему.

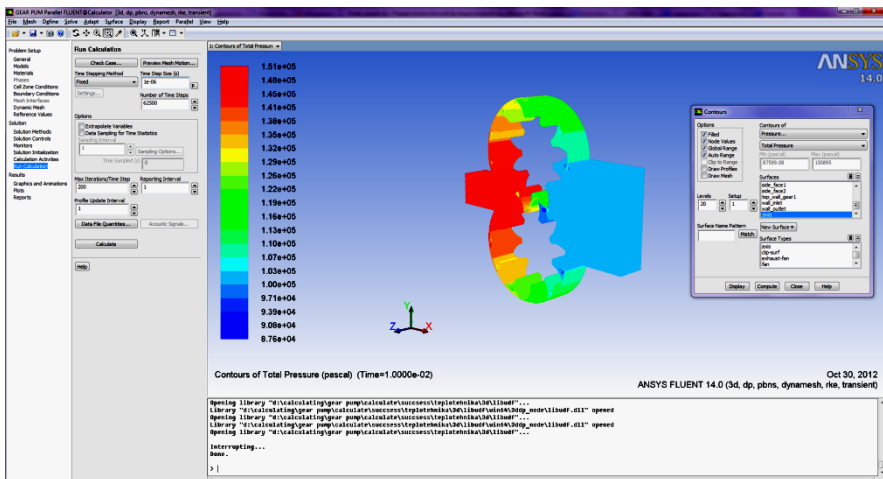


Рисунок 3.61 – Распределение полного давления в расчетной области

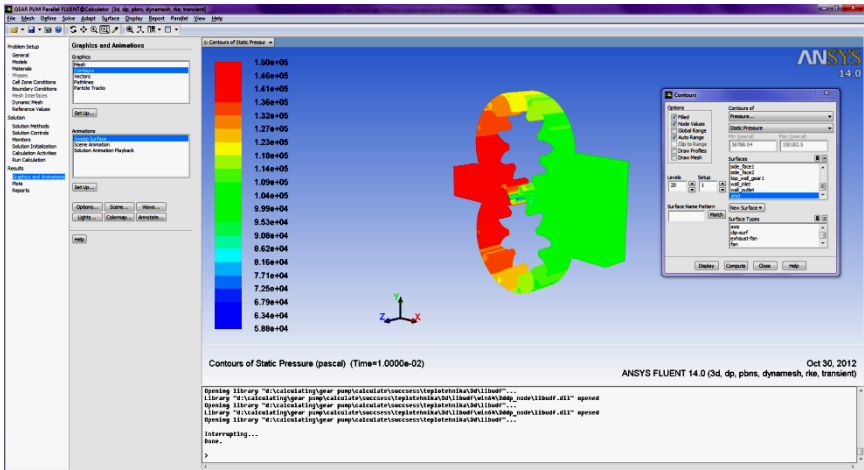


Рисунок 3.62 – Распределение статического давления в расчетной области

Учебное издание

*Родионов Леонид Валерьевич,
Гафуров Салимжан Азатович*

**МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА
ШЕСТЕРЕННОГО НАСОСА**

Учебное пособие

Редактор Т.К. Кретинина
Доверстка Е.С. Кочеулова

Подписано в печать 08.08.2015. Формат 60x84 1/16.
Бумага офсетная. Печать офсетная. Печ. л. 7,25 .
Тираж 300 экз. Заказ . Арт. - Д2(5)/2015.

федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Самарский государственный аэрокосмический
университет имени академика С. П. Королева
(национальный исследовательский университет)» (СГАУ)
443086, Самара, Московское шоссе, 34.

Изд-во СГАУ. 443086, Самара, Московское шоссе, 34.

ДЛЯ ЗАМЕТОК

ДЛЯ ЗАМЕТОК