МИНОБРНАУКИ РОССИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕВЫСШЕГО
ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ имени академика С.П. КОРОЛЕВА»
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)

Моделирование литья деталей аэрокосмического назначения в ProCAST

С А М А Р А
2012

УДК 629.192 (035)

ББК 30.14

Авторы: **Черников Дмитрий Генадьевич**
Смелов Виталий Геннадьевич
Вдовин Роман Александрович
Шляпугин Алексей Геннадьевич

Редакторская обработка Галимова Л.Р.
Компьютерная верстка Галимова Л.Р.
Доверстка Галимова Л.Р.

Моделирование литья деталей аэрокосмического назначения в ProCAST: / : электрон. учеб. пособие / Д.Г. Черников, В.Г. Смелов, Р.А. Вдовин, А.Г. Шляпугин Минобрнауки России, Самар. гос. аэрокосм. ун-т им. С. П. Королева (нац. исслед. ун-т). - Электрон. текстовые и граф. дан. (16,7 Мбайт). - Самара, 2012. - 1 эл. опт. диск (CD-ROM).

Учебное пособие состоит из 4 частей. Первый раздел посвящен общим сведениям о программном обеспечении Pro-Cast, особенностям работы, описанию интерфейса.

В разделах 2-4 рассмотрены практические примеры использования программы для моделирования процессов литья в песчанно-глинистые формы, по выплавляемым моделям и в кокиль. В качестве объектов моделирования выбраны детали Форсунка, Кронштейн и проба на жидкотекучесть Нехензи-Купцова.

Пособие предназначено для бакалавров, изучающих дисциплину «Теория конструкционных материалов» в 4 семестре по направлению 150400.62 (ФГОС-3). Подготовлено на базе Центра компьютерного моделирования совместно кафедрами ПДЛА и ОМД.

Методические указания разработаны в рамках мероприятия 3.5 программы развития национального исследовательского университета.

© Самарский государственный
аэрокосмический университет, 2012

СОДЕРЖАНИЕ

Введение 5

1. Общие сведения о Системе моделирования литейных процессов ProCAST 9

1.1. Общие сведения и интерфейс модуля MeshCAST 10

1.1.1. Описание команд меню TOP MENU 14

1.1.2. Описание команд меню DISPLAY TOOLS 18

1.1.3. Описание меню REPAIR TOOLS 19

1.1.4. ОписаниекомандменюREPAIR FACILITATION TOOLS 30

1.1.5 Описание команд меню SETS TABLE 32

1.1.6. Описание команд меню MESHING ENVIRONMENT 33

1.2. Общие сведения и интерфейс модуля PreCAST 44

1.3. Сведения о запуске задачи на счет 49

2. Моделирование литья по выпловляемым моделям 52

2.1.Общие сведения о современных технологиях, применяемых для литья по выплавляемым моделям 52

2.2. Последовательность действий при моделировании 59

2.2.1. Создание геометрической модели отливки 60

2.2.2 Создание поверхностной сетки в модуле MechCast 61

2.2.3.Создание контактных, граничных и начальных условий в модуле PreCast 78

2.2.4. Выполнение анализа скомпилированной модели в модуле ProCast 92

2.2.5 Анализ полученных результатов виртуальной заливки завихрителя II контура ГТД 94

3. Литье в разовые песчано-глинистые формы 107

3.1. Сущность и особенности процесса 107

3.2. Изготовление и заливка литейных форм 110

3.3. Охлаждение, выбивка и очистка отливок 111

3.4. Контроль отливок 112

3.5. Технологичность конструкций литых деталей, применительно к способу литья в песчано-глинистые формы 113

3.6.Особенности моделирования процесса литья в песчано-глинистую форму в ProCast 116
3.7. Описание последовательности действий при моделировании процесса литья в песчано-глинистые формы 117
3.7.1.Создание новой задачи 118
3.7.2. Создание конечно-элементной модели 119
3.7.3. Задание начальных и граничных условий 128
3.7.4. Задание параметров расчета 136
3.7.5. Визуализация полученных результатов моделирования 138
4. Моделирование литья в кокиль в ProCAST 143
4.1. Общие сведения о малой комплексной пробе на жидкотекучесть Нехендзи-Купцова 143
4.2. Построение геометрии конечно-элементной модели 144
4.3. Задание граничных и начальных условий 154
4.4. Оценка полученных результатов 169
Библиография 180

ВВЕДЕНИЕ

Сложность и высокая стоимость объектов и изделий современного развивающегося авиационного и машиностроительного комплекса делает обязательным применение этапа виртуального моделирования на всех циклах технологического производства [1].

Компьютерный анализ литейных процессов на этапе виртуального проектирования технологии литья (до изготовления отливок) позволяет минимизировать возможные просчеты и ошибки, неизбежно возникающие в процессе разработки, снизить финансовые и временные затраты, повыситьэффективность, конкурентоспособность, качество и надежность разрабатываемой продукции [27]. Происходит экономия материалов, энергоносителей, рабочего времени, бережется оборудование, а взамен получается масса уникальной информации о технологическом процессе. Только компьютерное моделирование технологии позволяет «заглянуть» внутрь изделия, увидеть характер протекающих в нем процессов, понять причины возникновения дефектов [34].

Внедрение компьютерных технологий позволяет повысить эффективность операций создания и обработки информации, происходит реальный переход от бумажного документооборота к электронному[33].

При внедрении компьютерных технологий снижаются расходы, уменьшается трудоемкость проектирования и освоения производства новых сложных изделий. На 30…40 % уменьшаются расходы на подготовку технологической документации. Более чем на 35 % сокращаются сроки выпуска новых сложных изделий [24].

Применение компьютерных технологий в литейном производстве в значительной степени связано с обработкой, поступающей от CAD-систем конструкторских подразделений информации о создаваемом изделии в виде электронных моделей деталей [16]. Информация о технологических процессах, применяемых в литейном производстве, поступает в виде математических моделей, создаваемых в результате деятельности CAE-

систем [14]. Виртуальное литейное производство созданное на базе современной CAE-системы ProCast не только моделирует затвердевание отливки (тепловая задача), но и позволяет прогнозировать макро и микроструктуру отливки, а также создает информационную картину электронной модели отливки [10]. По созданной электронной модели отливки, с использованием технологии быстрого прототипирования (аддитивных технологий), может быть быстро получена достаточно точная материальная модель, необходимая для изготовления отливки в литейном производстве [2].

Ключевым звеном виртуального производства литых заготовок служит программное обеспечение моделирования процесса затвердевания отливки и формирования макро и микроструктуры. Выбор программного обеспечения зависит от применяемых процессов литья и номенклатуры выпускаемой продукции [20].

Для литьядеталей аэрокосмического назначениядеталей с тонкими стенками, тонкими ребрами, щелевыми каналами сложной формы, например, лопаток газотурбинного двигателя (ГТД), преимуществом обладает метод конечных элементов (FEM), позволяющий более точно передать геометрию отливки, который используется в программном продукте ProCAST [18].

Этапы моделирования включают в себя подготовку геометрии (3D-модель литейного блока и 3D-сетку), определение теплофизических свойств материалов, задание граничных условий (воспроизведение реального технологического процесса) [11].

Для проведения численных расчетов необходимо задать физические и усадочные (теплофизические) свойства материала отливки [32].

Для моделирования литейных процессов нужны свойства сплава при температурах вблизи температуры точки солидус и выше [22].

Скорость охлаждения расплава, геометрия отливки существенно влияют на тепло и массообмен, полноту протекания диффузионных процессов на фронте кристаллизации [15]. Это определяет фазовый состав сплава,

распределение твердой фазы в интервале кристаллизации и температуру точки солидус. Температура плавления (температура ликвидус) - это температура, при которой вещество переходит в полностью жидкое состояние. Температура затвердевания (температуру солидус) - это такая температура, при которой вещество переходит полностью в твердое состояние [26].

В точной математической постановке система уравнений, описывающая процесс затвердевания отливки, должна включать уравнение диффузии в расплаве и твердой фазе [3].

Программный комплекс ProCAST позволяет решать практически любые технологические задачи, связанные с литьем металлов. ProCAST позволяет моделировать любую литейную технологию:

- любая гравитационная заливка (литье в кокиль, в ПГС и ХТС, по выплавляемым моделям и т.д.);

- литье под регулируемым давлением (литье под высоким давлением, литье под низким давлением, литье с противодавлением, литье вакуумным всасыванием и т.д.);

- центробежное литье;

- непрерывное литье;

- литье по газифицируемой модели [31].

Программа ProCAST имеет отличный встроенный генератор 2D и 3D сеток, позволяющий получить максимально корректную расчетную сетку за минимальное время.

Имеется встроенный химический калькулятор, благодаря которому можно получить все необходимые тепло-физические свойства любого сплава прямо в программе.

Программа ProCAST позволяет определить:

- распределение тепловых полей в отливке и форме;

- оценить уровень возникающих напряжений в отливке и металлической оснастке

- позволяет расчитывать цикличные нагрузки (например, при литье под давлением).

ProCAST отвечает задачам производства. Основанный на проверенной технологии конечных элементов, ProCAST представляет законченное решение, охватывающее широкий спектр процессов литья металлов и сплавов.

Покрытие всех производственных задач для широкого спектра процессов литья. Литьё в землю, гравитационное, наклонное литьё. Ключевые факторы успеха в гравитационном литье связаны с оптимизацией системы литников и исключением областей возможной усадки.

Литьё по выплавляемым моделям, литьё в оболочковые формы ProCAST хорошо приспособлен для решения задачи литья по выплавляемым моделям. Например, ProCAST может автоматически генерировать сетку, отражающую оболочковую форму, допускает неодинаковую толщину и многослойность. При этом учитывается теплоизлучение с эффектами затенения, которые важны для высокотемпературных сплавов.

ProCAST предоставляет возможность моделирования заполнения формы, затвердевания и формирования микроструктуры. Расположение стояков и применение изолирующих или экзотермических подводов, их влияние на усадку может быть изучено на компьютере и визуализировано на экране для достижения оптимального качества отливки.

Программный комплекс ProCAST отвечает рассмотренным выше требованиям и позволяет формировать расчетную модель на основе соответствующих физических процессов в литейной технологии, а необходимые решатели подключаются в процессе решения.

Успех моделирования заполнения формы, затвердевания и формирования микроструктуры связаны с оптимизацией системы литников и исключением областей возможной усадки. Размеры элементов литниковой системы, их влияние на усадку может быть изучено на компьютере и визуализировано на экране для достижения оптимального качества отливки.

1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О СИСТЕМЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ ЛИТЕЙНЫХ ПРОЦЕССОВ PROCAST

ProCAST содержит следующие модули.

•MeshCAST – модуль подготовки расчетной сетки. В MeshCAST создается как двухмерная, так и объемная (тетраэдральная) конечно-элементная расчетная сетка. Он позволяет осуществлять экспорт геометрии практически из любой CAD-системы в следующих форматах: IGES, STEP, Parasolid (x_t), STL и проверку импортированной геометрии, при необходимости, ее восстановление. В Meshcast также включен генератор оболочек, предназначенный для моделирования литья по выплавляемым моделям.

•PreCAST – модуль подготовки исходных данных для решения задачи. Этот модуль позволяет пользователю считывать конечно-элементную модель, назначать свойства материалов для различных компонентов модели, задавать контактные, граничные и начальные условия. Главной особенностью модуля PreCAST является наличие встроенного химического калькулятора, благодаря которому отпадает необходимость в поиске данных о сплавах на стороне. Можно просто занести химический состав сплава и получить все необходимые для расчета тепло-физические свойства материала.

•DataCAST – модуль для перевода всех введенных данных в необходимый для расчета вид. Действие выполняется автоматически.

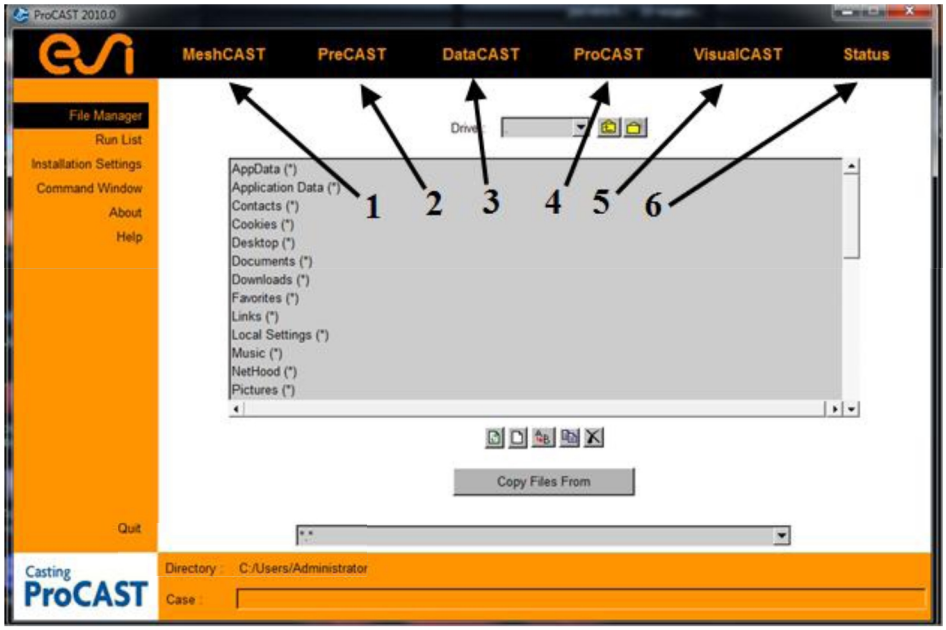
•ProCAST solver – модуль решателей. В СКМ ЛП ProCAST имеется несколько различных решателей. В зависимости от той задачи, которую необходимо решить, система выбирает и задействует необходимые решатели (например: гидродинамика для заполнения формы или решатель напряжений для определения напряжений и трещин в отливке).

•VisualCAST – модуль для просмотра результатов моделирования (постпроцессор). Этот модуль позволяет визуализировать все рассчитанные параметры: распределение температур, напряжений, скоростей и т.д. Так же

существует возможность создания графиков изменения той или иной характеристики, сохранения данных в виде графики и анимации и многое другое.

Все эти модули объединены в общем интерфейсе и запускаются из общего **ProCAST Manager** (рисунок 1.1)**.**

Так же из **ProCAST Manager** можно открыть дополнительную вкладку **Status**, которая позволяет контролировать процесс расчета. При этом отображаются следующие параметры: степень заполнения и кристаллизации отливки, общий ход выполнения задачи, а так же затраты машинного времени на вычисления. Использование этой функции позволяет экономить ресурсы компьютера, т.к. отпадает необходимость запускать **VisualCAST** на этапе решения задачи.



1-6 командыдлявызовамодулей MeshCast, PreCast, DataCast, ProCast, ViewCast, Status соответственно

Рисунок1.1 –ОкноProCAST Manager (Диспетчерафайлов)

1.1. Общие сведения и интерфейс модуля MeshCAST

MeshCAST генерирует трехмерную четырех узловую (из тетраэдров) сетку, используя метод конечных элементов. Разбиение поверхности на

треугольники является обязательной предварительной процедурой для генерации объемной сетки. MeshCAST может генерировать поверхностную треугольную сетку по модели в формате IGES, PARASOLIDS, STEP или STL. Также MeshCAST может использовать поверхностную сетку, полученную в любом CAD или CAE пакете для построения объемной сетки.

MeshCAST является мощным конструкторским и аналитическим инструментом, существенно отличающим ProCAST от всех других СКМ ЛП. Он обладает следующими свойствами:

- гибкость;
- быстрая генерация сетки;
- надежные инструментальные средства восстановления и работы с сеткой;
- разносторонний контроль качества модели;
- способность обрабатывать и выдавать файлы широкого набора форматов;

и возможностями:

- импорт данных непосредственно из CAD и CAE пакетов − MeshCAST обработает геометрию, сохраненную в форматах IGES, PARASOLIDS, STEP или STL. Он может также читать поверхности и объемные сетки, созданные широким кругом пакетов других производителей программ;
- возможность построения сетки с изменяющейся плотностью − можно выбирать критические области модели и назначать более высокую плотность сетки в этих областях. Это позволяет совершенствовать модель для повышения достоверности и точности при одновременном сокращении времени счета;
- поддержка генерации несовпадающей сетки − плотности сетки формы и отливки, содержащиеся в одной модели, могут задаваться независимо. Это позволяет описать компоненты модели на столько подробно, на сколько это необходимо;
- быстрота − быстрый счет обусловлен использованием специальных архитектурных и математических методов. Быстрые результаты определяются способностями MeshCAST поддерживать изменения

геометрии конструкции, дорабатывать модель, проводить анализ сетки и ее сглаживания. Это позволяет совершенствовать модель без применения CAD систем;

•контроль – можно проверять геометрию модели, поверхностную или объемную сетку. Генерация объемной сетки является наиболее длительной счетной задачей процесса проектирования. Поэтому возможность MeshCAST проверить корректность поверхностной до генерации объемной сетки позволяет значительно ускорить процесс проектирования;

•генерация сетки для литья по выплавляемым моделям – с помощью этой функции можно генерировать выплавляемую модель с различными уровнями оболочки в отливке;

•генерация пограничного слоя – эта функция позволяет создавать тонкий слой элементов внутри объема материала, для более точного моделирования поведения жидкости возле стенки формы.

Таким образом, для генерации объемной сетки в MeshCAST необходимо выполнить шесть основных шагов:

•Шаг 1: Открыть исходный файл.

•Шаг 2: Проверить геометрию модели и при необходимости устранить ее тнедостатки.

•Шаг 3: Сгенерировать поверхностную сетку.

•Шаг 4: При необходимости отредактировать поверхностную сетку.

•Шаг 5: Сгенерировать объемную тетраэдральную сетку.

•Шаг 6: Проверить качество полученной сетки.

При запуске MeshCAST открывается графический интерфейс, как показано на рисунке 1.2, с возможностями открыть или создать новый файл геометрии.

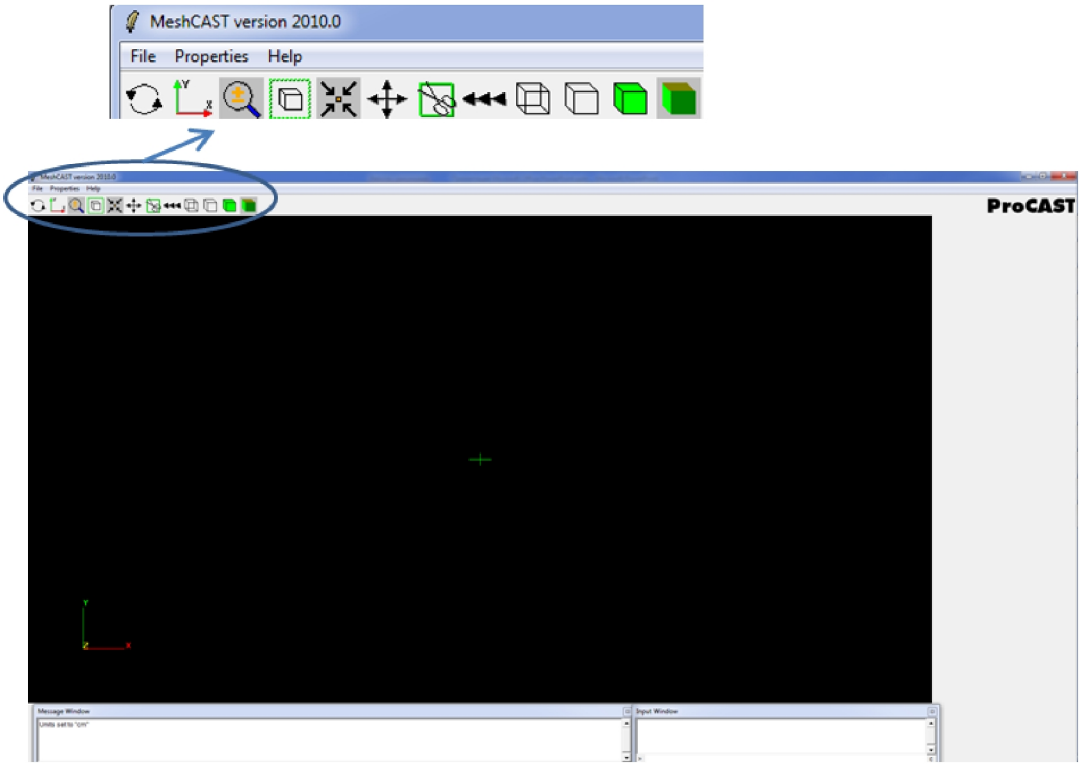


Рисунок 1.2 – Графический интерфейс модуля MeshCAST

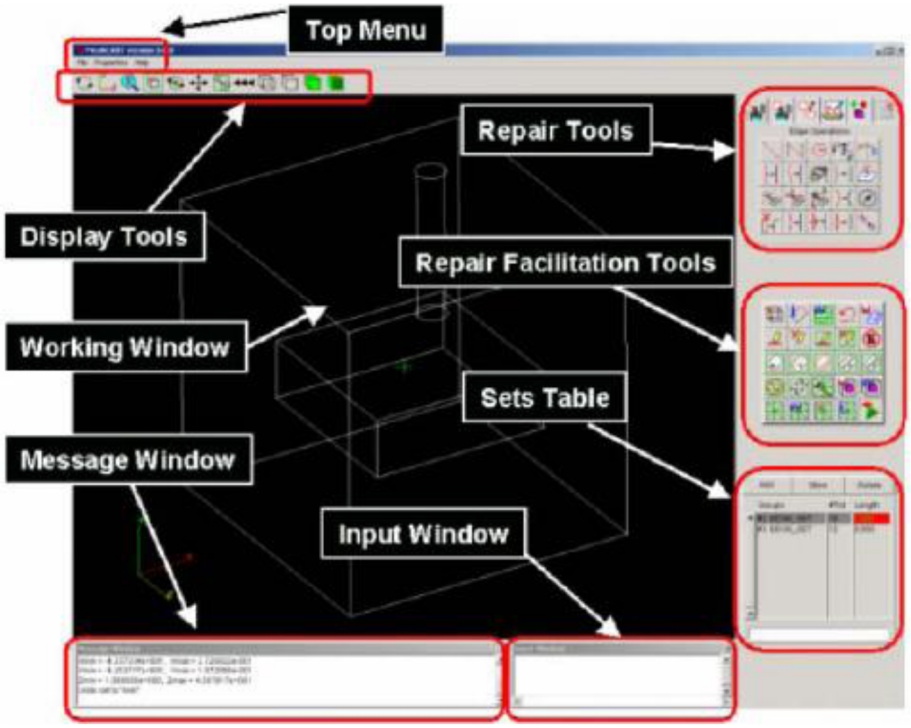


Рисунок 1.3 – Расширенный графический интерфейс модуля MeshCAST

После создания нового файла геометрии или открытия уже существующего графический интерфейс модуля MeshCAST выглядит, как показано на рисунке 1.3.

Расширенный графический интерфейс модуля MeshCAST состоит из различных областей, включая Top Menu (Главное меню), Repair Tools (Инструменты восстановления), Sets Table (Таблицу наборов), Repair Facilitation Tools (Инструментальные средства помощи восстановления), Display Tools (Средства отображения), Input Window (Окно ввода), MessageWindow (Окно сообщений) и WorkingWindow (Рабочее окно).

1.1.1. Описание команд меню TOP MENU

Меню**FILE (ФАЙЛ)** − подменю FILE позволяет выполнять различные действия с файлами. После нажатия на кнопку FILE появляется выпадающее меню (рисунок1.4).



Рисунок 1.4 − Подменю FILE

Open (Открыть) − эта команда открывает файлы различных типов с геометрией, поверхностной или объемной сеткой. При нажатии на кнопку OPEN программное обеспечение открывает Окно Диспетчера файлов. Файл, который будет открыт, может быть выбран с помощью Диспетчера файлов. MeshCAST поддерживает типы файлов со следующими расширениями: gmrst, sm, mesh, iges, step, xmt_txt, stl, unv, patran.mesh и ideas.mesh.

New (Новый) – эта команда позволяет создать новый файл геометрии. При нажатии на кнопку NEW инициируется Окно Команды, которое позволяет определить имя нового файла.

Save (Сохранить) – эта команда сохраняет геометрию, поверхностную или объемную сетку в файл. При нажатии на кнопку SAVE файл немедленно сохраняется. Тип сохраненного файла будет зависеть от того файла, с которым ведется работа. Если это геометрия, тогда будет сохранен "file.gmrst", если это поверхностная сетка – тогда "file.sm", а если это объемная сетка – тогда "file.mesh". Другие типы файлов могут быть сохранены при использовании команды SAVE AS.

Save As (Сохранить как) – эта команда сохраняет новую геометрию, поверхностную или объемную сетку в файл. При нажатии на кнопку SAVE AS инициируется Окно Диспетчера файлов, которое позволяет определить имя нового файла, папки или тип файла. С помощью команды SAVE AS могут быть сохранены файлы следующих типов: gmrst (MeshCAST), sm (MeshCAST), out (Patran), unv (Ideas), stl (Stereolithography), mesh (MeshCAST), patran.mesh (Patran), ideas.mesh (Ideas), ansys.mesh (Ansys), nastran.mesh (Nastran) и .gif (imagefile).

Merge Files (Объединить файлы) – эта команда объединяет поверхностные и объемные сетки. При нажатии на кнопку MERGE FILES инициируется Окно Команды, позволяюее определить два входных файла (Входной файл 1, Входной файл 2), которые требуется объединить, а также новый объединенный файл (Выходной файл).

Equivalence Mesh (Совпадающая сетка) – эта команда удаляет общие совпадающие узлы между двумя сетками в местах контакта. При нажатии на кнопку EQUIVALENCE MESH инициируется Окно Команды, которое позволяет определить "Входной файл", "Выходной файл" и Эквивалент точности "Equiv. Toler".

Print (Печать) – эта команда создает файл печати (mesh.print).

Exit (Выход) – эта команда завершает работу MeshCAST.

Меню**PROPERTIES (СВОЙСТВА)** − в этом меню находится подменю с командой UNITS для установки единиц измерения и командой ADVANCED для установки точности и геометрических параметров. Точность и параметры геометрии должны быть установлены перед открытием файла. При щелчке на кнопку PROPERTIES появляется выпадающее подменю (рисунок 1.5).

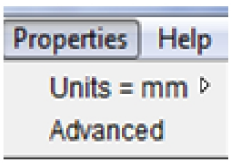


Рисунок 1.5 − Подменю PROPERTIES

Units (Единицы измерения) − после открытия файла и до начала любой работы с геометрией должны быть определены рабочие единицы измерения. При нажатии на кнопку UNITS появляется список допустимых единиц измерения (m, cm, mm, Feet, Inches). После выбора одного из значений все дальнейшие измерения будут делаться в этих единицах.

Advanced − эта кнопка позволяет определить различные установочные параметры перед операцией импорта геометрии. При нажатии на кнопку ADVANCED появляется меню, в котором можно отметить различные установочные параметры. При активизации флажка каждой функции в текстовом поле окна появляется ее описание. Список доступных флажков зависит от активной рабочей среды.

Функции флажков меню Advanced в положении «активно», перечислены ниже:

Tolerance: точность, которую необходимо применить перед считыванием геометрии;

NoBeep: подача звукового сигнала запрещена;

GifBgWhite: изменить фон на белый;

SurfaceOnly: удаляет поверхностную сетку в файле "gmrst" для уменьшения его размера;

ParNoSplit: используется для моделей в формате parasolid, для того чтобы во время импорта предотвратить отнимающее много времени разбиение периодических поверхностей;

ParSurfIncrDesc: используется для моделей в формате parasolid, для того чтобы увеличить качество описания поверхности через указанный коэффициент;

ParNoMultBody: используется для моделей в формате parasolid, для того чтобы предотвратить объединение общих границ между материалами;

ParMLE: используется для моделей в формате parasolid, для того чтобы объединить множественные ребра линии в единое длинное ребро;

NoWait: не будет ждать ответ пользователя в процессе разбиения поверхности на сетку;

NoDelPeriodic: предотвратит решение проблем, связанных с Periodic Surface Descriptions;

DelStfCorner: удаляет любой маленький прямоугольник/квадрат около границ решетки описания поверхности;

NoThinSurface: сохранит описание поверхности неповрежденным в течение генерации сетки для специальных поверхностей;

Maximum Nodes/Iteration: используется для управления числом внутренних узлов при генерации сетки в GENERATE TET MESH;

UnrecWriteddat: выдает объемную сетку, узлы и элементы которой отличаются от тех, что на входе. Полезно для отладки сетки с большим числом материалов.

Меню**HELP (ПОМОЩЬ)** – нажатие на кнопку HELP активизирует справку по модулю MeshCAST и каждой его функции.

1.1.2. Описание команд меню DISPLAY TOOLS

Данные средства используются для изменения отображения модели, что позволяет облегчить выполнение операции разбиения геометрии на конечно-элементную сетку. Описание средств отображения модели приведено в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Описание средств отображения модели

Иконка	Название	Описание
	*Rotate*	Используется для поворота изображения путем задания угла поворота или использования некоторых стандартных положений.
	*Restore*	Восстанавливает геометрию к ее оригинальному виду в рабочем окне.
	*Zoom*	Позволяет увеличивать или уменьшать изображение геометрии в рабочем окне.
	*Zoom Out*	Автоматически подгоняет масштаб изображения геометрии в размер рабочего окна.
	*Center*	Позиционирует изображение относительно его центра, помещая этот цент изображения в указанную точку.
	*Drag*	Позволяет передвигать изображение в рабочем окне с помощью мышки.
	*Clip*	Позволяет выбрать интересующую часть геометрии.

Таблица 1.1 – Описание средств отображения модели (Продолжение)

Иконка	Название	Описание
	*Backtrack/All*	Позволяет вернуться к прежнему активному набору. MeshCAST предоставляет инструменты для выбранной части геометрии в виде активного набора. Активный набор может представлять собой временную подгруппу модели. Подгруппа позволяет работать с небольшой частью геометрии, это особенно полезно в случае большой и сложной конечно-элементной модели.
	*Wireframe*	Используется для отображения всех элементов геометрии или всех поверхностных сеток.
	*Hide*	Используется для отображения поверхностной сетки в режиме hidden-surface.
	*Solid*	Используется для отображения поверхностной сетки в режиме закраски. При активировании этой опции отображение конечно-элементной модели переходит в режим твердотельного. Различие между опциями HIDE и SOLID заключается в цвете закрашенной поверхности.
	*Shade*	Позволяет просматривать модели в твердотельном виде.

1.1.3. Описание меню REPAIR TOOLS

Команды меню REPAIR TOOLS (Инструменты восстановления) позволяют восстанавливать и изменять геометрию модели, для того чтобы получить поверхностную сетку высокого качества, которая будет использоваться при создании объемной сетки. Данные инструменты сгруппированы в различные подменю, которые появляются при нажатии на кнопку определенной папки. Все кнопки папок показаны на рисунке 1.6.



Рисунок 1.6 – Панель инструментов

Команды подменю**EDGE OPERATIONS**

Кнопки команд EDGE OPERATIONS (*Работа с ребрами)*  используются для исправления и изменения ребер геометрической модели. При нажатии на папку EDGE OPERATIONS появится группа команд работы с ребрами (рисунок 1.7).

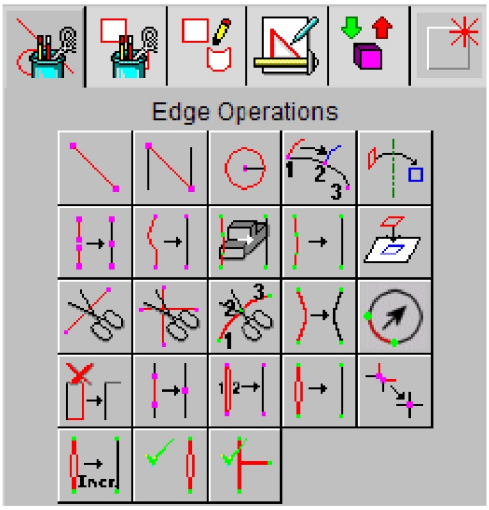


Рисунок 1.7 – Группа команд для работы с ребрами

В таблице 1.2 приведено описание команд работы с ребрами геометрической модели.

Таблица 1.2 – Описание команд работы с ребрами

Иконка	Название	Описание
	*Add Line Points*	Создает прямую линию между двумя точками с заданными координатами.
	*Add Line*	Создает прямую линию между конечными точками двух выбранных ребер (эти два ребра должны быть выбраны до выполнения этой команды).
	*Add Circle*	Создает окружность в заданной плоскости по координатам центра и радиусу.
	*Sweep Edges*	«Протягивает» набор выбранных ребер на заданный угол и вдоль заданной оси.
	*Sweep Curve*	Создает новое ребро, перемещая указанное уже существующее ребро.
	*Connect*	Присоединяет конечную точку выбранного ребра к самой близкой конечной точке другого ребра или позволяет выбрать нужную точку для присоединения ребра.
	*Straighten*	Соединяет конечные точки выбранного ребра прямой линией без изменения остальной части геометрии.
	*Make Long Edges*	Заменяет набор соединенных ребер, конечные точки которых совпадают, одним новым ребром.
	*Make One Edge*	Заменяет выбранный набор соединенных ребер одним длинным ребром, которое имеет ту же самую ассоциативность с поверхностями, что и замененный набор ребер.
	*Project Edge*	Проецирует ребро на выбранную поверхность.
	*Split Line*	Разбивает одно ребро на два.
	*Split Two*	Разбивает два пересекающихся ребра. Разбиение произойдет в ближайшей точке пересечения двух ребер.

Таблица 1.2 – Описание команд работы с ребрами (продолжение)

Иконка	Название	Описание
	*Split Edge*	Разбивает выбранное ребро в указанной позиции.
	*Reverse Arc*	Полностью изменяет форму дугообразного ребра.
	*Complement Arc*	Продлевает дугу на противоположную сторону окружности.
	*Delete Edges*	Удаляет выбранное ребра из геометрии без изменения остальной ее части.
	*Del/Merge Edge*	Удаляет ребро, объединяя две конечных точки этого ребра в одну.
	*Merge Edges*	Объединяет два смежных ребра в одно.
	*Auto Merge*	Объединяет ребра, которые формируют зазоры между поверхностями, а также ребра, принадлежащие к прилегающим поверхностям.
	*Merge Points*	Объединяет самые близкие конечные точки двух выбранных ребер в одну точку.
	*Auto Incr Merge*	Автоматически объединяет разрывы в текущем активном наборе. Точность для объединение задается пользователем.
	*Identify Cracks*	Автоматически выбирает разрывы (то есть ребра, окрашенные в голубой цвет при выполнении команды проверки сетки "Check mesh"). Под "разрывом" понимается ребро, которое примыкает к одной (или не примыкает ни к одной) поверхности.
	*Identify Multiple Edges*	Автоматически выбирает множественные ребра (то есть ребра, окрашенные в желтый цвет при выполнении команды проверки сетки "Check mesh"). Множественное ребром – ребро, которое примыкает более чем к двум поверхностям.

Командыподменю **SURFACE OPERATIONS**

Кнопки команд подменю *Surface Operations (Операции с поверхностями)*  используются для восстановления и изменения геометрии поверхности (рисунок 1.8).

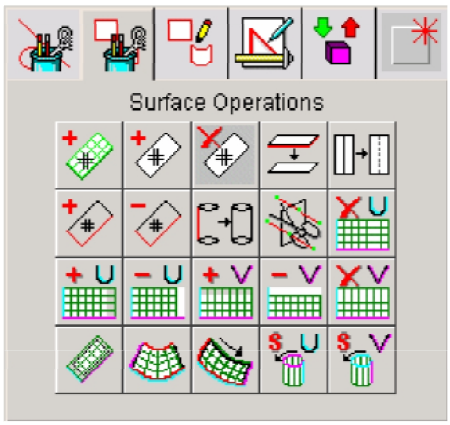


Рисунок 8 – Группа команд с поверхностями

В таблице 1.3 приведено описание команд работы с поверхностями.

Таблица 1.3 – Описание команд работы с поверхностями

Иконка	Название	Описание
	*Add Plane*	Создает новую плоскую поверхность для набора выбранных ребер. Номер созданной поверхности отображается в Информационном окне.
	*AddSurface*	Создает новую поверхность, номер которой отображается в Информационном окне.
	*Delete Surfaces*	Удаляет только выбранную поверхность из геометрии модели (без удаления ребер).
	*Rem Coin Faces*	Удаляет все двойные поверхности, построенные на тех же самых ребрах, которые могли быть созданы в результате операции «automerge».

Таблица 1.3 – Описание команд работы с поверхностями (продолжение)

Иконка	Название	Описание
	*Merge Surfaces*	Объединяет меньшую поверхность с большей смежной поверхностью.
	*Add Edge(s)*	Добавляет выбранные ребра к указанной поверхности.
	*Remove Edge(s)*	Удаляет выбранные ребра из указанной поверхности.
	*Split Cylinder*	Разбивает все цилиндроподобные периодические поверхности на две поверхности, пригодные для построения сетки в MeshCAST.
	*Plane Split*	Разбивает геометрию в текущем активном наборе плоскостью, определенной тремя координатами.
	*Deldescu*	Удаляет элемент в описании указанной поверхности.
	*Incrdescu (Добавить к поверхности по вертикали)*	Расширяет существующее описание поверхности для включения любой неохваченной области поверхности, сформированной в результате выполнения некоторой операции MERGE.
	*– Incrdescu (Добавить к поверхности по вертикали в начало)*	
	*Incrdescv (Добавить к поверхности по горизонтали)*	
	*– Incrdescv (Добавить к поверхности по горизонтали в начало)*	

Таблица 1.3 – Описание команд работы с поверхностями (окончание)

Иконка	Название	Описание
	*Deldescv*	Удаляет элемент в описании выбранной поверхности.
	*Plane Description*	Создает описание плоской поверхности для уже существующей поверхности, содержащей, по крайней мере, два ребра.
	*Construct Surface*	Создает описание поверхности по набору выбранных ребер, присутствующих в указанной поверхности.
	*Contruct Sweep Descr*	Создает описание поверхности для указанного номера поверхности перемещением одного ребра вдоль остальных выбранных ребер.
	*Shift -U*	Изменяет существующее описание поверхности с целью включения в него любой раскрытой области указанной поверхности.
	*Shift -V*	

Описание команд подменю **BUILD OPERATIONS**

Кнопки команд в папке *Build Operations (Операции построения)*  используются для создания и изменения элементов геометрии (рисунок 1.9). В таблице 1.4 приведено описание команд работы с поверхностями.

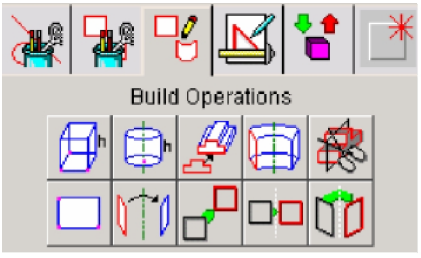


Рисунок 1.9 – Группа команд для построения геометрии

Таблица 1.4 – Описание команд работы с поверхностями

Иконка	Название	Описание
	*Box*	Создает параллелепипед, построенный на указанных координатных точках и высоте.
	*Cylinder*	Создает цилиндр по заданным оси, точке начала координат, радиусу и высоте.
	*Extrude*	Выдавливает набор предварительно выбранных ребер вдоль указанного вектора, создавая новую поверхность для каждого из выбранных ребер.
	*Sweep*	Выдавливает набор предварительно выбранных ребер, создавая новую поверхность для каждого из выбранных ребер, путем вращения их вокруг указанной оси на заданный угол поворота.
	*Split Geom*	Разбивает геометрию на две части, используя плоскость, построенную по трем координатам.
	*Add Rectangle*	Создает новую поверхность с 4 новыми ребрами, формирующими прямоугольник, по трем заданным точкам. Эти 3 точки могут быть определены в любом порядке.
	*Construct Periodic Surfaces*	Перемещает выбранные поверхности вокруг указанной оси на угол поворота.
	*Translate*	Создает набор новых ребер и поверхностей, путем перемещения абора ребер на указанное расстояние.
	*Mirror Symmetry*	Создает новый набор ребер и поверхностей, зеркально расположенных относительно заданных.
	*Rotational Symmetry*	Создает новый набор ребер путем вращения выбранного набора ребер вокруг указанной оси на заданный угол.

Описание команд подменю **TOOLS**

Кнопки в папке *Tools (Инструменты)*  используются для выполнения различных операций, которые используются при исправлении геометрии (рисунок 1.10).

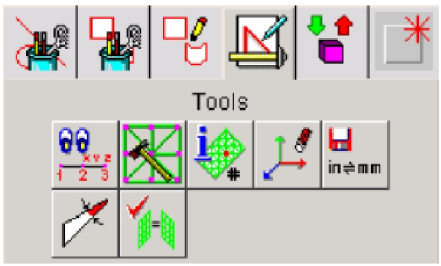


Рисунок 1.10 – Группа команд с исправлением геометрии

В таблице 1.5 приведено описание команд исправления геометрии.

Таблица 1.5 – Описание команд исправления геометрии

Иконка	Название	Описание
	*Print Co-ords*	Показывает координаты положения группы точек, указанных на выбранном ребре.
	*Auto Fix: Unmeshed Surfaces*	Генерирует поверхностную сетку на тех поверхностях, на которых это невозможно было сделать обычным путем.
	*ISN (*Identify Surface Nodes*) command*	Показывает положение выбранных узлов поверхностной сетки и указывает номера поверхностей, связанных с этими узлами.
	*Change View*	Изменяет первоначальное представление модели на текущее, которое отображено на экране.
	*Change Units*	Изменяет единицы измерения путем их преобразования.

Таблица 1.5 – Описание команд исправления геометрии (продолжение)

Иконка	Название	Описание
	*Bad Angle Criteria*	Заменяет существующее значение параметра "плохого" угла на угол, который определен для этой команды.
	*Check Periodicity*	Контролирует хорошо ли выровнена поверхностная сетка, принадлежащая указанной поверхности, с сеткой второй указанной поверхности, когда первая поверхность вращается на указанный угол.

Описание команд подменю IMPORT/EXPORT

Кнопки в папке *Import/Export (Импорт/Экспорт)*  используются для выполнения команд импорта и экспорта (рисунок 1.11).

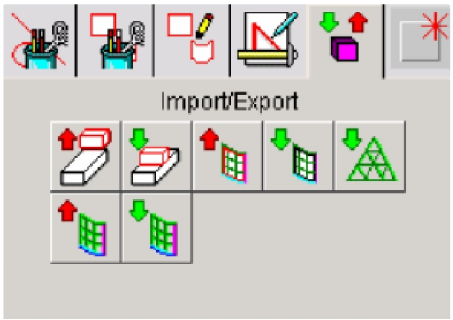


Рисунок 1.11 – Группа команд импорта и экспорта

В таблице 1.6 приведено описание команд импорта и экспорта.

Таблица 1.6 – Описание команд импорта и экспорта

Иконка	Название	Описание
	*Export Geom*	Сохраняет файл рестарта prefix.gmrst для части геометрии в текущем АКТИВНОМ наборе.
	*Import Geom*	Импортирует файл prefix.gmrst и присоединяет его геометрию к существующей геометрии.
	*Write Surface*	Добавляет в конец файла 'meshcast_tmp' в текущем рабочем каталоге все параметры поверхности с указанным номером.
	*Read Surface*	Создает новую поверхность, все параметры которой прочитаны из файла 'meshcast_tmp' в текущем рабочем каталоге. Этот файл должен быть предварительно создан командой WRITE SURFACE.
	*Read Surf Mesh*	Читает поверхностную сетку из файла meshcast.tmp.
	*Write Surface Desc*	Записывает описание указанной поверхности в файл 'meshcast_tmp' в текущем рабочем каталоге.
	*Read Surface Desc*	Читает описание поверхности, присутствующее в файле 'meshcast_tmp', в поверхность с указанным номером, заменяя ранее существующее описание поверхности.

Описание команд подменю **USER DEFINED**

Папка команд определяемых пользователем *User Defined (Пользовательские команды)*  первоначально пуста, но пользователь может добавлять часто используемые кнопки в эту папку.

1.1.4. ОписаниекомандменюREPAIR FACILITATION TOOLS

Команды меню REPAIR FACILITATION TOOLS позволяют оценивать геометрию, выполнять операции выбора, активизировать подгруппы геометрии и завершить построение поверхностной сетки (рисунок 1.12).

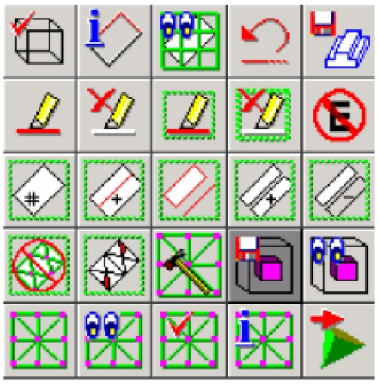


Рисунок 1.12 – Группа команд помощи восстановления

В таблице 1.7 приведено описание команд помощи восстановления.

Таблица 1.7 – Описание команд помощи восстановления

Иконка	Название	Описание
	*Check Geometry*	Идентифицирует поверхности и ребра в геометрии, соответствующие выбранным критериям. Команда IDENTIFY отображает номера поверхностей и ребер, индексы, длины ребер и комбинации этих методов, как результат выполнения требуемой идентификации.
	*Display*	Показывает указанные поверхность(и) геометрии в рабочем окне.
	*Undo*	Отменяет операций изменения геометрии или создания поверхностной сетки (показывает название последней операции, которая будет отменена при нажатии на эту кнопку).

Таблица 1.7 – Описание команд помощи восстановления (продолжение)

Иконка	Название	Описание
	*Store Geom*	Сохраняет файл рестарта с текущей геометрией.
	*Select*	Позволяет выбрать ребра в геометрии, отображенной в Рабочем Окне.
	*Deselect*	Отменяет выбор ребер в геометрии, отображенной в Рабочем Окне.
	*Select All*	Выбирает все ребра, видимые в Рабочем Окне.
	*Deselect All*	Снимает выделение всех выбранных ребер, видимых в Рабочем Окне.
	*Select Remaining*	Выделяет все ребра, которым не были назначены какие-либо значения длины при разбиении на конечно-элементную сетку.
	*Active*	Создает активный набор поверхностей / ребер, выбранных в геометрии отображенной в Рабочем Окне.
	*Append Adjacent*	Создает новый активный набор, который будет включать все поверхности, связанные с каждым выбранным ребром в текущем активном наборе.
	*Active Highlight*	Создает новый активный набор, который будет состоять только из ребер, которые были высвечены или выбраны в текущем активном наборе.
	*Append*	Создает новый активный набор, добавляя поверхности к текущему активному набору.
	*De-Active*	Создает новый активный набор, удаляя поверхности из текущего активного набора.
	*Active Unmeshed*	Создает активный набор из всех поверхностей / ребер неразбитых на конечные элементы.

Таблица 1.7 – Описание команд помощи восстановления (окончание)

Иконка	Название	Описание
	*Active Bad Mesh*	Создает активный набор поверхностей / ребер, которые содержат "плохие" элементы.
	*Store Enclosure*	Сохраняет все поверхности, которые формируют окружение.
	*Show Enclosure*	Показывает все поверхности окружения.
	*Generate Surface Mesh*	Генерирует поверхностную конечно-элементную сетку.
	*Show Mesh*	Показывает поверхностную конечно-элементную сетку модели.
	*Check Mesh*	Проверяет качество сгенерированной поверхностной конечно-элементной сетки.
	*Mesh Properties*	Показывает общее количество ребер, поверхностей, узлов и элементов, присутствующих в настоящее время в поверхностной конечно-элементной сетке.
	*Go: Volume Meshing*	После завершения корректировки геометрии и генерации поверхностной сетки эта команда сохраняет геометрию и поверхностную сетку, а затем генерирует объемной конечно-элементную сетку.

1.1.5 Описание команд меню SETS TABLE

Меню SETS TABLE (Таблица наборов) (рисунок 1.15) позволяет определять наборы ребер и поверхностей, которые могут быть использованы при корректировке геометрии для изоляции ее части или для назначения величины поверхностных элементов (в разных наборах эти значения могут отличаться), которые необходимо применить к ребрам и поверхностям при построении конечно-элементной сетки.

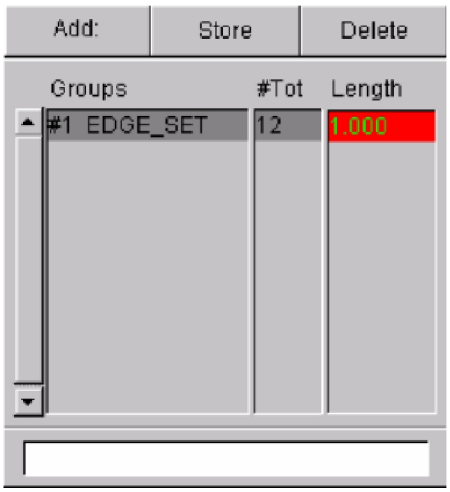


Рисунок 1.15 – Таблица наборов

В таблице 1.8 приведено описание команд таблица наборов.

Таблица 1.8 – Описание команд таблица наборов

Иконка	Название	Описание
Add:	*Add*	Позволяет добавлять наборы ребер и поверхностей
Store	*Store*	Назначает выбранные ребра или поверхности наборам ребер (EDGE_SET) или наборам поверхностей (SURFACE_SET).
Delete	*Delete*	Удаляет наборы ребер или поверхностей из таблицы.

1.1.6. Описание команд меню MESHING ENVIRONMENT

Когда вся геометрия построена, исправлена и разбита на поверхностную конечно-элементную сетку или открыт внешний файл с поверхностной сеткой, инициируется среда построения объемной сетки (MESHING ENVIRONMENT), в которой может быть отредактирована поверхностная сетка и сгенерирована объемная твердотельная сетка.

Описание команд подменю **MESH EDITING TOOLS**

Раздел редактора сетки (MeshEditingTools) содержит команды, которые позволяют пользователю работать с поверхностной сеткой.

Меню функций редактирования конечно-элементной сетки **-EDIT MESH**показано на рисунке1.15.

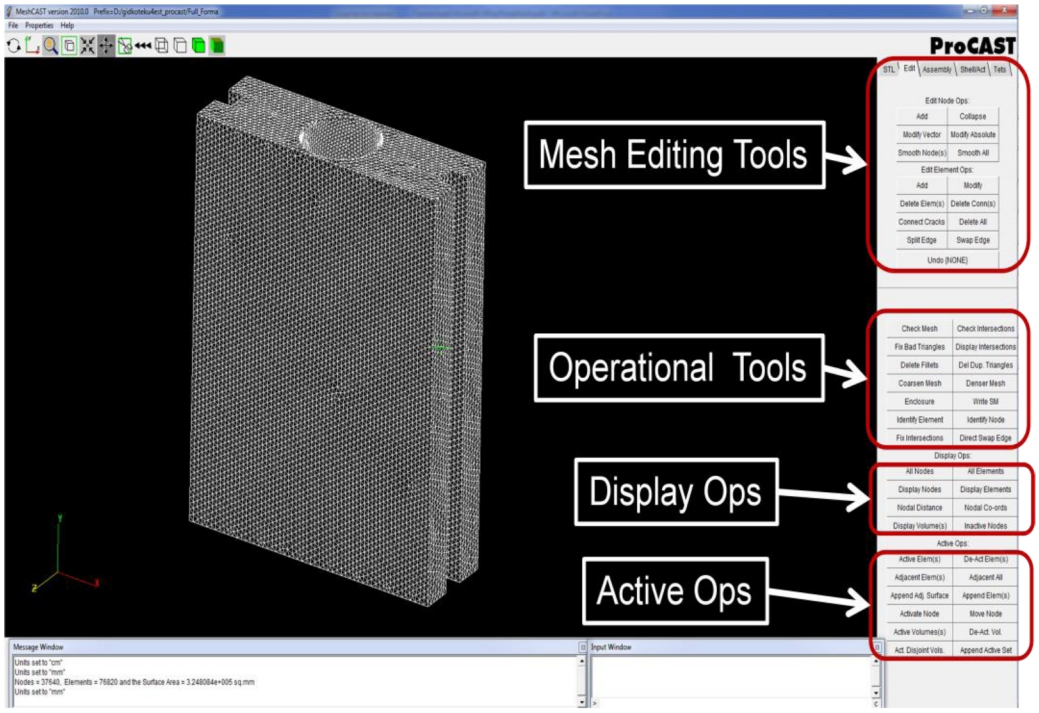


Рисунок 1.14 – Среда построения объемной сетки

Эти функции позволяют: перемещать узлы сетки, добавлять, удалять и изменять узлы и элементы.

Раздел *Edit Nodes Ops* позволяет выполняет различные редактирующие функции над узлами конечно-элементной сетки.

В таблице 1.9 приведено описание команд раздела *Edit Nodes Ops*.

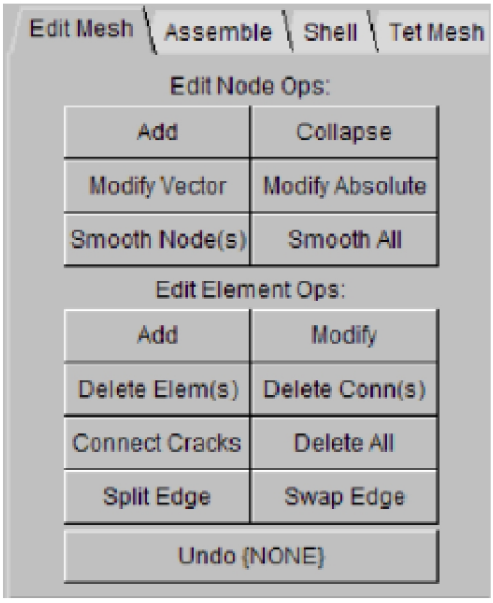


Рисунок 1.15 – Меню функций редактирования конечно-элементной сетки

Таблица 1.9 – Описание команд раздела *Edit Nodes Ops*

Иконка	Название	Описание
Add	*Add Node*	Добавляет узлы при помощи задания их координат.
Modify Vector	*Modify Vector*	Передвигает узлы в определенном направлении (вдоль вектора).
Smooth Node(s)	*Smooth Node(s)*	Выравнивает (сглаживает) заданные узлы для того, чтобы повысить их качество.
Smooth All	*Smooth All*	Сглаживает все узлы, отображаемые в текущем активном наборе, для повышения их качества.

Раздел*EditElementOps* позволяет выполнять различные функции по редактированию элементов.

В таблице 1.10 приведено описание команд раздела *EditElementOps*.

Таблица 1.10 – Описание команд раздела *Edit Element Ops*

Иконка	Название	Описание
	*Add Element*	Добавляет элементы при помощи задания 3-х узлов.
	*Modify*	Редактирует элементы путем выбора номера элемента и 3-х новых номеров узлов.
	*Delete Elem(s)*	Удаляет заданные элементы.
	*Delete Conn(s)*	Удаляет все элементы, смежные с заданным узлом.
	*Connect Cracks*	Соединяет разрывы в поверхностной сетке.
	*Delete All*	Удаляет все элементы, которые в настоящее время активны в рабочем окне.
	*Undo*	Отменяет выполнение последней операции во время редактирования сетки.

***ASSEMBLE**/Mesh Assembly (Сборка конечно-элементных сеток)* – Меню команд, которые позволяют задавать и генерировать оболочковую сетку. В модуле MeshCAST возможны два варианта:

1. "Surface Mesh Assembly" (сборка поверхностных сеток) позволяет собрать автоматически или полуавтоматически две поверхностные конечно-элементные сетки, которые имеют общие поверхности. Это означает, что такие сетки соприкасаются некоторыми поверхностями и алгоритм сборки настроен на поиск и объединение этих общих поверхностей. Этот алгоритм не допускает наличия больших разрывов или наложения поверхностных сеток.

В зависимости от качества обеих поверхностных сеток и их близости алгоритм сборки может быть либо полностью автоматическим, либо

требовать ручной работы. Поэтому этот вариант может использоваться только для простых сборок.

2. "Boolean Assembly" (сборка булевыми операциями) позволяет собрать две взаимно пересекающиеся поверхностные сетки. Алгоритм автоматически распознает пересечения и переразбивает локальную зону на сетку для создания единой общей поверхностной сетки. Этот алгоритм полностью автоматический. Результирующая сетка может в ряде случаев иметь мелкие дефекты, которые потребуют дальнейшего небольшого редактирования полученной сетки. В отличие от первого варианта "Boolean Assembly" позволяет осуществлять сборку не прилегающих плотно сеток.

SHELL *(Оболочка)* – Меню команд, которые позволяют задавать и генерировать оболочковую сетку (рисунок 1.16).

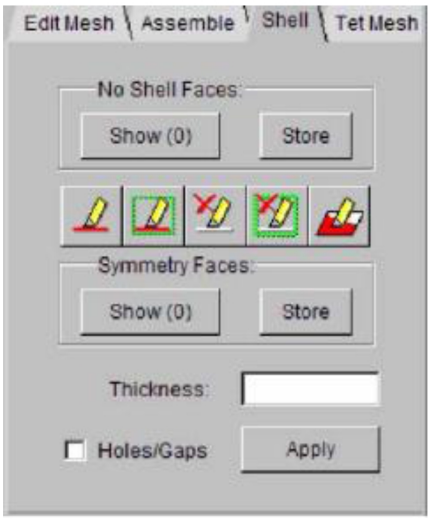


Рисунок 1.16 – Меню команд для задания и генерирования оболочковой сетки

Раздел *NoShellFaces (Нет оболочки)* – Задает регионы, где оболочковая сетка генерироваться не будет.

Раздел *Symmetry Faces (Симметричные поверхности)* – Задает регионы, в которых сетка генерироваться не будет.

Раздел *Element Selection (Выбор элементов)*– Задают поверхности, которые будут исключены из процесса генерации сетки (рисунок 1.17).

В таблице 1.11 приведено описание команд раздела выбора элементов.

Переключатель *Holes/Gaps (Отверстия и карманы)* – Определяет, будут ли исключены отверстия и карманы при генерации оболочковой сетки.

Комада *Apply (Применить)* – Выполняет процесс генерации оболочковой сетки с помощью использования информации, заданной в папке SHELL.

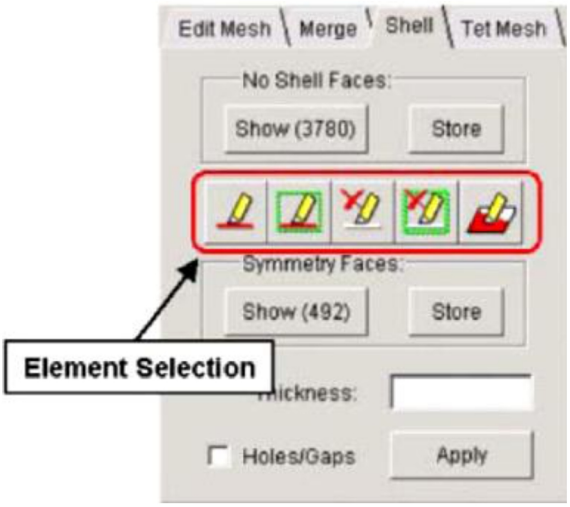


Рисунок 1.17 – Раздел командля выбора элементов

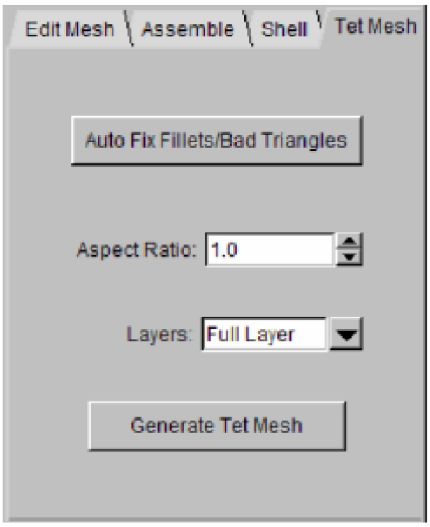


Рисунок 1.18 – Меню команд для генерации объемной конечно-элементной сетки

Таблица 1.11 – Описание команд раздела выбора элементов

Иконка	Название	Описание
	*Select*	Выбор элементов поверхности, которые используется для оболочковой сетки.
	*Select All*	Выбор всех элементов поверхности в рабочем окне, которые используется для генерации оболочковой сетки.
	*Deselect*	Отменяет выбор поверхностных элементов, которые используются для генерации оболочковой сетки.
	*Deselect All*	Отменяет выбор всех поверхностных элементов в рабочем окне, которые используются для генерации оболочковой сетки.
	*Select Surface*	Выбор всех элементов на поверхности путем задания определенного угла отклонения.

TET MESH *(Объемная сетка)* – Меню команд для генерации объемной конечно-элементной сетки (рисунок 1.18).

•*Auto Fix Bad Triangles (Устранение плохих треугольников)* – Устраняет все "плохие" треугольники в поверхностной сетке. Эта операция выполняется полностью в автоматическом режиме и не требует ввода никакой дополнительной информации. В процессе будут выполнены следующие операции над сеткой:

- ✓ удаление дублированных треугольных элементов;
- ✓ удаление треугольных элементов с углом более 165° или менее 6°;
- ✓ удаление скруглений с большим отношением сторон и "плохими" треугольными элементами.

•*Aspect Ratio (Отношение сторон)* – Позволяет изменять длину ребра тетраэдрального элемента.

•*Layers (Слои)* – Настройки этой команды контролируют добавление внутренних узлов во время генерации конечно-элементной сетки.

•*Generate Tet Mesh (Создать объемную сетку)* – Генерирует 3-х мерную сетку при помощи поверхностной сетки и на основе опций, заданных в папке TET MESH.

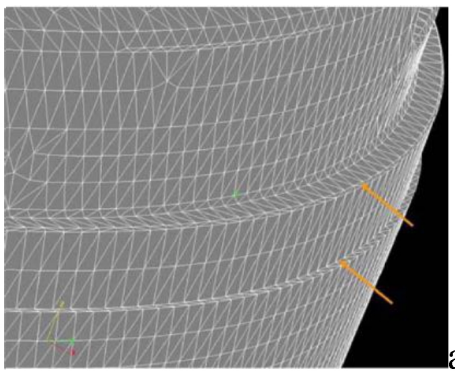
Описание команд подменю **OPERATIONAL TOOLS**

Меню *OPERATIONAL TOOLS*– Содержит команды, которые используются для проверки и выполнения различных операций (рисунок 19). Описание основных команд представлено в таблице 1.12.

Пример выполнения команды *Delete Fillets* приведен на рисунке 1.20.

Check Mesh	Check Intersections
Fix Bad Triangles	Display Intersections
Delete Fillets	Del Dup. Triangles
Coarsen Mesh	Denser Mesh
Enclosure	Write SM
Identify Element	Identify Node
Fix Intersections	Direct Swap Edge

Рисунок 1.19 – Меню оперативных инструментов


а)

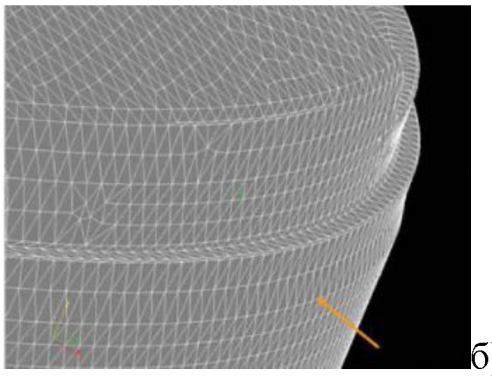

б)

Рисунок 1.20 – Удаление скруглений с помощью команды Delete Fillets

Таблица 1.12 – Описание основных команд меню оперативных инструментов

Иконка	Название	Описание
Check Mesh	*Check Mesh*	Проверка качества поверхностной сетки.
Check Intersections	*Check Intersections*	Проверка пересечений в поверхностной сетке.
Delete Fillets	*Delete Fillets*	Удаляет скругления (или часть скруглений).
Del Dup. Triangles	*Del Dup. Triangles*	Удаляет все дублирующие элементы в поверхностной сетке.
Denser Mesh	*Denser Mesh*	Повышает плотность поверхностной сетки за счет увеличения количества элементов.
Coarsen Mesh	*Coarsen Mesh*	Позволяет сделать поверхностную сетку более грубой путем снижения плотности элементов.
Enclosure	*Enclosure*	Отображает ограждающую сетку (enclosure mesh).
Write SM	*Write SM*	Переписывает поверхностную сетку из текущей активной сетки.
Identify Element	*Identify Element*	Определяет номера выбранных элементов.
Identify Node	*Identify Node*	Определяет номера выбранных узлов.

Меню *DISPLAY OPS (МЕНЮ ОТОБРАЖЕНИЯ)* – Содержит различные команды, которые используются для отображения узлов и элементов (рисунок 1.21). Описание основных команд представлено в таблице 1.13.

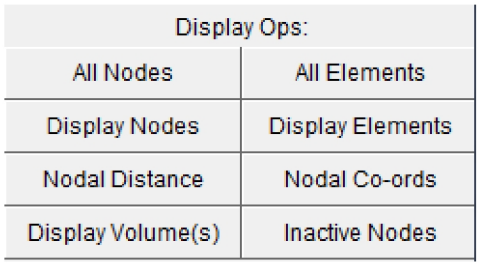


Рисунок 1.21 – Меню команд отображения узлов и элементов

Таблица 1.13 – Описание основных команд меню отображения узлов и элементов

Иконка	Название	Описание
All Nodes	*All Nodes*	Отображает все узлы поверхностной сетки, которые находятся в текущем активномнаборе.
All Elements	*All Elements*	Отображает все элементы поверхностной сетки, которые находятся в текущем активном наборе.
Display Nodes	*Display Nodes*	Показывает положение заданных узлов.
Display Elements	*Display Elements*	Показывает положение заданных элементов.
Nodal Distance	*Nodal Distance*	Отображает расстояние между двумя заданными узлами.
Nodal Co-ords	*Nodal Co-ords*	Показывает узловые координаты всех заданных узлов.

Меню *ACTIVE OPS (МЕНЮ АКТИВИЗАЦИИ)* – Содержит командные кнопки, которые используются для активизации узлов и элементов (рисунок 22). Описание основных команд представлено в таблице 14.

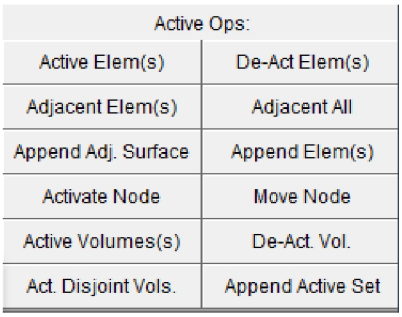


Рисунок 1.22 – Меню активации узлов и элементов

Таблица 1.14 – Описание основных команд меню активации узлов и элементов

Иконка	Название	Описание
Active Elem(s)	*Active Elem(s)*	Создает активный набор элементов из поверхностной сетки.
De-Act Elem(s)	*De-Act Elem(s)*	Делает неактивными выбранные элементы в текущем окне.
Adjacent Elem(s)	*Adjacent Elem(s)*	Добавляет все элементы, которые соединяются с заданным элементом в активном наборе.
Adjacent All	*Adjacent All*	Добавляет все элементы, которые соединяются с элементами, находящимися в текущем наборе.
Append Elem(s)	*Append Elem(s)*	Добавляет все заданные элементы в активный набор.
Append Adj. Surface	*Append Adj. Surface*	Добавляет целую поверхностную сетку, соединенную с заданным элементом.
Activate Node	*Activate Node*	Эта функция активизирует все элементы, соединенные с заданным узлом.
Move Node	*Move Node*	Для перемещения выбранного узла в направлениях X, Y и Z необходимо использовать три кнопки мыши: левую, среднюю и правую, соответственно.

После разбиения модели на трехмерную конечно-элементную сетку программа автоматически запускает *Quality Checking Environment (Инструменты проверки сетки)* для анализа полученной объемной сетки и ее редактирования. Эта опция проверяет, сглаживает и оптимизирует ее.

1.2. Общие сведения и интерфейс модуля PreCAST

Препроцессор запускается при помощи кнопки "PreCAST", которая расположена в окне ProCASTmanager(рисунок 1.23).

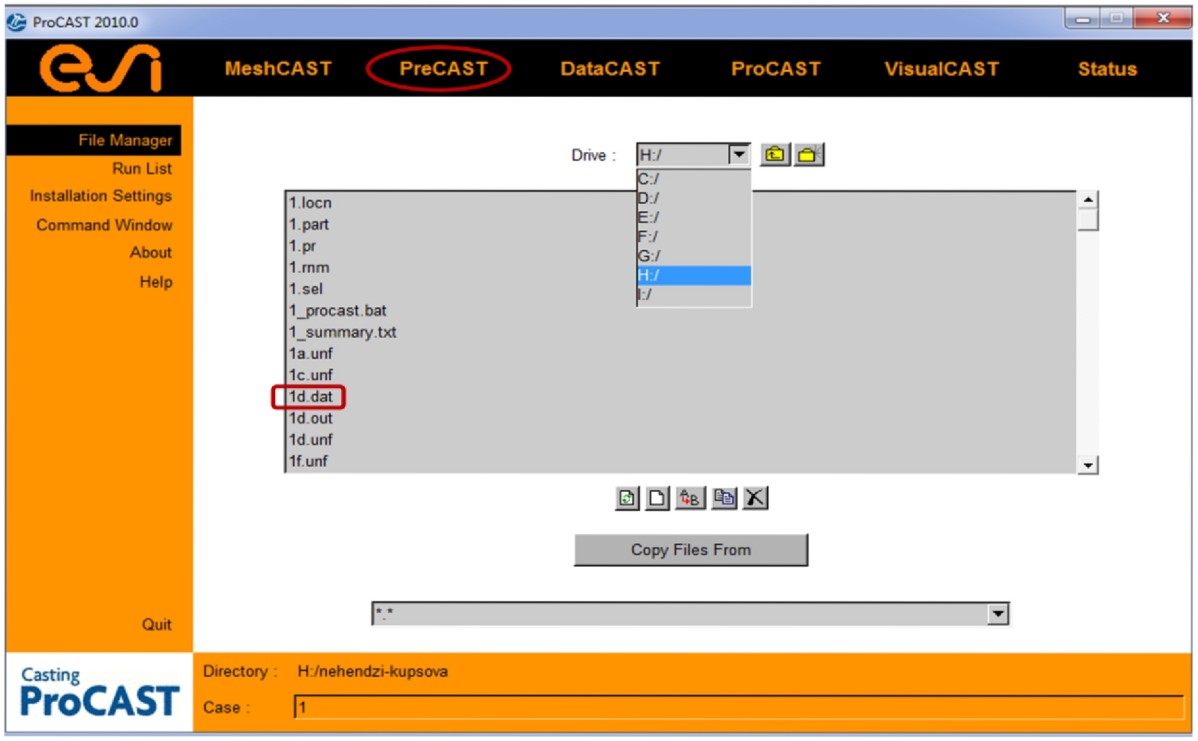


Рисунок 1/23 – Запуск модуля PreCAST из менеджера ProCAST

Во вкладке Drive необходимо указать путь к рабочей директории. Если уже существует файл объемной сетки case.mesh или файл исходных данных типа d.dat (cased.dat), при запуске препроцессора будут автоматически загружены данные, касающиеся задачи с именем Case. В данном случае имя расчетного файла "1".

После загрузки задачи появляется окно с информацией о геометрической модели: число материалов, количество узлов и элементов сетки, а также габаритные размеры модели (рисунок 24). С этого момента препроцессор готов к вводу данных.

Меню, расположенное в верхней части окна, содержит 9 разделов (рисунок 1.25), позволяющих выполнить все операции по формулировке задачи: File (Файл), Geometry (Геометрия), Materials (Материалы), Interface (Границы между телами), Boundary Conditions (Граничные условия), Process (Процесс), Initial Conditions (Начальные условия), Run Parameters (Параметры вычислений), Inverse (Обратная задача), Help (Помощь).

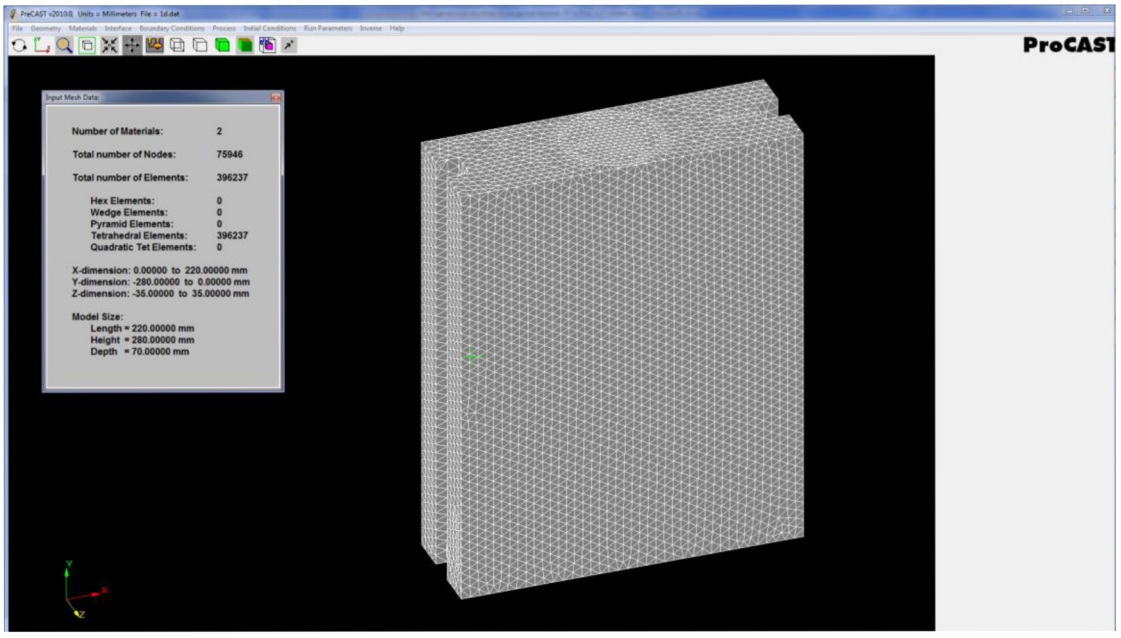


Рисунок 1.24 – Окно PreCAST с загруженной моделью и информацией о ней

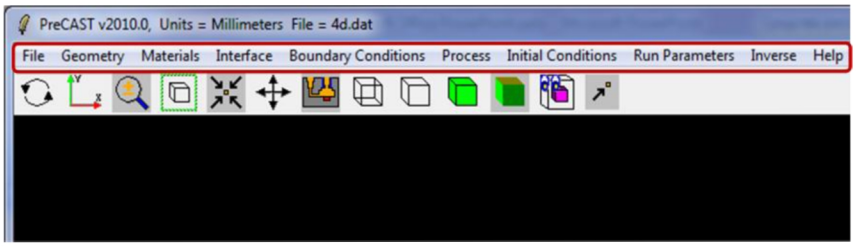


Рисунок 1.25 – Меню модуля PreCAST

Меню **File** (рисунок 1.26) позволяет открыть, экспортировать, сохранить, оптимизировать (для увеличения скорости счета) модель. С помощью этого меню можно также выйти из препроцессора.

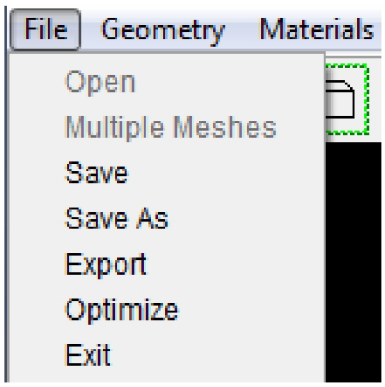


Рисунок 1.26 – Меню File

В меню **Geometry** (рисунок 1.27) могут быть определены плоскости симметрии модели и характеристики виртуальной формы. Кроме того, может быть проведена проверка МКЭ сетки и определены объемы всех областей модели.

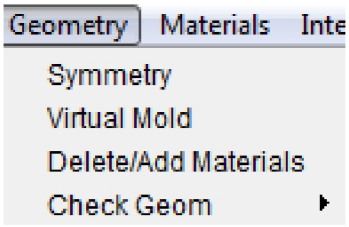


Рисунок 1.27 – Меню Geometry

В меню **Materials** (рисунок 1.28) могут быть определены характеристики каждой области (каждого материала). Кроме свойств материала здесь устанавливается тип области (отливка, форма, фильтр и др.), а также устанавливается флаг, определяющий, заполнена эта область данным материалом или нет к моменту начала вычислений (это необходимо для моделирования процесса заполнения формы).

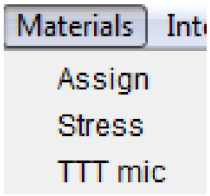


Рисунок 1.28 – Меню Material

Меню **Interface** не имеет подразделов. Оно открывает окно, которое позволяет определить условия взаимодействия различных материалов, например, коэффициент теплопередачи.

Меню **Boundary conditions** (рисунок 1.29) позволяет определить все условия взаимодействия материалов с окружающим миром (т.е условия на внешних поверхностях материалов), такие как внешнее охлаждение, скорости на поверхностях модели, необходимые для моделирования течения металла, перемещения или их отсутствие при моделировании напряженного состояния, т.д.

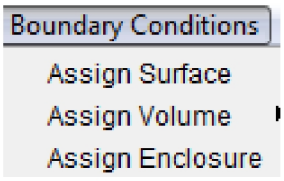


Рисунок 1.29 – Меню Boundary conditions

Меню **Process** (рисунок 1.30) позволяет определить вектор силы тяжести, назначить режимы перемещения различным областям модели или окружающим телам.

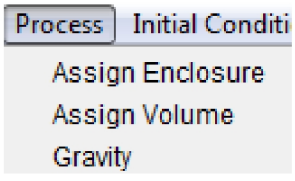


Рисунок 1.30 – Меню Process

Начальные температуры для всех материалов определяются в меню **Initial conditions** (рисунок 1.31).

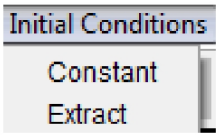


Рисунок1.31 – МенюInitialconditions

Меню Run Parameters, какименюHelp, не имеет подменю. Все параметры вычислительного процесса определяются в окне, которое появляется при нажатии кнопки Run Parameters.

С помощью меню Help осуществляется оперативный доступ к описанию программы и руководству пользователя.

Ниже меню расположены иконки команд, позволяющие осуществлять ряд действий, необходимых для представления модели на экране монитора. Основные функции этих команды совпадают с командами модуля MeshCAST, описание которых приводится в разделе 2.1.2. Описание же несовпадающих команд приведено в таблице 1.15.

Таблица 1.15 – Описание команд средств отображения модели в модуле PreCAST

Иконка	Название	Описание
	*Active Materials*	Выбор материала (или области)
	*Display Enclosure/Casting*	Отображение границ формы (для радиационной модели)
	*Pick Node*	Показывает номер и положение выбранного узла конечно-элементной сетки.

1.3. Сведения о запуске задачи на счет

Как только завершена подготовка в PreCAST, необходимо выполнить две операции для выполнения расчета:

1. Запустить компилятор DataCAST.

DataCAST вызывается кнопкой «DataCAST» Программного менеджера ProCAST (рисунок 1.32). DataCAST конвертирует входные данные, сохраненные в коде ASCII, в файл prefixd.dat в двоичном коде, готовом для расчета. DataCAST также стирает любые ранее существовавшие файлы результата (если стоит галочка напротив Update option (-u)) и готовит новый файл. Это значит, что после выполнения DataCAST, все предыдущие результаты будут стерты. Также в DataCAST выполняется проверка ошибок.

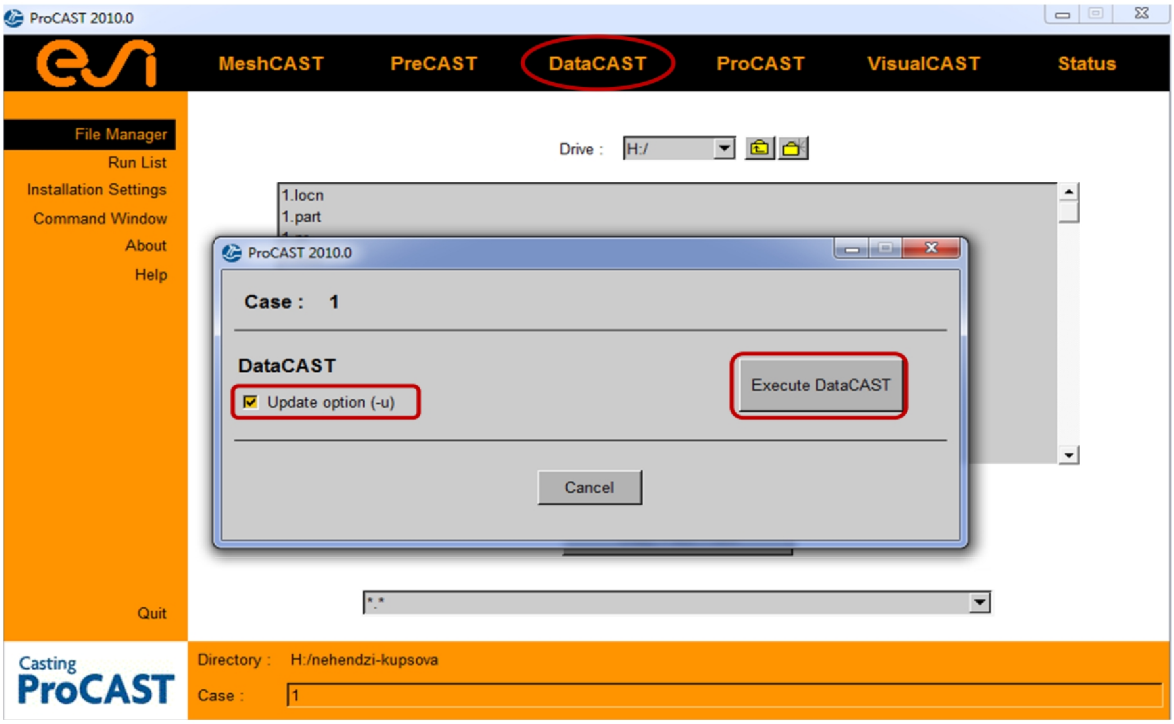


Рисунок 1.32 – Запуск задачи на счет в модуле DataCAST

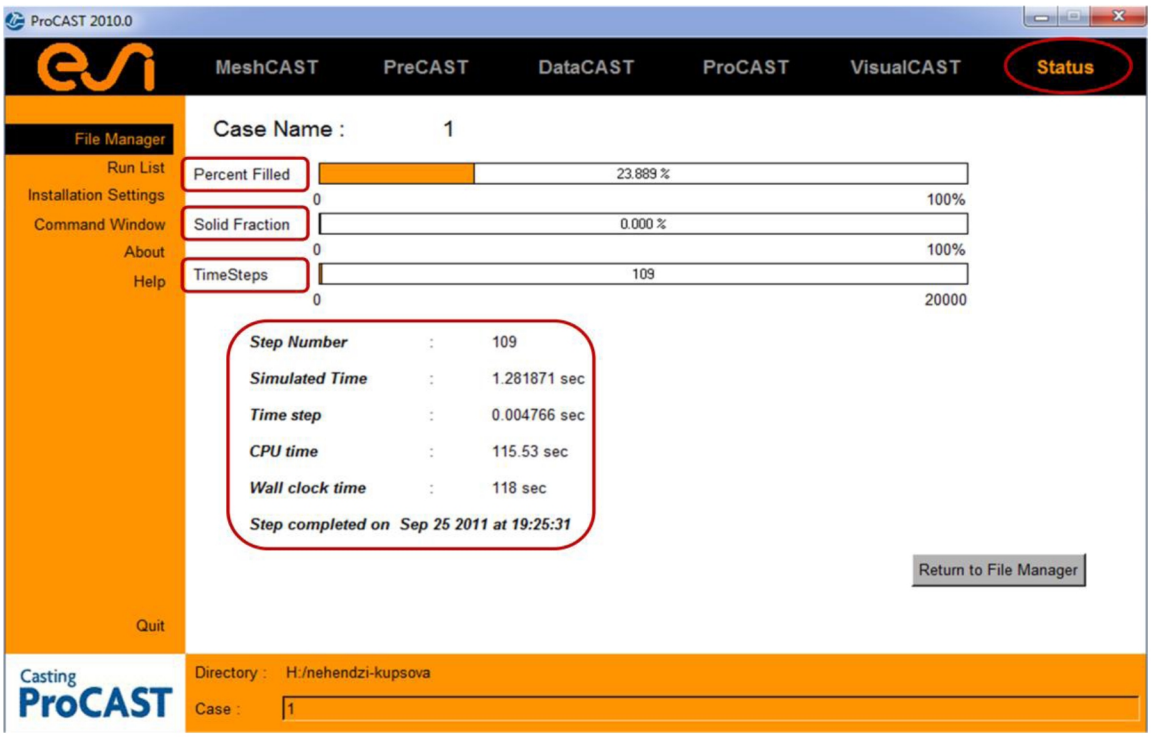


Рисунок 1.33 – Статус выполняемого расчета

2. Запустить решатель ProCAST.

ProCAST запускает решатель. Он не отображает никаких сообщений, кроме ситуации, когда решатель останавливается по неожиданной причине. ProCAST вызывается кнопкой «ProCAST» Программного менеджера. Во время расчета можно контролировать такие важные параметры как: процент заполнение формы (Percent Filled), процент твердой фазы (Solid Fraction) и количество шагов по времени. Для этого необходимо использовать кнопку "Status" Менеджера ProCAST (рисунок 1.33). Здесь же представлен целый блок не менне полезной информации, например, номер выполненного шага расчета, время выполнения расчета и др.

Кроме того, в процессе расчета можно просматривать уже полученные результаты моделирования запустив постпроцессор VisualCAST (рисунок 34).

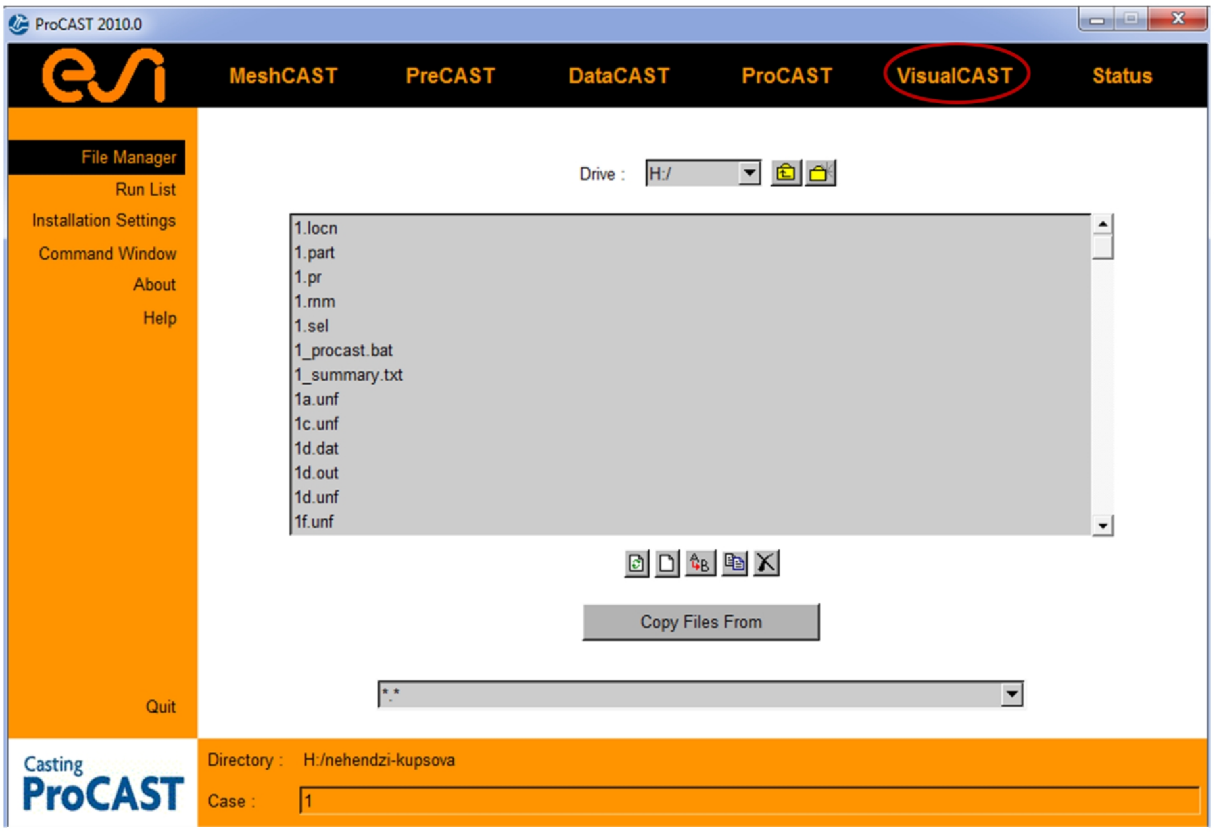


Рисунок 1.34 – Запуск постпроцессора

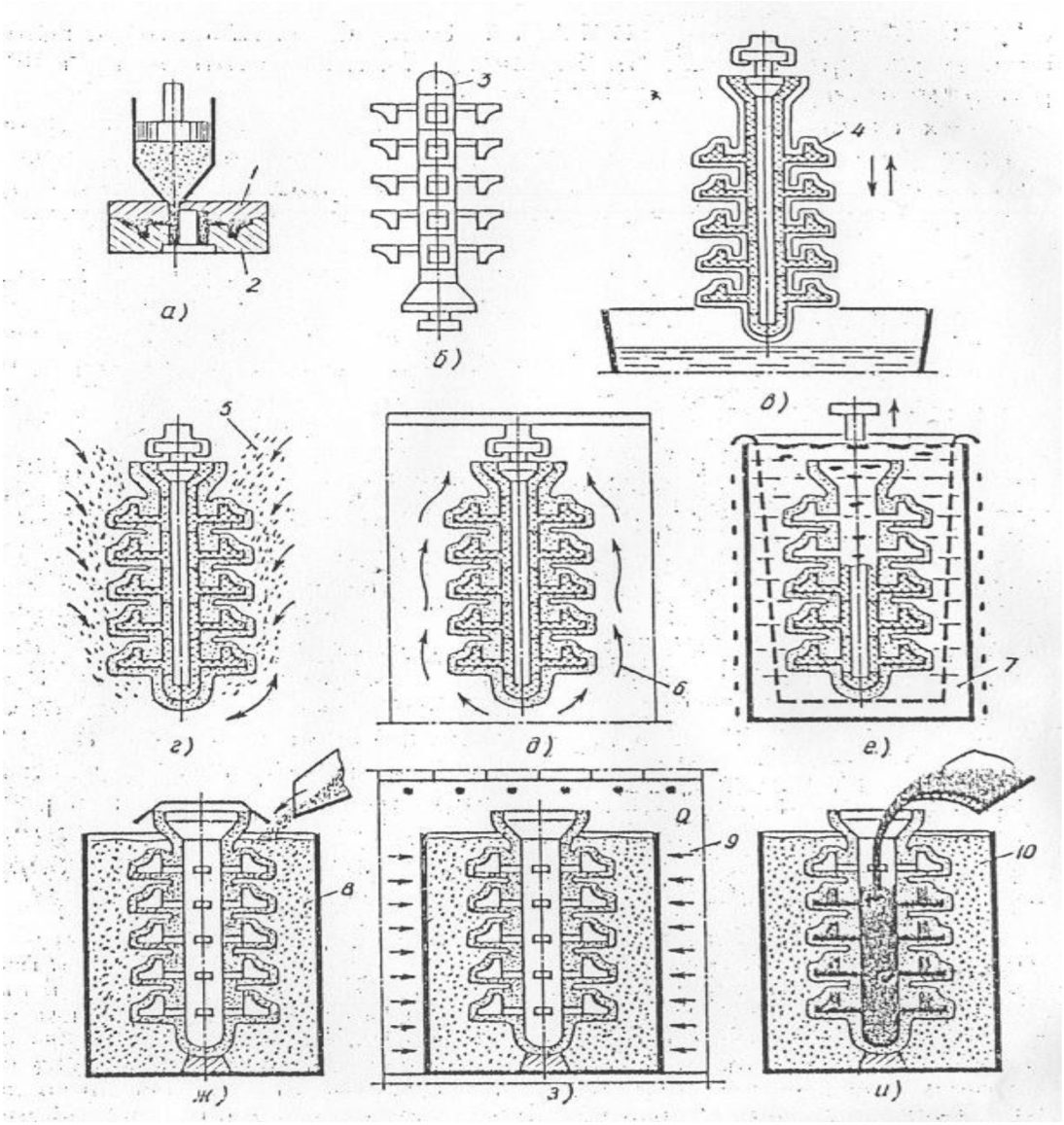
2. МОДЕЛИРОВАНИЕ ЛИТЬЯ ПО ВЫПЛОВЛЯЕМЫМ МОДЕЛЯМ

2.1.Общие сведения о современных технологиях, применяемых для литья по выплавляемым моделям

Сущность литья по выплавляемым моделям заключается в том, что для получения отливок применяются разовые, точные неразъемные, керамические оболочковые формы, получаемые по разовым моделям с использованием жидких формовочных смесей [6]. Перед заливкой расплава модель удаляется из формы выплавлением, выжиганием, растворением или испарением. Для удаления остатков модели и упрочнения форма нагревается до высоких температур. Прокалка формы перед заливкой практически исключает ее газотворность и улучшает заполняемость расплавом [25].

Основные операции технологического процесса. Модель или звено моделей *2* изготовляют в разъемной пресс-форме *1*, рабочая полость которой имеет конфигурацию и размеры отливки с припусками на усадку (модельного состава и материала отливки) и обработку резанием (рисунок 2.1, а). Модель изготовляют из материалов, имеющих невысокую температуру плавления (воск, стеарин, парафин), способных растворяться (карбамид) или сгорать без образования твердых остатков (полистирол). Готовые модели или звенья моделей собирают в блоки *3* (рисунок 2.1, б) имеющие модели элементов литниковой системы из того же материала, что и модель. Блок моделей состоит из звеньев, центральная часть которых образует модели питателей и стояка [12]. Модели чаши и нижней части стояка изготовляют отдельно и устанавливают в блок при его сборке. Блок моделей погружают в емкость с жидкой формовочной смесью — суспензией для оболочковых форм, состоящей из пылевидного огнеупорного материала, например пылевидного кварца или электрокорунда, и связующего (рисунок2.1, б). В результате на поверхности модели образуется тонкий (менее 1 мм) слой *4* суспензии. Для упрочнения этого слоя, увеличения его толщины на него наносят слои огнеупорного зернистого материала *5* (мелкий кварцевый песок, электрокорунд, зернистый шамот) (рисунок 2.1, г).

Операции нанесения суспензии и обсыпки повторяют до получения на модели оболочки требуемой толщины (3…10 слоев) [8].



1 - пресс-форма; 2 – модель; 3 – блок моделей отливок и литниковой системы; 4 – слой суспензии; 5 – огнеупорный зернистый материал; 6 – пары аммиака; 7 – горячая вода; 8 – опорный материал; 9 – печь; 10 – прокаленная форма.

а - запрессовка модельного состава в пресс-форму; б - сборка блока; в - нанесение суспензии; г - обсыпка; д - сушка; е - удаление модели; ж - засыпка опорным материалом; з - прокалка; и - заливка формы расплавом.

Рисунок 2.1 – Последовательность изготовления многослойной оболочковой формы по выплавляемым моделям

Каждый слой покрытия высушивают на воздухе или в парах аммиака *6*, что зависит от связующего (рисунок 2.1, д). После сушки оболочковой формы модель удаляют из нее выплавленным, растворением, выжиганием или испарением. На рисунок 2.1, *е*. показан процесс удаления выплавляемой модели в горячей воде 7 ($T_{\text{воды}}$ = 100 ^0C). Так получают многослойную оболочковую форму по выплавляемой модели [23]. Для упрочнения перед заливкой оболочковую форму помещают в металлический контейнер и засыпают огнеупорным материалом *8* (кварцевым песком, мелким боем использованных оболочковых форм) (рисунок 2.1, ж). Для удаления остатков моделей из формы и упрочнения связующего контейнер с оболочковой формой помещают в печь *9* для прокаливания (рисунок 2.1, з). Форму прокаливают при температуре 900…1100 ^{0}С. Прокаленную форму *10* извлекают из печи и заливают расплавом (рисунок 2.1, м). После затвердевания и охлаждения отливки до заданной температуры форму выбивают, отливки очищают от остатков керамики и отрезают от них литники [21].

Во многих случаях оболочки прокаливают в печи до засыпки огнеупорным материалом, а затем для упрочнения их засыпают предварительно нагретым огнеупорным материалом. Это позволят сократить продолжительность прокаливания формы перед заливкой и сократить энергозатраты. Так, например, организуется технологический процесс на автоматических линиях для массового производства отливок [13].

Малая шероховатость поверхности формы при достаточно высокой огнеупорности и химической инертности материала позволяет получать отливки с поверхностью высокого качества. После очистки от остатков оболочковой формы шероховатость поверхности отливок может быть от R_z= 20 мкм до R_a = 1,25 мкм [29].

Отсутствие разъема формы, использование для изготовления моделей материалов, позволяющих не разбирать форму для их удаления, высокая огнеупорность материалов формы, нагрев ее до высоких температур перед

заливкой и др. улучшает заполняемость, дает возможность получать отливки сложнейшей конфигурации, максимально приближенной или соответствующей конфигурации готовой детали, практически из всех известных сплавов [5]. Коэффициент точности отливок по массе (КТМ) может достигать 0,85…0,95, что резко сокращает объемы обработки резанием и отходы металла в стружку. Точность отливок может соответствовать 2…5 классам точности по ГОСТ 26645-85, а припуски на обработку резанием для отливок размером до 50 мм обычно не превышают 1,0 мм, а размером до 500 мм составляют около 3,0 мм [4].

Литье по выплавляемым моделям обладает следующими особенностями:

1. Возможность изготовления практически из любых сплавов отливок сложной конфигурации, тонкостенных, с малой шероховатостью поверхности, высоким коэффициентом точности по массе, минимальными припусками на обработку резанием, с резким сокращением отходов металла в стружку.

2. Возможность создания сложных конструкций, объединяющих несколько деталей в один узел, что упрощает технологию изготовления машин и приборов.

3. Возможность экономически выгодного осуществления процесса в единичном (опытном) и серийном производствах, что важно при создании новых машин и приборов.

4. Сокращение расхода формовочных материалов для изготовленияотливок, снижение материалоемкости производства.

5. Улучшение условий труда и уменьшение вредного воздействия литейного процесса на окружающую среду [28].

Наряду с преимуществами способ обладает и следующими недостатками:

- процесс изготовления формы многооперационный, трудоемкий и длительный;
- большое число технологических факторов, влияющих на качество

формы и отливки, и соответственно сложность управления качеством;

- большая номенклатура материалов, используемых для получения формы (материалы для моделей, суспензии, обсыпки блоков, опорные материалы);
- сложность манипуляторных операций изготовления моделей и форм, автоматизации этих операций;
- повышенный расход металла на литники и поэтому невысокий технологический выход годного (ТВГ) [9].

Указанные преимущества и недостатки определяют эффективную область использования литья в оболочковые формы по выплавляемым моделям:

- изготовление отливок, максимально приближающихся по конфигурации к готовой детали с целью снижения трудоемкости обработки труднообрабатываемых металлов и сплавов резанием, сократить использование обработки давлением труднодеформируемых металлов и сплавов, замены трудоемких операций сварки или пайки для повышения жесткости, герметичности, надежности конструкций деталей и узлов;
- изготовление тонкостенных крупногабаритных отливок повышенной точности с целью снижения массы конструкции при повышении ее прочности, герметичности и других эксплуатационных свойств;
- изготовление отливок повышенной точности из сплавов с особыми свойствами и структурой [30].

Производство отливок по выплавляемым моделям находит широкое применение в различных отраслях машиностроения и в приборостроении [19].

Использование литья в оболочковые формы для получения заготовок деталей машин взамен изготовления их из кованых заготовок или проката, позволяет в среднем уменьшить отход металла в стружку на 34…90%, снизить трудоемкость обработки резанием на 25…85%, себестоимость изготовления деталей на 20…80% [7].

Сцелью экономии материальных ресурсов на доводку литейной оснастки широко применимо моделирование. В случае изготовления детали литьем по выплавляемым моделям используют следующий алгоритм:

1. На основании литейных чертежей изделия строится CAD модель отливки (рисунок 2.2), а в соответствующих модулях ProCAST (рисунок 2.3) генерируется конечно-элементная модель и подготавливаются данные для расчета.



Рисунок 2.2 – Построение CAD модели детали завихритель II контура в программном продукте SIEMENS UGS PLM NX V 7.5

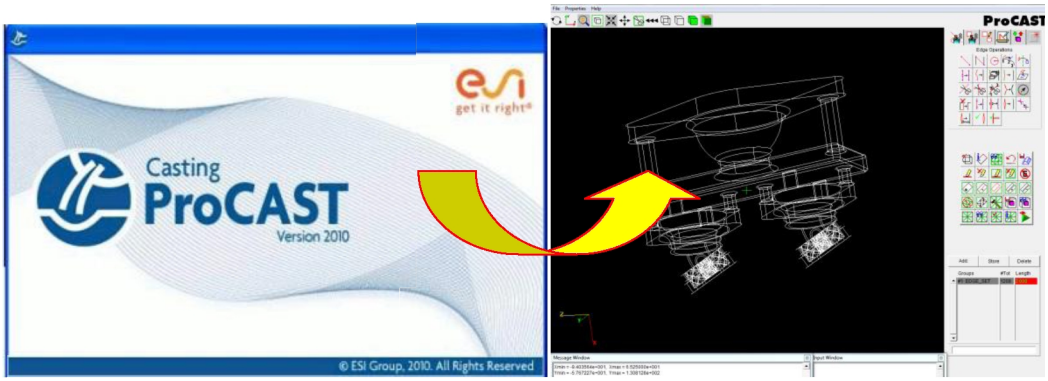


Рисунок 2.3 – Виртуальное моделирование технологического процесса заливки детали завихритель II контура в программном продукте ProCast

После произведенного расчета и анализа визуализированного отчета результатов выполняется оптимизация, которая состоит в поиске наилучших параметров геометрии и процесса. Итоги этапа виртуального моделирования

являются основополагающими для реальноготехнологического цикла производства детали.

2. Изготовление мастер-модели детали завихритель II контура с помощью 3D-принтера ObjetEden 350, использующего технологию многоструйного нанесения материала и отверждающего слоя УФ-лампой (рисунок 2.4).



Рисунок 2.4 – Изготовление мастер-модели детали

3. Создание силиконовых эластичных пресс-форм пополучаемой мастер-модели с использованием системы для вакуумного литья полимеров в эластичные формы MTT C4/05 (рисунок 2.5).



Рисунок 2.5 – Создание силиконовых эластичных пресс-форм

4. Изготовление оболочковых форм из сыпучих огнеупорных формовочных составов (рисунок 2.6).



Рисунок 2.6 – Готовые оболочковые формы

2.2. Последовательность действий при моделировании

Рассмотрим на примере деталиЗавихритель последовательность действий при моделировании. Форсунка предназначена для впрыска и поджига горючего, устанавливается в камере сгорания газотурбинного двигателя (ГТД) в количестве 36 штук(рисунок 2.7).

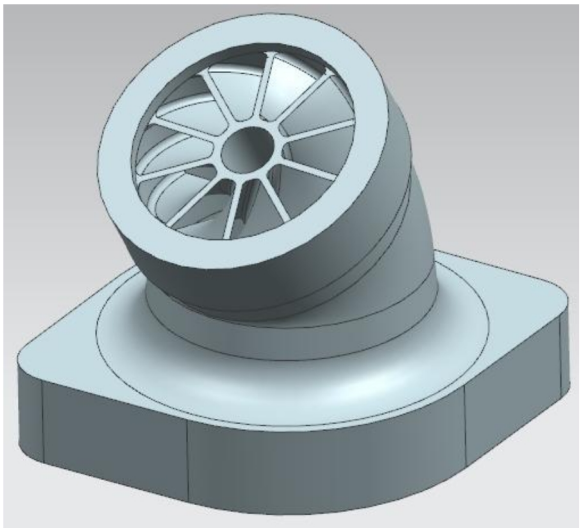


Рисунок 2.7 – CAD модель завихрителя II контура

2.2.1. Создание геометрической модели отливки

Рассмотрим экспериментальный технологический процесс заливки на примере завихрителя.

Геометрическая модель литниковой системы может быть построена в любой CAD-системе. В нашем случае, можно использовать программу SIEMENS UGS PLM NX V 7.5. 3-D модель заготовки с литниково-питающей системой (ЛПС) представлена на рисунке 2.8.

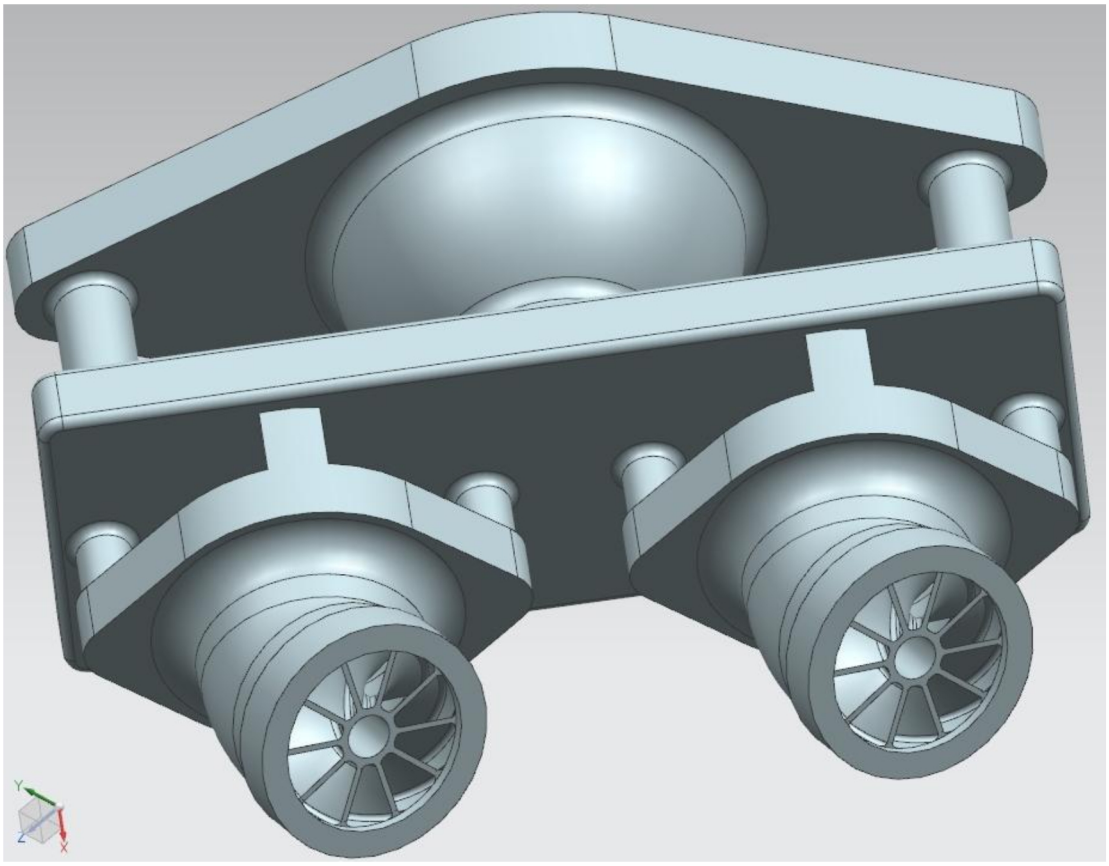


Рисунок 2.8 – 3D-модель заготовки с литниковой системой

Далее модель отливки экспортируется в текстовый файл с именем Zavichritel формата Parasolid с внутренним расширением *.x_t (рисунок 9). Желательно экспорт модели производить в корневую папку диска C:\. Необходимо следить, чтобы все папки с расчетными файлами имели

латинские имена. В нашем случае создадим папку с именем Model. Таким образом, полный путь к файлам выглядит следующим образом: C:\Model.

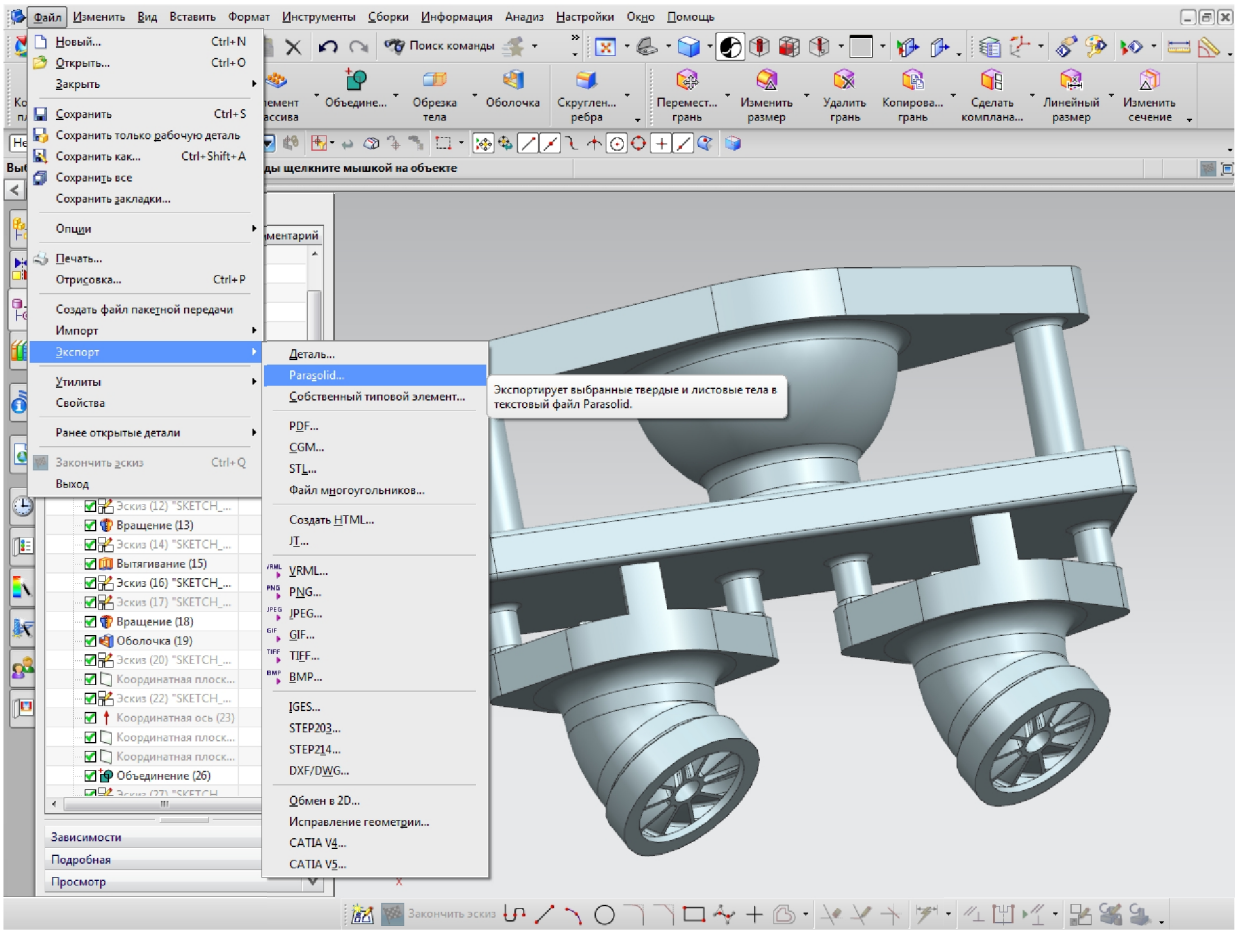


Рисунок 2.9 – Экспорт 3D-модели отливки в формат Parasolid

2.2.2 Создание поверхностной сетки в модуле MechCast

MeshCAST имеет интерфейс с различными форматами CAD приложений. Дополнительно к собственно файлам ProCAST, MeshCAST может читать следующие форматы:

- геометрия: iges, step, parasolid и stl;
- поверхностные сетки: patran и ideas;
- объемные сетки: patran и ideas.

При подготовке расчета в программе PROCAST необходимо указать путь к сохраненному файлуZavichritel.x_t, который лежит в папке C:\Model. Для этого нажимаем ЛКМ на вкладке MeshCast (рисунок 2.10) и загружаем модуль MESHCAST, заходим в меню File/Open и указываем путь к файлу Zavichritel.x_t, (рисунок 2.11).

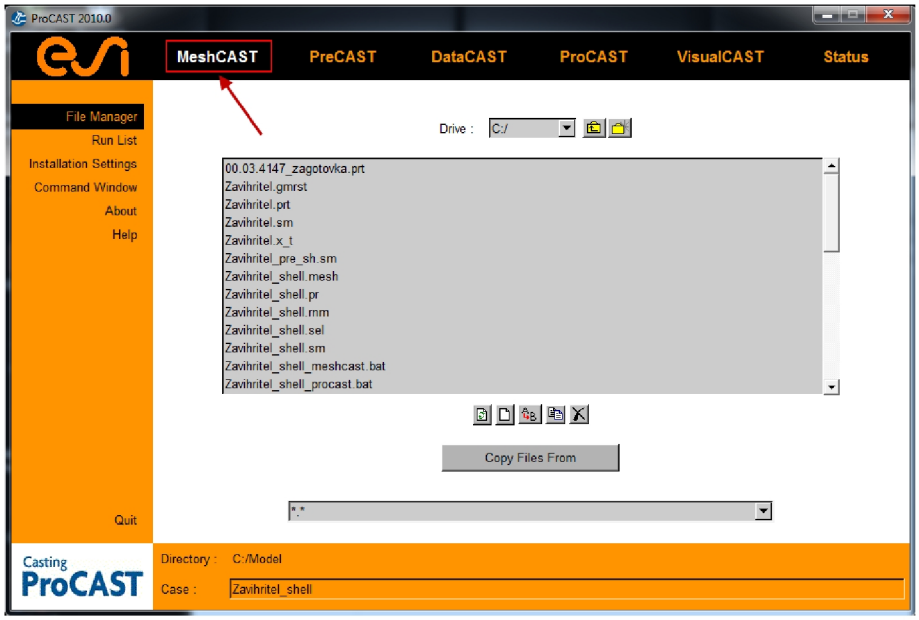


Рисунок 2.10 – Загрузка модуля MeshCAST

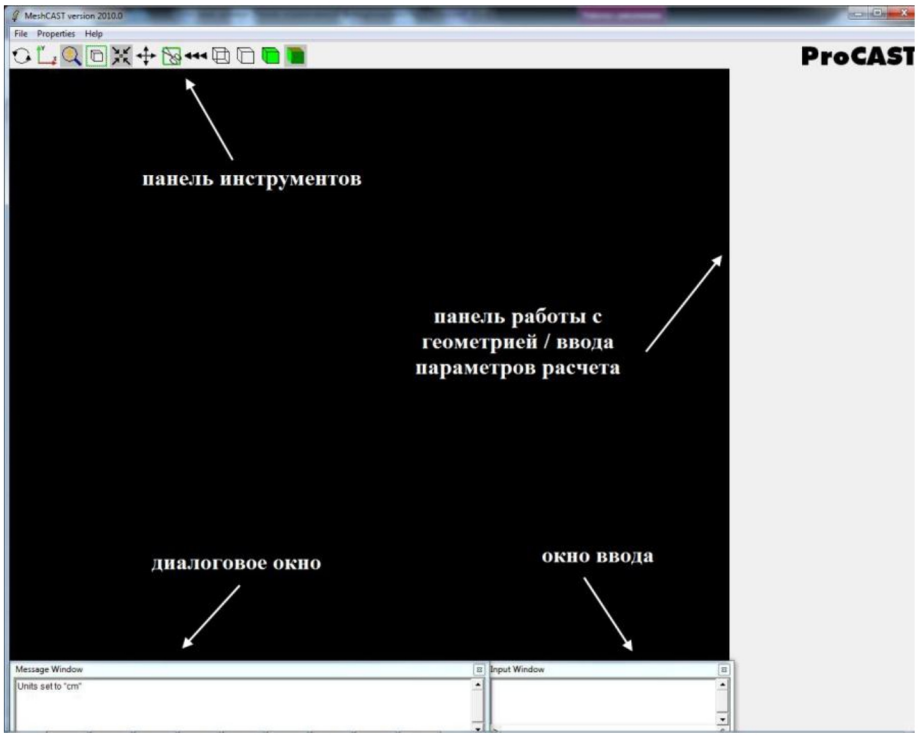


Рисунок 2.11 – Окно модуля MeshCAST

При загрузке модуля MESHCAST открываем модель Zavichritel.x_t предварительно выбрав данное расширение в области «тип файлов» (рисунок 2.12, 2.13).

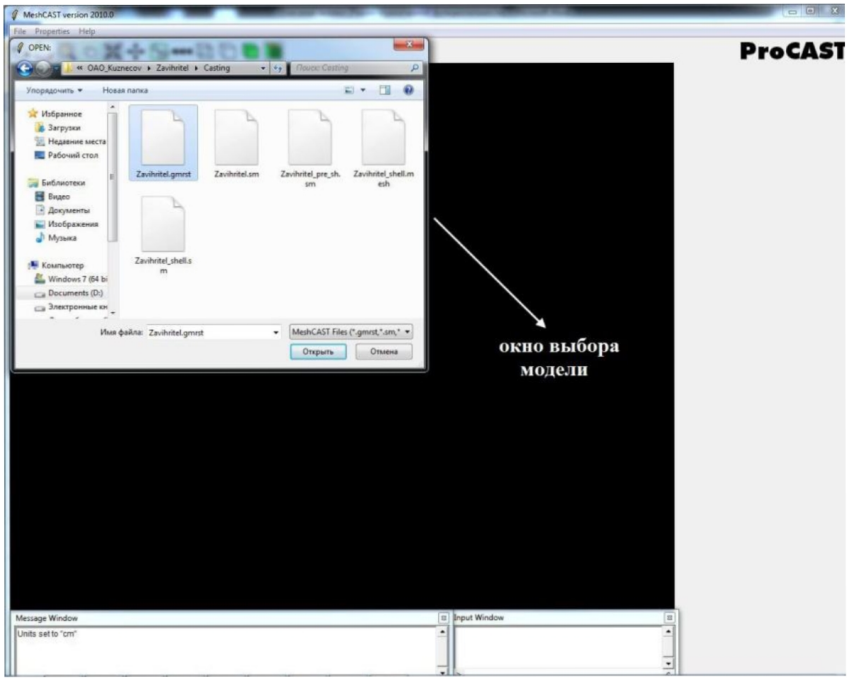


Рисунок 2.12 – Импортирование 3-D модели с расширением .x_t

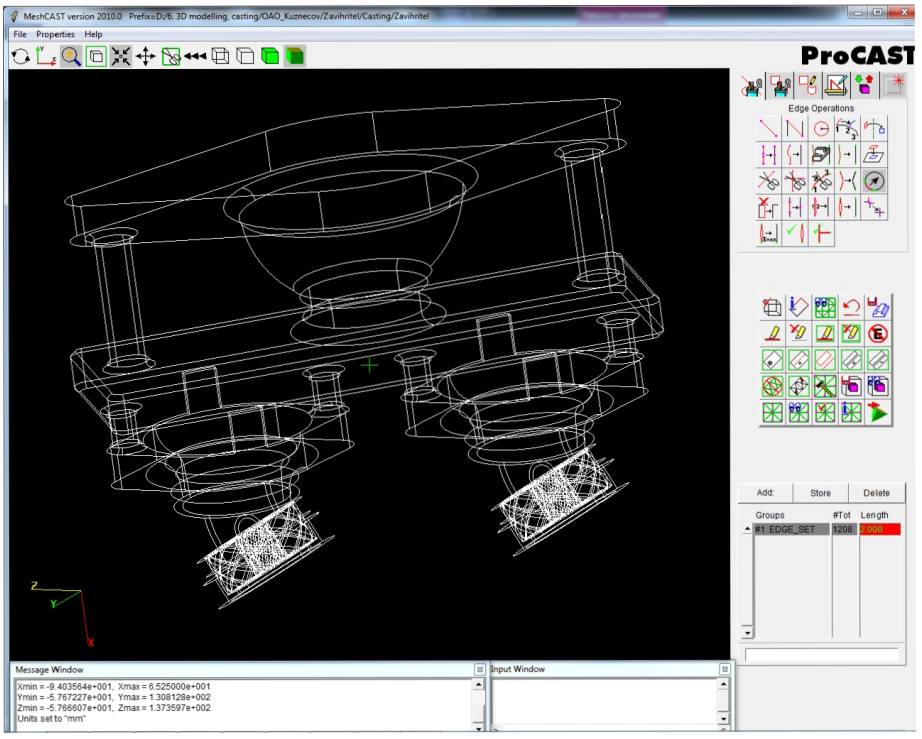


Рисунок 2.13 – Импортированная 3-D модель

Для работы в метрической системе необходимо перевести единицы измерения детали в миллиметры.Для этого заходим во вкладку Tools выбираем функцию «in=mm»  (К1) и в высвеченном окне выбираем миллиметры (К2), представленном на рисунке 2.14. После чего нажатием на кнопку «excute» (К3) производим преобразование. Окно MeshCast автоматически закроется.Для закрытия появившегося окна необходимо нажать любую клавишу на клавиатуре.

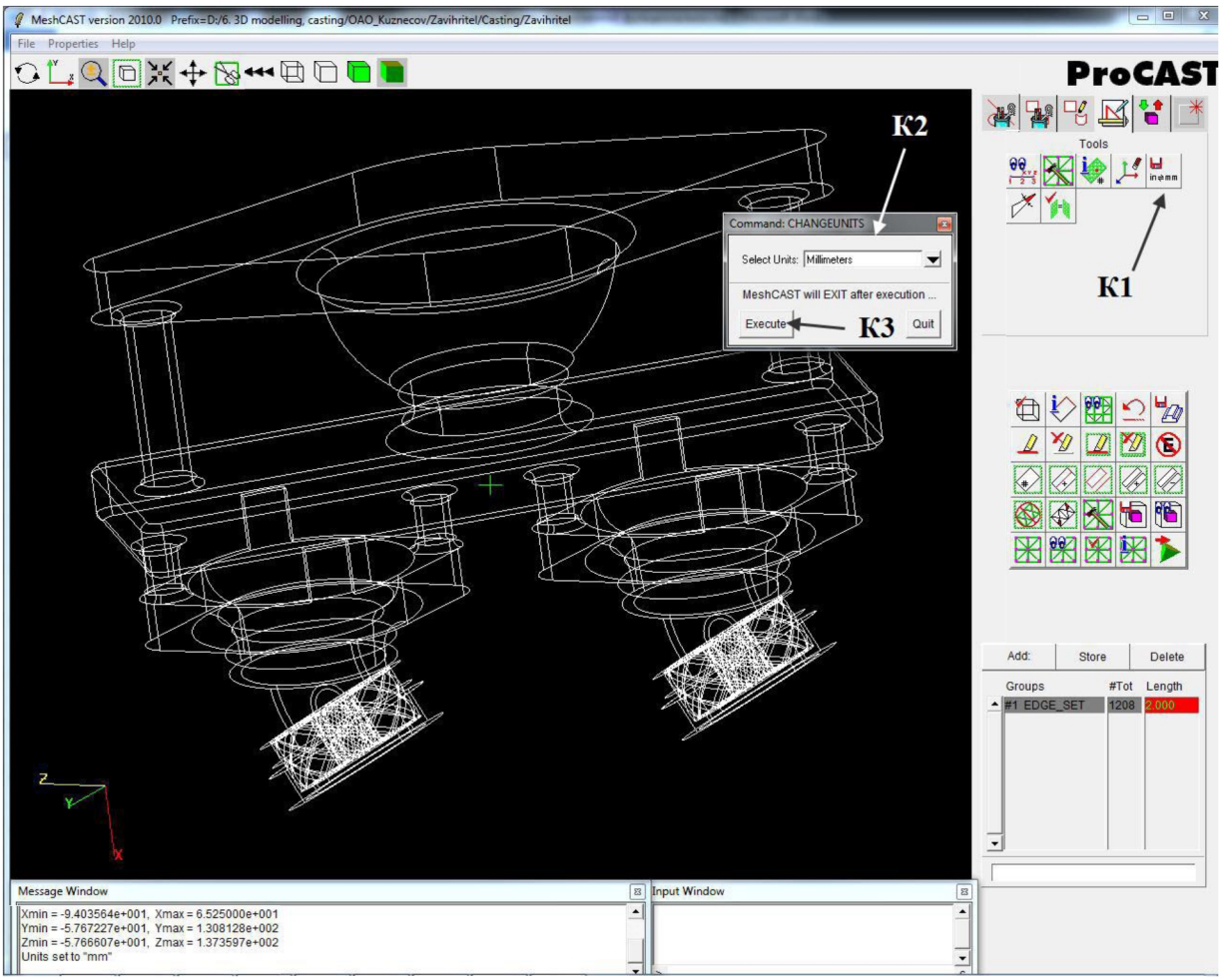
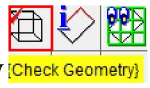


Рисунок 2.14 – Перевод единиц измерения в мм

После перевода модели с ЛПС в мм, снова запускаем модуль MeshCast, заходим в File/Open и загружаем деталь Zavichritel.gmrst и жмем открыть.

После загрузки модели необходимо проверить ее геометрию, нажав на кнопку CheckGeometry 

(К1, рисунок 2.15). Для исправления и редактирования геометрии модели необходимо воспользоваться инструментами, находящимися в верхней части панели работы с геометрией модуля MechCast  (К2, рисунок 2.15), которые позволяют производить операции с ребрами, поверхностями модели. В окне MessageWindowпоявиться дополнительное сообщение “SurfaceedgesseemOK”,что свидетельствует об отсутствии ошибок в импортированном файле (см. рисунок 2.15).

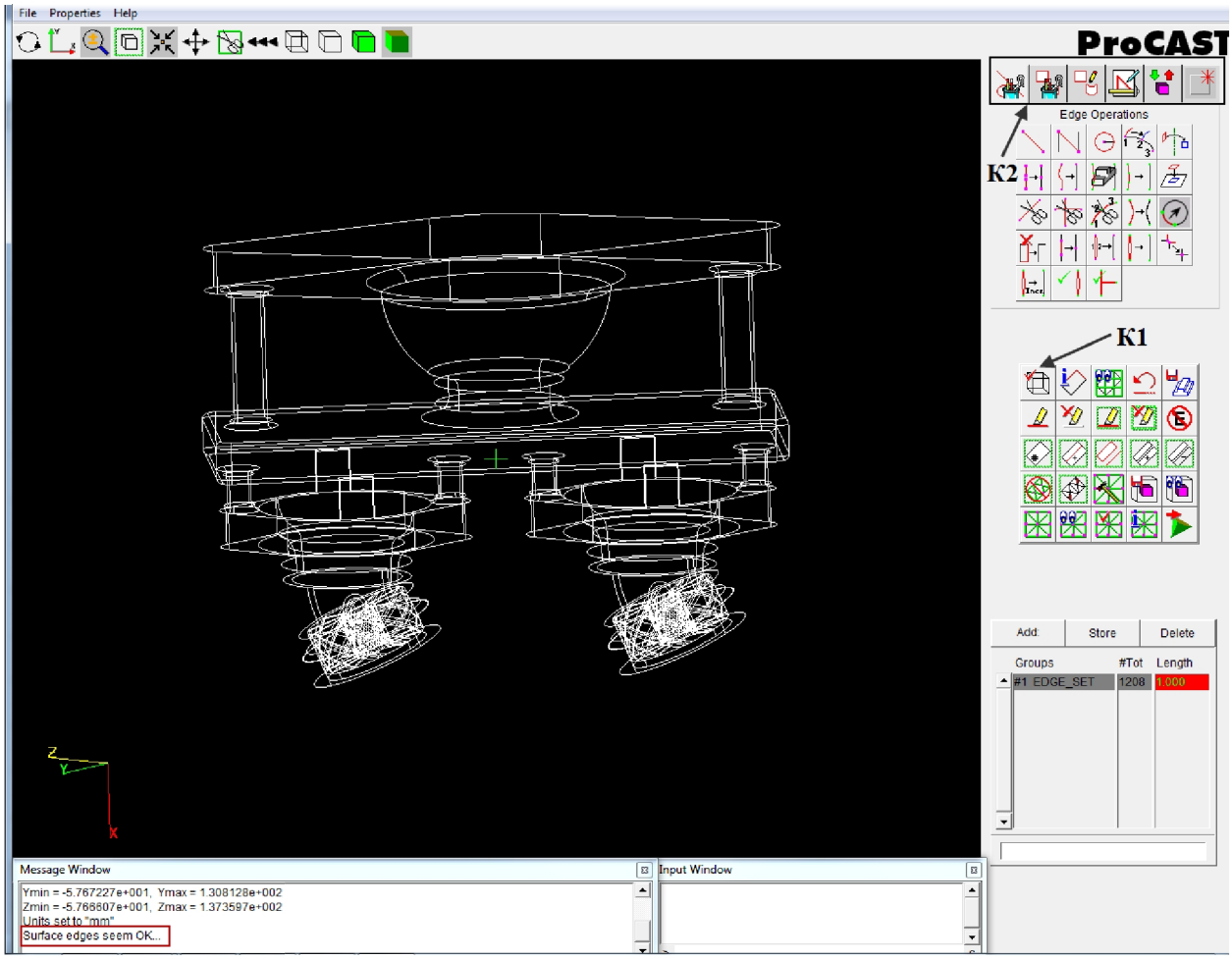
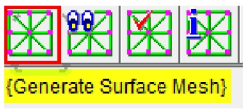


Рисунок 2.15 – Проверка геометрии модели на ошибки

Следующим шагом является задание узлов сетки. Несмотря на то, что минимальная толщина нашей ЛПС составляет 2 мм (минимальная толщина лопатки), задаем значение 2 в нижнем окне модуля Meshcast (К1 на рисунке 2.16). Ввод значения подтверждаем нажатием на клавишу Enter и, используя функцию «generatesufacemesh», 

(К2 на рисунке 2.16) система накладывает данную сетку на модель ЛПС, представленной на рисунке 2.17 (К1).Вдальнейшем при создании объемной сетки система автоматически на участках с толщиной 2 мм создаст несколько слоев. При генерации система проверяет геометрию модели, и выявляет узлы с самопересечением.

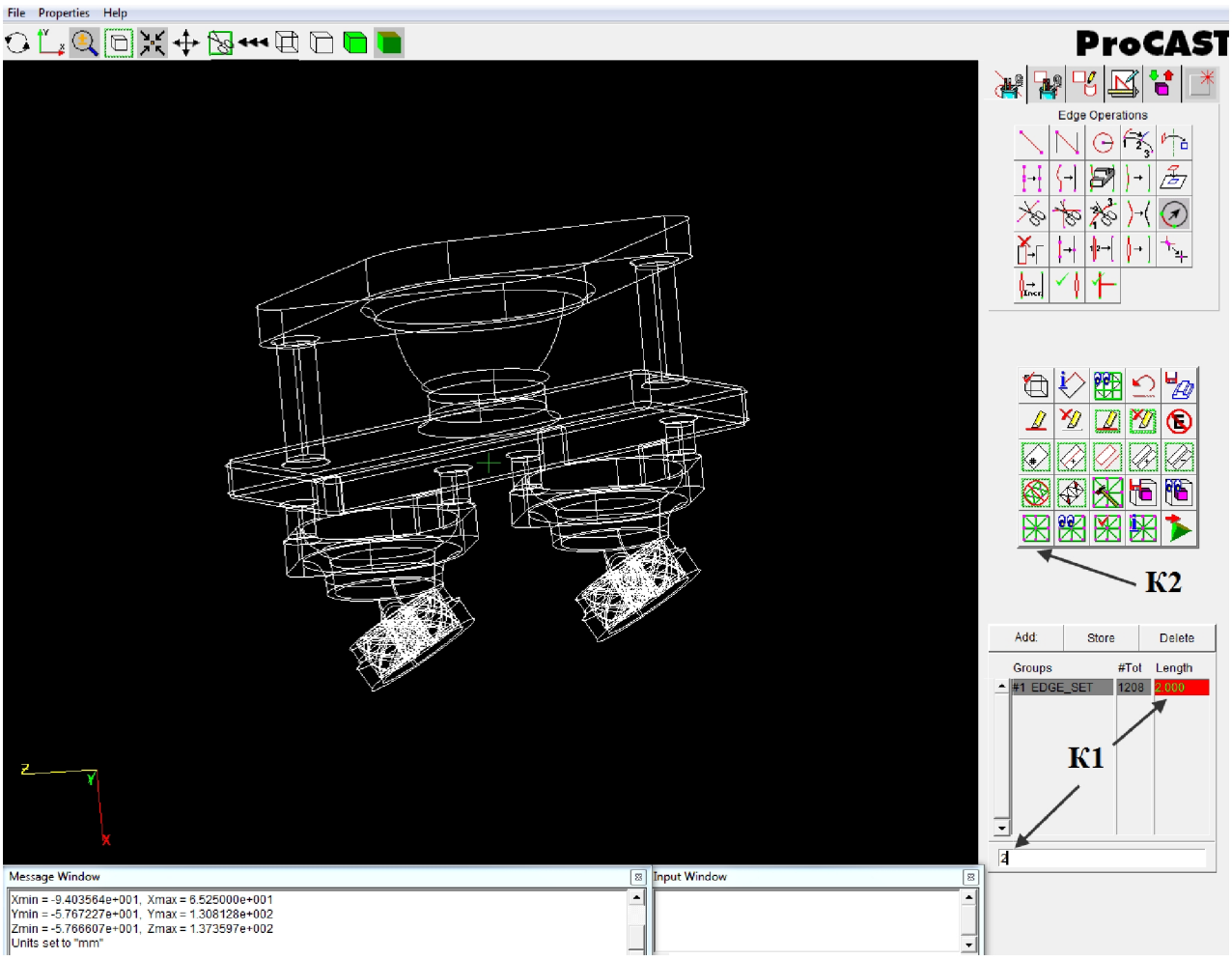


Рисунок 2.16 – Задание размеров ячейки сетки

После наложения сетки используя функцию «checkmesh» 

(К1 на рисунке 2.18) система выдает всю информацию о модели, включая геометрию и предупреждения об ошибках геометрии модели. На данном этапе возникает 2 ошибке в области крыльчатки завихрителя, не являющиеся критическими, поэтому можно продолжить работу.

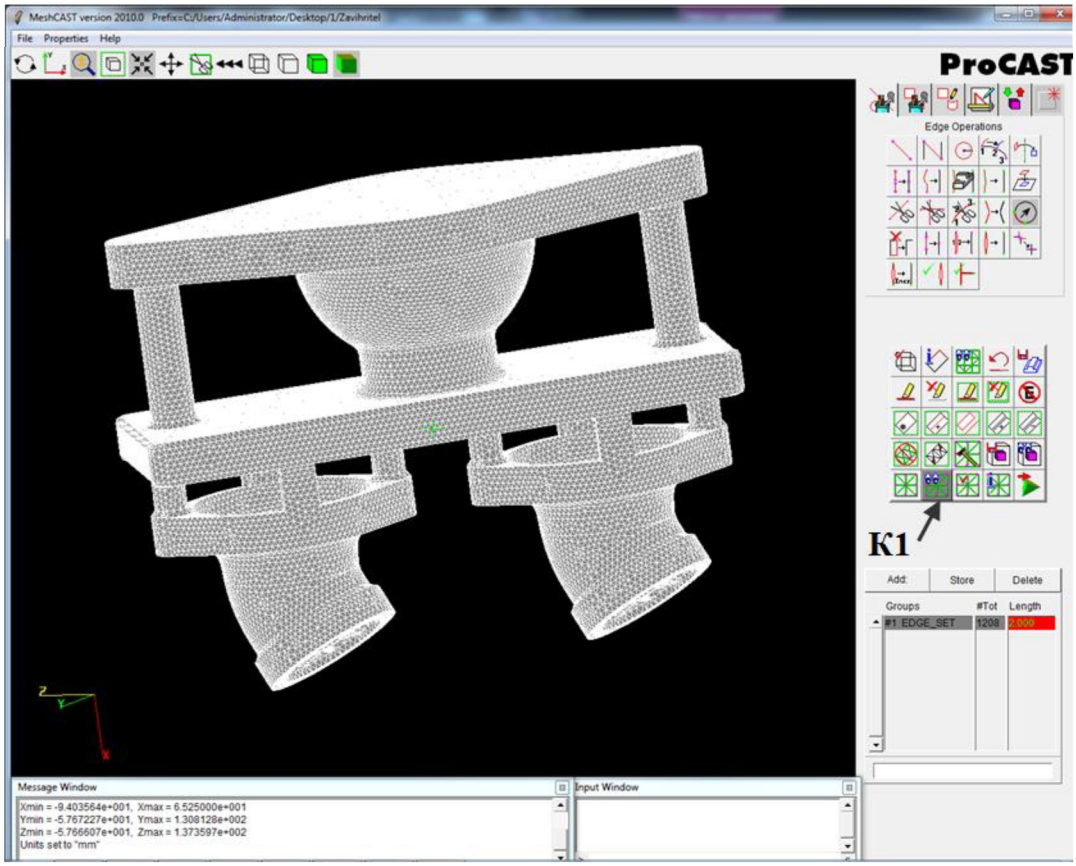


Рисунок 2.17– Наложенная сетка

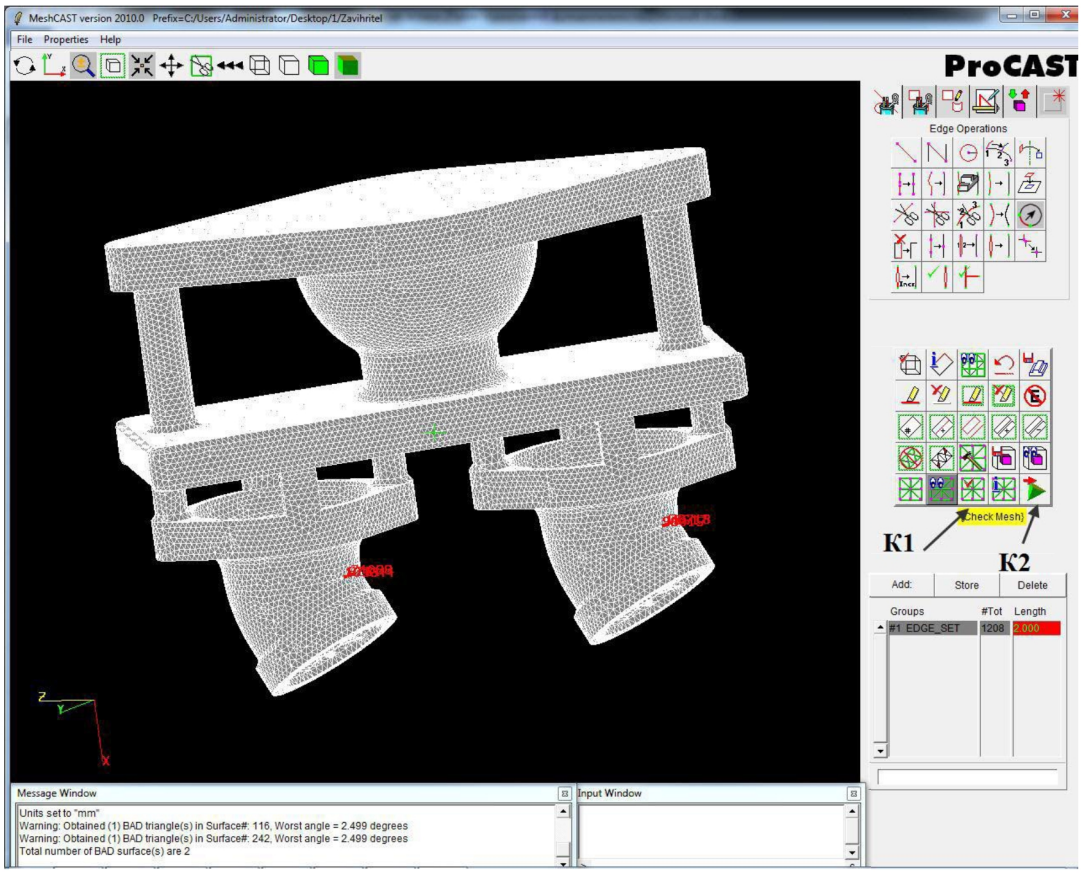
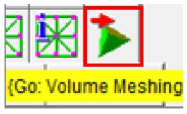


Рисунок 2.18 – Генерация узлов сетки

Далее нажимаем кнопку «volumemeshing» 

(К2 на рисунке 2.18) для наложения оболочки (обсыпка модели, необходимая для того что бы металл поступал в форму, а не в форму модели детали). На данном этапе появляется окно предупреждения (рисунок 2.19), которое показывает какое количество плохих поверхностей содержит модель. Достаточно нажать “Да” и перейти к созданию объемной сетки.

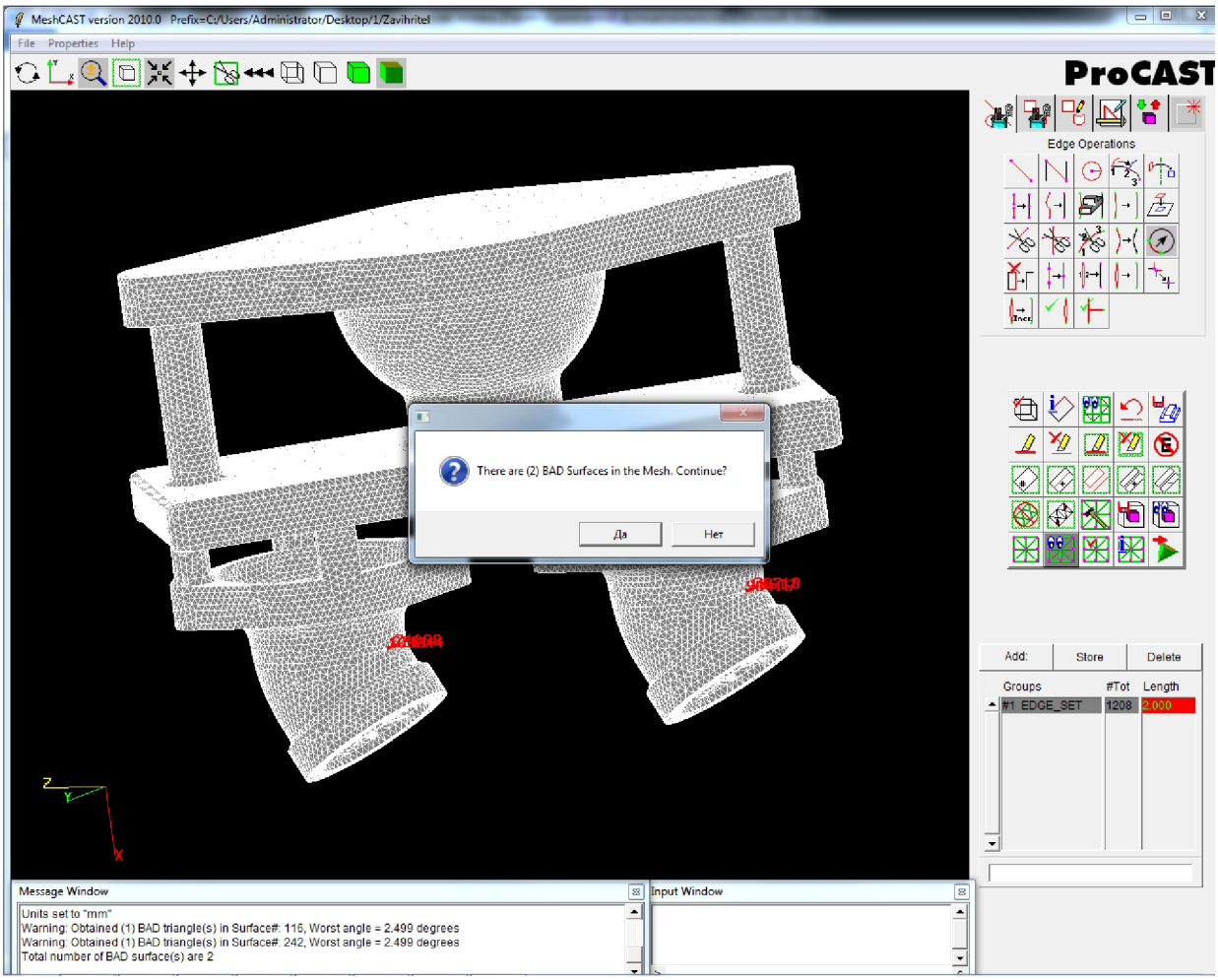


Рисунок 2.19 – Перевод модели для генерации оболочки

Используются функции «Checkmesh», «FixBadTriangles» и «Checkintersection» (К1, К2 и К3 соответственно на рисунке 2.20) для того, чтобы система проверила геометрию ЛПС, исправила плохие треугольники и проверила пересечения треугольников, а также выдала ошибки в узлах, в данном случае на рисунке 2.20 они выделены розовым цветом. При необходимости, чтобы увидеть плохое пересечение треугольников, достаточно нажать кнопку «Displayintersection» (К4 на рисунке 2.20). Результат исправленной модели представлен на рисунке 2.21. При этом в окне MessageWindownpри выполнении проверки должно появиться сообщение “… thesurfacemeshseemsOK”.

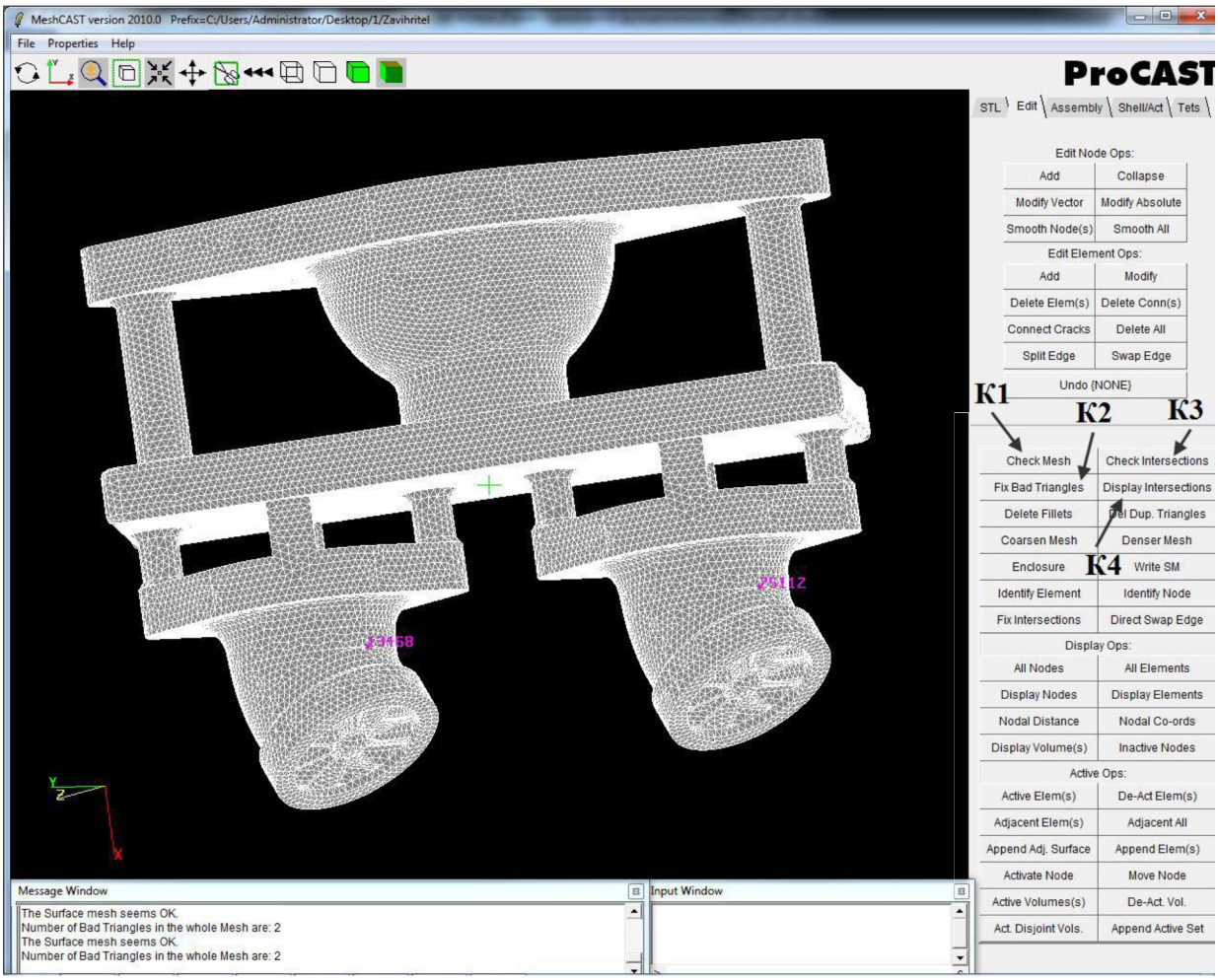


Рисунок 2.20 – Проверка геометрии детали

Для более детального построения сетки возможно использование команд ручного редактирования сетки.

Нажатие на кнопку Identify Element позволяет выбирать треугольники при нажатии на них ЛКМ, а кнопка Identify Node позволяет выбирать узлы пересечения ребер поверхности при нажатии на них ЛКМ. Возможен второй вариант выбор поверхностей и узлов. Для этого нажимаем на кнопку All Nodes или All Elements, в зависимости от того, что хотим выбрать – узел (подсвечивается красным цветом) или поверхность (подсвечивается зеленым цветом) и в окне ввода InputWindow указываем номер выбранного элемента. Нажатие кнопок Add или Delete Elem(s) блока EditElementsOps позволяет, соответственно, создавать или удалять выбранный элемент. Таким образом, происходит процедура исправления поверхностной сетки. В итоге

при нажатии на кнопку Check Mesh в окне MessageWindow должно появиться сообщение, вида: The Surface mesh seems OK, что свидетельствует о полностью исправленной поверхностной сетки. Подобные процедуры необходимо производить, если в объемной сетке имеются ошибки. Удаление и создание новых треугольников вручную в большинстве случае помогает исправить подобные ошибки.

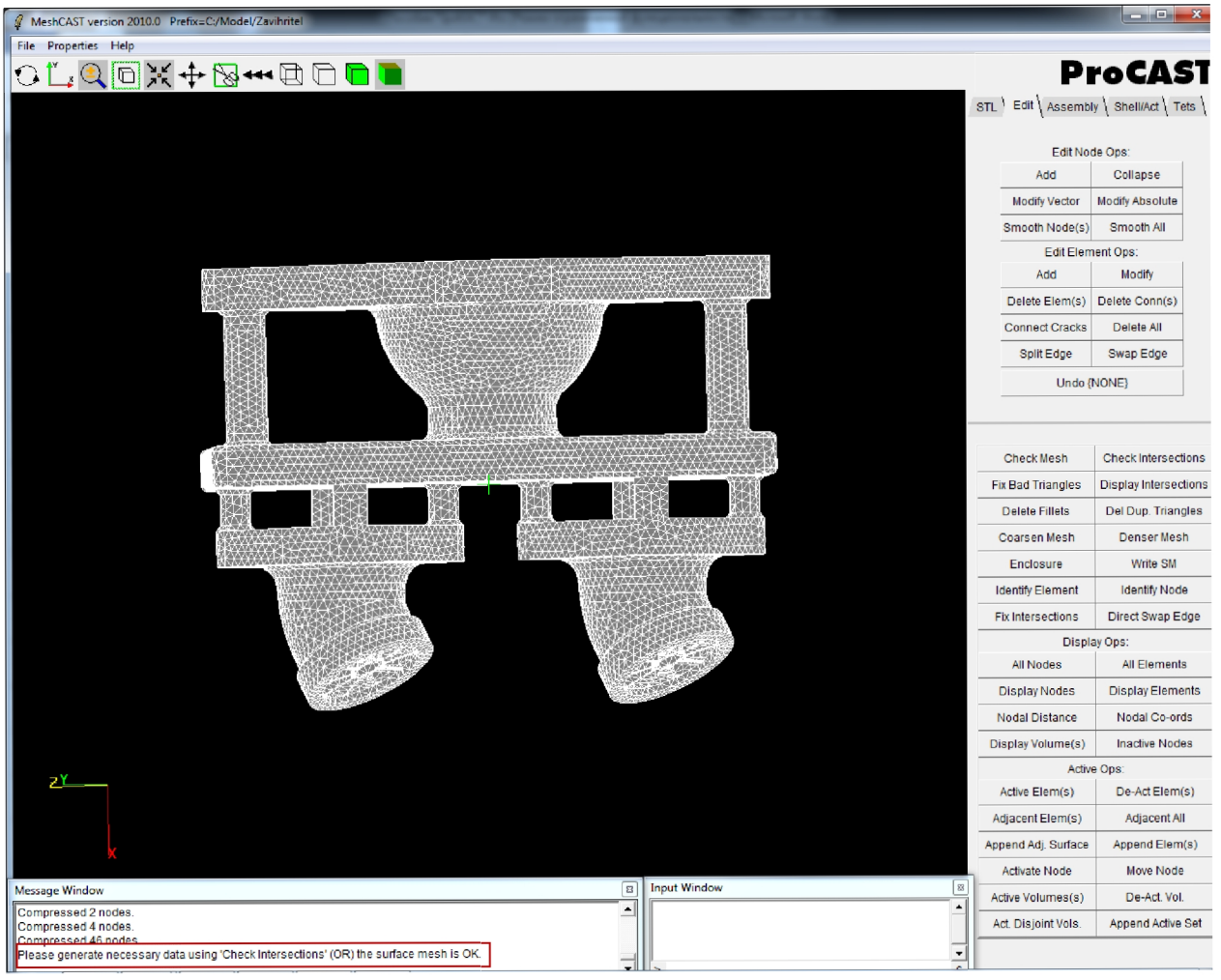
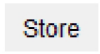


Рисунок 2.21 – Исправление геометрии детали

После исправления ошибок в геометрии необходимо обозначить поверхность, через которую будет производиться заливка металла (рисунок 2.22), так как при наложении оболочки система построит оболочку всей детали, и заливка будет не возможна. Перейдем во вкладку Shell/Act и выделим часть элементов поверхности при помощи инструмента выделения

узлов сетки 

(К1 на рисунке 2.22) при зажатой ЛКМ, после чего используем функцию «store» 

(К2 на рисунке 2.22) для записи выделенных узлов поверхности.

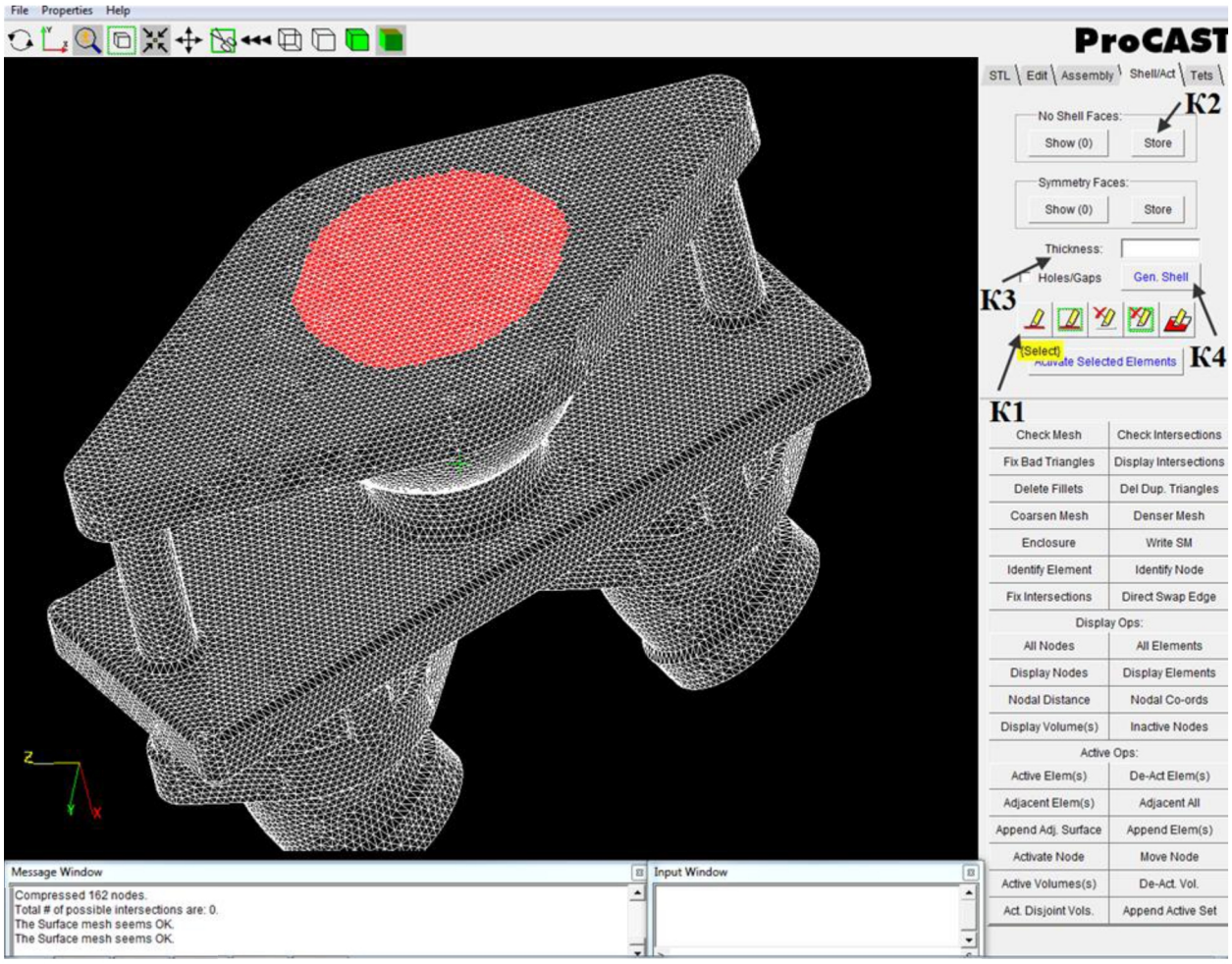


Рисунок 2.22 – Обозначение заливочной поверхности

В окне «thickness» (К3 на рисунке 2.22) задаем толщину оболочки (обсыпки), исходя из соображений накладывания слоев обсыпки выбираем величину 7 миллиметров (толщину оболочки). После чего используя функцию «gen.shell» 

(К4 на рисунке 2.22) система генерирует оболочку, толщиной 7 мм, при чем используя в сеточной модели

равносторонние треугольники так же с величиной стороны 7 мм (рисунок 2.23, 2.24).

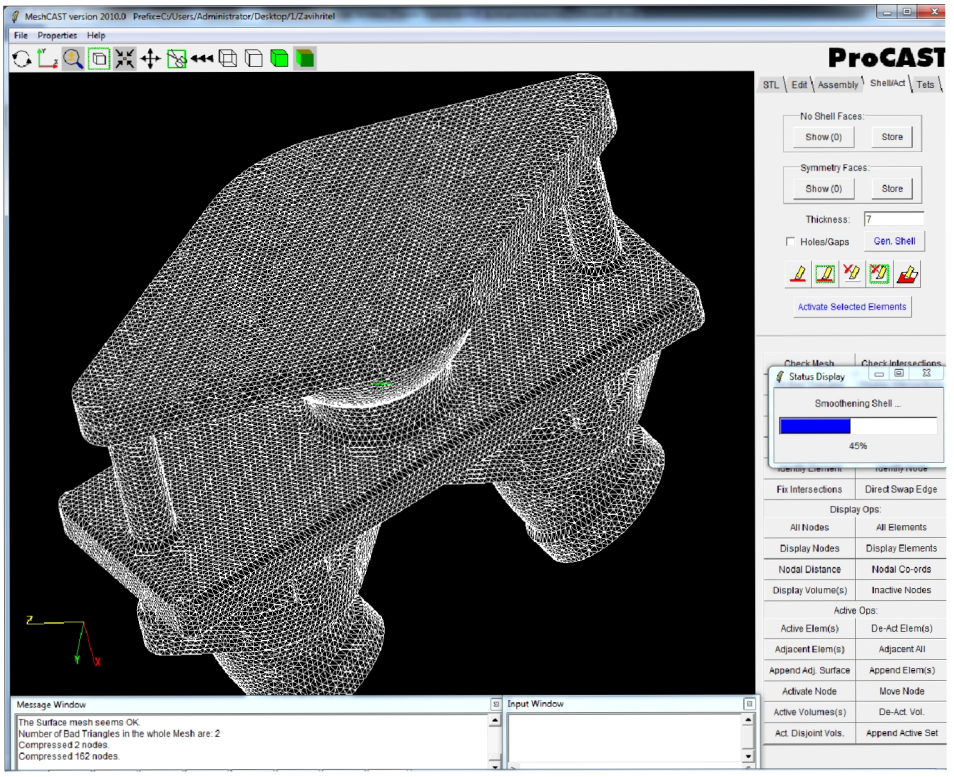


Рисунок 2.23 – Система в процессе создания оболочки

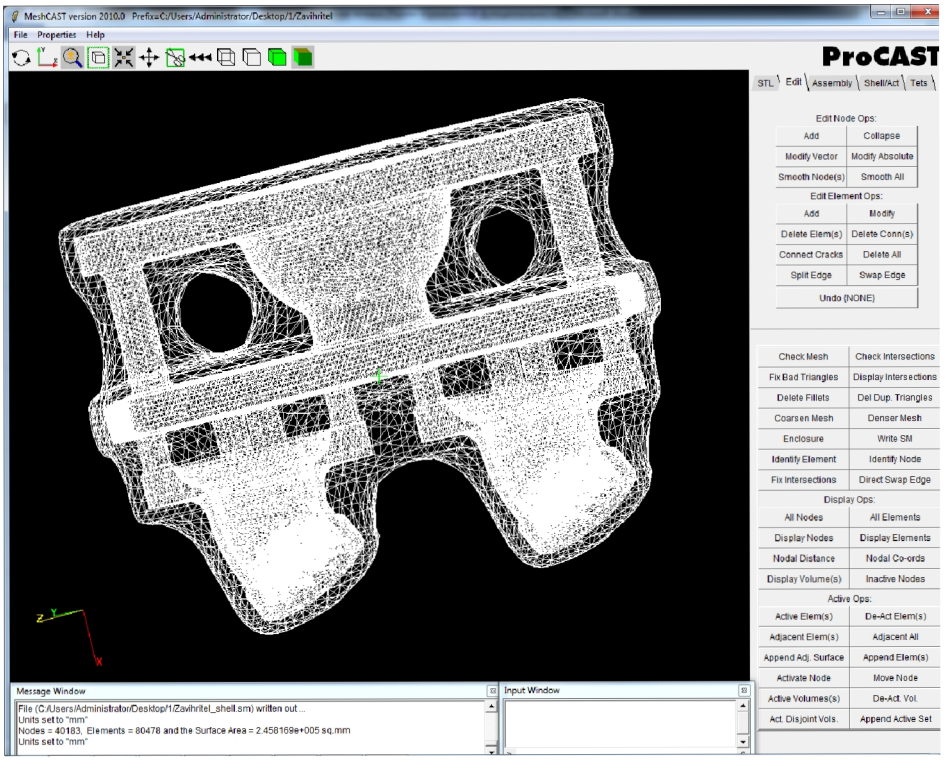


Рисунок 2.24 – Созданная оболочка

Следующим шагом создания сетки модели ЛПС, является ее окончательная генерация. Для этого переходим в окно «tets» и нажимаем кнопку «generatingmesh» Generate Tet Mesh (К1 на рисунке 2.25). Если данная функция отсутствует (возможна при работе с PROCAST на мониторах менее 19 дюймов) данную функцию возможно задать при использовании подокна «layers». Для чего необходимо поставить курсор перед «fulllayer» и нажатием двойного «tab» и «пробела» на клавиатуре, данная функция запустится (рисунки 2.26, 2.27).

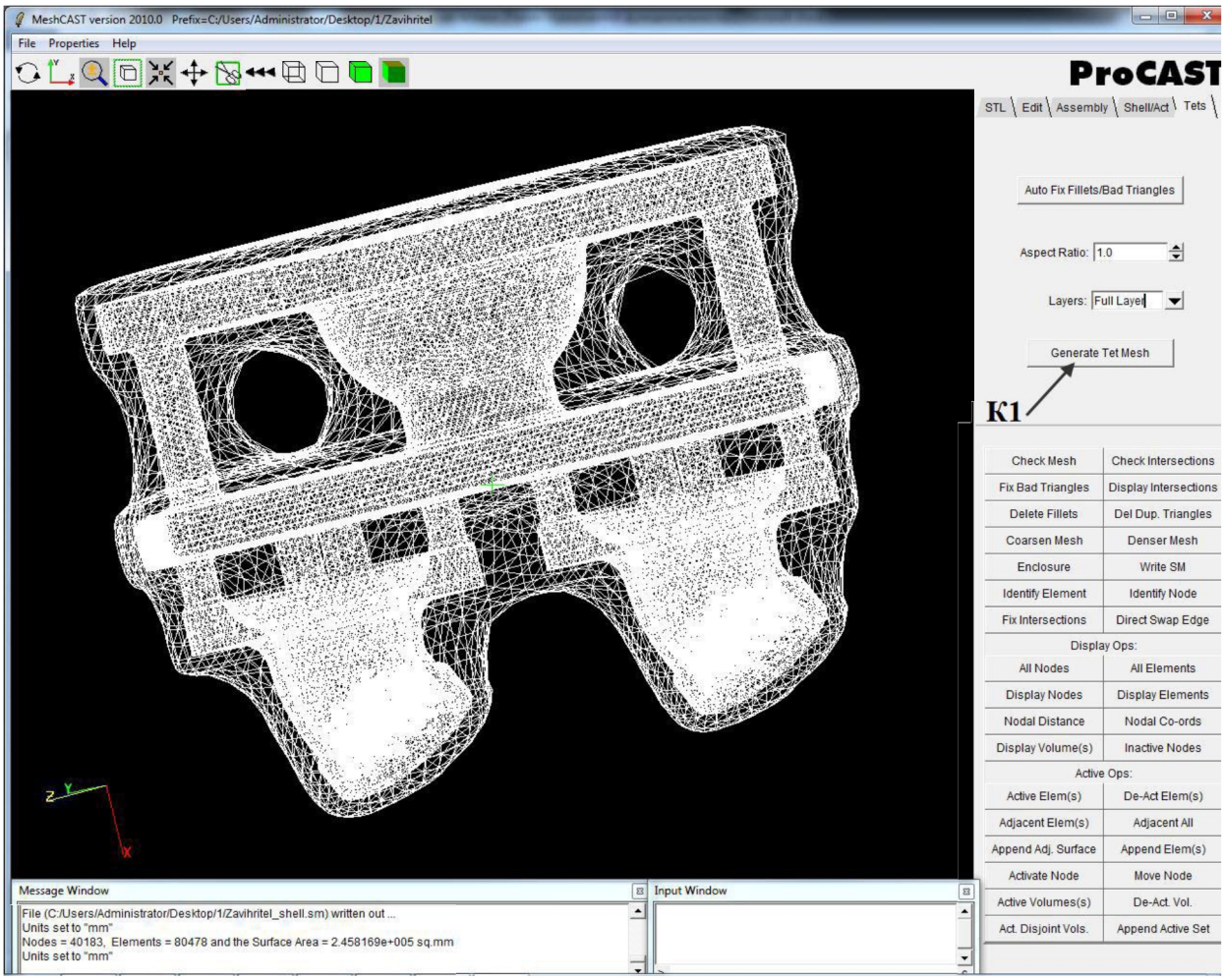


Рисунок 2.25 – Генерация наложенной сеточной модели

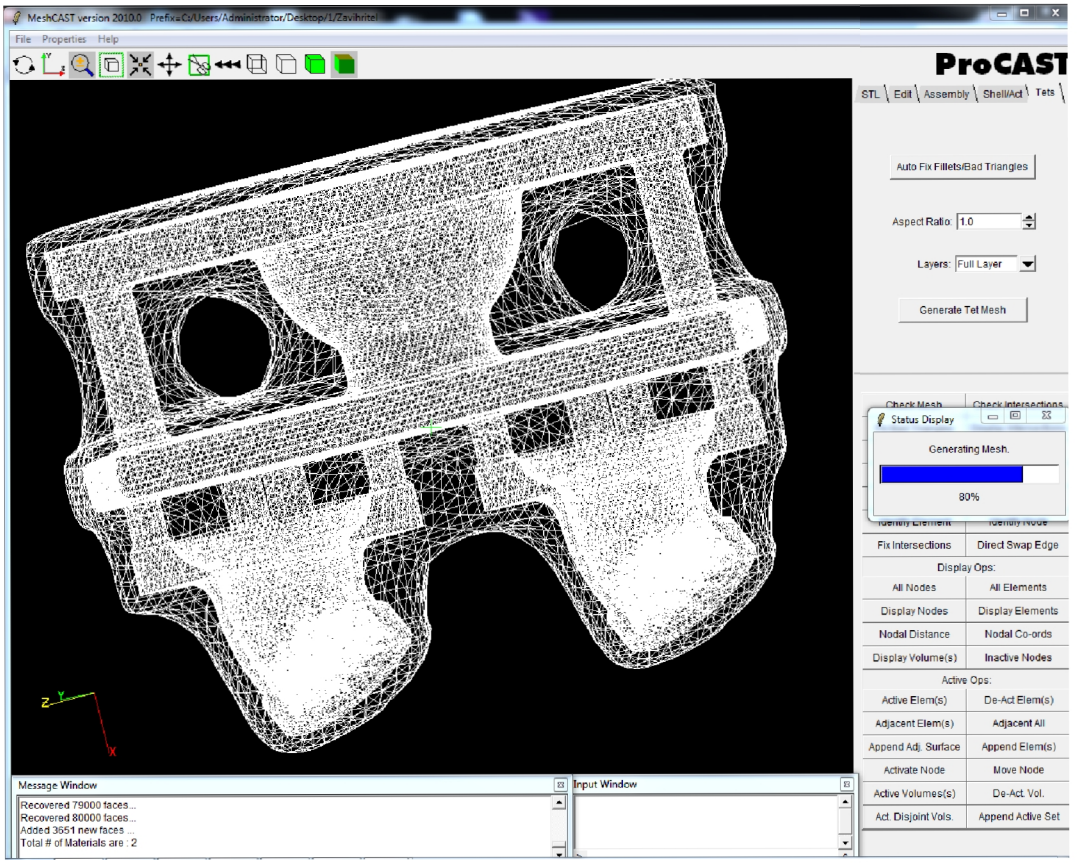


Рисунок 2.26 – Окончательная генерация сеточной модели

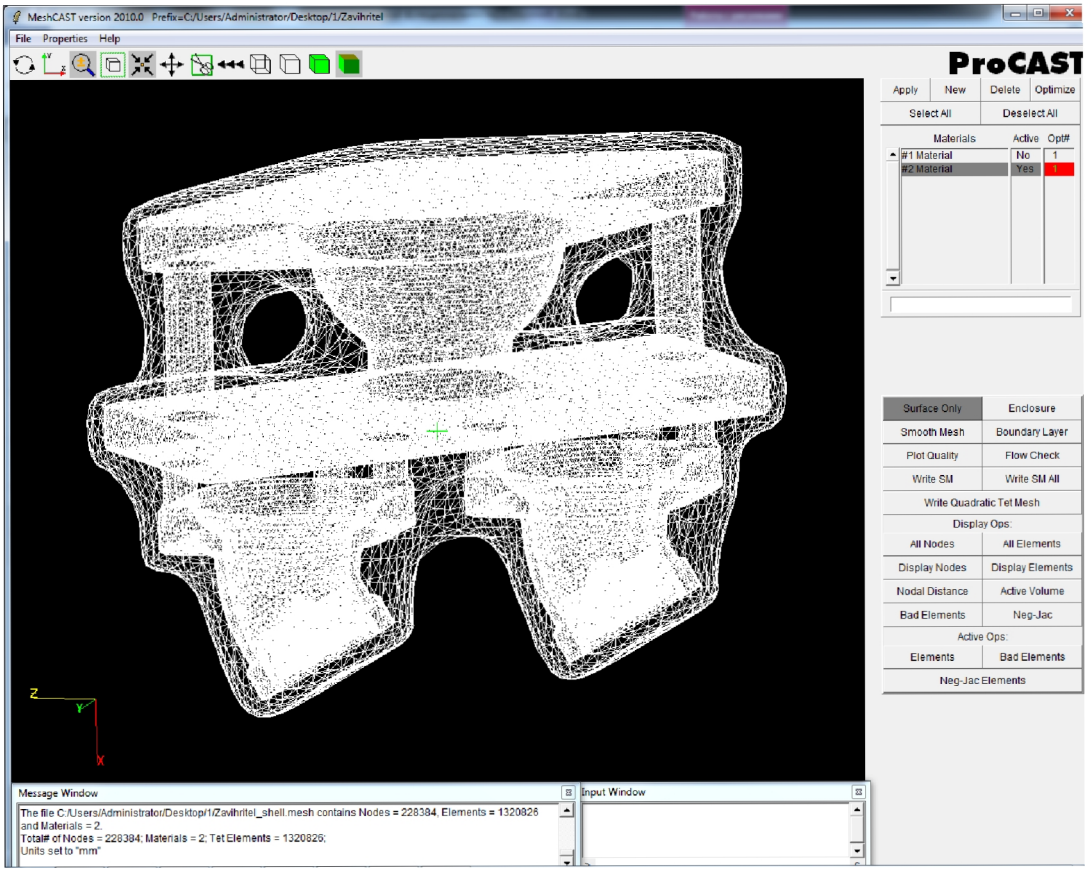


Рисунок 2.27 – Сформированная сеточная модель

После окончания генерации сетки система выдаст окно, в котором заданы два материала (материал заливки или форма которую необходимо залить и материал формы оболочки, собственно куда заливается металл) представленные на рисунке 2.28, 2.29. Причем, в графе Active напротив материала заливки должно стоять Yes, а в материале формы – No. Установка требуемых параметров осуществляется нажатием ЛКМ по соответствующему окну.

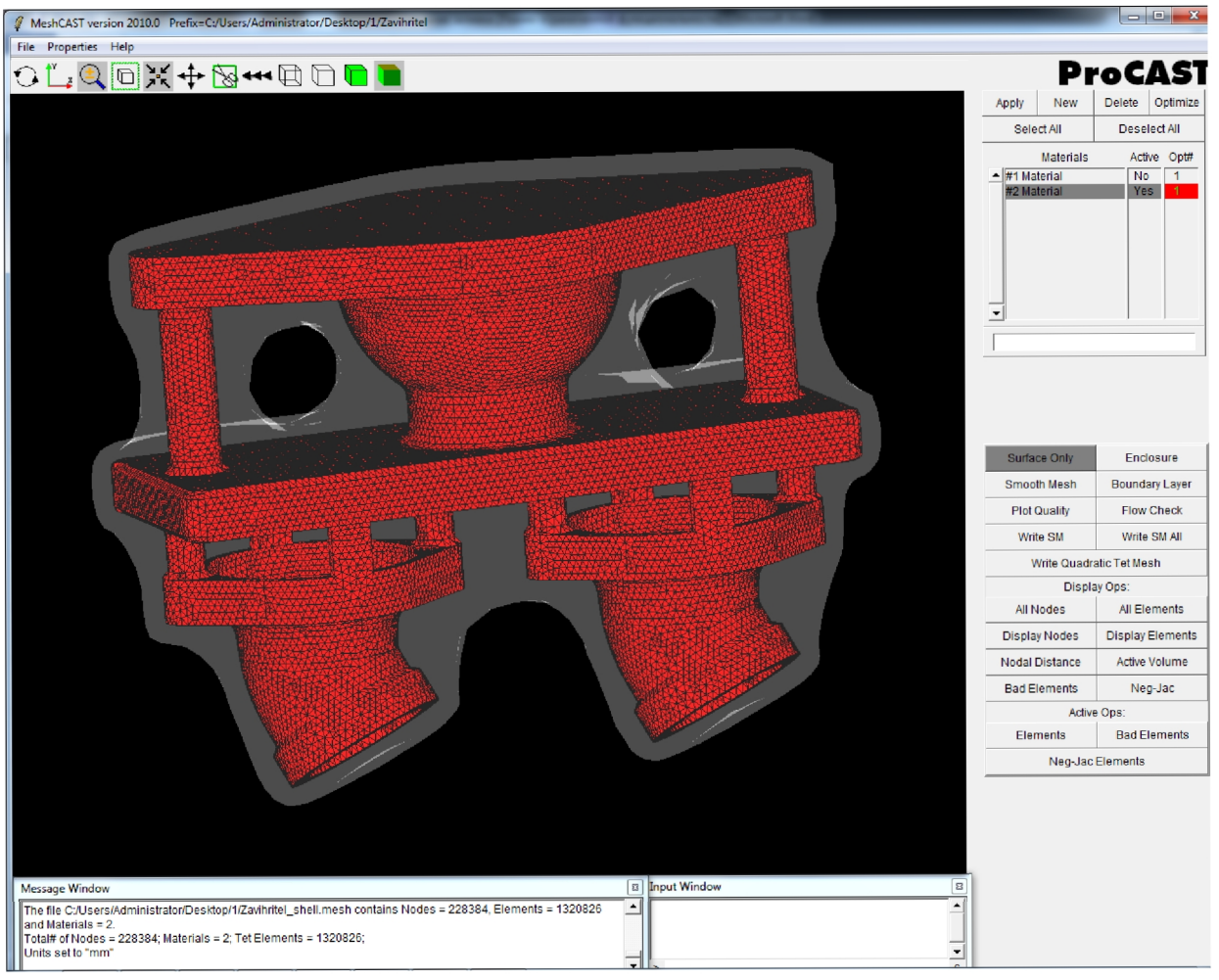


Рисунок 2.28– Режим отображения материала заливки

В итоге, нажимаем на кнопку Optimize (К1 на рисунке 2.30), для оптимизации модели и нажимаем кнопку применить Apply (К2 на рисунке 2.30).

Работа в модуле «MeshCast» закончена переходим в модуль «PreCast».

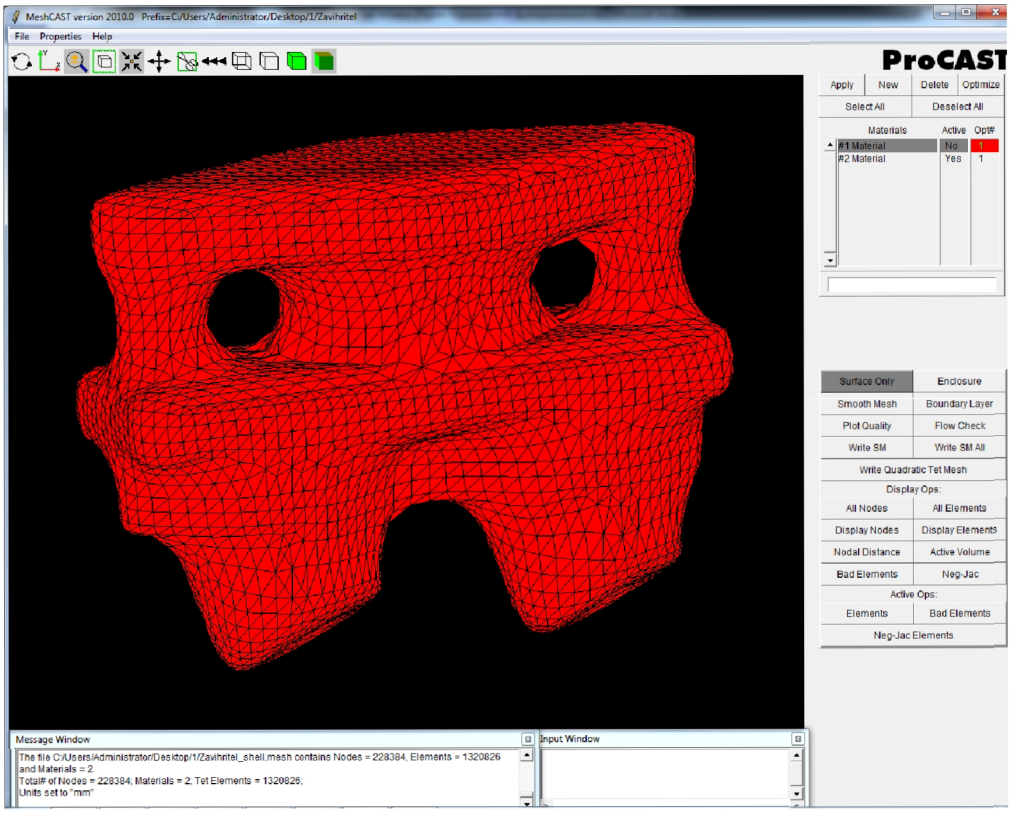


Рисунок 2.29 – Показ материала формы

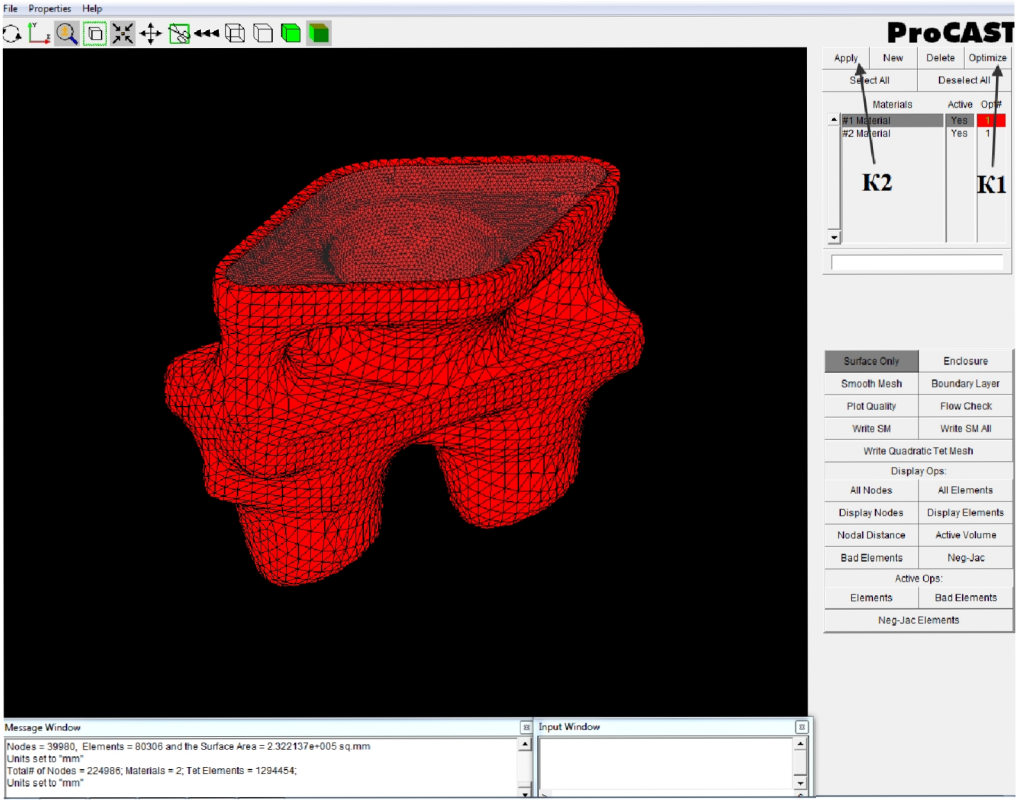


Рисунок 2.30 – Оптимизация модели

2.2.3.Создание контактных, граничных и начальных условий в модуле PreCast

Работа в данном модуле начинается с загрузки файла модели, находящегося в папке Model, подготовленного на этапе MashCast. Для этого необходимо в диалоговом окне ProCast указать путь к папке с подготовленными файлами и нажать на кнопку PreCast (К1, К2, К3 на рисунке 2.31). При открытии модели в данном модуле система выдает информацию о модели (рисунок 2.32). Необходимо проверить единицы измерения (К1 на рисунке 2.32) и габаритные размеры модели (К2 на рисунке 2.32).

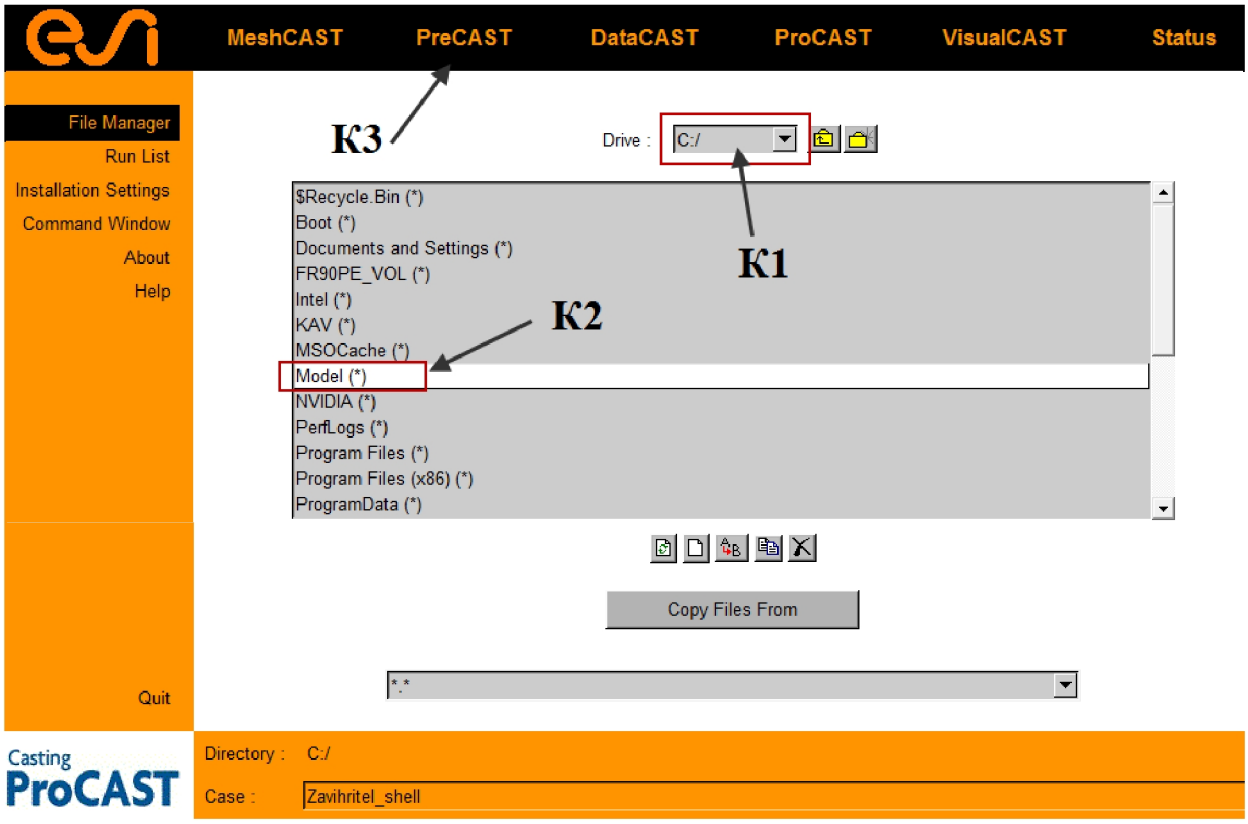
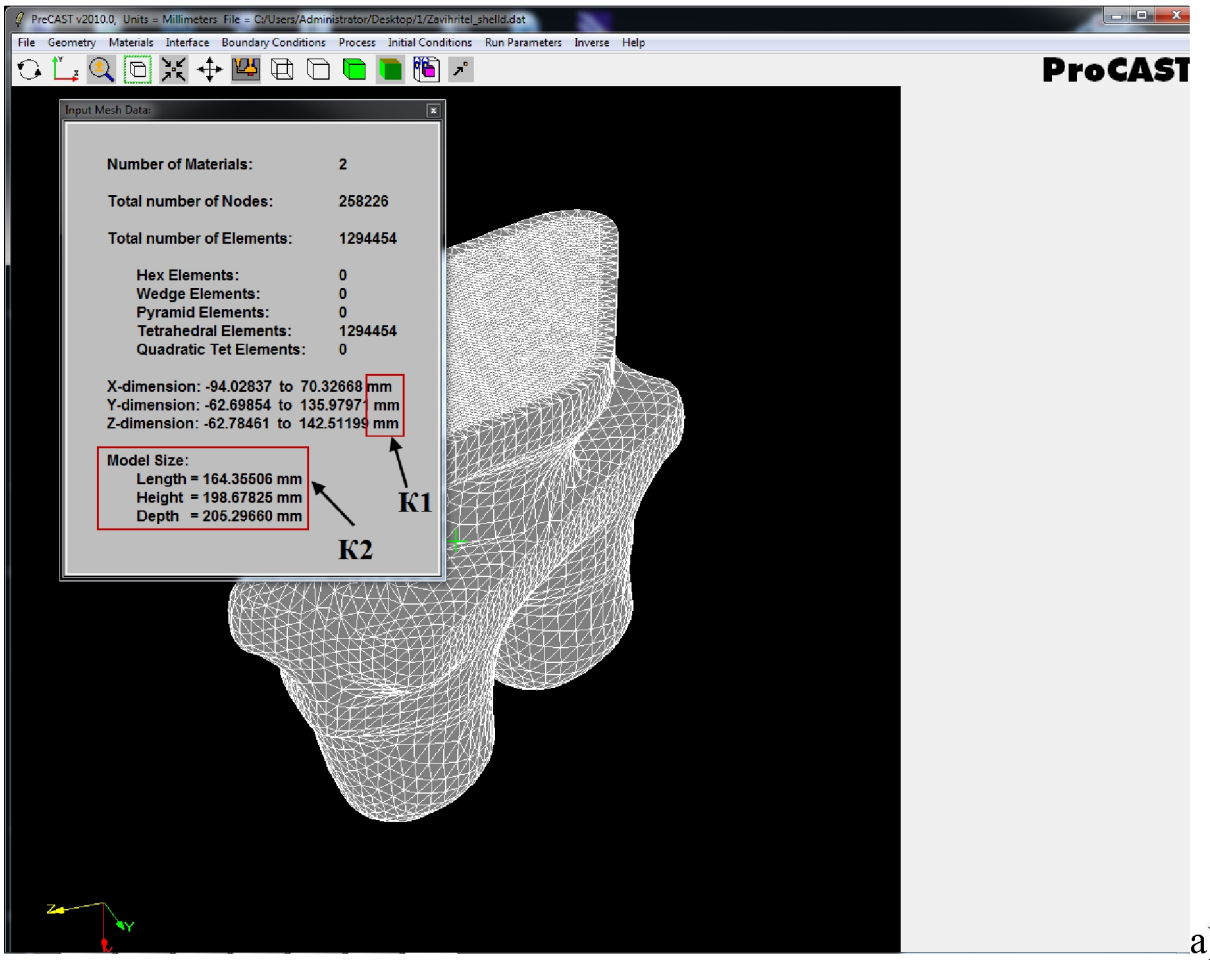


Рисунок 2.31 – Загрузка модели в модуль PreCast

Данное окно просто закрываем. Меню, расположенное в верхней части окно содержит 9 разделов-меню, которые позволяют выполнять все операции по формулировке задачи:



а)

File	- Файл
Geometry	- Геометрия
Materials	- Материалы
Interface	- Границы между телами
Boundary Conditions	- Граничные условия
Process	- Процесс
Initial Conditions	- Начальные условия
Run Parameters	- Вычислительные параметры
Inverse	- Обратная задача
Help	- Помощь

б)

а, б – интерфейс и меню модуля соответственно

Рисунок 2.32 – Открытие геометрической модели в модуле PreCAST

Используя закладку «geometry» - «chekgeom» - «min-max» система выдаст размеры модели по осям X, Y, Z. Так же необходимо убедится, что в модели отсутствуют элементы с отрицательным значением якобиана. Для чего необходимо воспользоваться той же закладкой «geometry» и функцией «neg-jac» (рисунок 2.33, 2.34).

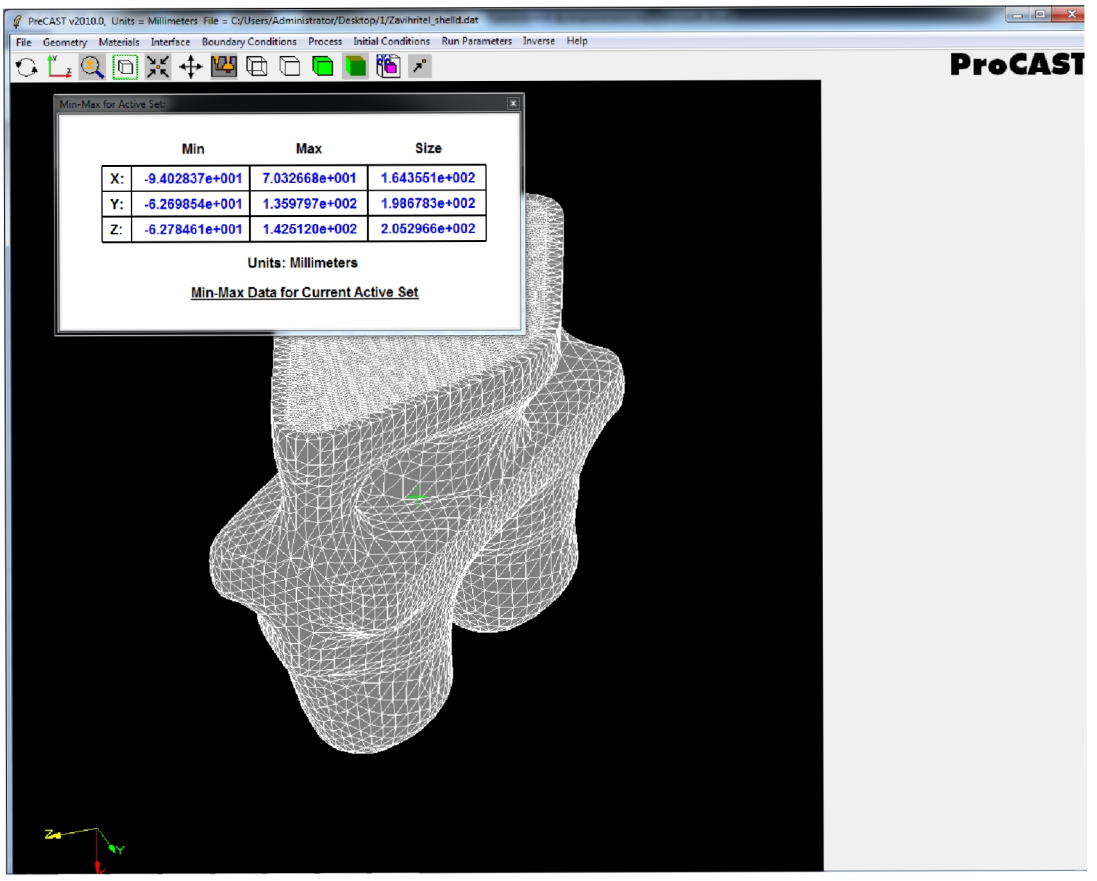


Рисунок 2.33 – Показ геометрии отливки

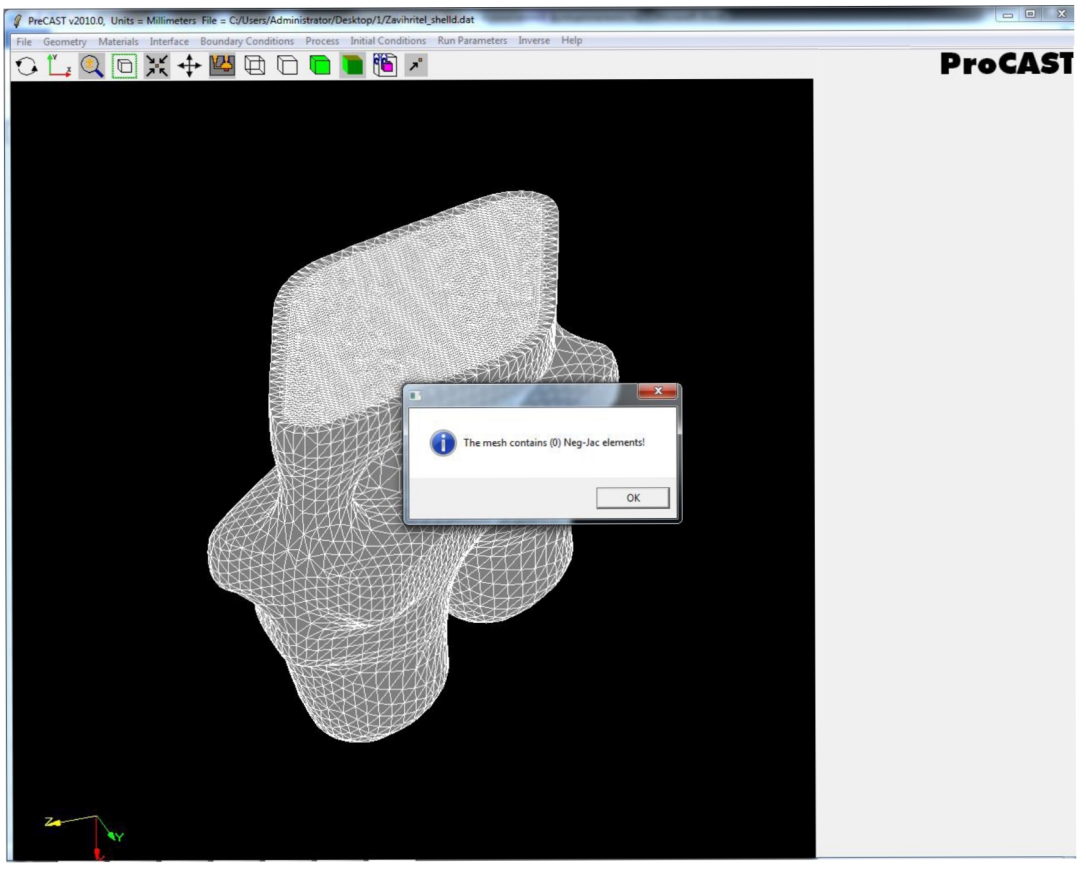


Рисунок 2.34 – Проверка элементов с отрицательным значением Якобиана

Переходим в закладку «materials» для задания материалов формы и заливки.

Банк материалов находится в нижнем правом окне (К1 на рисунке 2.35), при выборе материала, из списка банка, необходимо задать его форме или модели для чего необходимо использовать функцию «assingn». В нашем случае задаем материал заливки никелевый сплав (Ni_Inconel), а материал формы керамическое покрытие. Так же необходимо задать форму контакта между материалом и формой, задание контакта производится в закладке «type», в нашем случае «casting», в закладке «empty» ставим «yes» (рисунок 2.35, 2.36).

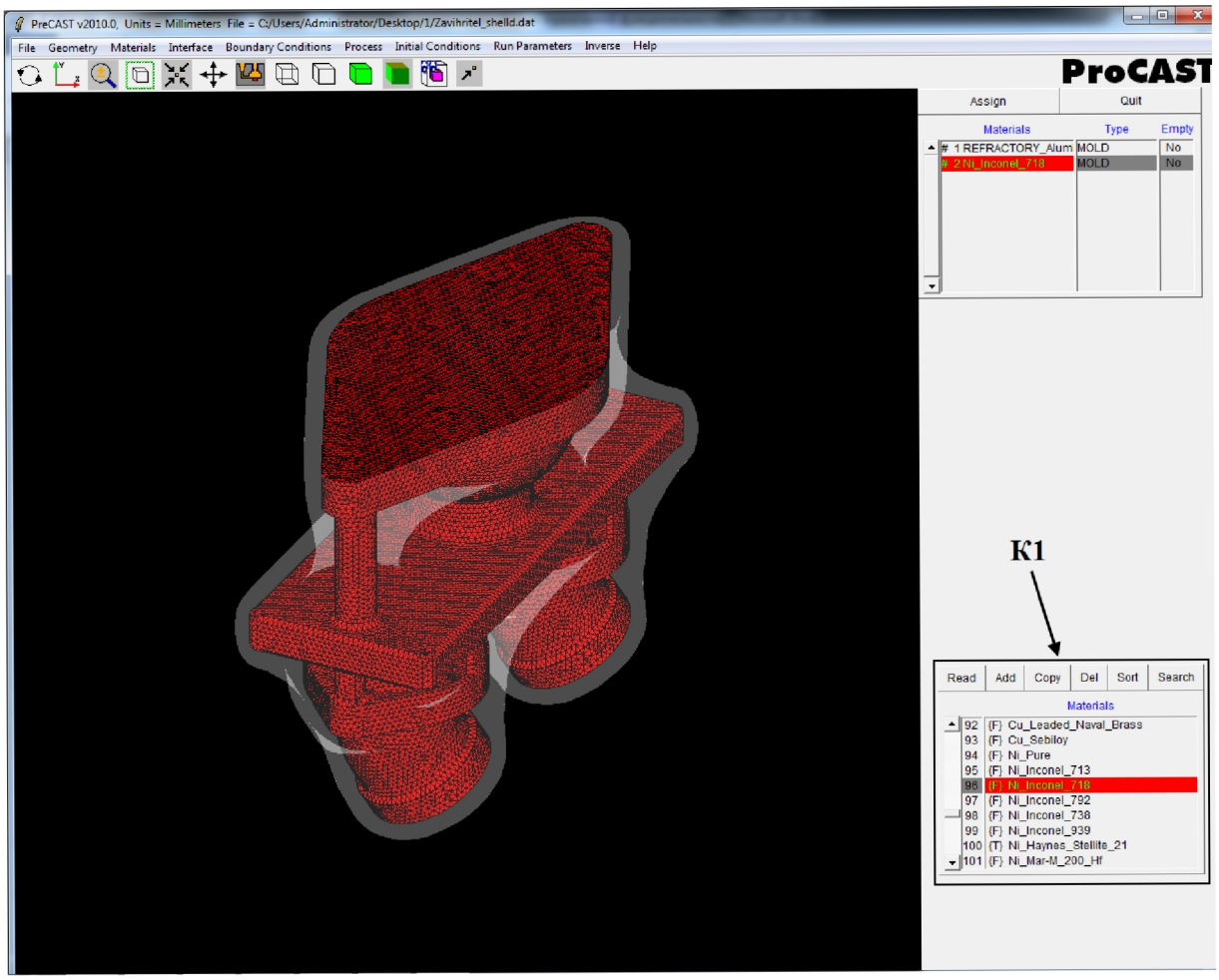


Рисунок 2.35 – Задание материала отливки

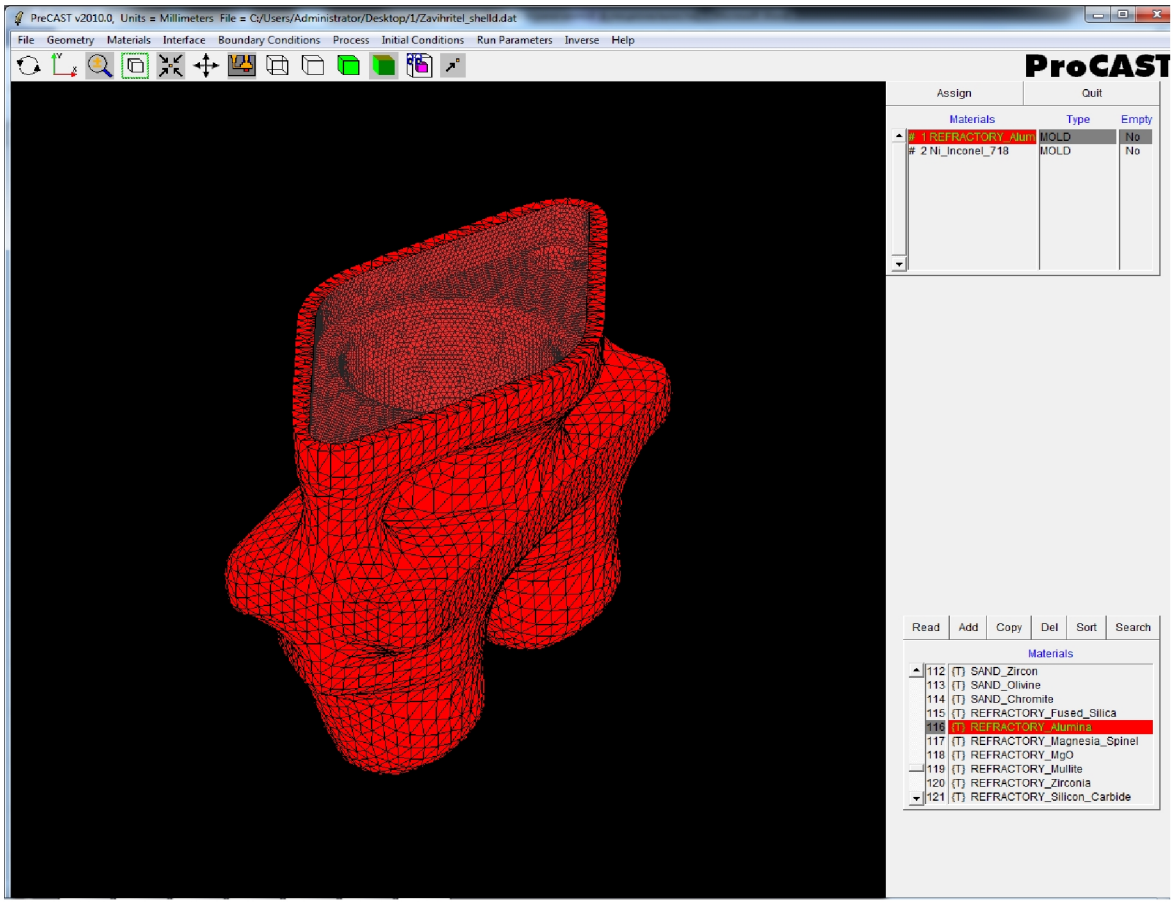


Рисунок 2.36 – Задание материала формы

В закладке «interface» задаем стандартные условия выбирая из меню в правом нижнем углу (коэффициент теплопередачи, равен 700 W/m*2/K), и задаем тип контакта щелчком ЛКМ между формой и отливкой, в данном случае тип контакта будет «coing», при задании параметров пользуемся функцией «assing» (рисунок 2.37).

Переходим в закладку «Boundary Conditions» в подменю «Assign Surface» для задания температуры, скорости, и предварительного подогрева формы.

Используем закладку «add» (К1 на рисунке 2.38) где соответственно и выбираем температуру (temperature), скорость (velocity) и предварительный подогрев (heat). При задании данных параметров в меню правого нижнего угла выбираем закладку «add» (К2 на рисунке 2.39), где задаем параметры для каждого выбранного элемента условий заливки.

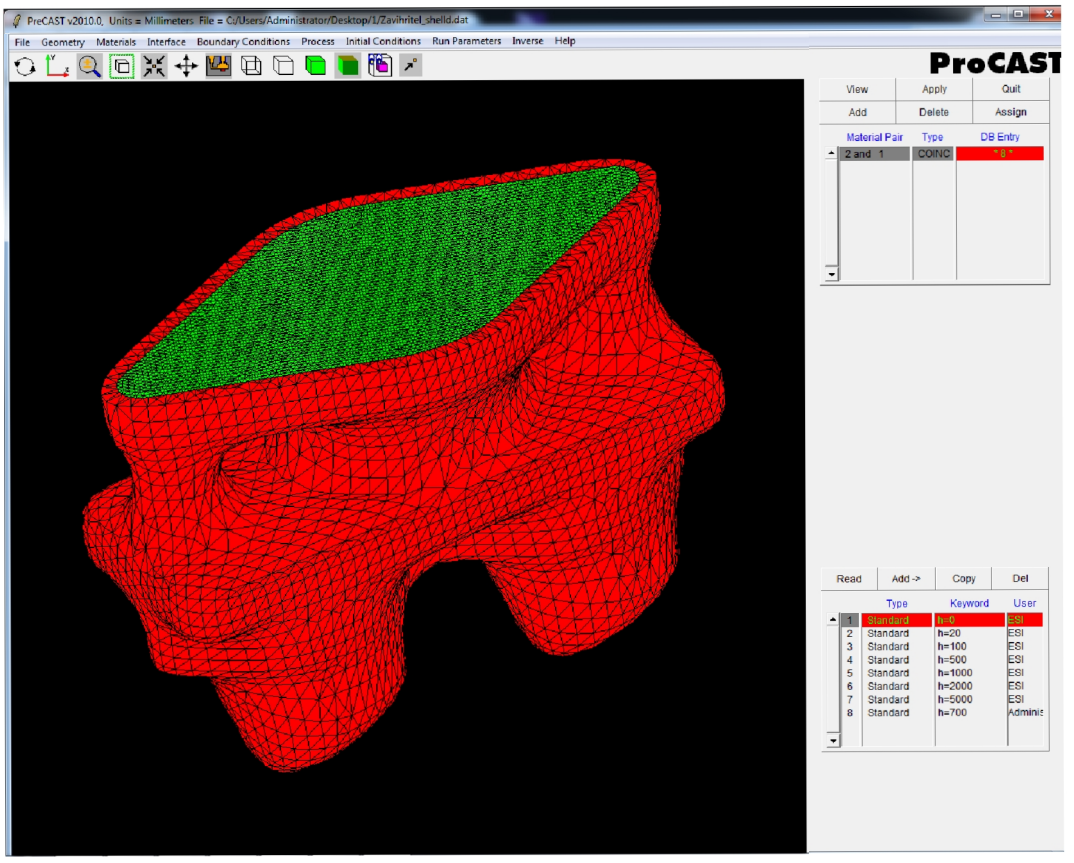


Рисунок 2.37 – Задание типа контакта формы и металла

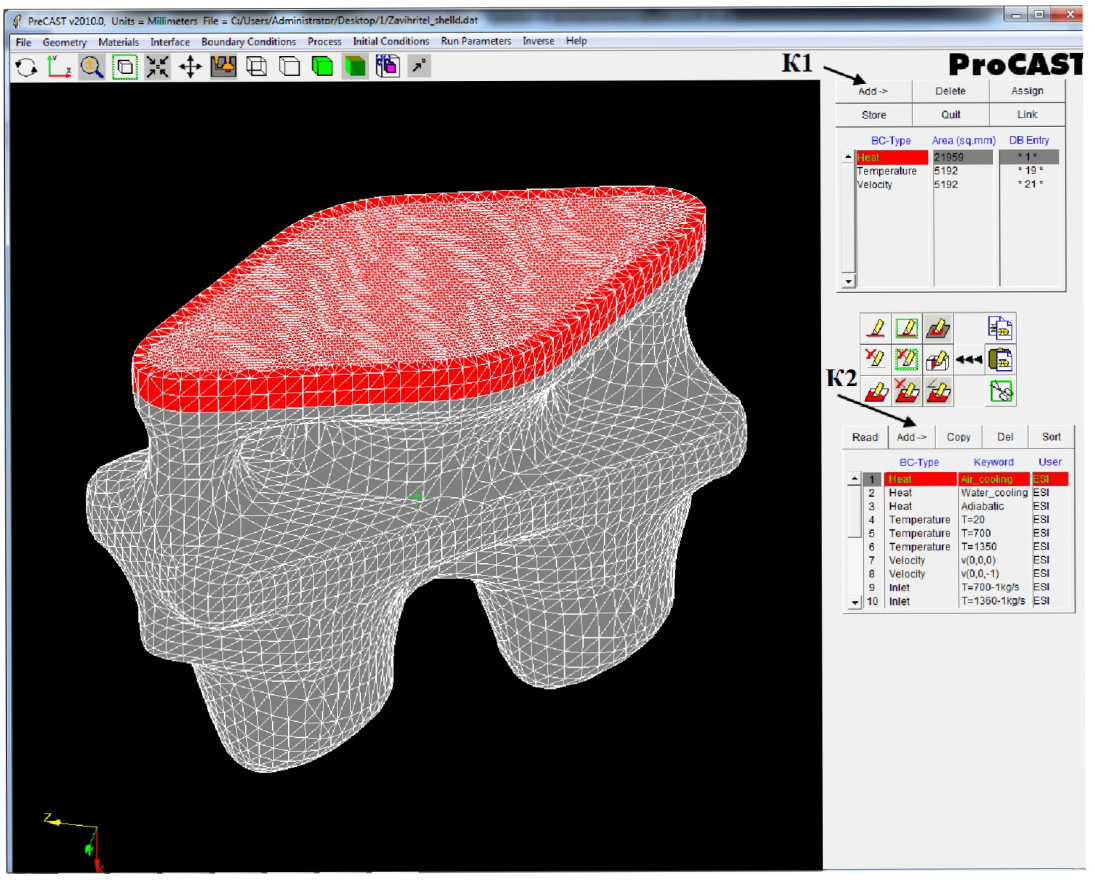


Рисунок 2.38 – Задание предварительного подогрева для формы отливки

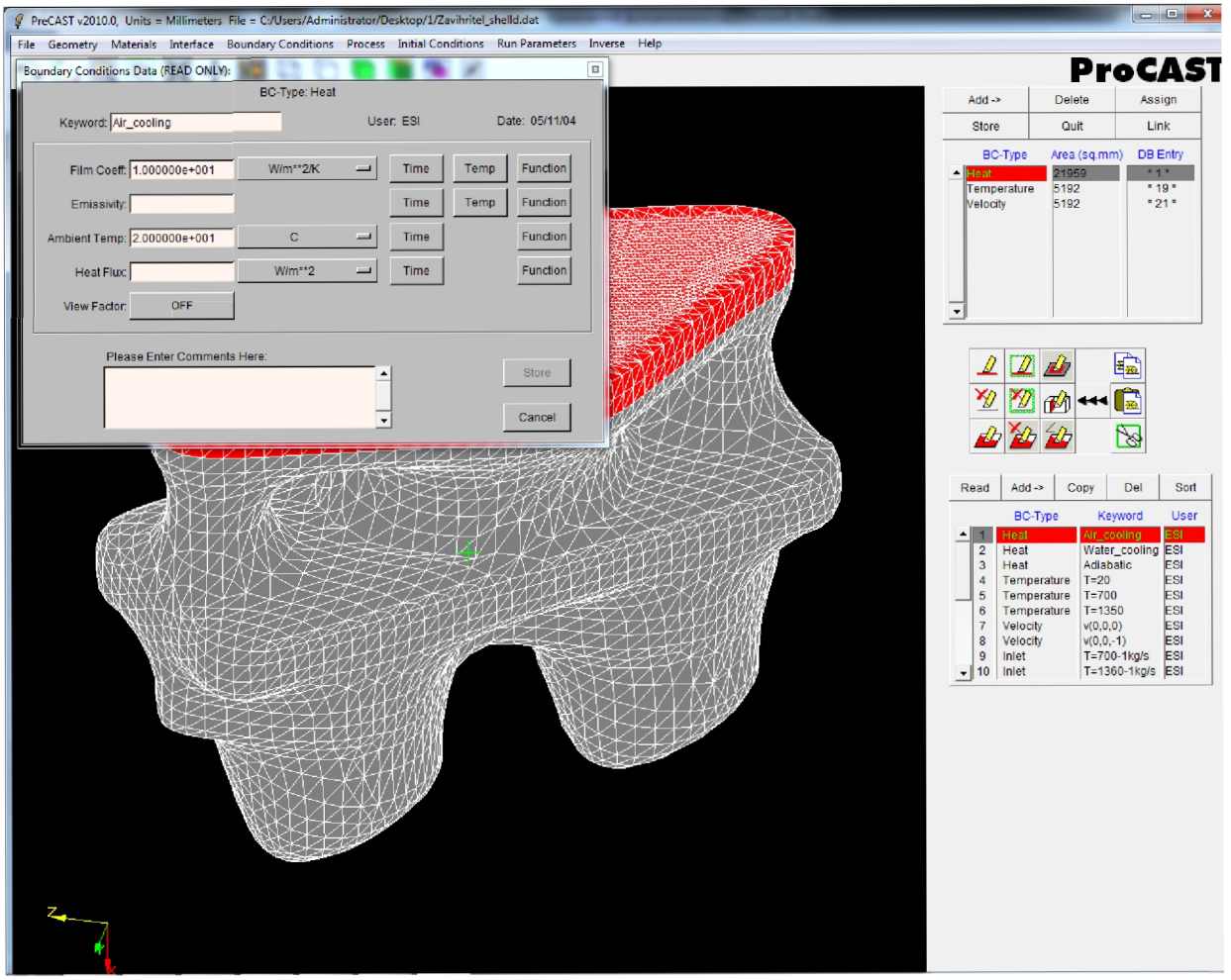


Рисунок 2.39 – Задание табличных данных предварительного подогрева

При задании параметров предварительного подогрева формы выделяем внешнюю оболочку формы, при помощи инструментов выделения узлов сетки, для упрощения выделения используем команды «Propagate-Select» и «Define Propagating Angle. После чего записываем выбранные поверхности при помощи команды «store». В окне задания параметров предварительного подогрева формы задаем значения температуры окружающей среды, коэффициент теплопередачи и коэффициент черноты, после чего для закрытия окна используем команду «store» (рисунок 2.38, 2.39).

Задаем параметры температуры заливки, для чего выделяем поверхность заливки (заливочное отверстие) используя команду выделения поверхности узлов сетки, после выделения сохранив выделенную поверхность используем

команду «store» в окне задаем значение температуры (T=1570^{0}C) согласно технологии заливки и закрываем окно при помощи команды «store» (рисунок 2.40).

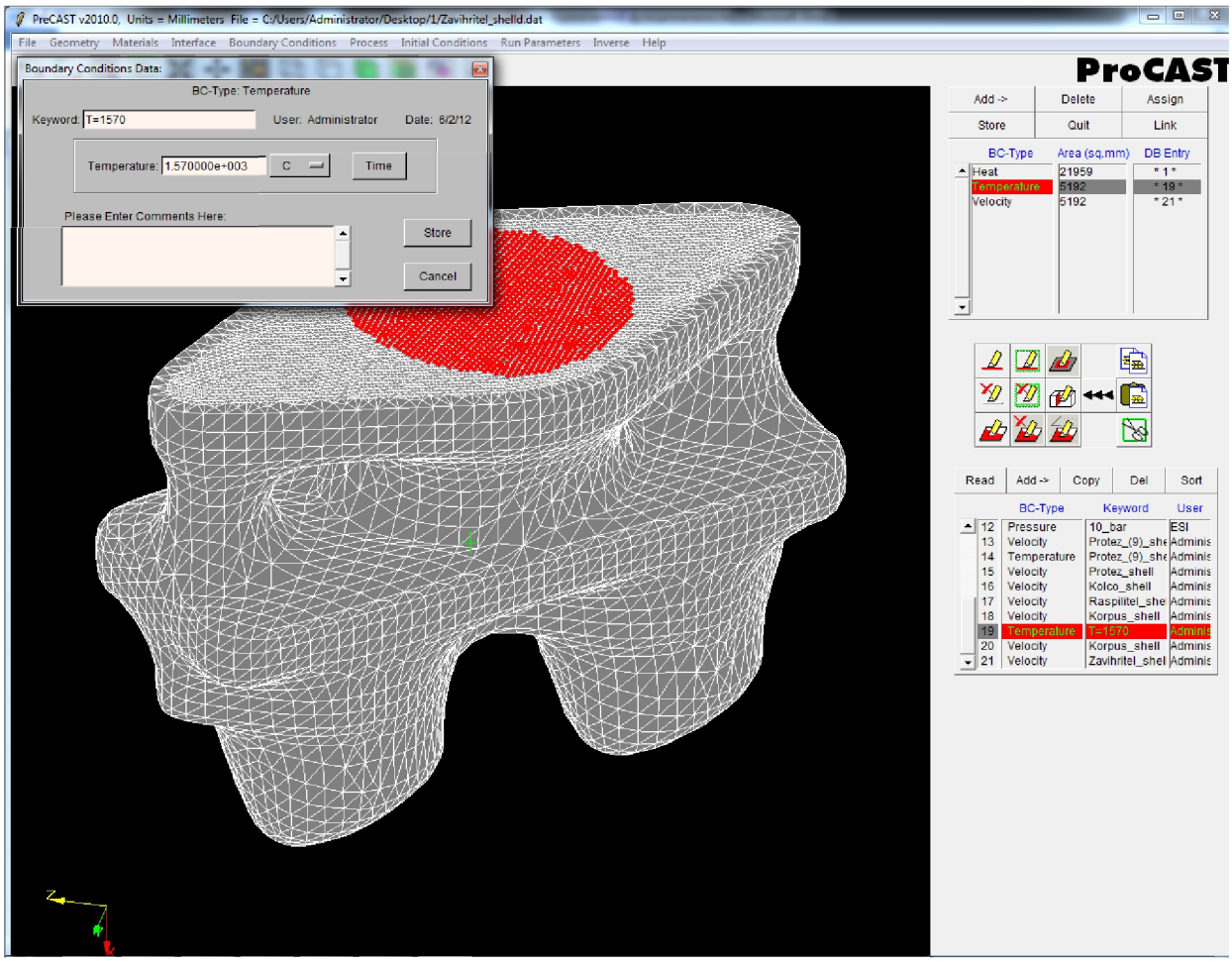


Рисунок 2.40 – Задание температуры

Переходим к заданию скорости заливки. При задании скорости необходимо так же выделить заливочную поверхность, как в случае с температурой, для удобства копируем уже выбранную поверхность используя команды «copy/paste». В окне задания параметров скорости необходимо задать скорость по оси заливки, по всем остальным осям значения необходимо оставить нулевыми. Если направление скорости заливки будет противоположно направлению вектора оси, то ставим перед значением скорости знак минус. Для удобства задания используем команду

«velocitycalculator», при выборе данной команды открывается дополнительное окно где задаем значения времени (20 секунд), система выдает скорость которую заносим в значение оси. Скорость входящего потока металла рассчитывается в специальном калькуляторе скорости «Velocity calculator». Величина скорости определяется требуемым временем заполнения формы (принимается 15 с). Скорость заливки расплава через литниковую чашу (S=5192 мм^2) всей полости оболочки составляет около 8,96 мм/с. Причем изначально ставим единицы измерения мм/с, а во все не заполняемые поля вводим значение 0 (рисунок 2.41).

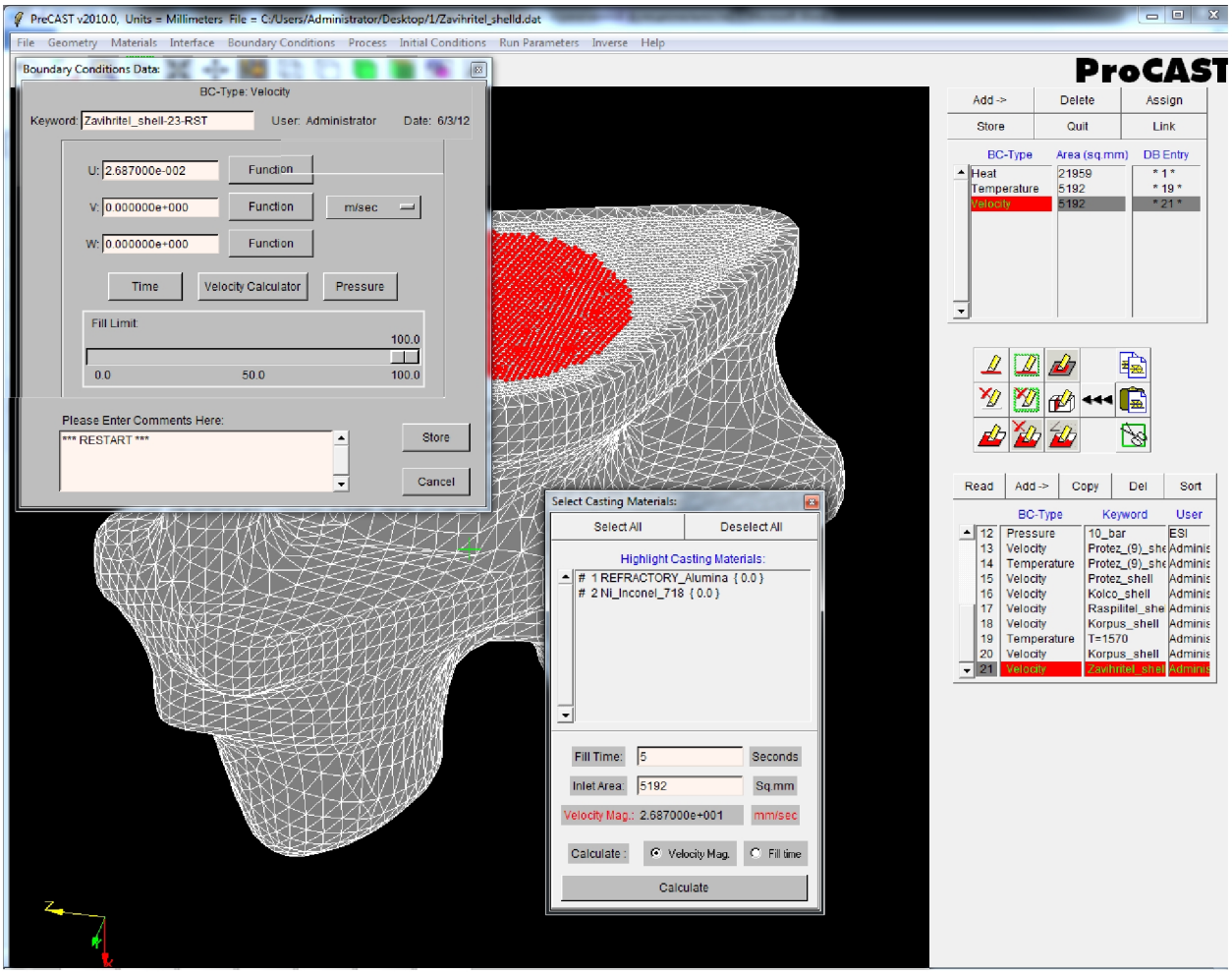


Рисунок 2.41 – Задание скорости

Задаем вектор гравитации (рисунок 2.42) для чего открываем закладку «process» и подменю « gravity» в открывшемся окне задаем вектор гравитации (9,8 м/с^2) относительно оси заливки. Если ось заливки противоположно направлена относительно вектора гравитации, то ставим знак минус.

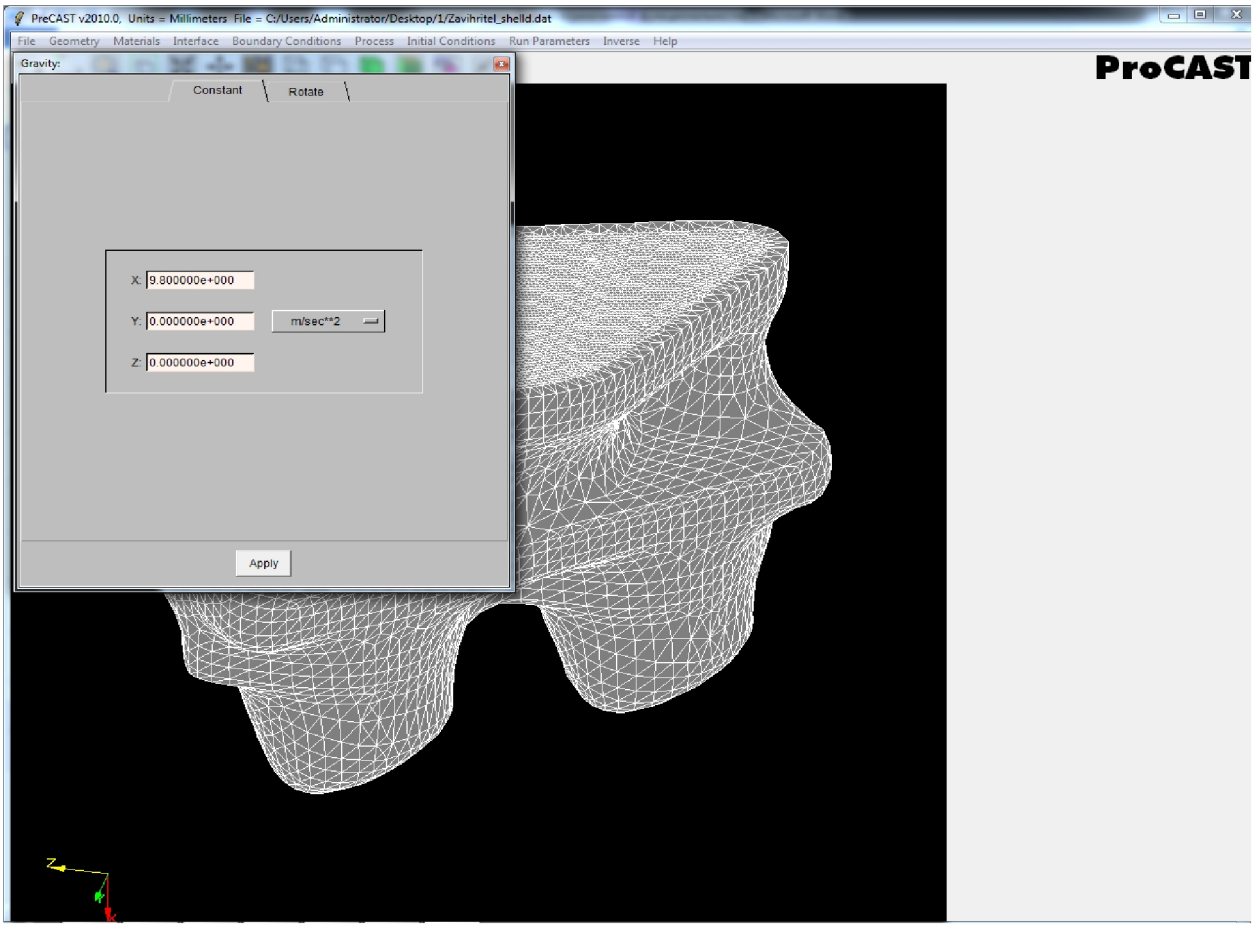


Рисунок 2.42 – Задание вектора гравитации

Переходим на вкладку InitialCondition и выбираем параметр Constant. Задаем начальные температуры отливки (T=1050^{0}C) и формы (T=1570^{0}C), для чего, выбрав данный материал в нижней строке задаем значение температуры, используя клавишу «enter» (см. рисунок 2.43).

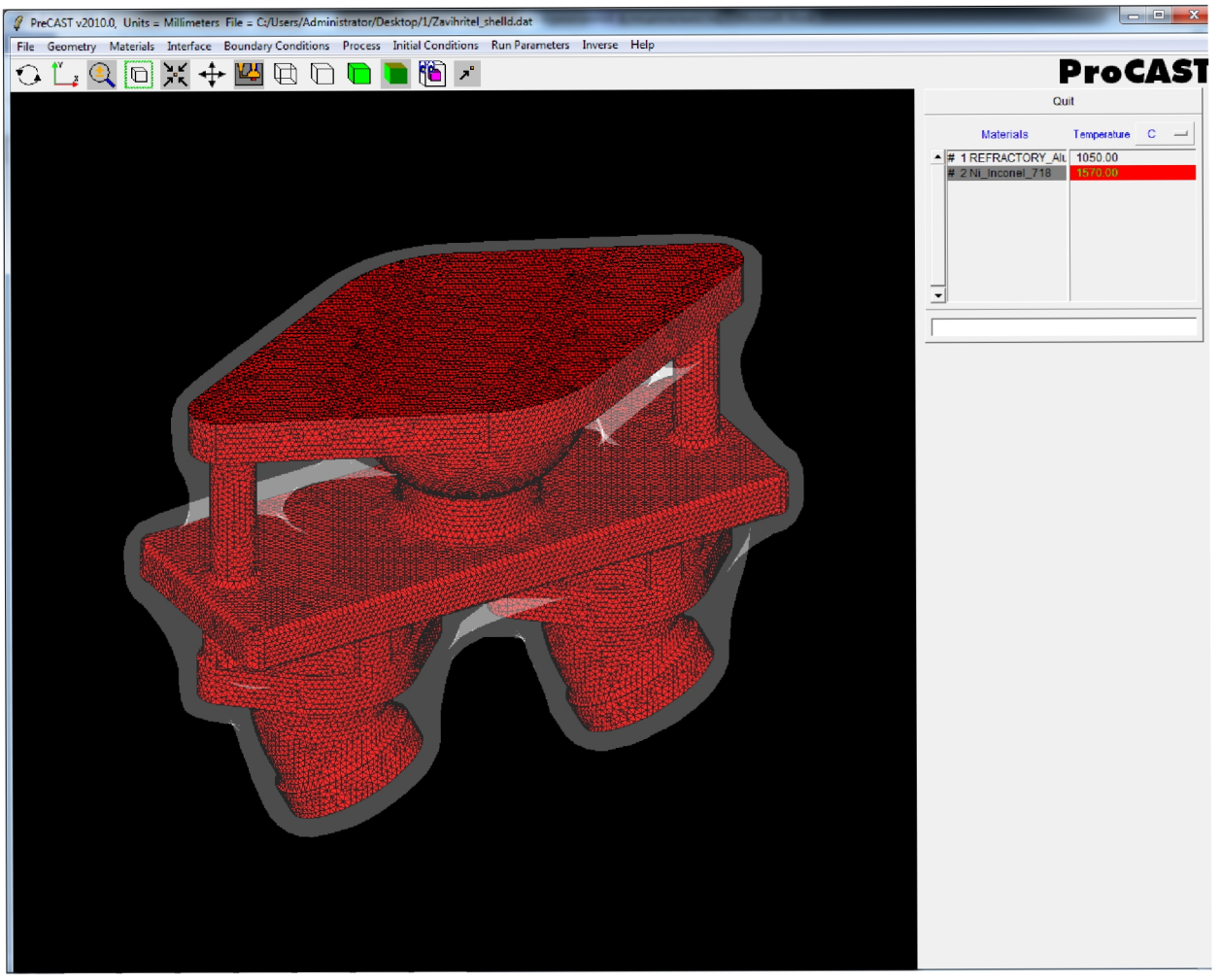


Рисунок 2.43 – Задание начальной температуры формы и металла

В закладке «RunParametrs» (рисунок 2.44) задаем параметры процесса литья в данном случае это литье по выплавляемым моделям, во вкладке «Preferences» выбираем «Gravity filling». При этом будут автоматически установлены специализированные параметры для данного вида. В вкладке «General» меняем количество шагов NSTEP на 20000, TSTOP на 1100 (для уменьшения времени расчета). Для получения более детальных результатов устанавливаем меньшее значение частоты сохранения расчетных шагов, в нашем случае 5. Во вкладке «radiation» выбираем «advantcet» и задаем параметры «TRI2QUAD».

TRI2QUAD – параметр, определяющий возможность группировки или не группировки треугольников в четырехугольники для расчета теплообмена излучением. Когда параметр TRI2QUAD равен 1, треугольники

группируются в четырехугольники (при условии, что угол между треугольниками не слишком велик). Это приводит к снижению количества излучающих поверхностей (примерно на 50%), что значительно сокращает время расчета (примерно на 75%). Сохраняем заданные параметры используя команду «apply».

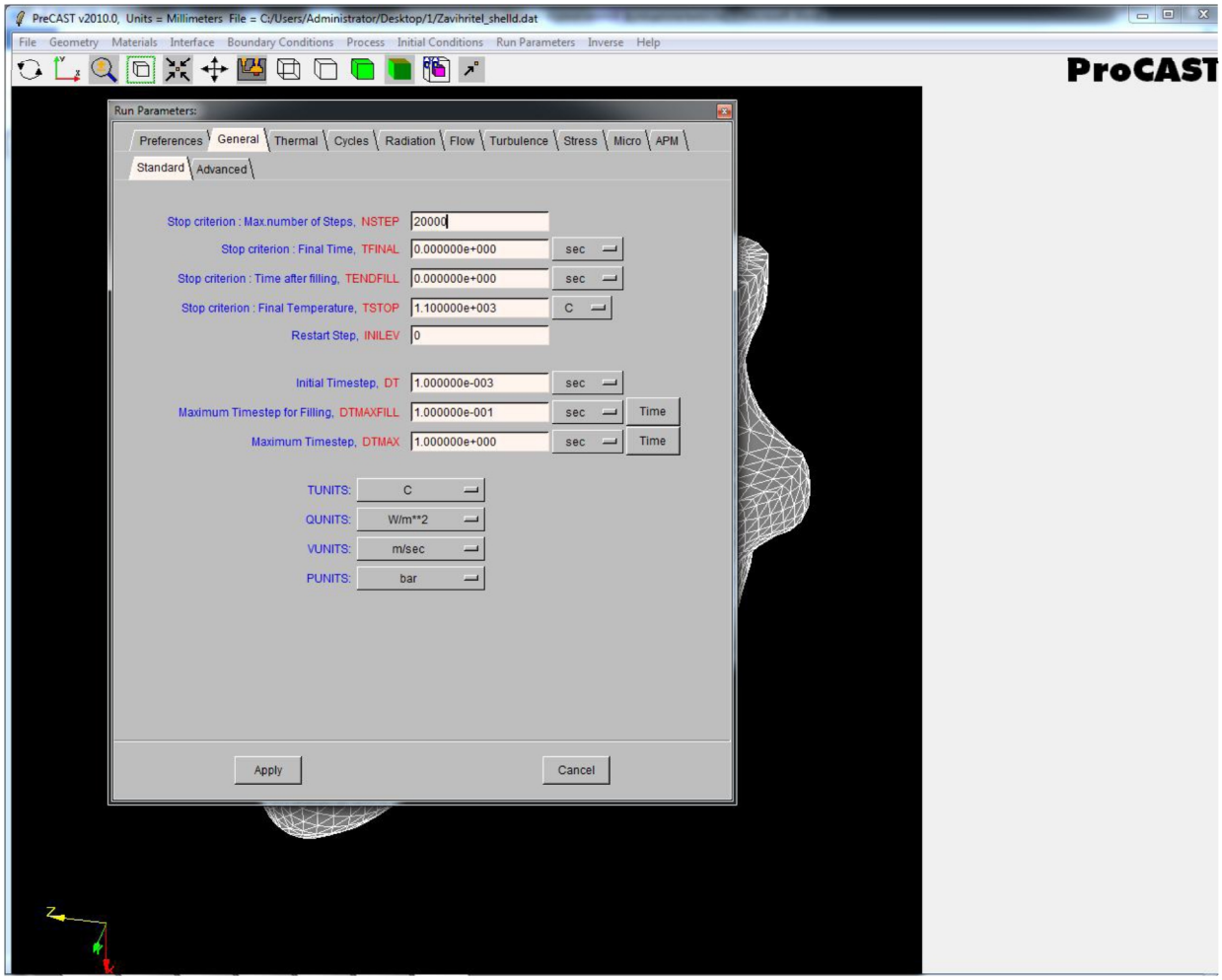


Рисунок 2.44 – Задание граничных условий

На этом задание граничных и начальных условий заканчивается. Для сохранения и оптимизации введенных значений заходим во вкладку File и ставим галочку напротив пункта Optimize. Затем снова заходим во вкладку File и выбираем Exit. Происходит оптимизация модели с заданными условиями. На этом работа в модуле PreCast заканчивается. При

оптимизации PreCast переименует все узлы в модели для увеличения скорости расчета. Оптимизацию необходимо выполнить перед выходом из PreCAST

2.3.2. Компилирование настроек и создание необходимых для расчета файлов в модуле DataCast

DataCast компилирует и конвертирует исходные данные, хранившие в ASCII-файле prefixd.dat, в двоичный формат, пригодный для решателя. DataCast также удаляет все файлы с результатами расчета и создает новые. Поэтому при запуске DataCast все результаты моделирования, проведенные раннее, будут удалены. Также DataCast исправляет некоторые ошибки в ходе компиляции.

Работа в данном модуле начинается с загрузки файла модели, подготовленного на этапе PreCast. Для этого необходимо в диалоговом окне ProCast указать путь к папке с подготовленными файлами и нажать на кнопку DataCast (рисунок 2.45). Произойдет загрузка модели в модуль и появится диалоговое окно, в верхнем поле которого будет указано имя, загружаемого файла.

Модуль DataCast служит препроцессором системы. Используем команду прочтения файла (рисунок 2.46).

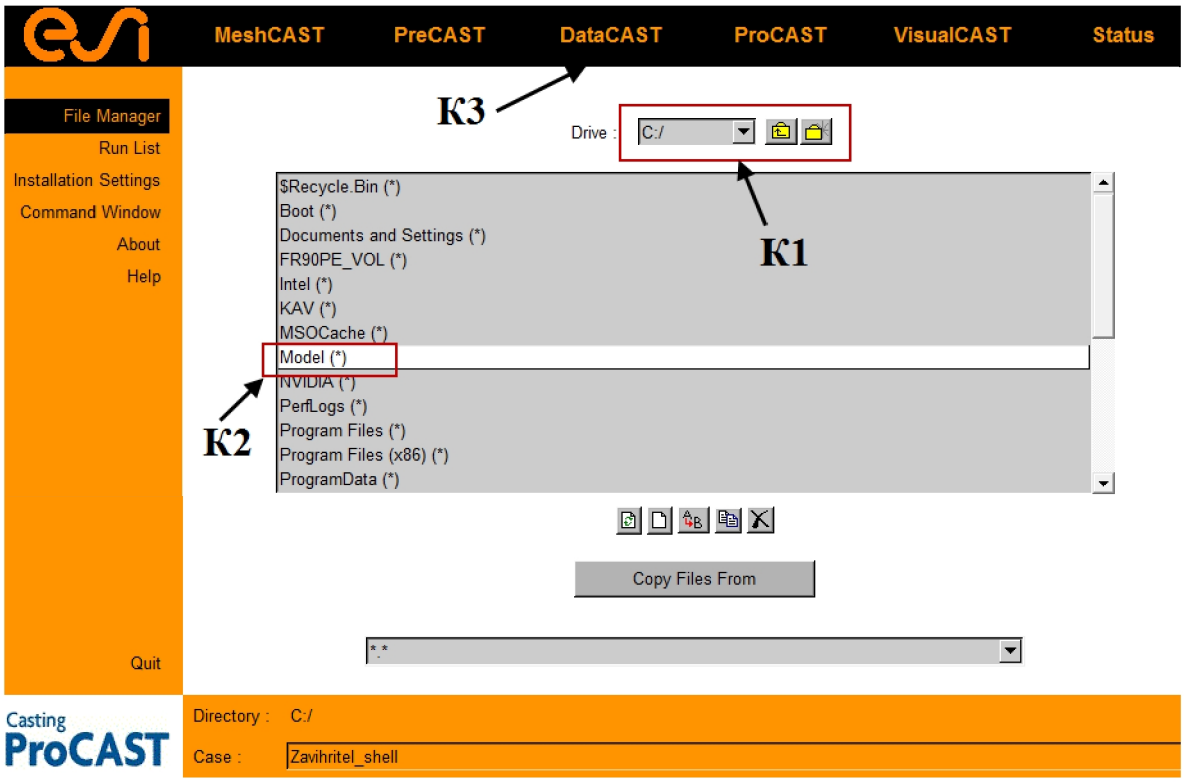


Рисунок 2.45 – Загрузка модели в модуль DataCast

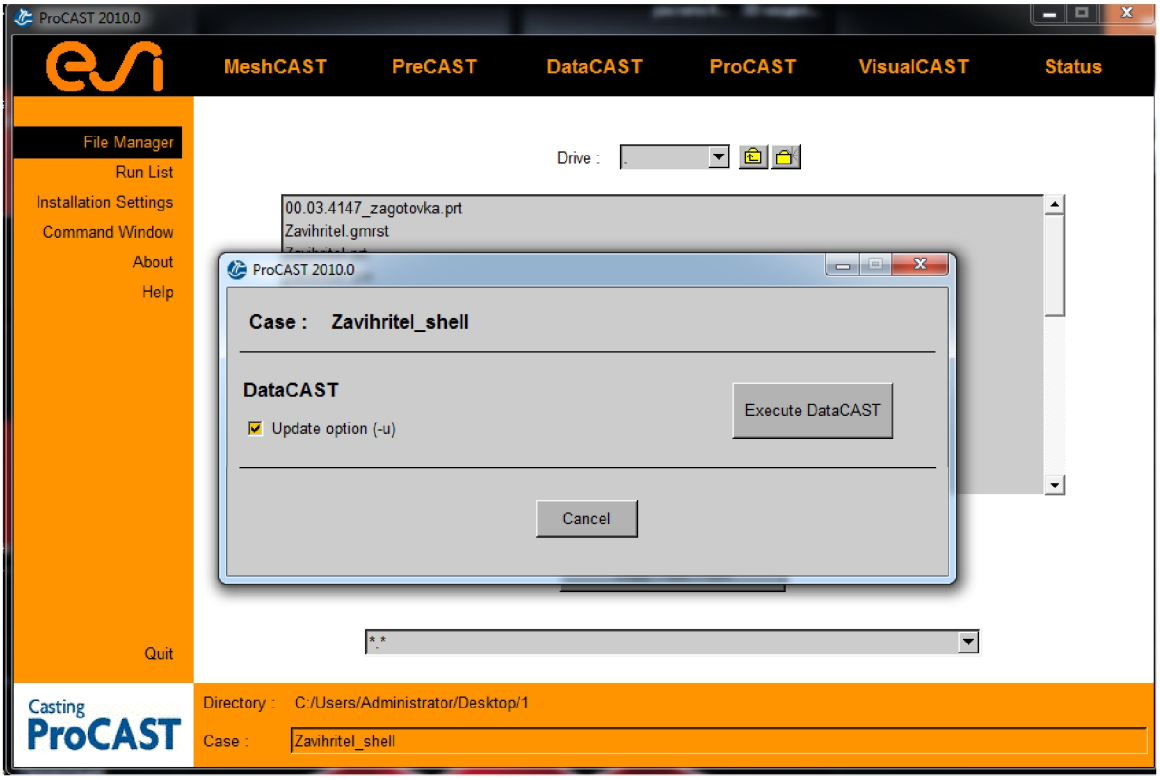


Рисунок 2.46 – Компилирование настроек

Опция ExecuteDataCAST необходима для компиляции введенных в PreCAST параметров в файлы запуска расчета. Проводить компиляцию необходимо перед первым запуском каждого расчета, при повторном перезапуске (с текущего шага или нулевого) компиляция не нужна. Разница между DataCAST и ExecuteDataCASTfirst состоит в том, что в первом случае компиляция проводиться независимо, во втором случае - перед запуском самого расчета.

После этого появляется черное диалоговое окно и произойдет обработка модели. Ждем пока в этом окне не появиться сообщение следующего вида: “Для продолжения нажмите любую клавишу…” – это свидетельствует о том, что модуль DataCast успешно завершил свою работу. На этом работе в модуле DataCast заканчивается.

2.2.4. Выполнение анализа скомпилированной модели в модуле ProCast

ProCAST управляет решателем. Он создает все файлы, которые необходимы для ViewCast.

1. Перейдите в окно File Manager.

2. Находим *d.dat и *p.dat файлы, которые будут использованы для расчета. Оба этих файла необходимы для решателя.

3. Нажмите кнопку ProCast.

4. Появится новое окно.

5. Поставьте галочку в окне "Execute DataCast first". Эту опцию необходимо использовать перед каждым новым расчетом (рисунок 2.47).

6. Нажмите кнопку Run, при этом будет запущен расчет. После этого появляется черное диалоговое окно, как в командой строке и произойдет обработка модели. Одновременно нажимаем кнопку Status в верхнем меню окна ProCast и ждем пока закончится процесс обработки (рисунок 2.48).

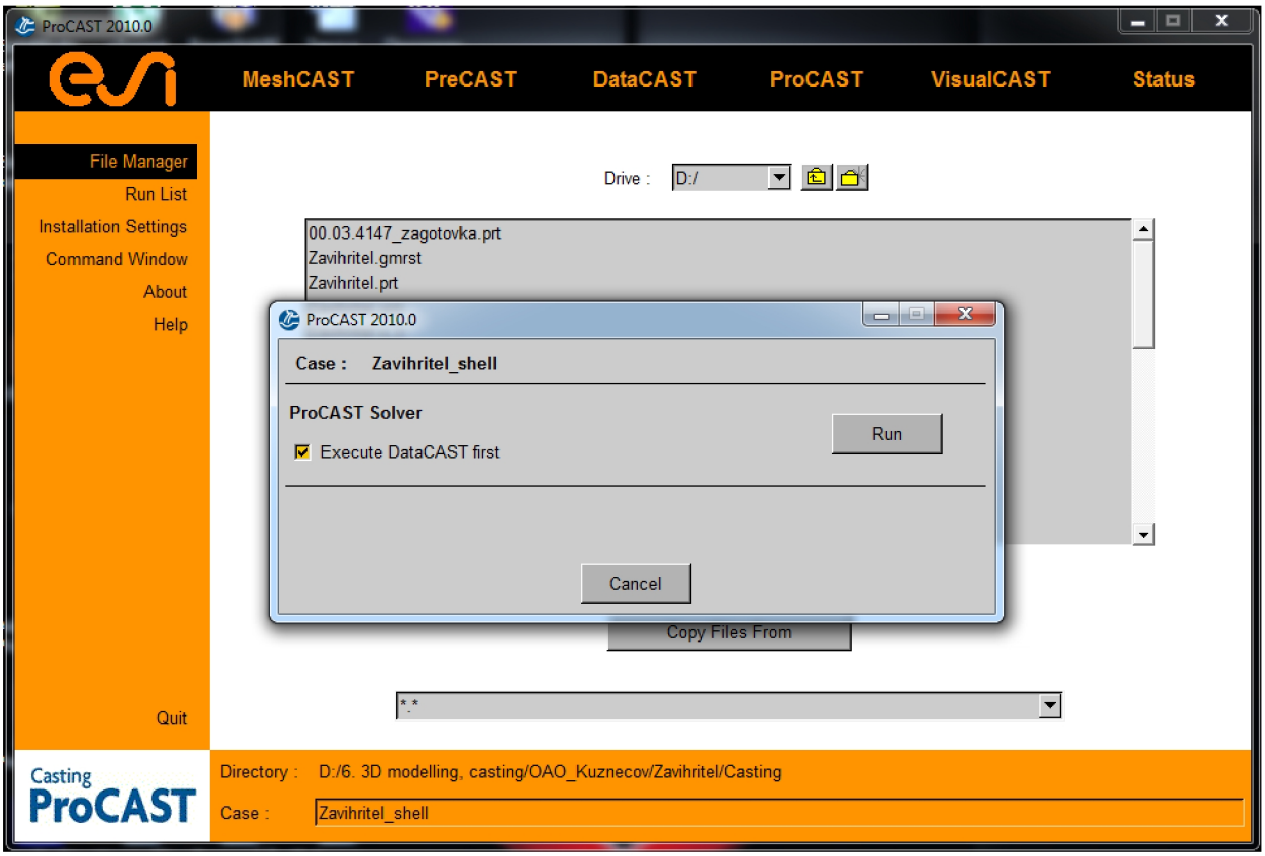


Рисунок 2.47 – Запуск расчета

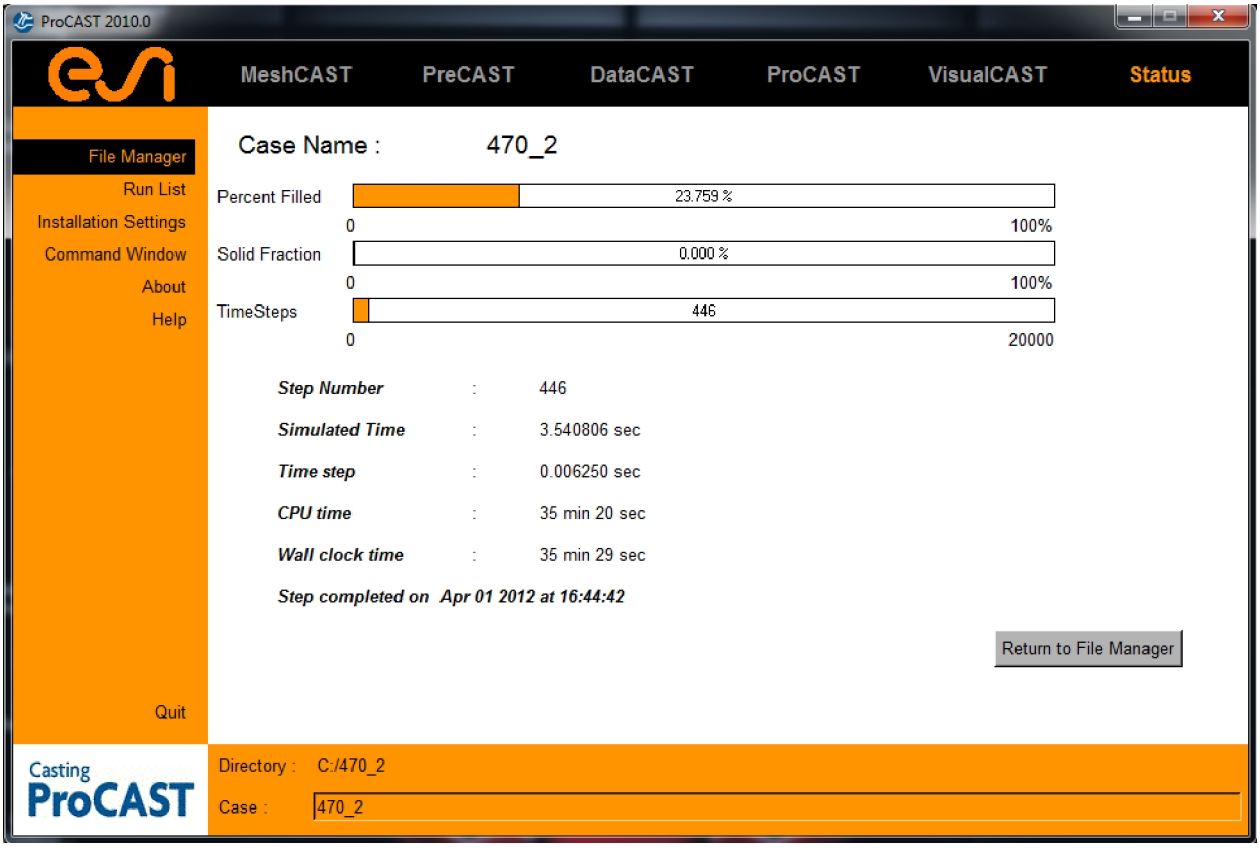


Рисунок 2.48 – Расчет скомпилированной задачи

Данный шаг занимает очень длительное время – от нескольких часов до нескольких дней. После завершения процесса обработки, можно считать работу модуля ProCast завершенной.

Причины, по которым необходим перезапуск:

- ✓ программа закончила расчет в заданном месте;
- ✓ не хватило мощностей компьютера;
- ✓ существует проблема программного обеспечения или сходимости;
- ✓ вы сами прервали расчет.

2.2.5 Анализ полученных результатов виртуальной заливки завихрителя II контура ГТД

Для просмотров результатов расчета программы ProCAST необходимо запустить дополнение ESIVISUALCAST, и открыть файл результата расчета с расширением .UNF. Данное дополнение позволяет записать видео процессов изменения параметров и заливки.

Ниже приведены данные по результатам расчетов полей температур, скоростей, давлений жидкой фазы и пр., на основании которых можно оценить качество проектируемого технологического процесса.

Температура. Процесс заполнения оболочки и распределение температуры сплава в некоторые моменты времени заливки представлен на рисунках 2.49 – 2.52. Перед заливкой оболочка имеет температуру 1050 ^{0}C, и можно рассмотреть повышение температуры оболочки при контакте с ней расплавленного металла с температурой 1570 ^{0}C. Также представлены температуры ликвидуса и солидуса.

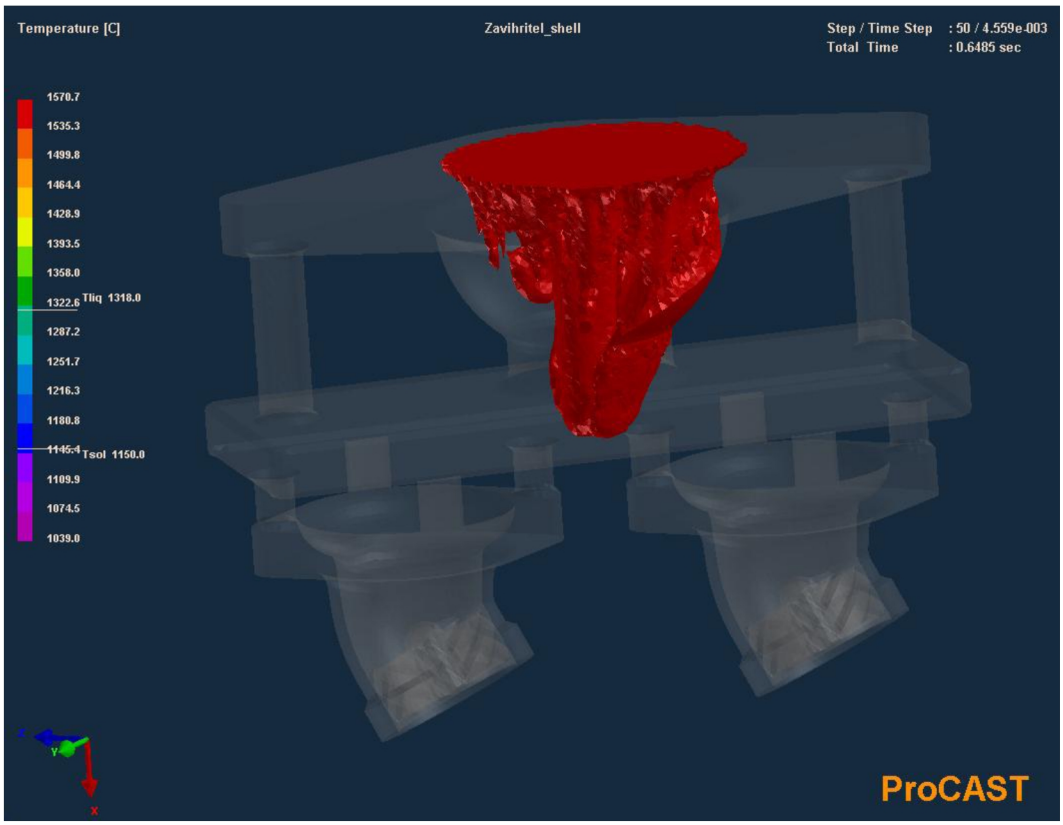


Рисунок 2.49 – Распределение температуры сплава при заполнении оболочки (начальный момент)

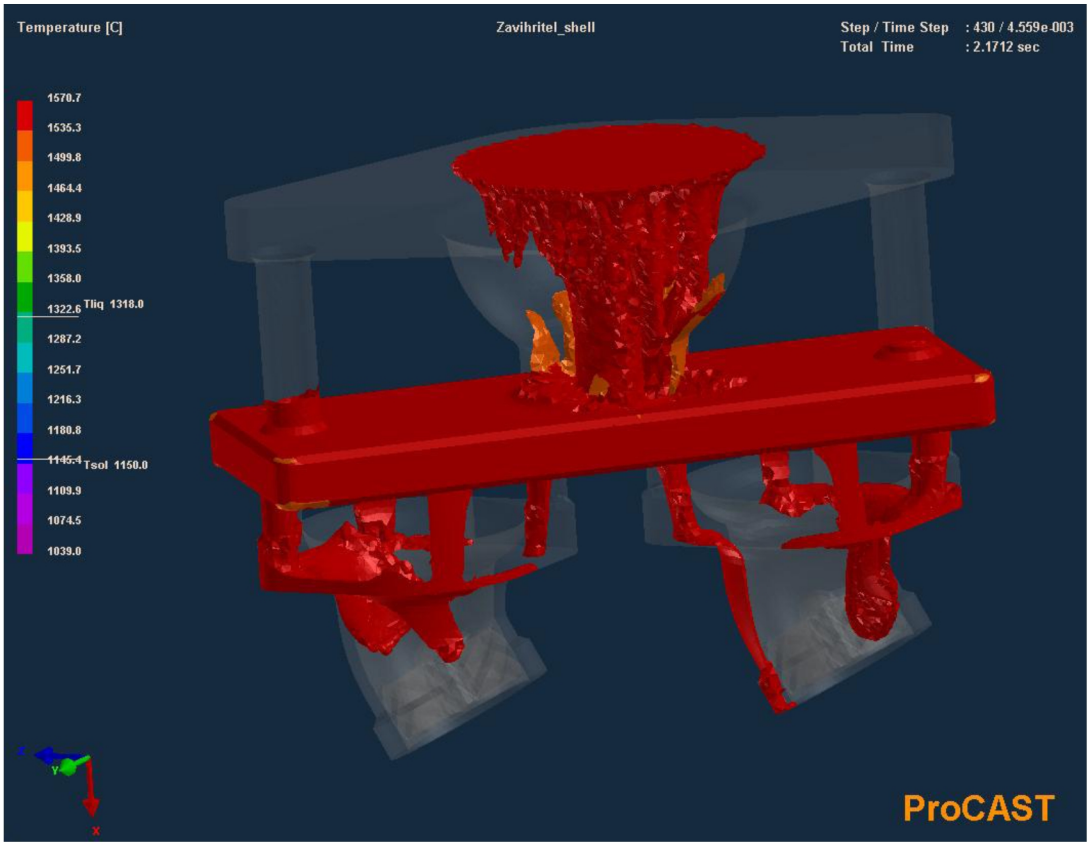


Рисунок 2.50 – Распределение температуры сплава при заполнении оболочки (2 с)

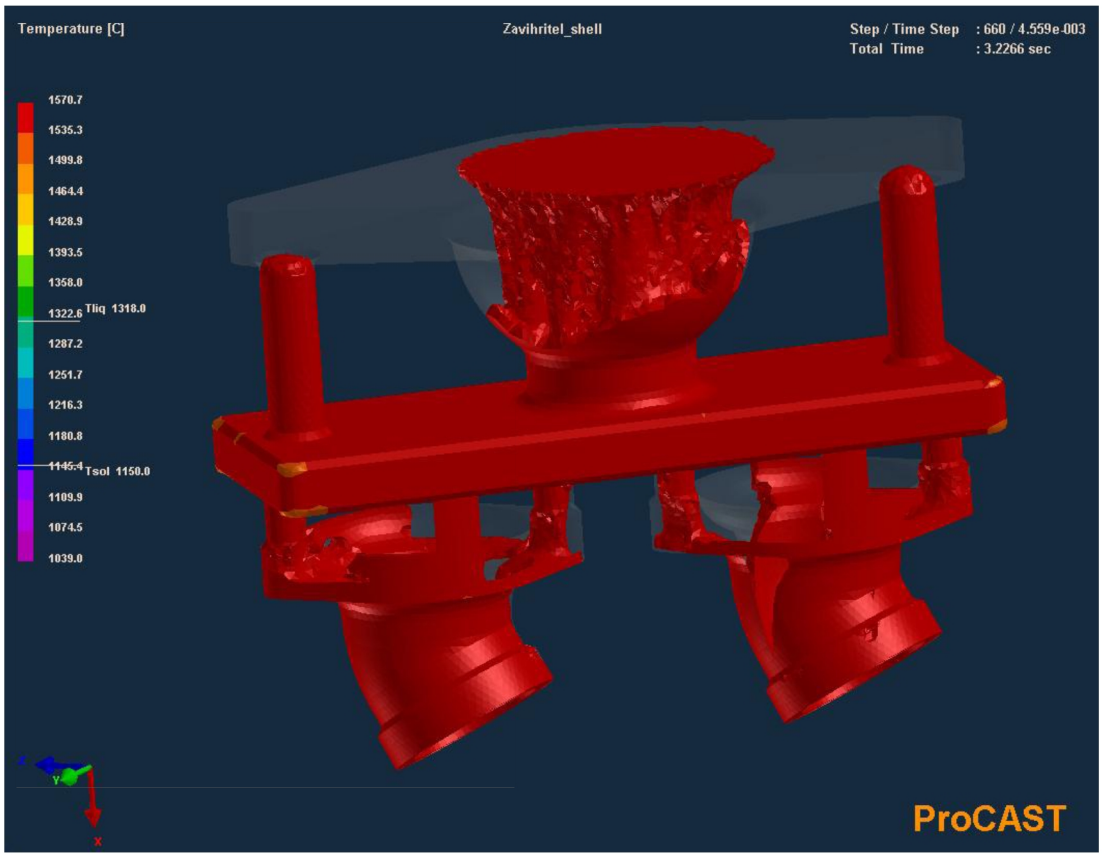


Рисунок 2.51 – Распределение температуры сплава при заполнении оболочки (3 с)

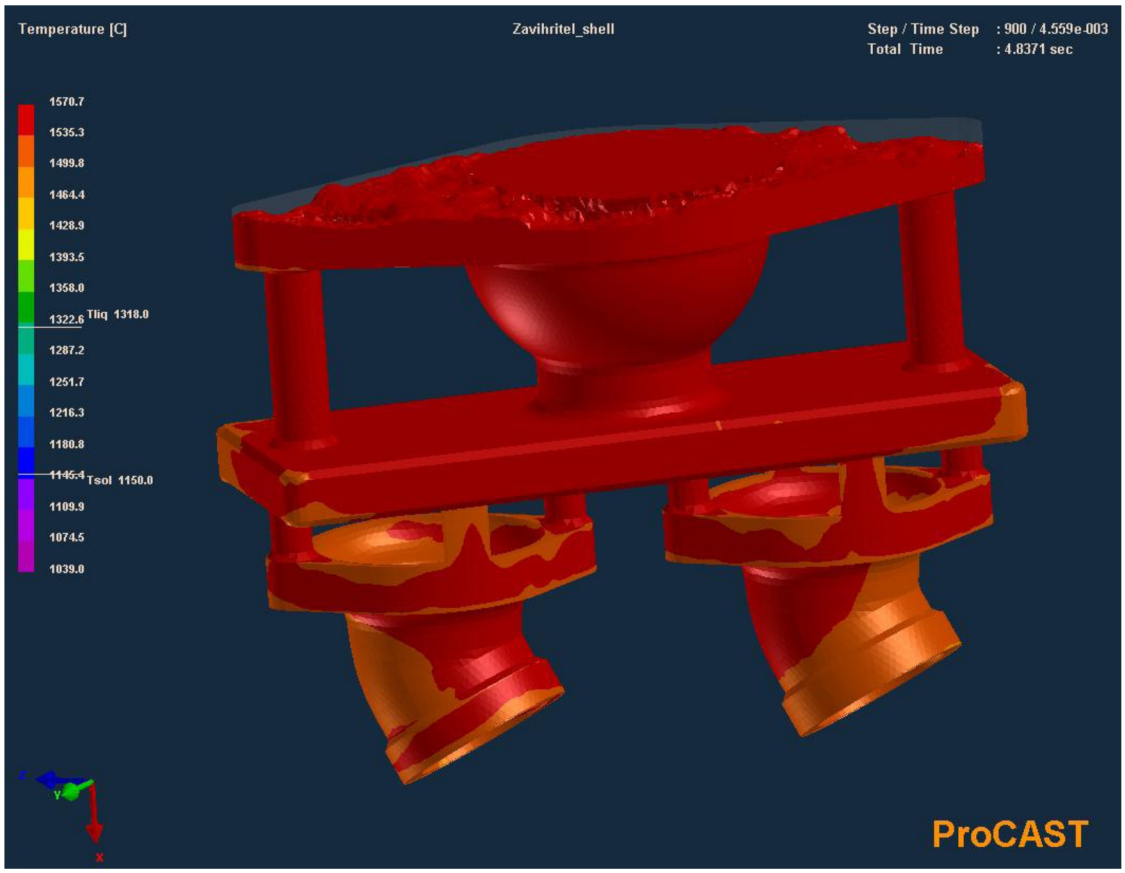


Рисунок 2.52 – Распределение температуры сплава при заполнении оболочки (5 с)

Из рисунков видно, что расплав поступает относительно равномерно в питатели обоих отливок, это свидетельствует об эффективности литников, прибылей и питателей в частности и об литниково-питающей системы в целом.

На рисунке 2.53 представлено распределение температуры одной из половин оболочки перед окончанием заливки.

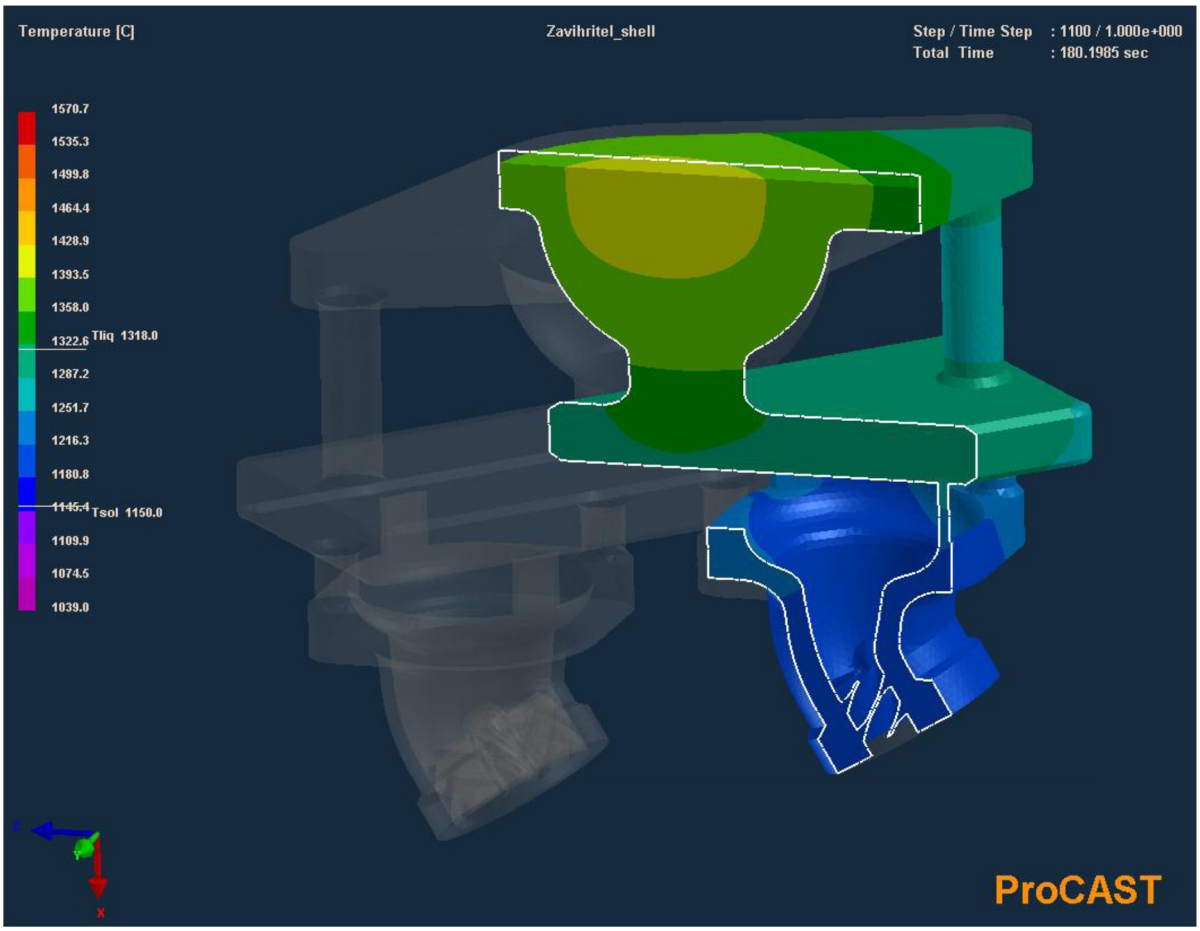


Рисунок 2.53 – Распределение температуры поверхностей оболочки

Оболочковая форма нагревается относительно равномерно по мере наполнения ее сплавом. Большое влияние на распределение температур оказывает местные участки сопротивления течения жидкости (резкое изменение проходной площади и направления движения расплава).

Давление. Динамическое и статическое давление металла представлено на рисунках 2.54 – 2.56.

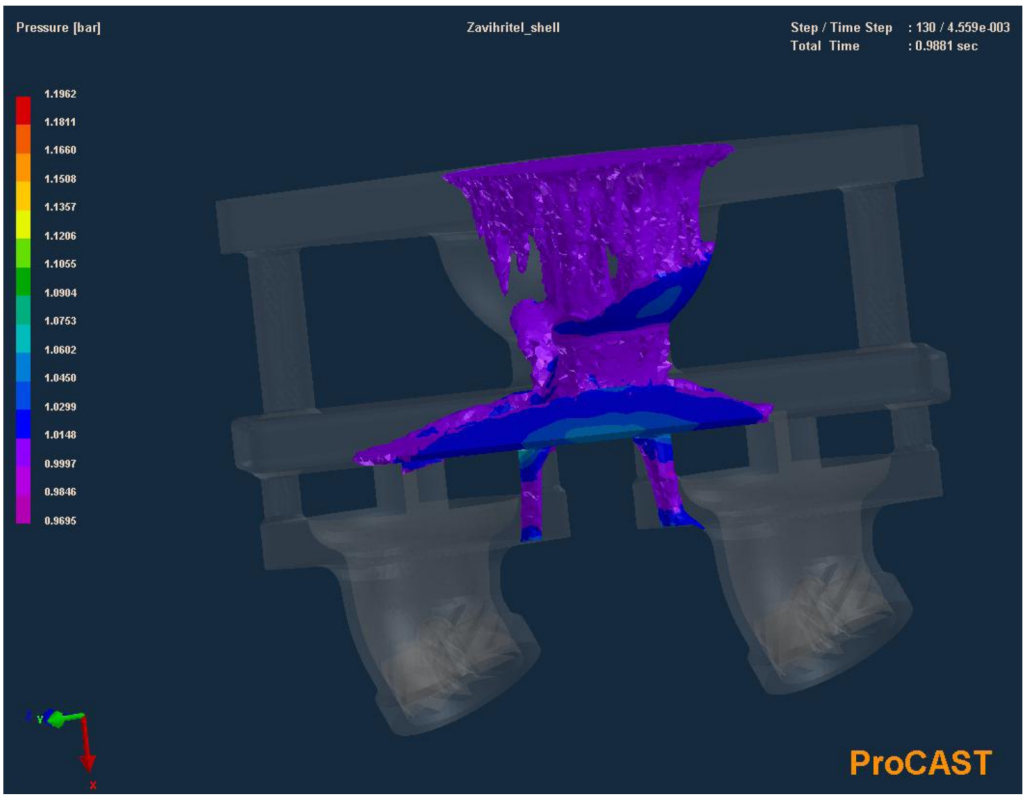


Рисунок 2.54 – Распределение давления сплава при заполнении оболочки в начальный момент заливки

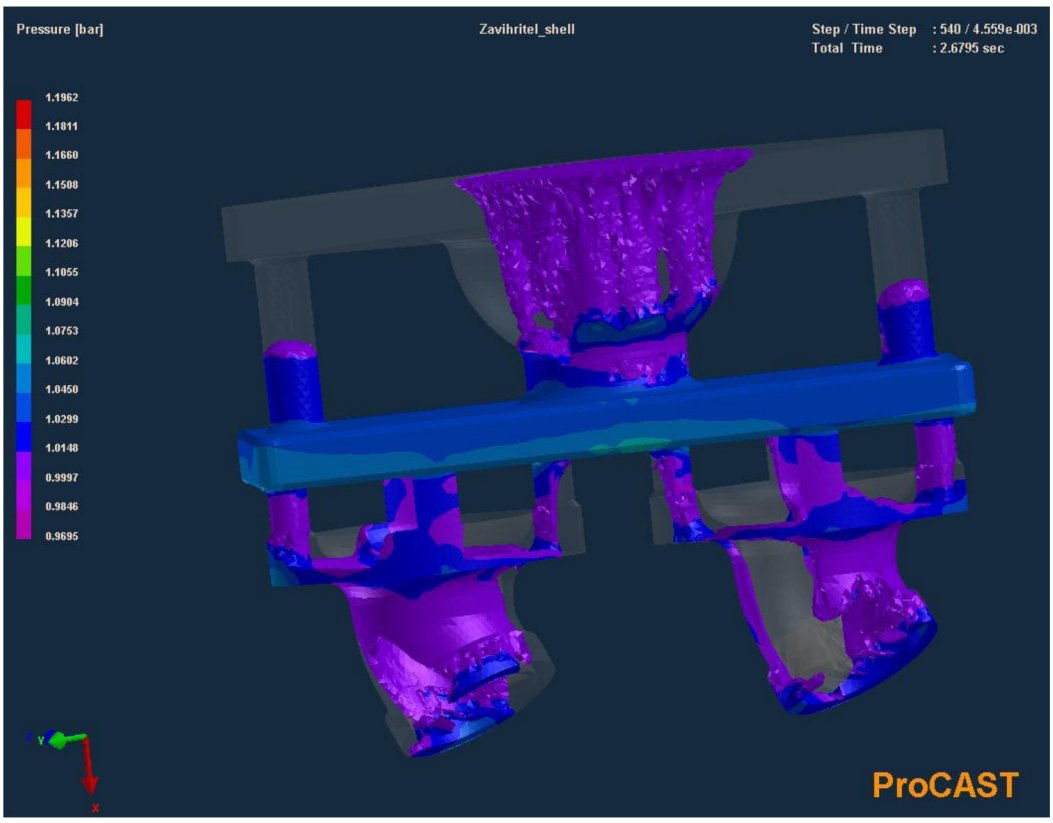


Рисунок 2.55 – Распределение давления сплава при заполнении оболочки в середине заливки

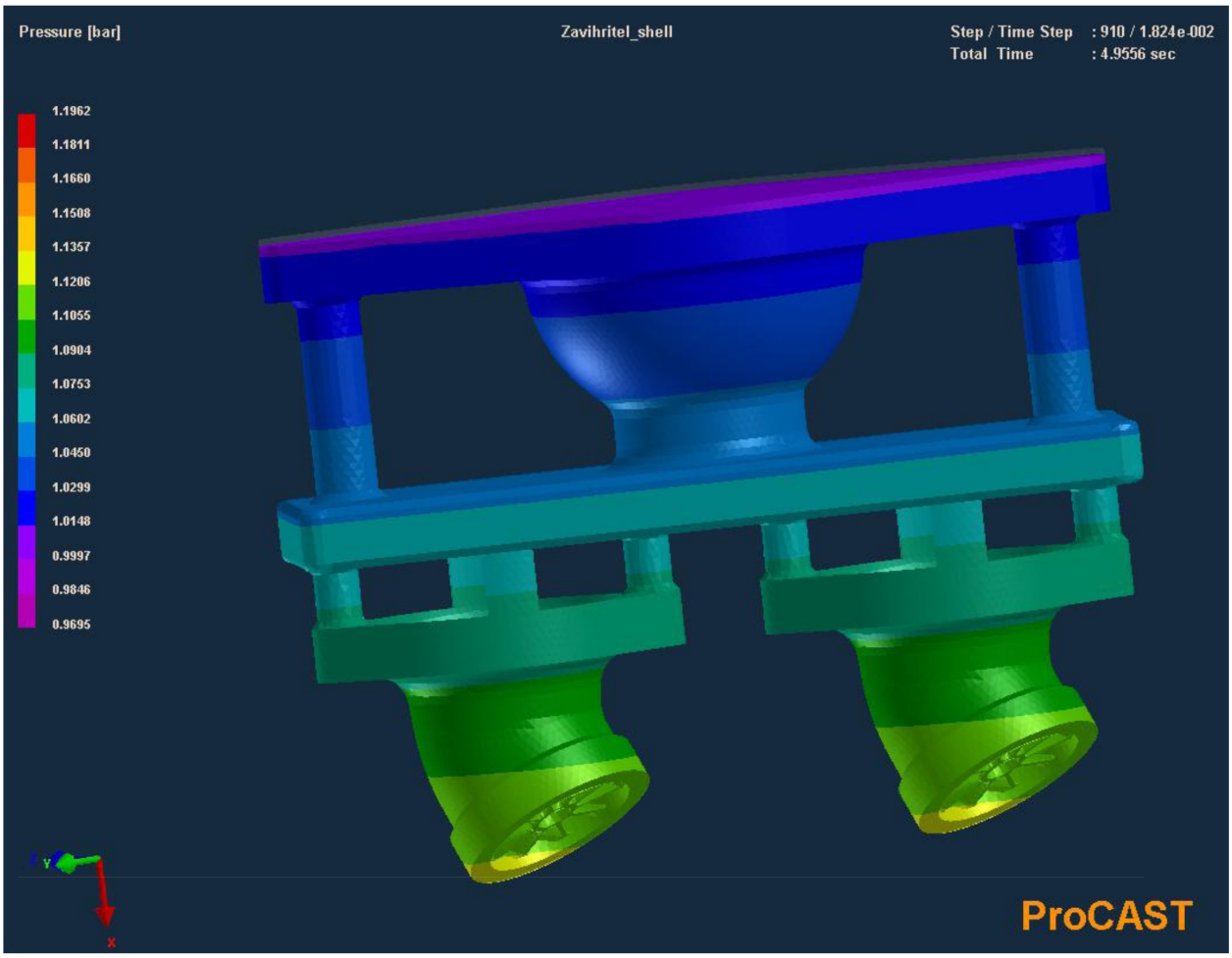


Рисунок 2.56 – Распределение давления сплава при заполнении оболочки в конечный момент заливки

Из рисунков 2.54 – 2.56 видно, что максимальное давление сплава соответствует в нижней части стояка. Распределяясь по двум отливкам давление сплава снижается, и при завершении заливки поле давлений начинает выравниваться по сечению.

Скорость. Значение скорости металла U вдоль оси X представлено на рисунках 2.57 – 2.59.

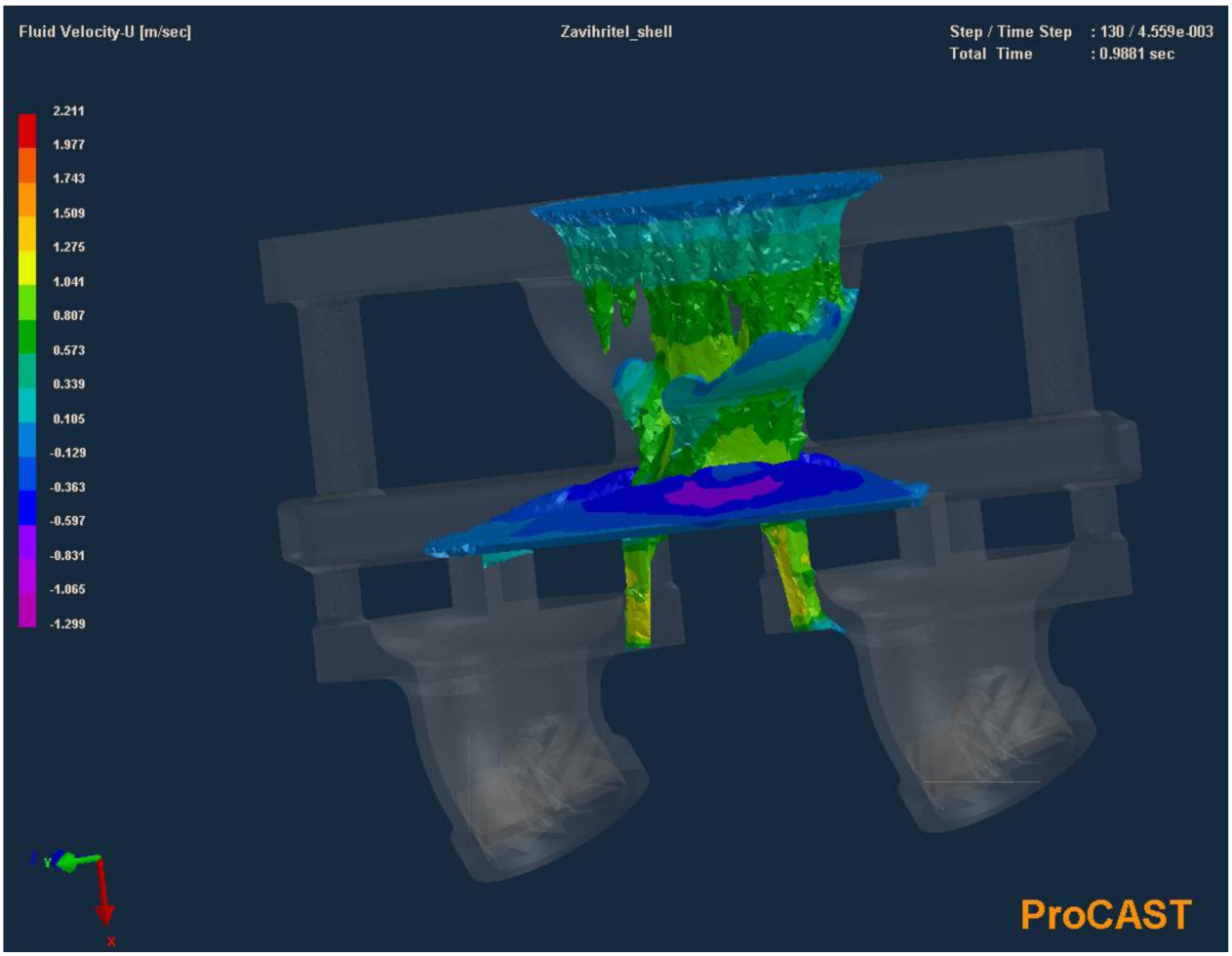


Рисунок 2.57 – Распределение скорости сплава вдоль оси X при заполнении оболочки в начальный момент заливки

Скорость движения частиц сплава вдоль оси X растет с момента заливки в оболочковую форму (рисунок 2.56). К окончанию процесса заливки (рисунок 2.59) расплав имеет равномерное поле скоростей частиц по всему объему вдоль оси X, плавно снижающееся до 0 м/сек.

Количество жидкой фракции (FVOL). Режим заполнения и объем заполненного сплава представлен на рисунках 2.60 – 2.62.

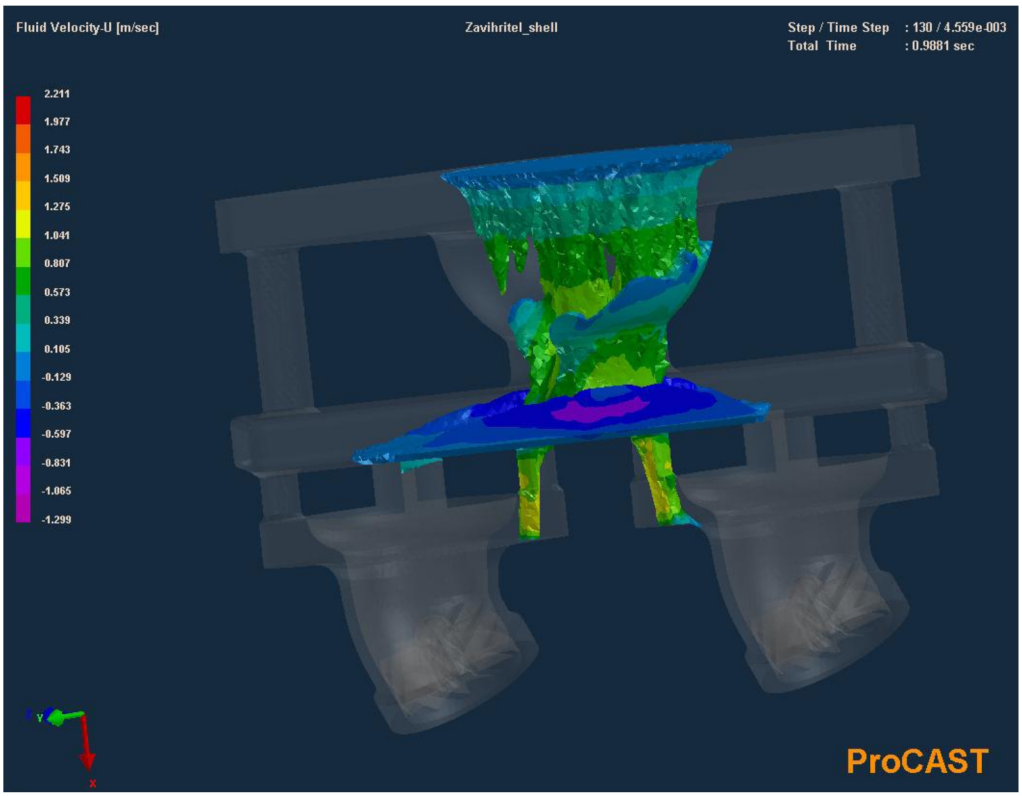


Рисунок 2.58 – Распределение скорости сплава вдоль оси X при заполнении оболочки в середине заливки

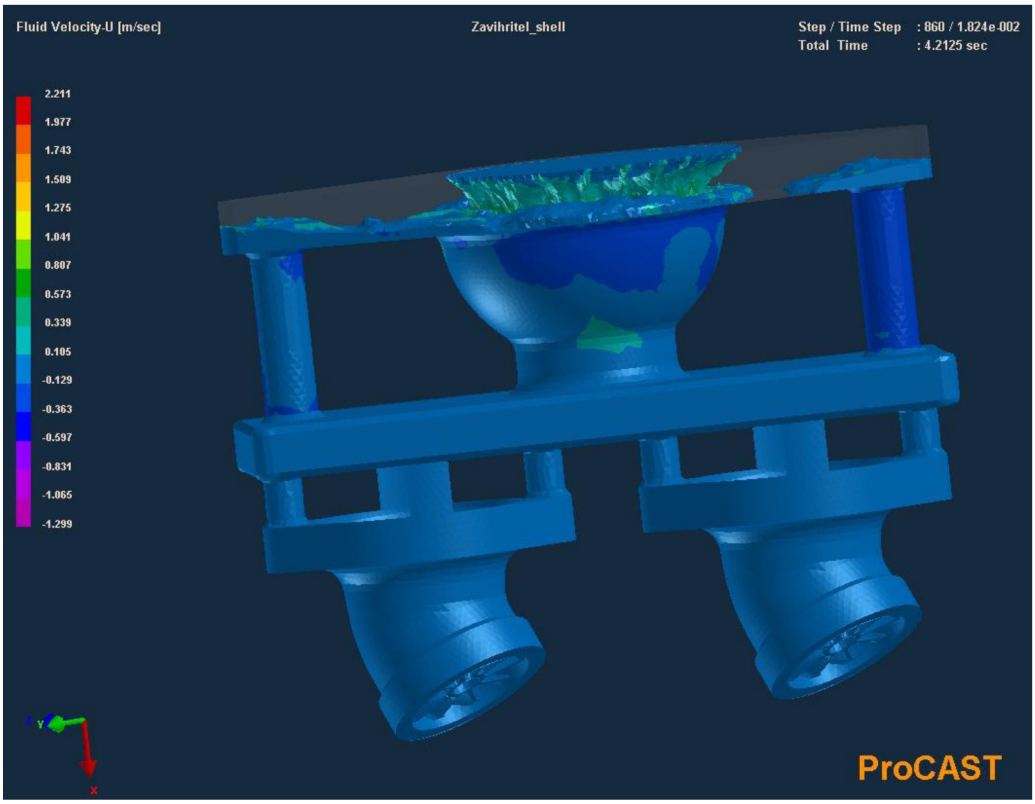


Рисунок 2.59 – Распределение скорости сплава вдоль оси X при заполнении оболочки в конечный момент заливки

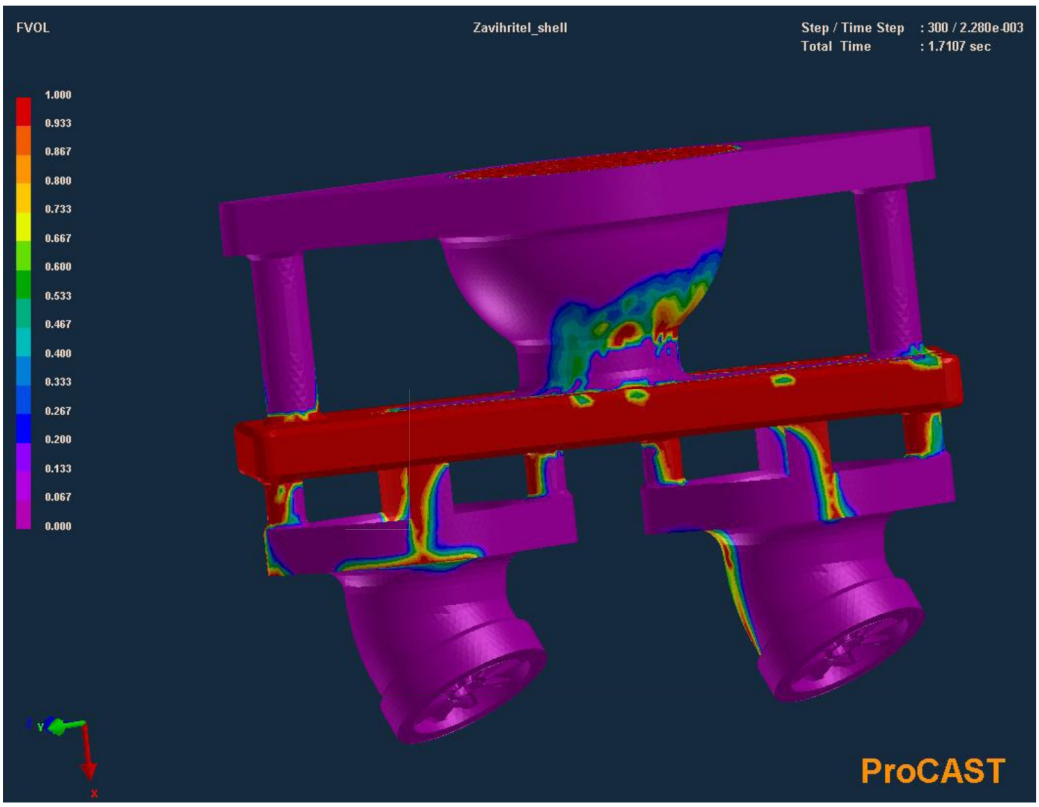


Рисунок 2.60 – Распределение жидкой фракции сплава при заполнении оболочки в начальный момент заливки

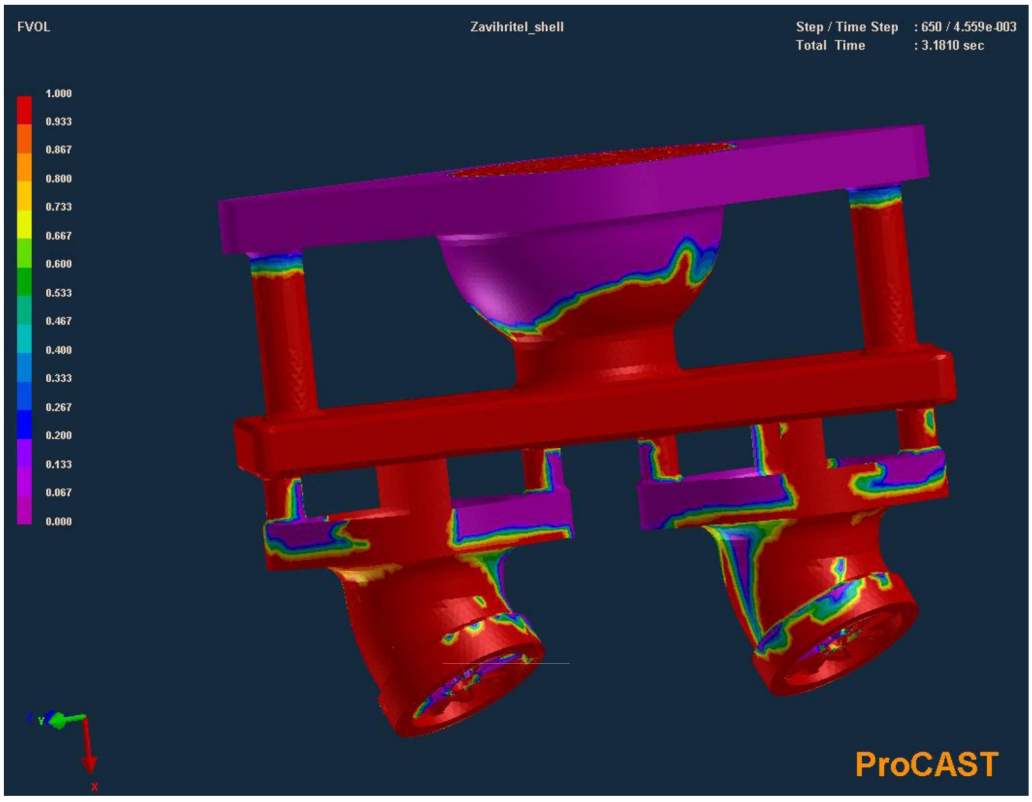


Рисунок 2.61 – Распределение жидкой фракции сплава при заполнении оболочки в середине заливки

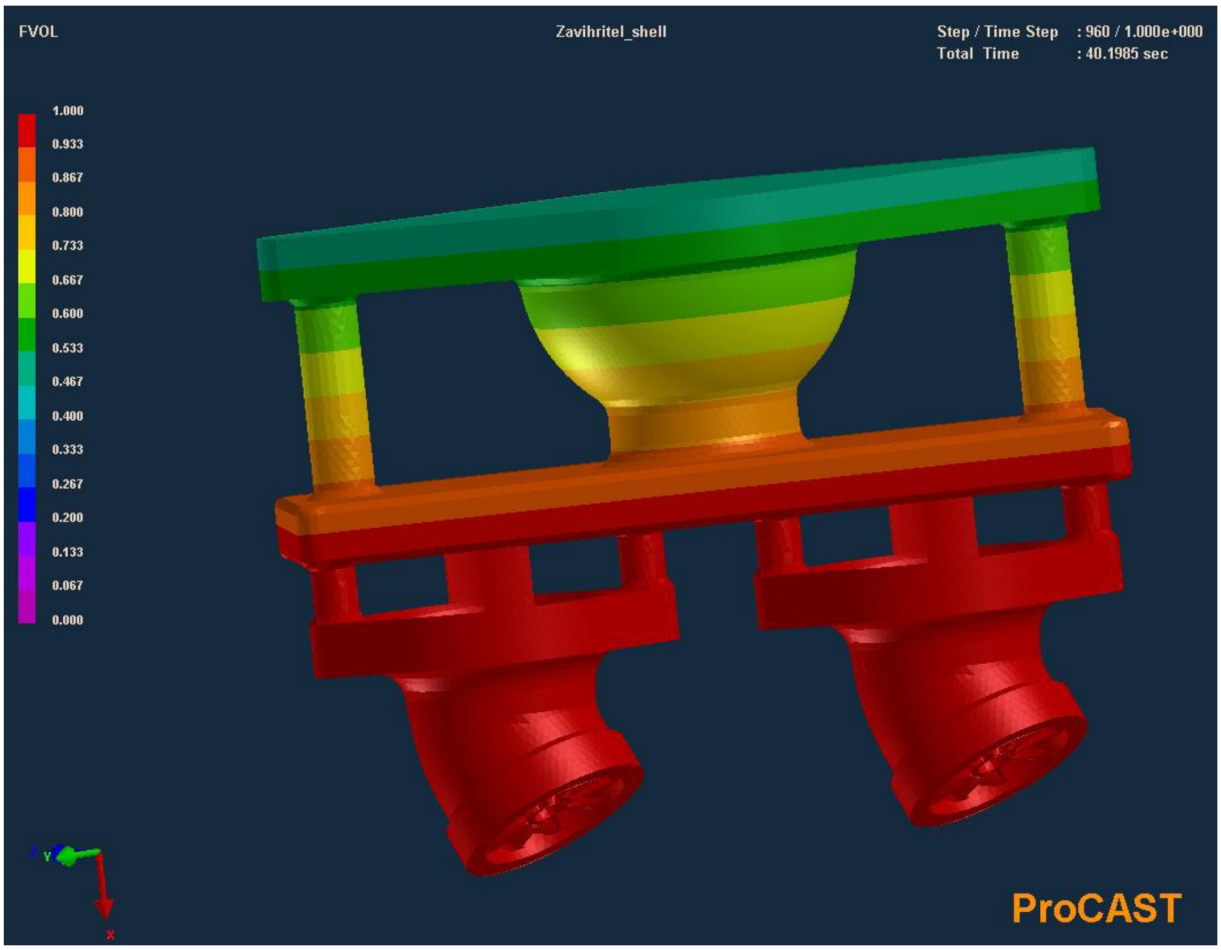


Рисунок 2.62 – Распределение жидкой фракции сплава при заполнении оболочки в конечный момент заливки

Из рисунков 2.60 – 2.62 видно, что жидкая фракция составляет 100% внутреннего объема всех четырех отливок окончанию заливки, следовательно, моделирование заливки демонстрирует высокое качество заполнения жидким сплавом исследуемой оболочковой формы.

Распределение пустот в отливке в начале и конце заливки представлено на рисунках 2.63,2.64 .

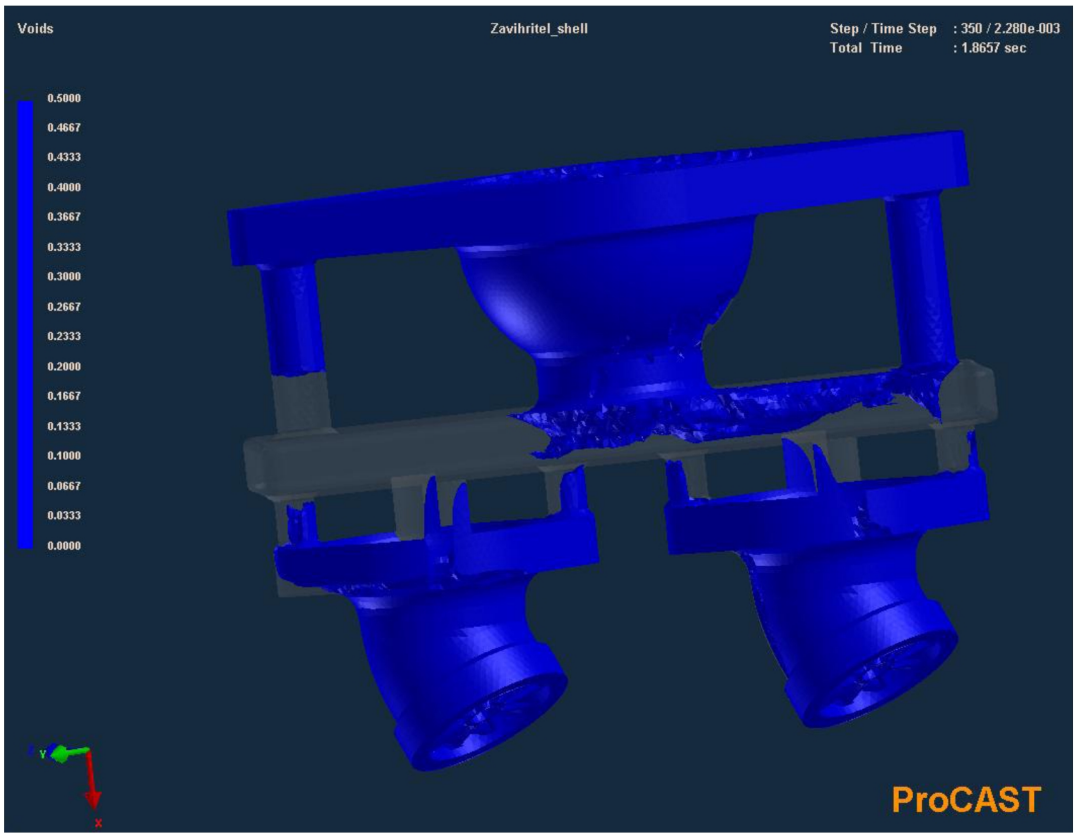


Рисунок 2.63 – Распределение пустот в отливке в начальный момент

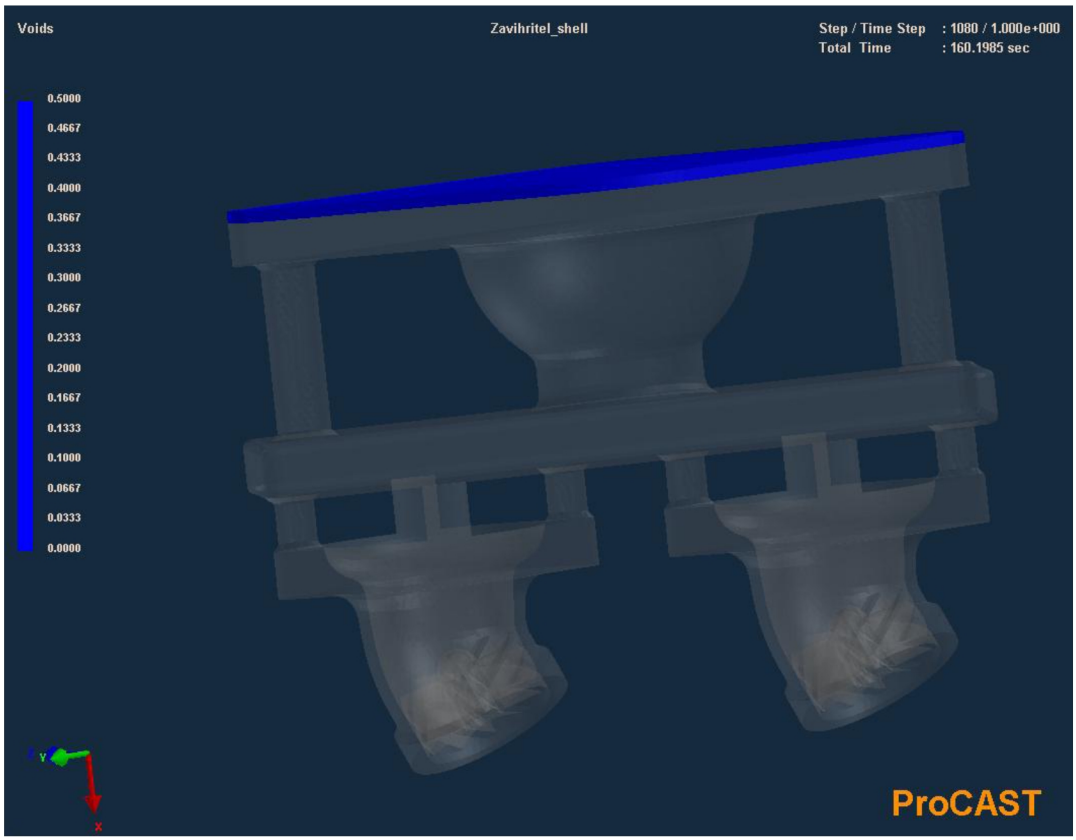


Рисунок 2.64 – Распределение пустот в отливке в конечный момент

На рисунках 2.63,2.64 представлено распределение пустот в отливке в начале и конце заливки. Видно, что в конце заливки отсутствуют пустоты, однако, результат заливки показывает усадочные раковины в районе лопаток крыльчатки (рисунок 2.65) – это, в итоге приведет к непроливам лопаток и, как следствие, к браку. Таким образом, можно сказать, что выбранная литниково-питающая система является не эффективной. Чтобы избежать образования усадочных раковин, можно порекомендовать изменить вид литниково-питающей системы, изменить проходное сечение заливной горловины, так как металл кристаллизуется, не успевши заполнить всю форму, а также изменить начальные и граничные условия заливки, в частности температуру, скорость заливки.

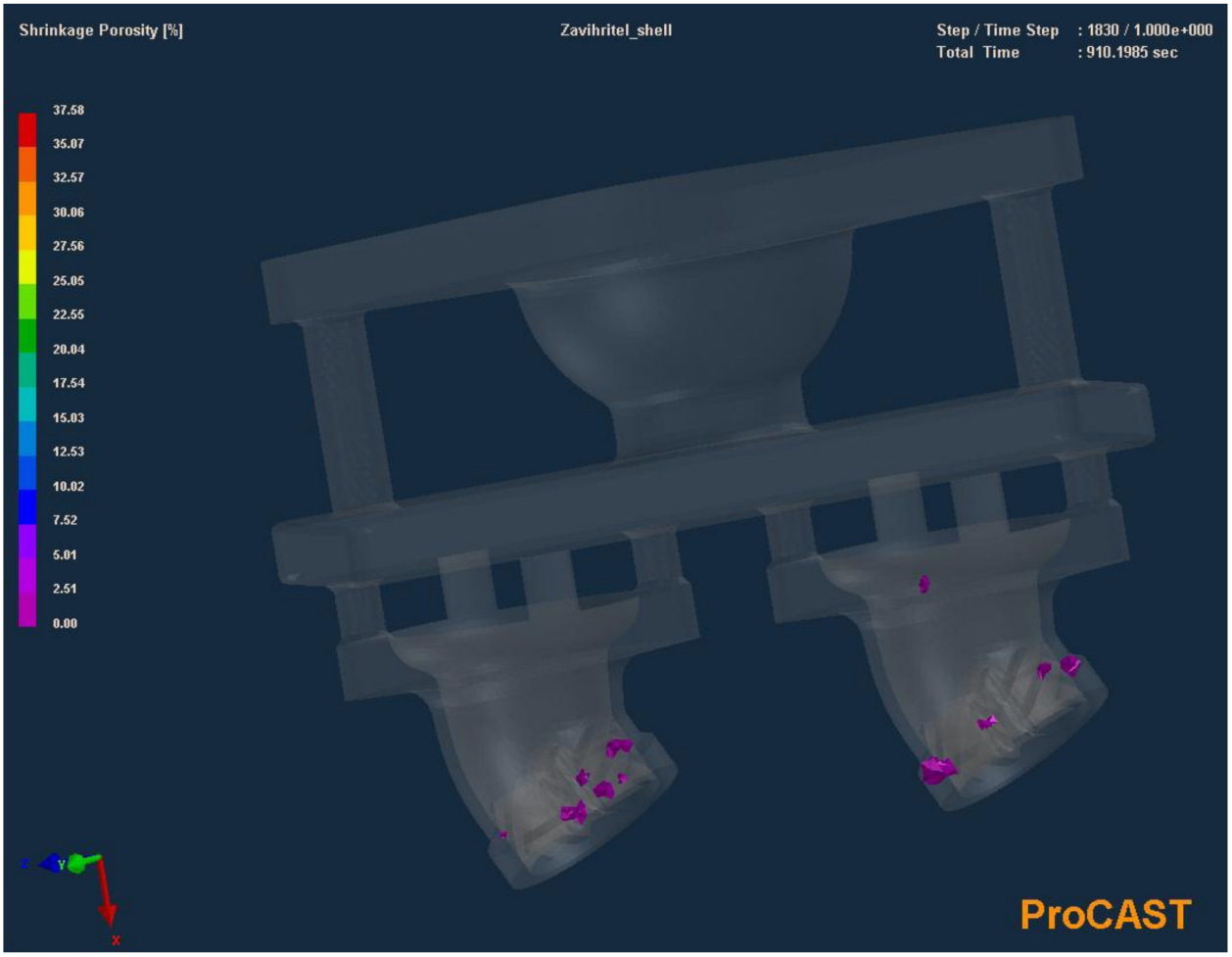


Рисунок 2.65 – Образование усадочных раковин при заливки завихрителя

Призаливки экспериментальной партии завихрителей на предприятии ОАО “Кузнецов” были сделаны рентгенограммы, анализ которых показал точечную усадочную пористость (рисунок 2.66). Полученный результат полностью соответствует результату, полученному на этапе виртуального моделирования, что свидетельствует об адекватности применяемого CAE программного продукта ProCast.

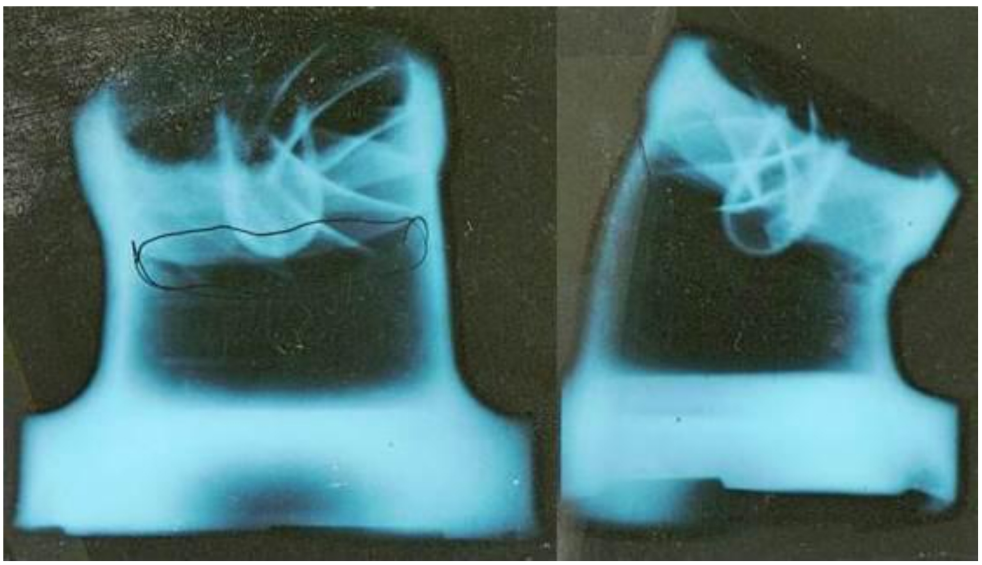


Рисунок 2.66 – Рентгенограммы завихрителя II контура

Исходя из полученных расчетов можно судить о том что:

- имеются усадочные раковины на крыльчатке лопаток завихрителя II контура ГТД;

- при данной заливке отсутствует пористость металла в отливаемой модели;

- данная литниково-питающая система (а также граничные и начальные условия) не подходят для отливки данной модели детали, а именно завихрителя II контура ГТД.

3. ЛИТЬЕ В РАЗОВЫЕ ПЕСЧАНО-ГЛИНИСТЫЕ ФОРМЫ

3.1. Сущность и особенности процесса

В разовых песчаных формах производят ~ 80% от всего объема выпуска отливок. Это объясняется универсальностью процесса, которая заключается в широких технологических возможностях процесса, обеспечивающих получение любых отливок как по массе и размерам, так и по роду металла, а также низкой себестоимостью, сравнительно легкой и быстрой технологической подготовкой производства отливок широкой номенклатуры [1].

Технологический процесс производства отливки в разовой песчано-глинистой форме состоит из подготовительной, основной и заключительной стадий, последовательность которого приведена на рисунке 3.1.

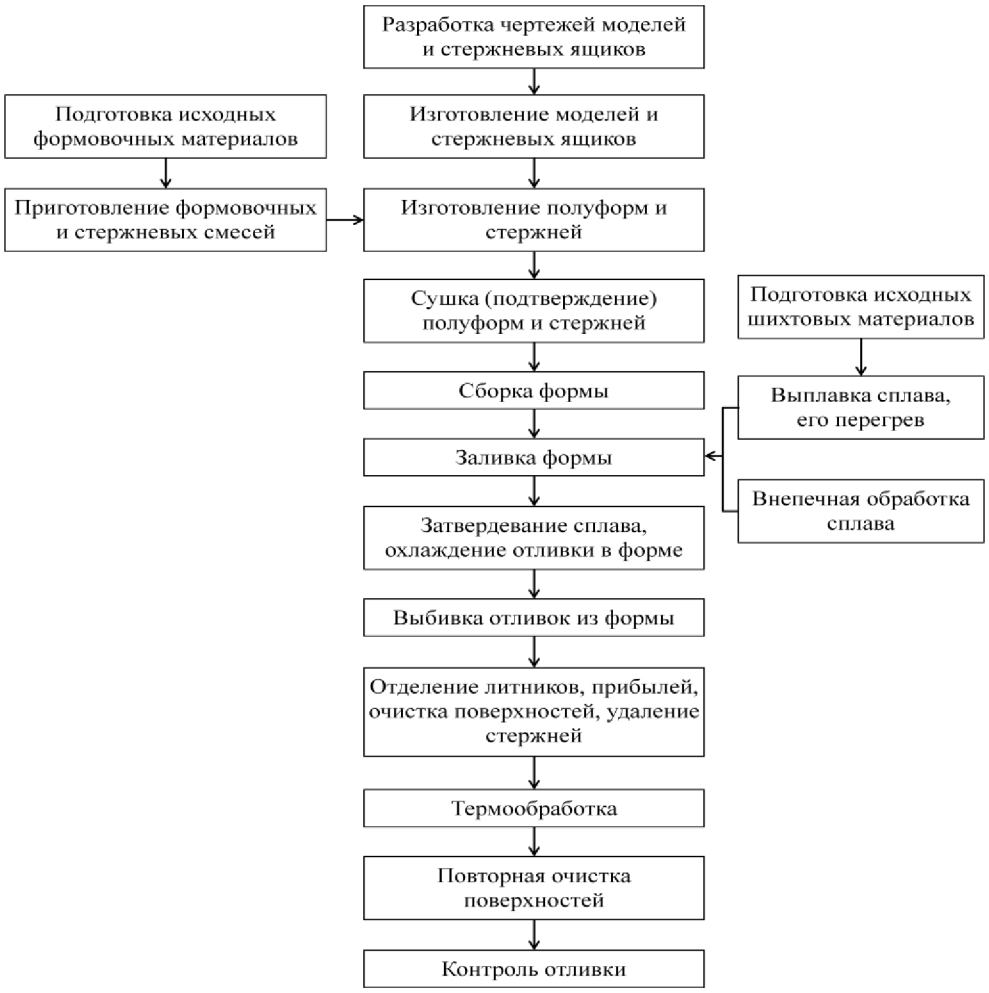
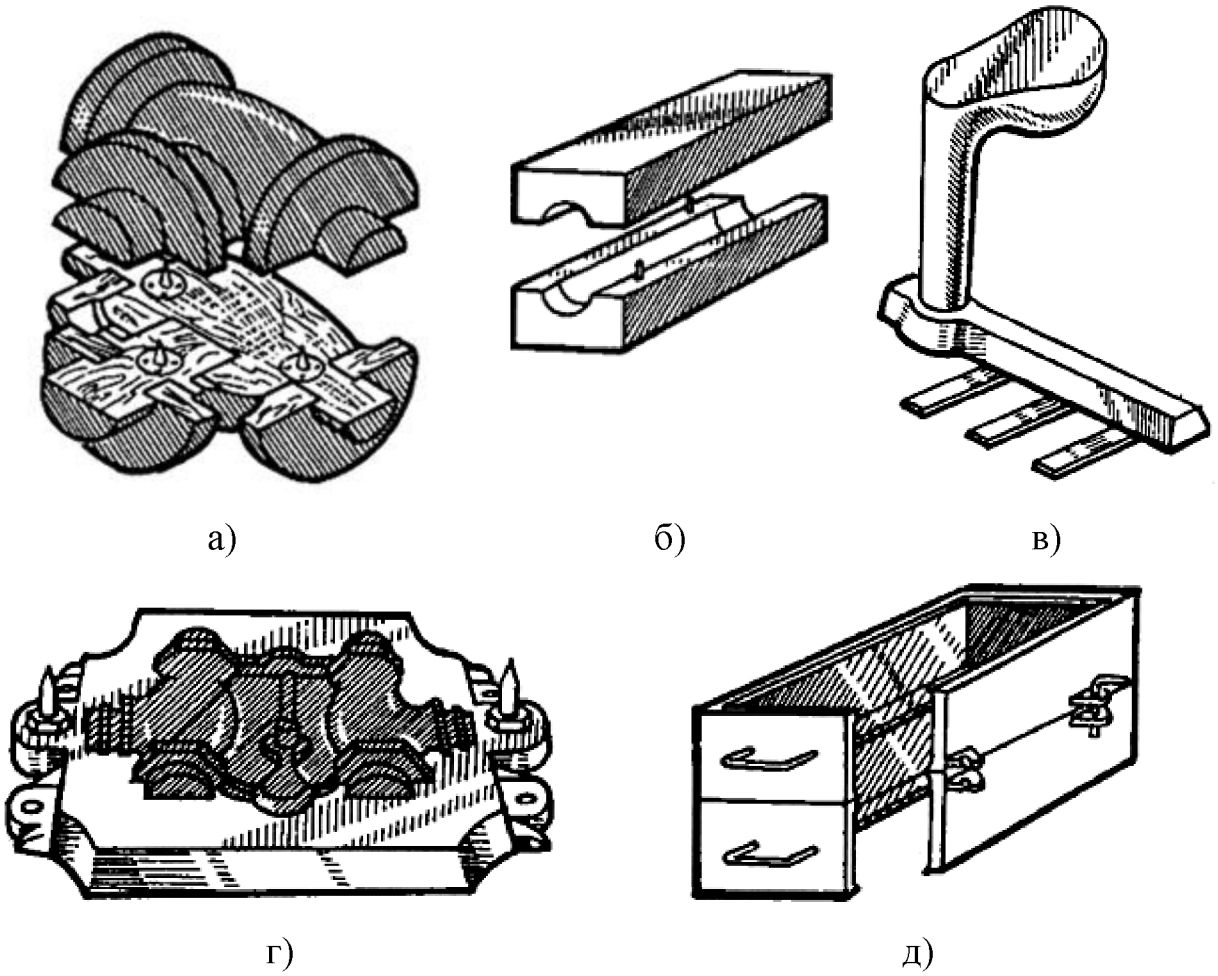


Рисунок 3.1 – Технологический процесс получения отливки в разовой песчано-глинистой форме [1]

Модельная оснастка, изготовленная в модельных цехах, представляет собой приспособления, с помощью которых изготовляют формы и стержни. К оснастке относятся модели деталей, подмодельные щитки, стержневые ящики, модели элементов литниковой системы и опоки (рисунок 3.2).



а – модель детали; б –стержневой ящик; в –модель литниковой системы;
г – подмодельная плита; д –опока

Рисунок 3.2 – Модельная оснастка

Модель (рисунок 3.2, а) служит для получения полости в земляной форме, которая по размерам и внешним очертаниям соответствует будущей отливке. Так как металл после затвердевания усаживается, размеры модели делают несколько большими.

Модели изготавливают из дерева, пластмассы или металла. Выбор материала зависит от условий производства и требований, которые предъявляют к отливке в отношении точности размеров и чистоты поверхности. Для того чтобы модели легко извлекались из формы, их делают с формовочными уклонами и зачастую разъемными, из двух и более частей, легко скрепляемых при помощи шипов.

Для получения отливок с отверстиями или углублениями в соответствующих местах моделей предусматривают выступы – стержневые знаки, которые оставляют в форме отпечатки для установки стержней. Место, занимаемое в форме стержнем, не заполняется металлом и в отливке после удаления стержня образуется отверстие или углубление. Стержни изготавливают из особой стержневой смеси, набивая ее вручную или машинным способом в стержневые ящики (рисунок 3.2, б). При этом учитывают изменение размеров отливки при затвердевании металла. Размеры стержней должны быть меньше отверстий на величину усадки металла.

Стержневые ящики делают цельными и разъемными. В массовом производстве, особенно при повышенных требованиях к точности литья, применяют металлические ящики (чугунные или из алюминиевых сплавов).

Модели литниковой системы предназначены для образования в форме каналов и полостей, служащих для подачи металла, задержки шлака и выхода воздуха из полости формы (рисунок 3.2, в). Конструкция литниковой системы должна обеспечивать спокойное, безударное поступление металла в форму, предохраняя ее от повреждения [2].

Подмодельные щитки-плиты (рисунок 3.2, г) служат для размещения на них моделей и установки опоки при изготовлении литейной формы вручную.

В массовом производстве при машинной формовке эффективно применение тщательно обработанных деревянных или металлических модельных плит с прочно укрепленными на них или выполненными за одно целое моделями деталей и элементами литниковой системы.

Опоки (рисунок 3.2, д) представляют собой деревянные или металлические рамки, каркасы, основное назначение которых состоит в удерживании песчано-глинистой смеси, обеспечении достаточной прочности и жесткости формы при ее изготовлении, транспортировке и заливке металла.

Формовочные и стержневые смеси в основном состоят из кварцевого песка определенной зернистости и жароупорности.

3.2. Изготовление и заливка литейных форм

Процесс изготовления разовых песчаных литейных форм называется формовкой. Применяют следующие способы формовки [3]:

- в почве и кессонах;
- в опоках;
- безопочную;
- по шаблону;
- по скелетным моделям и контрольным сечениям;
- в стержнях;
- с применением быстротвердеющих смесей.

Кроме этого, в зависимости от степени механизации процесса изготовления форм различают три вида формовки: ручную, машинную и автоматическую. Ручную формовку применяют в индивидуальном и мелкосерийном производстве, а также при производстве крупных отливок. Машинную формовку применяют в условиях серийного и массового производства отливок, а автоматическую – для автоматизации процесса изготовления форм какой-либо одной отливки.

Заливка литейных форм это процесс заполнения полости литейной формы расплавленным металлом из ковша.

При заливки расплавленного металла в форму важное значение имеет выбор его температуры. Например, при повышенной температуре заливки увеличивается жидкотекучесть металла, улучшается питание отливки. При этом горячий металл более газонасыщен, сильнее окисляется и вызывает

пригар на поверхности отливки. А низкая температура заливки увеличивает опасность незаполнения полости формы и захвата воздуха, также способствует ухудшению питания отливки. Таким образом, температуру заливки сплавов целесообразно назначать на 100 – 150 °С выше температуры ликвидуса.

3.3. Охлаждение, выбивка и очистка отливок

Охлаждение отливки в литейной форме после заливки продолжается до температуры выбивки. Небольшая тонкостенная отливка охлаждается в форме несколько минут, а массивная толстостенная, например, массой 50 ÷ 60 т – в течение нескольких суток. Для сокращения этого времени используют различные методы принудительного охлаждения: формы обдувают воздухом; в формы при формовке укладывают змеевики или трубы, по которым пропускают воздух или воду и др.

Выбивка отливки это процесс удаления затвердевшей и охлажденной до определенной температуры отливки из литейной формы, при этом литейная форма разрушается. Выбивку отливки осуществляют на различных выбивных установках [4].

Процесс удаления с отливки прибылей, литников, выпоров и заливов (облоя) по месту сопряжения полуформ называется обрубка отливки. Обрубку производят пневматическими зубилами, ленточными и дисковыми пилами, газовой резкой и на прессах. После обрубки отливку зачищают, удаляя мелкие заливы, остатки прибылей, выпоров и литников. Зачистку выполняют маятниковыми и стационарными шлифовальными кругами, пневматическими зубилами, газоплазменной обработкой и другими способами [4].

Процесс удаления пригара, остатков формовочной и стержневой смеси с наружных и внутренних поверхностей отливки называется очистка отливки. Ее осуществляют в галтовочных барабанах периодического или не-

прерывного действия, в гидропескоструйных и дробеметных камерах, химической или электрохимической обработкой и другими способами.

3.4. Контроль отливок

Основные задачи технического контроля: выявление причин отклонения качества отливок от заданного и нарушений технологического процесса, разработка мероприятий по повышению качества продукции; установление соответствия режимов и последовательности выполнения технологических операций, предусмотренных технической документацией; установление соответствия качества материалов, требуемых для производства отливок и др. [5]

Контроль отливок прежде всего осуществляют визуально для выявлениябракаили отливок, подлежащих исправлению. Правильность конфигурации и размеров проверяют разметкой. Внутренние дефекты выявляют в специализированных лабораториях.

Тщательному контролю подвергают литейную оснастку (модели, модельные плиты и др.) и весь технологический процесс на всех этапах производства отливок (контроль свойств формовочных и стержневых смесей, уплотнения в форме, качества стержней и правильности их установки, химического состава и технологических свойств сплава, температуры заливки и т. д.).

Дефекты отливок по внешним признакам подразделяют на [5]:

- наружные (песчаные раковины, перекос, недолив и др.);
- внутренние (усадочные и газовые раковины, трещины горячие и холодные и др.).

Ниже перечислены наиболее часто встречающиеся дефекты при литье в разовые песчано-глинистые формы:

- песчаные раковины – открытые или закрытые пустоты в теле отливки, которые возникают из-за низкой прочности формы и стержней, слабого

уплотнения формы, недостаточного крепления выступающих частей формы и прочих причин;

•перекос – смещение одной части отливки относительно другой, возникающий в результате небрежной сборки формы, износа центрирующих штырей, несоответствия знаковых частей стержня на модели и в стержневом ящике, неправильной установки стержня в форму и других причин;

•недолив – некоторые части отливки остаются незаполненными в связи с низкой температурой заливки, недостаточной жидкотекучестью, недостаточным сечением элементов литниковой системы, неправильной конструкцией отливки (например, малая толщина стенки отливки) и др.;

•усадочные раковины – открытые или закрытые пустоты в теле отливки с шероховатой поверхностью и грубокристаллическим строением. Эти дефекты возникают при недостаточном питании массивных узлов, нетехнологичной конструкции отливки, неправильной установке прибылей, заливке перегретым металлом;

•газовые раковины – открытые или закрытые пустоты в теле отливки с чистой и гладкой поверхностью, которые возникают из-за недостаточной газопроницаемости формы и стержней, повышенной влажности формовочных смесей и стержней, насыщенности расплавленного металла газами и др.;

•трещины горячие и холодные – разрывы в теле отливки, возникающие при заливке чрезмерно перегретым металлом, из-за неправильной конструкции литниковой системы и прибылей, неправильной конструкции отливки, повышенной неравномерной усадки, низкой податливости форм и стержней и др.

3.5. Технологичность конструкций литых деталей, применительно к способу литья в песчано-глинистые формы

Под технологичностью литой детали понимают ее конструктивные особенности, которые при наилучшем соответствии назначению детали

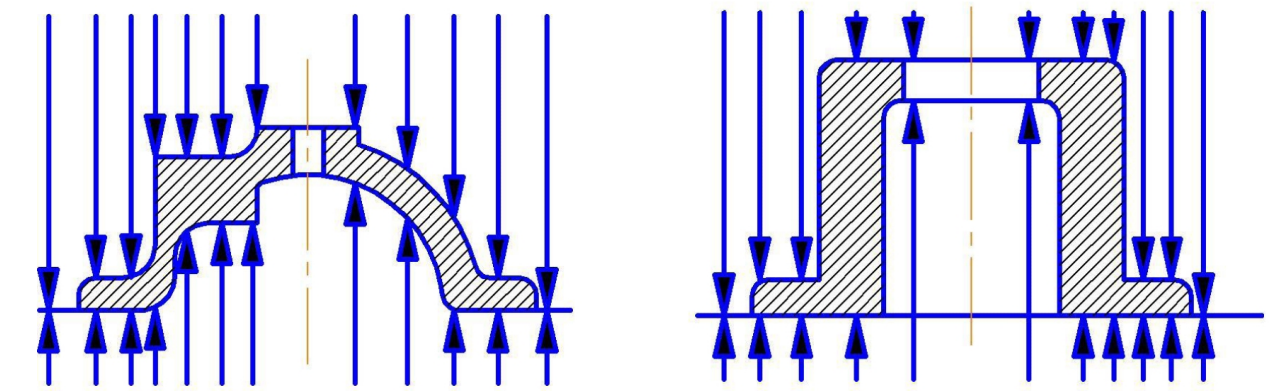
обеспечивают минимальный уровень затрат на ее изготовление. Технологичной считают такую конструкцию литой детали, которая в максимальной степени отвечает требованиям как литейной технологии, так и технологии механической обработки. При анализе технологичности конструкции отливки необходимо прежде всего учитывать выбранный способ литья, требуемые механические и эксплуатационные свойства, влияющие на уровень производственных и эксплуатационных затрат. Отливки должны иметь очень близкую к очертаниям готовых деталей конфигурацию, высокую размерную точность, минимальные припуски на механическую обработку и малую шероховатость поверхности.

Конструкция детали должна отвечать следующим основным технологическим требованиям [6]:

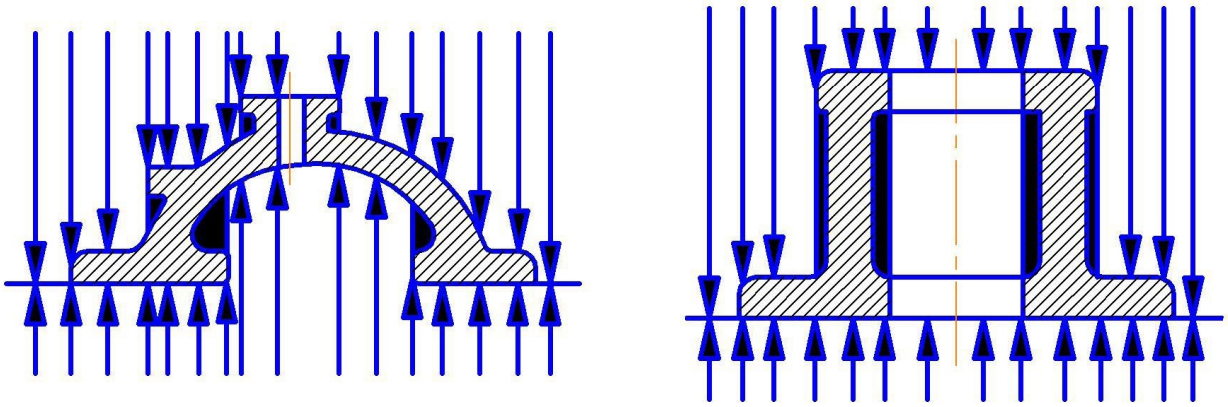
- иметь простое внешнее очертание – без резких переходов, углов и поворотов, высоких ребер и выступов, а также минимальное число внутренних полостей;
- обеспечивать направленное затвердевание и достаточную сопротивляемость усадочным и термическим напряжениям;
- толщина стенок должна быть рациональной, обеспечивающей хорошую заполняемость формы металлом при выбранном способе литья;
- конструктивные уклоны поверхностей должны по возможности обеспечивать изготовление литейных форм без усложняющих приемов, вызывающих, в частности, увеличение массы отливки;
- иметь достаточное число отверстий для удобства оформления стержнями внутренних полостей отливки;
- обладать по возможности небольшой металлоемкостью и подвергаться минимальной последующей механической обработке;
- обеспечивать технологичность моделей, а также возможность изготовления и применения простой и дешевой оснастки.

При отработке на технологичность конструкции отливки, получаемой литьем в разовые песчано-глинистые формы, стремятся прежде всего

обеспечить минимальное число поверхностей разъема модели и формы, исключить отъемные части и сократить число стержней. Возможность использования одной плоскости разъема определяют по правилу световых теней: теневые участки при воображаемом освещении детали параллельными лучами в направлении, перпендикулярном к плоскости разъема формы или стержневого ящика, должны отсутствовать (рисунок 3.3).



а)



б)

а – рациональные; б – нерациональные

Рисунок 3.3– Конструкции отливок

Наличие большого числа стержней приводит к увеличению трудоемкости, а следовательно, и себестоимости изготовления отливки, появлению брака вследствие перекоса и искажения размеров их внутренних полостей в результате неточностей при установке стержня. Для облегчения формовки и уменьшения числа стержней вертикальные ребра жесткости и

полки для упора и крепления других деталей необходимо располагать перпендикулярно к плоскости разъема формы, горизонтальные – в плоскости разъема.

Поверхности отливки, перпендикулярные плоскости разъема формы, должны иметь уклоны для съема полуформ. Целесообразно предусматривать в детали конструктивные уклоны. Это позволяет сохранять на всем протяжении поверхности отливки одинаковую толщину стенки, чтобы не увеличивать массу отливки. Если этого сделать не удается, то необходимо назначать формовочные уклоны [6].

Стенки отливки должны быть по возможности без резких переходов от тонких сечений к толстым, так как в противном случае в узлах скопления металла могут возникнуть литейные дефекты. При правильно сконструированной детали отношение толщин стенок при переходе от одного сечения к другому должно быть не больше 4:1.

3.6.Особенности моделирования процесса литья в песчано-глинистую форму в ProCast

Общая последовательность шагов для моделирования литейных процессов в "ProCAST" для большинства задач одинакова:

- создатьконечно-элементную модель;
- подготовить данные для расчета;
- произвести расчет;
- интерпретировать результаты.

В "ProCAST" для моделирования подобных задач имеется уникальная возможность создать виртуальную форму, что существенно сэкономит процессорное время. При этом, тепловое влияние такой формы будет учитываться, а именно распределение тепла, локальные источники тепла, тепловое насыщение. Однако, поскольку для виртуальной формы не требуется построение конечно-элементной сетки, то возможность визуализации распределения температур в форме отсутствует.

Еще одной важной особенностью при использовании виртуальной формы является то, что на поверхности отливки должна быть задана нулевая скорость в качестве граничных условий.

Режим виртуальной формы активируется в разделе *Geometry* модуля ***PreCAST***. Для этого достаточно ввести габаритные размеры виртуальной формы. При этом необходимо убедиться, что вся отливка расположена внутри этой формы. Поскольку условия на внешней границе виртуальной формы принимаются адиабатическими (отсутствие теплообмена), размеры виртуальной формы могут быть установлены достаточно большими.

3.7. Описание последовательности действий при моделировании процесса литья в песчано-глинистые формы

Ниже подробно рассмотрена последовательность действий при моделировании процесса литья в песчано-глинистые формы на примере конкретной отливки (рисунок 3.4).

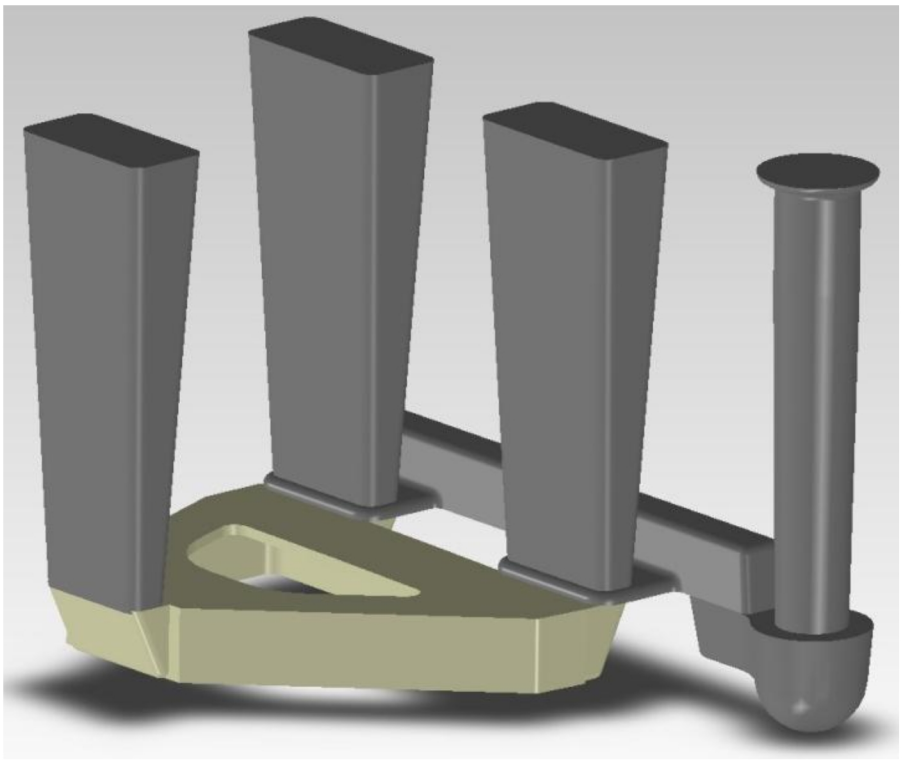


Рисунок 3.4 - Пример отливки

3.7.1.Создание новой задачи

Для создания новой задачи запустите систему "ProCAST", нажав левой кнопкой мыши (ЛКМ) последовательно *Пуск* → *Программы* → *ProCAST*. В результате будет вызван ProCAST Manager, показанный на рисунке 3.5.



Рисунок 3.5 – ProCAST Manager

Далее перейдите в рабочую директорию с файлом геометрии рассматриваемой отливки, созданной в любой CAD-системе и импортированный в универсальный формат для передачи данных такой как *parasolid*, имеющий расширение *x_t*. Для этого воспользуйтесь выпадающим меню раздела *Drive:*, расположенного в центральной верхней части ProCAST Manager. На рисунке 3.6 показан результат описанных выше действий.

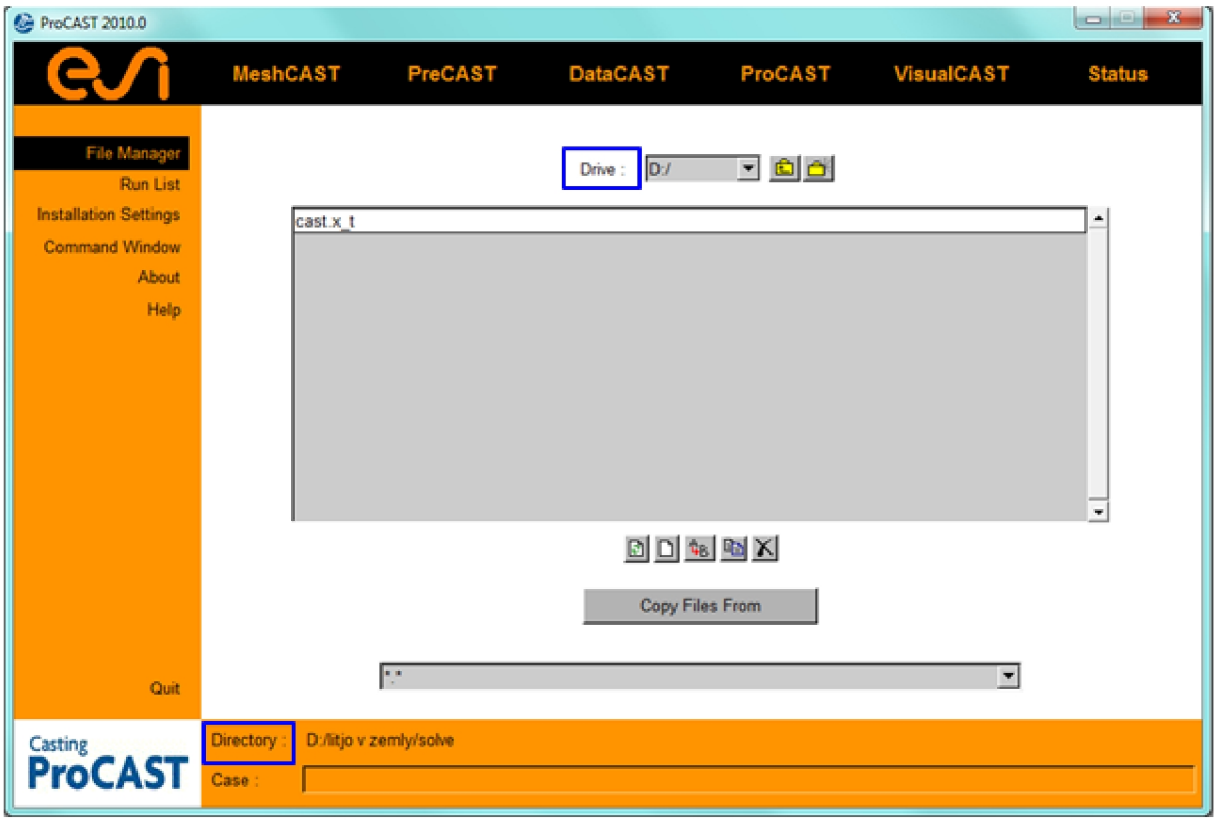


Рисунок 3.6 – Выбор рабочей директории и файла геометрии отливки в ProCAST Manager

Под разделом Drive: отображается название выбранного файла геометрии отливки, в данном случае cast.x_t. А в нижней части ProCAST Manager в строке Directory показан путь к этому файлу.

3.7.2. Создание конечно-элементной модели

Создание конечно-элементной модели, используемой в расчетах производится в модуле ***MeshCAST***. Загрузите этот модуль, нажав на соответствующую надпись ЛКМ в ProCAST Manager. В результате появится окно, показанное на рисунок 3.7.

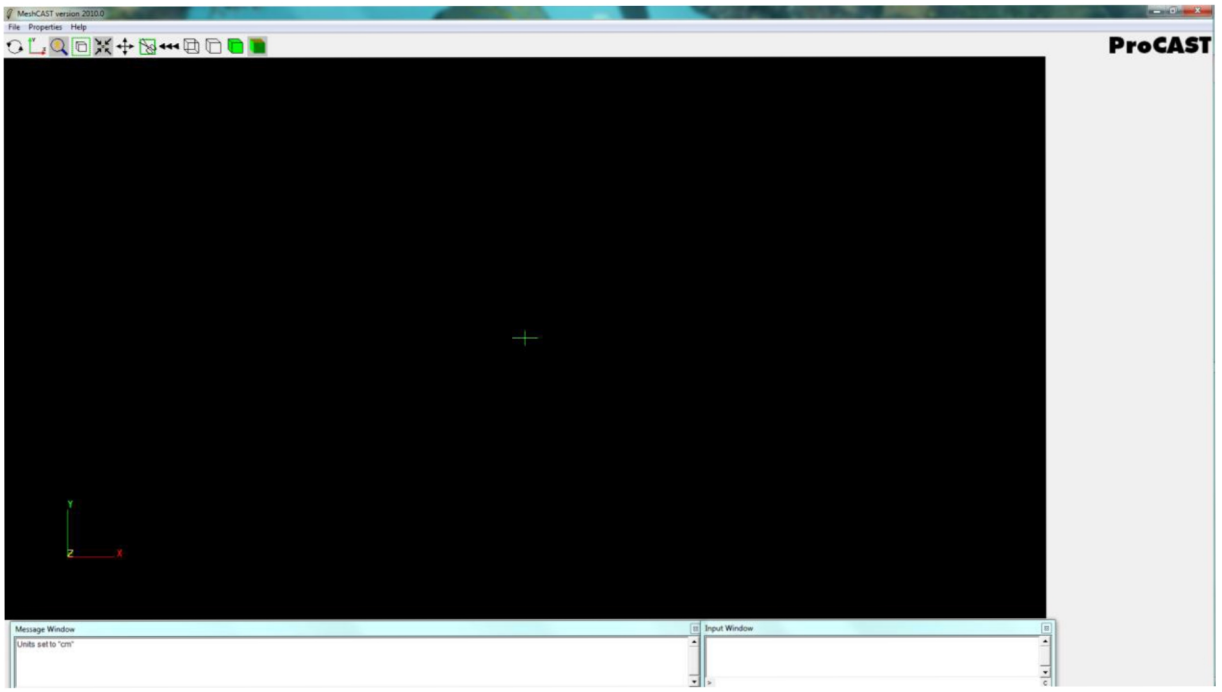


Рисунок 3.7 – Интерфейс модуля MeshCAST

Импортируйте файл геометрии отливки в ***MeshCAST***. Для этого нажмите ЛКМ последовательно *File* → *Open* и в открывшемся окне (рисунок 8) напротив строки *Имя файла*, расположенной в нижней ее части выберите формат *PARASOLID (*xmt_txt, *x_t)*.

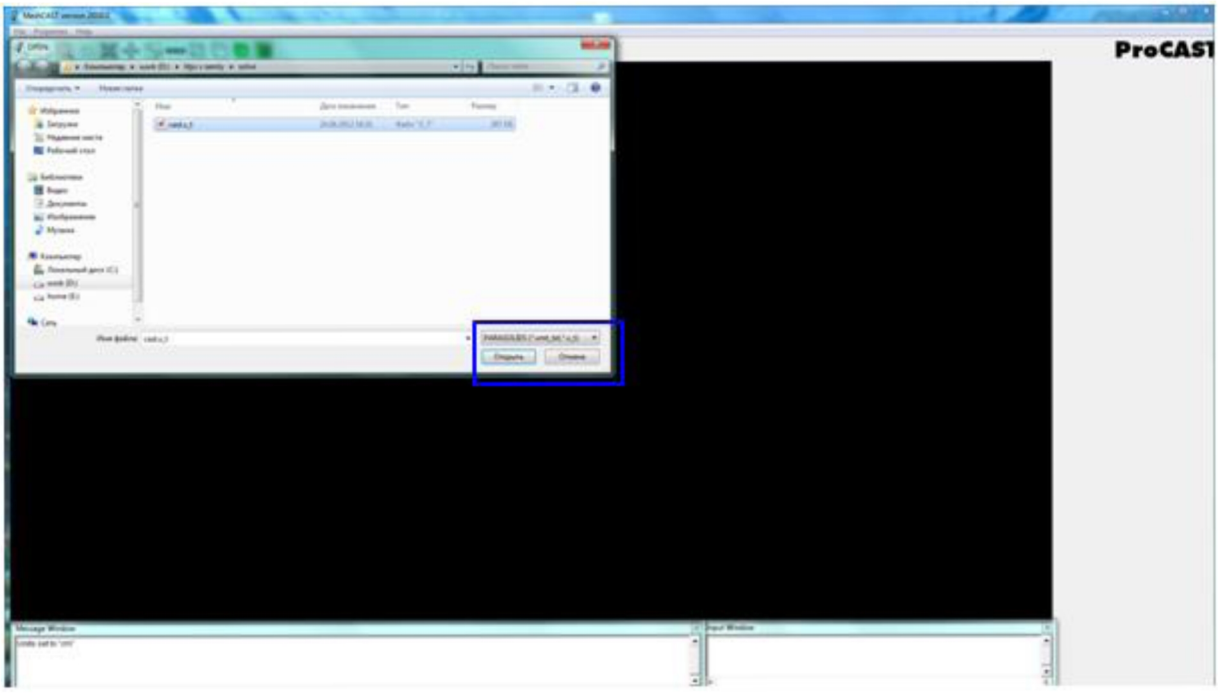


Рисунок 3.8 – Процедура загрузки файла геометрии в модуль MeshCAST

После чего в окне появится файл геометрии отливки в выбранном формате, в данном случае *cast.x_t*. Нажмите ЛКМ на этот файл, а затем на кнопку *Отрыть*. В результате Вы увидите загрузившуюся в модуль ***MeshCAST*** геометрию отливки (рисунок 3.9).

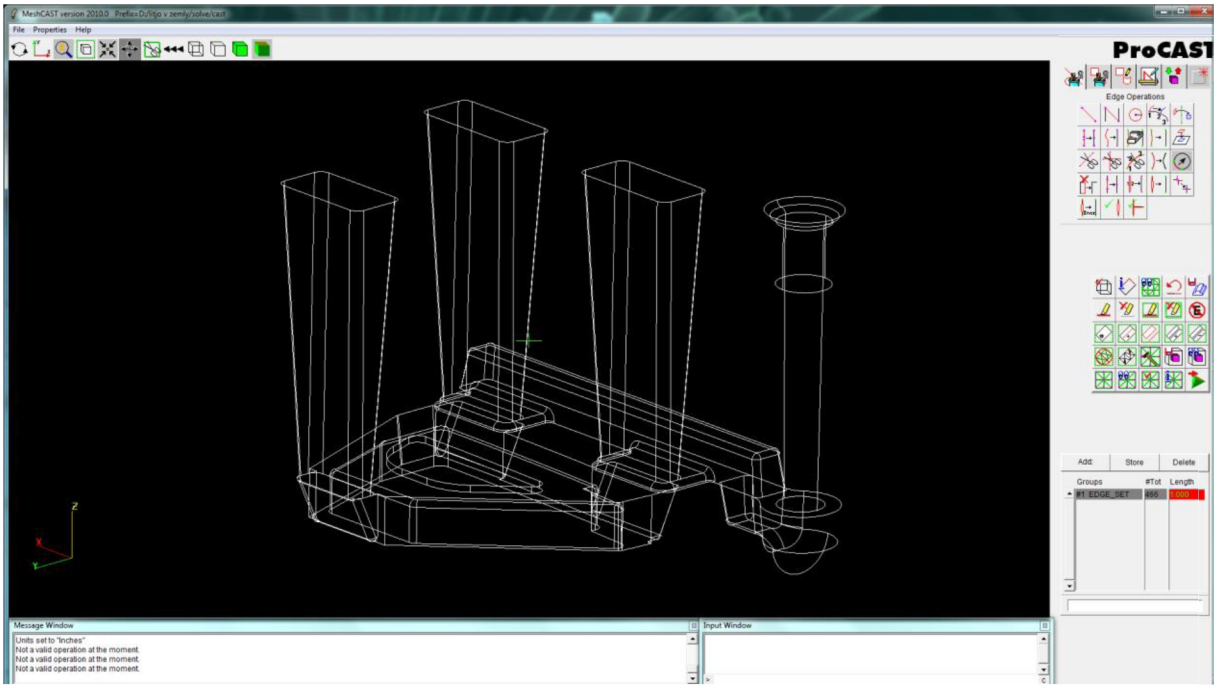


Рисунок 3.9 – Загруженная в модуль MeshCAST геометрия отливки

После импорта геометрии в модуль ***MeshCAST*** необходимо установить единицы измерения. Для этого в панели инструментов, которая расположена в верхней правой части окна нажмите ЛКМ на кнопку *Tool* –  (шаг 1), а затем на кнопку *Change Units* –  (шаг 2). В появившемся окне выберите в качестве единиц измерения миллиметры (рисунок 3.10) и нажмите ЛКМ на кнопку *Execute*.

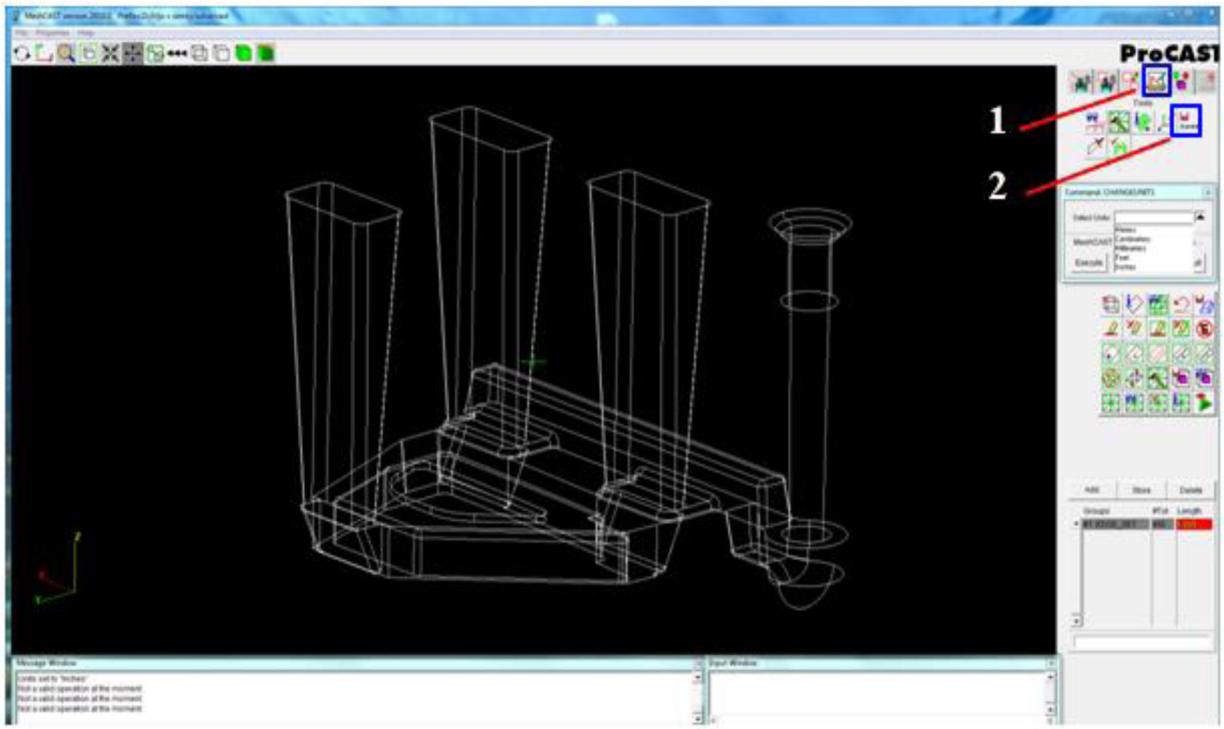


Рисунок 3.10 – Загруженная в модуль MeshCAST геометрия отливки

После этого программа автоматически закроется и в рабочей директории создастся файл с расширением *.*gmrst*, в нашем случае файл *cast*.*gmrst*.

Нажатием ЛКМ на надпись ***MeshCAST*** в ProCAST Manager загрузите заново этот модуль. Последовательным нажатием на кнопки *File* → *Open*загрузите созданный файл *.*gmrst*. Проверить выбранные единицы измерения можно в окне сообщений (MessageWindow), которое расположено в нижней части окна (рисунок 3.11).

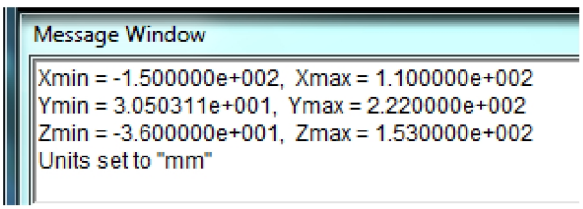


Рисунок 3.11 – Окно сообщений

Для управления изменением отображения математической модели, что существенно облегчает выполнение различных операций, например разбиение геометрии на конечно-элементную сетку, в модуле ***MeshCAST*** существует группа команд DISPLAY TOOLS. Данная группа команд расположена в верхней левой части окна ***MeshCAST***(рисунок 12).



Рисунок 3.12 – Группа команд для управления отображением модели

Описание средств отображения модели приведено в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Описание средств отображения модели.

Иконка	Название	Описание
	*Rotate*	Используется для поворота изображения путем задания угла поворота или использования некоторых стандартных положений.
	*Restore*	Восстанавливает геометрию к ее оригинальному виду в рабочем окне.
	*Zoom*	Позволяет увеличивать или уменьшать изображение геометрии в рабочем окне.
	*Zoom Out*	Автоматически подгоняет масштаб изображения геометрии в размер рабочего окна.
	*Center*	Позиционирует изображение относительно его центра, помещая этот цент изображения в указанную точку.
	*Drag*	Позволяет передвигать изображение в рабочем окне с помощью мышки.

Таблица 3.1 – Описание средств отображения модели (продолжение)

Иконка	Название	Описание
	*Clip*	Позволяет выбрать интересующую часть геометрии.
	*Backtrack/All*	Позволяет вернуться к прежнему активному набору. MeshCAST предоставляет инструменты для выбранной части геометрии в виде активного набора. Активный набор может представлять собой временную подгруппу модели. Подгруппа позволяет работать с небольшой частью геометрии, это особенно полезно в случае большой и сложной конечно-элементной модели.
	*Wireframe*	Используется для отображения всех элементов геометрии или всех поверхностных сеток.
	*Hide*	Используется для отображения поверхностной сетки в режиме hidden-surface.
	*Solid*	Используется для отображения поверхностной сетки в режиме закраски. При активировании этой опции отображение конечно-элементной модели переходит в режим твердотельного. Различие между опциями HIDE и SOLID заключается в цвете закрашенной поверхности.
	*Shade*	Позволяет просматривать модели в твердотельном виде.

Построение конечно-элементной сетки состоит их двух этапов. На первом строится поверхностная сетка, а на втором этапе – объемная.

Для генерации поверхностной конечно-элементной сетки установите в меню *SETS TABLE*, которое расположено в правой нижней части окна, размер конечно элемента равный 3 (рисунок 3.13). Для этого ЛКМ нажмите на значение параметра *Length*, по умолчанию равное 1.000, и в свободном поле,

в котором мигает курсор введите при помощи клавиатуры цифру 3.0. После чего подтвердите свой выбор нажатием на клавиатуре на кнопку *Enter*.

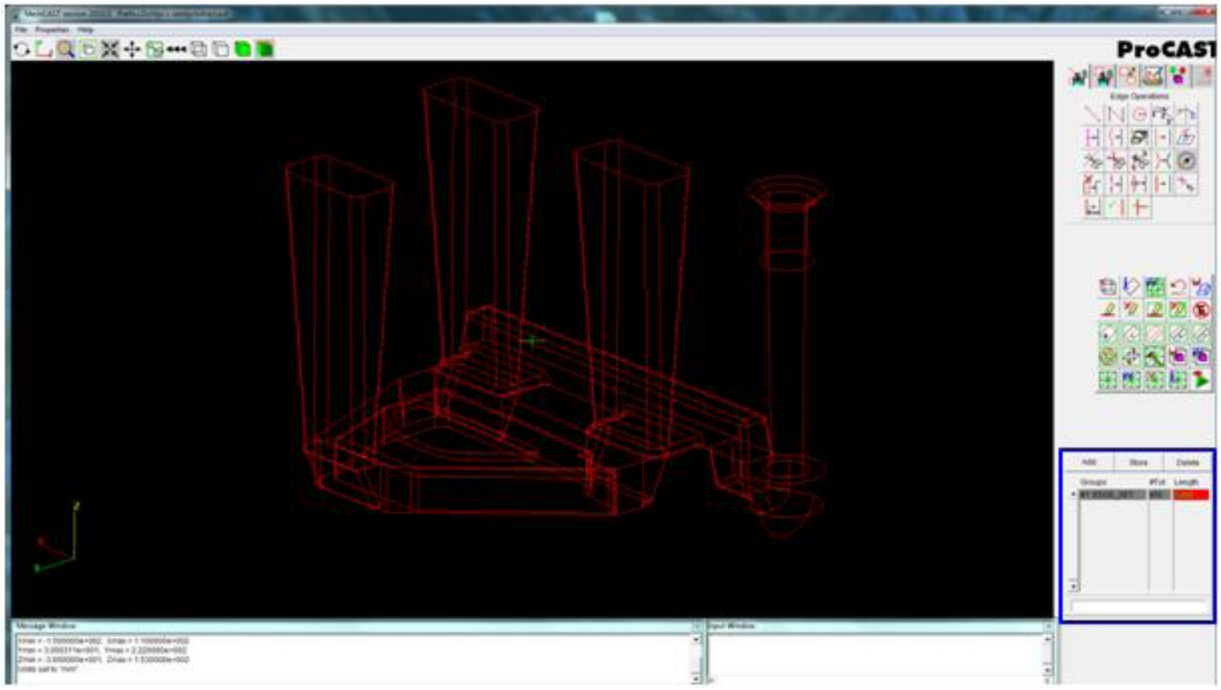


Рисунок 3.13 – Выбор размера конечного элемента

Затем нажмите кнопку *GenerateSurfaceMesh* – , расположенной в меню *REPAIR FACILITATION TOOLS* в правой средней части окна. В результате выполнения этой команды на экране будет отображаться процесс построения конечно-элементной сетки, показанный на рисунке 3.14.

Для отображения полученной сетки (рисунок 3.15) нажмите ЛКМ последовательно на кнопки *Show Mesh* –  (шаг 1), расположенную там же, а затем на кнопку *Solid* –  (шаг 2) в меню *DISPLAY TOOLS* (данное расположено в верхней части окна).

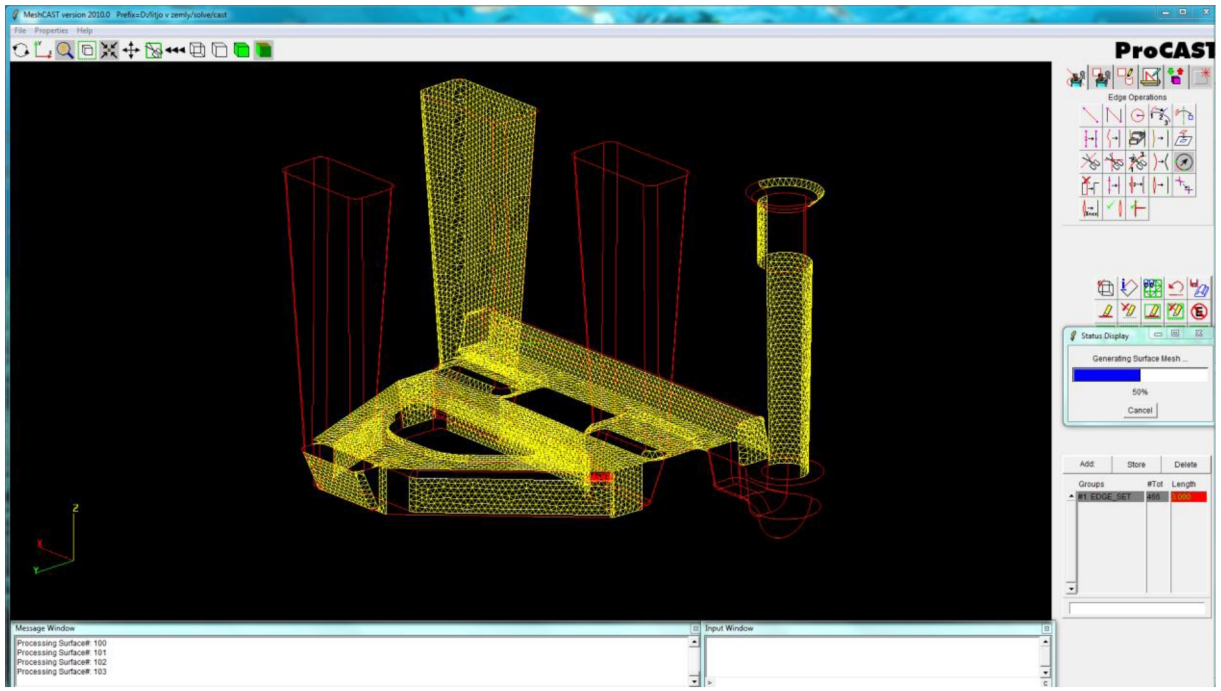


Рисунок3.14 – Процесс построения поверхностной конечно-элементной сетки

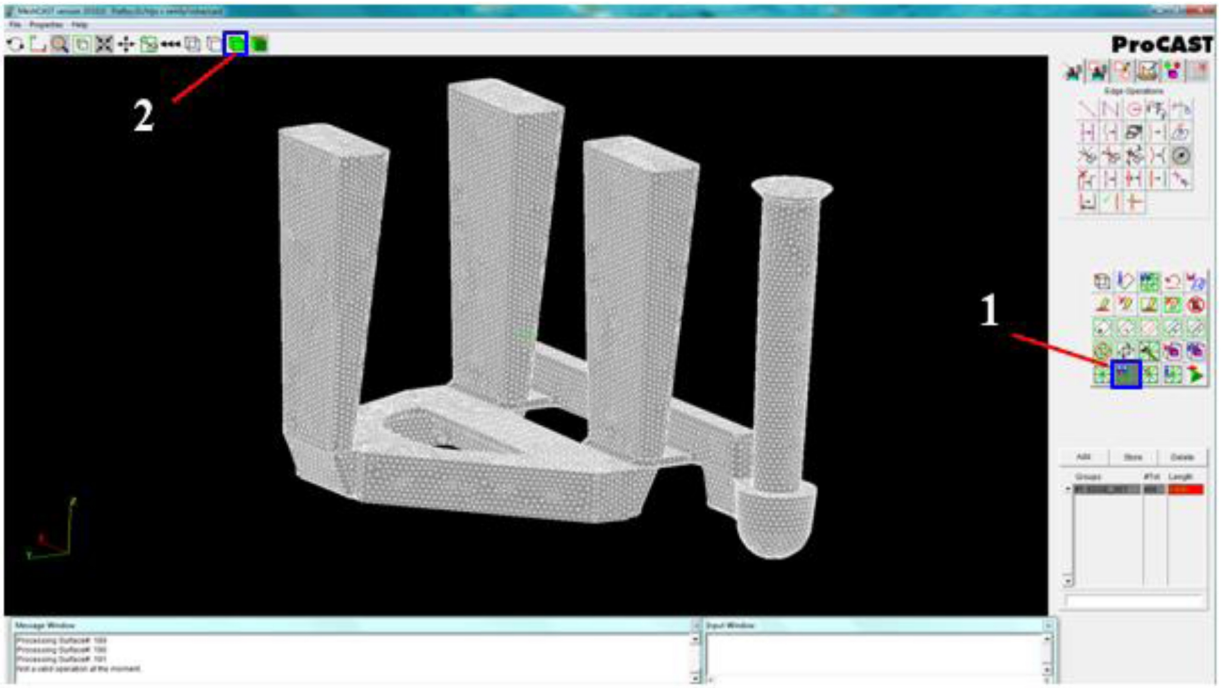


Рисунок 3.15 – Полученная поверхностная конечно-элементная сетка

Для построения объемной конечно-элементной сетки на основе полученной поверхностной нажмите на кнопку *Go: Volume Meshing* – ,

которая расположена в расположенной в меню *REPAIR FACILITATION TOOLS*. В окне модуля ***MeshCAST*** появятся меню и команды для построения объемной конечно-элементной сетки как это показано на рисунке 3.16.

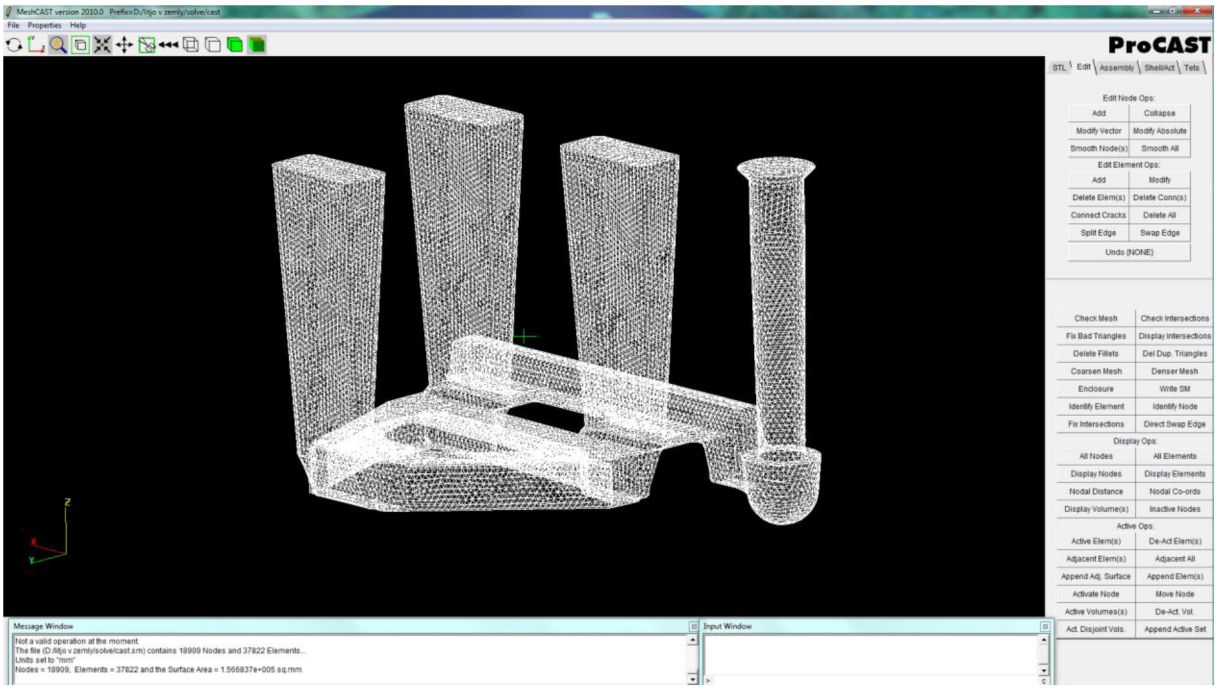


Рисунок 3.16 – Инструменты модуля MeshCAST для построения объемной конечно-элементной сетки

Для завершения построения объемной сетки в этом окне перейдите нажатием ЛКМ на вкладку Tets. Затем последовательно нажмите ЛКМ на кнопку *Auto Fix Fillets/Bad Triangles* и на кнопку *Generate Tet Mesh*. Также как и при построении поверхностной сетки будет отображать процесс генерации объемной сетки. По завершению построения объемной сетки будет показано следующее окно (рисунок 3.17).

На этом работа в модуле ***MeshCAST*** закончена. Сохраните созданную математическую модель, последовательно нажав ЛКМ на кнопки *File* → *Save*. В результате в рабочей директории появится новый файл с расширением ***.mesh**, работу с которым необходимо продолжить в модуле ***PreCAST***.

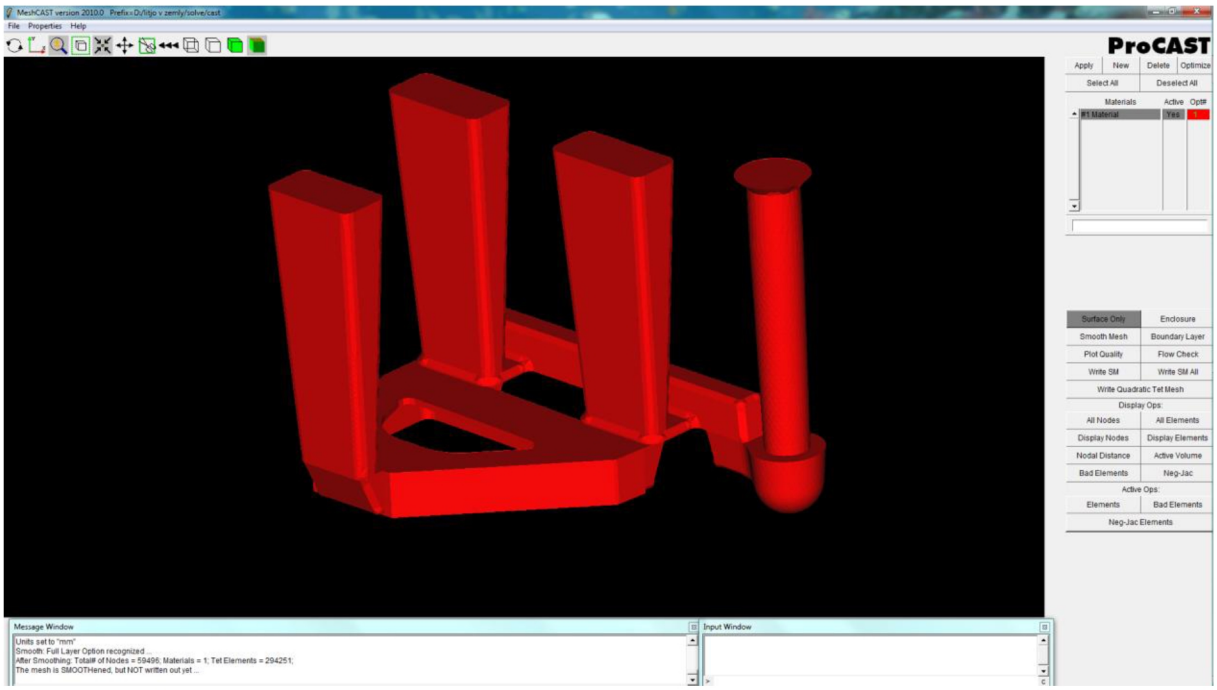


Рисунок 3.17 – Материал в модели

3.7.3. Задание начальных и граничных условий

Для задания начальных и граничных условий необходимо продолжить работу в модуле ***PreCAST.*** Для этого нажмите на соответствующую надпись в **ProCAST Manager**, подобно загрузки модуля **MeshCAST**. В результате появится окно этого модуля (рисунок 3.18), на котором будет отражена основная информация о модели, в том числе количество материалов, общее количество узлов и конечных элементов, и габаритные размеры.

После этого необходимо оптимизировать модель, для это последовательно нажмите ЛКМ на кнопки *File* → *Optimize*. При оптимизации модуль ***PreCAST***переименует все узлы в модели для увеличения скорости расчета. Оптимизация будет выполнена перед выходом из модуля ***PreCAST***.

Для создания виртуальной формы нажмите ЛКМ на вкладку *Geometry*, расположенной в верхней части окна. Для удобства назначения размеров виртуальной формы отобразите размеры модели последовательно нажав на кнопки из выпадающего меню *CheckGeom* → *Min-Max*. В результате в окне (рисунок 3.19) появится таблица с габаритными размерами модели. Для ввода размеров виртуальной формы нажмите ЛКМ в той же вкладке

Geometry на кнопку VirtualMold. После чего в появившееся окно введите значения из таблицы 3.2.

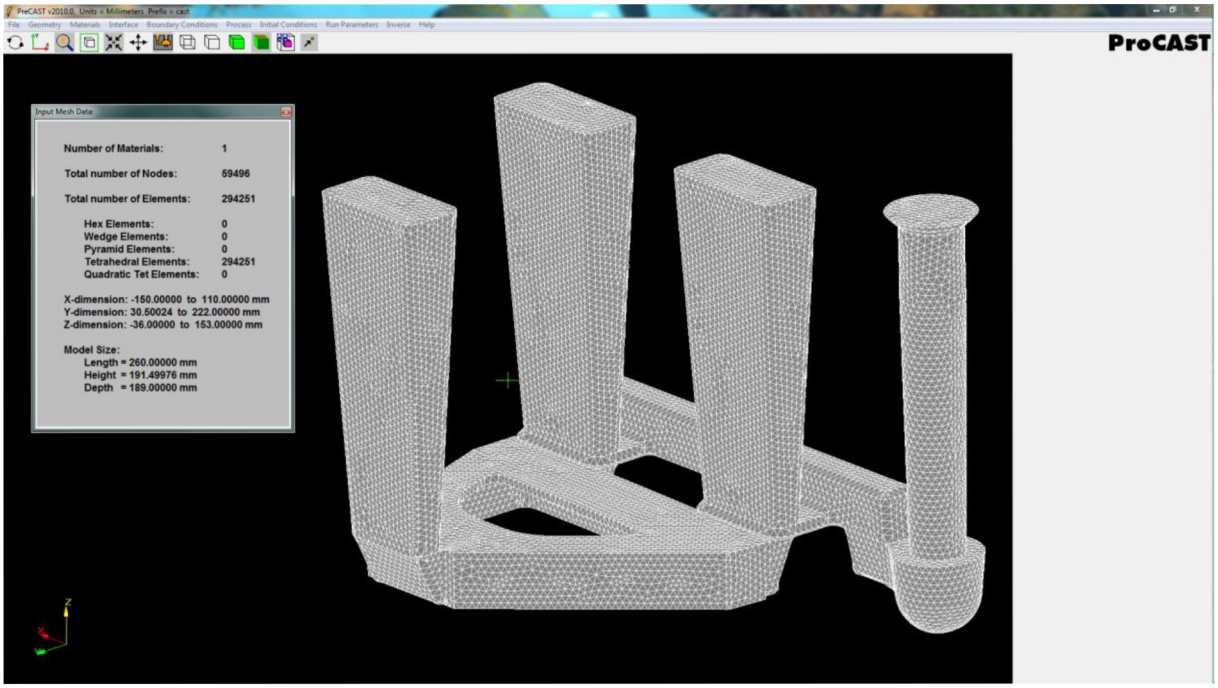


Рисунок 3.18 – Модуль PreCAST

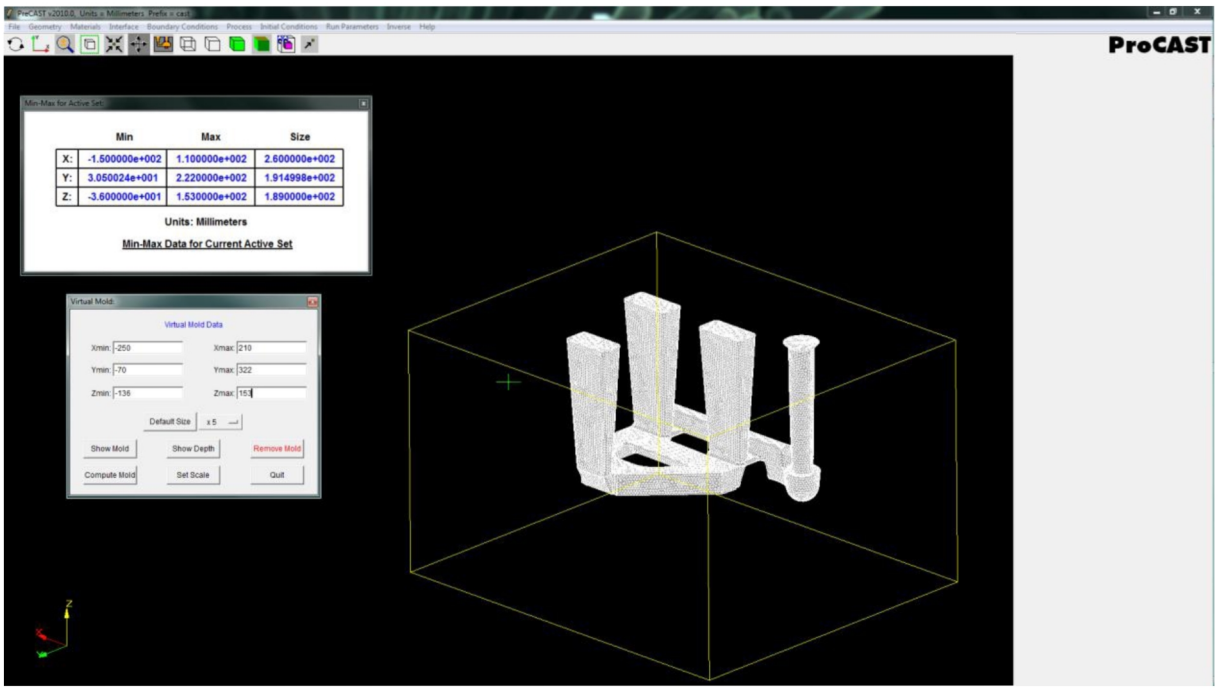


Рисунок 3.19 – Создание виртуальной формы

Таблица 3.2 – Размеры виртуальной формы

Xmin	-250	Xmax	210
Ymin	-70	Ymax	322
Zmin	-136	Zmax	153

Далее необходимо назначить материалы, из которых состоит модель. Для этого нажмите последовательно ЛКМ на вкладку *Materials*, а затем на кнопку *Assign*. В верхней части появившегося окна в разделе *Materials* нажмите ЛКМ на первый материал (# 1), это материал отливки, и выберите из существующей базы, расположенной в правой нижней части окна материал под номеров 59 (Al_AlSi7Cu3). Подтвердите свой выбор нажатием ЛКМ на кнопку *Assign*. Повторите ту же последовательность действий для присвоения материала для виртуальной формы. В качестве такового выберите материал под номером 111 (Sand_Silica).

Далее назначьте тип для материала отливки, для этого нажмите ЛКМ на против материала отливки в столбце *Type* и из выпадающего меню выберите нажатием ЛКМ *Casting*. Также нажатием ЛКМ в столбце *Empty* установите *Yes*, это означает, что объем отливки изначально пуст. Результаты этих действий показаны на рисунке 3.20.

После выбора материалов необходимо определить поверхности раздела между формой и отливкой. Для этого нажмите ЛКМ на вкладку *Interface*.В появившемся в правой верхней части окне отображена контактная пара (*Material Pair*).Так как наша модель состоит только из отливки и формы, то контактная пара одна. Чтобы задать коэффициент теплопередачи на границе раздела между отливкой и формой выберите в нижнем окне стандартной значение под номером 4, равное 500 Вт/(м^2·К) (рисунок 3.21). После этого для подтверждения сделанного выбора последовательно нажмите ЛКМ на кнопки *Assign* и *Apply*.

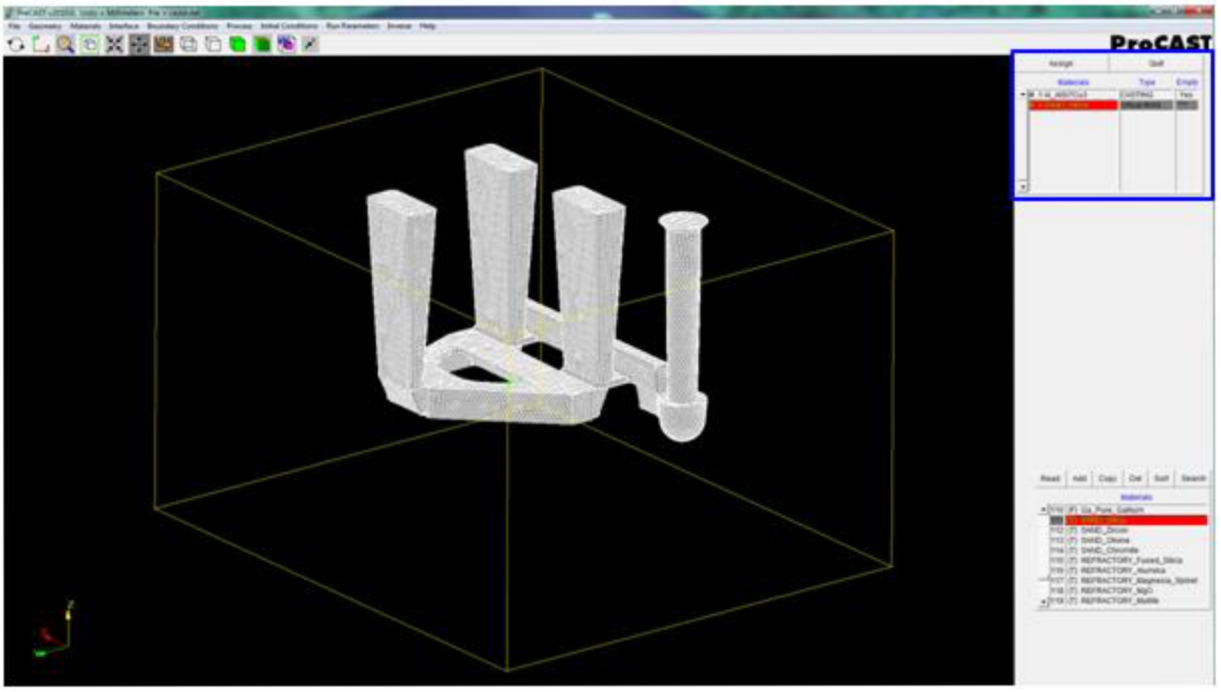


Рисунок 3.20 – Назначение материалов отливки и формы

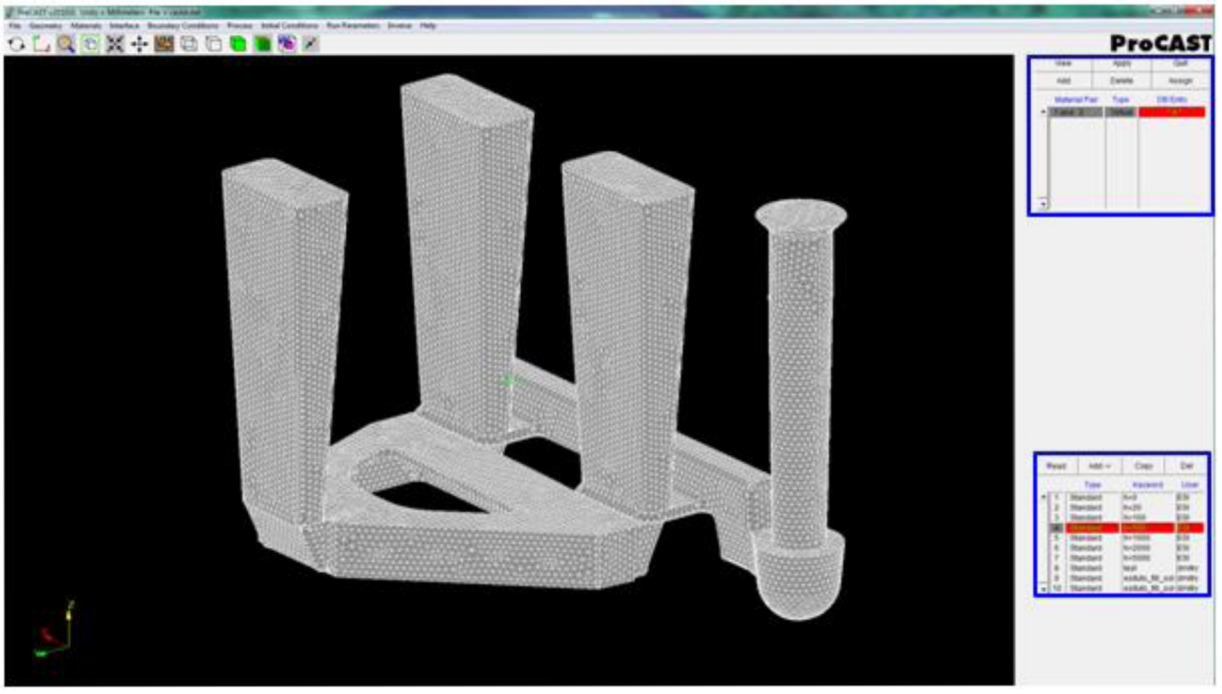


Рисунок 3.21 – Задание коэффициента теплопередачи между отливкой и формой

Перейдите к заданию граничных условий. Для этого нажмите ЛКМ на вкладку *BoundaryConditions* и из выпадающего меню выберите нажатием ЛКМ пункт *AsignSurface*.

Для создания граничных условий нажмите ЛКМ на кнопку *Add* в верхней части экрана и выберите из выпадающего меню *Velocity*. С помощью инструмента выбора укажите сечение струи расплава (выделите приблизительно такую же область как на рисунке 3.22). Для этого нажмите ЛКМ на кнопку *Select* – , а затем нажав и удерживая ЛКМ выделите узлы, для подтверждения выбора узлов нажмите ЛКМ на кнопку *Store*.

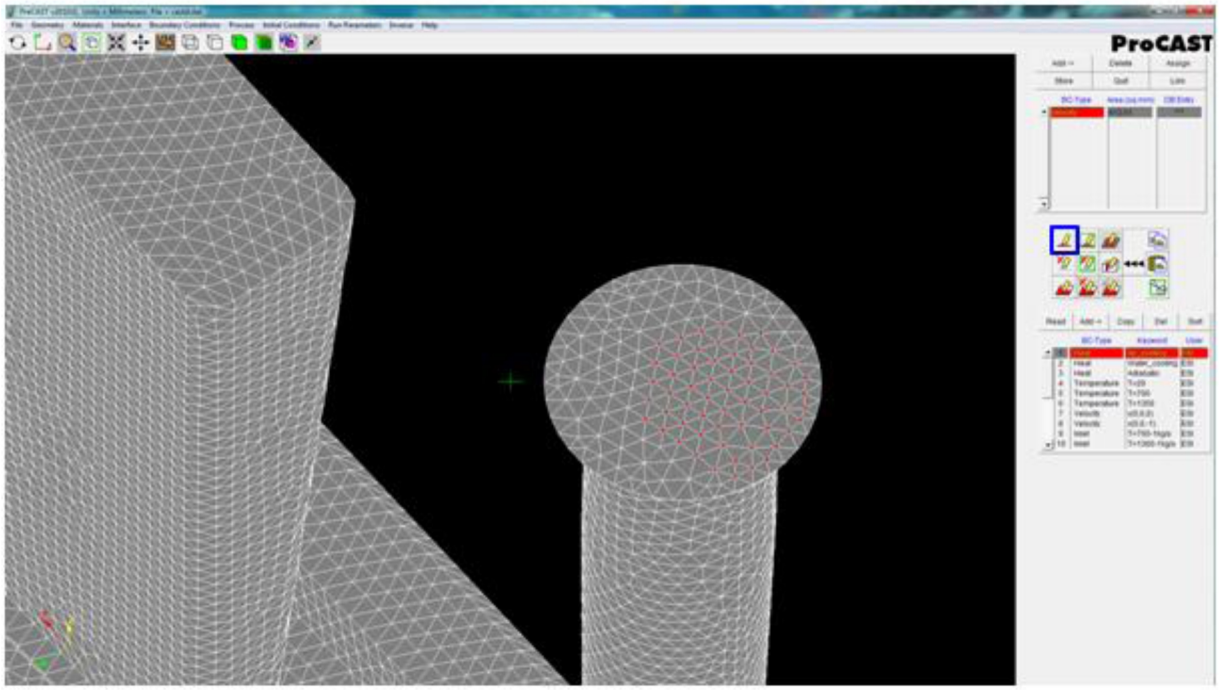


Рисунок 3.22 – Выбор сечения струи расплава

Для вычисления скорости падения струи воспользуйтесь встроенным калькулятором. Для этого нажмите ЛКМ на кнопку *Add* и выберите из выпадающего меню *Velocity* как показано на рисунке 3.23.

В появившемся окне нажмите ЛКМ на кнопку 

и в качестве единиц измерения установите mm/sec (мм/с). Затем нажмите ЛКМ на кнопку *VelocityCalculator* и во вновь появившемся окне напротив *Fill Time* с помощью клавиатуры введите значение 5. Далее нажмите ЛКМ на кнопку *Calculate* и рассчитанное значение, показанное на против *Velocity Mag*,

равное -447 введите в строке *W:* окна *Boundary Conditions Data* (рисунок 3.24).

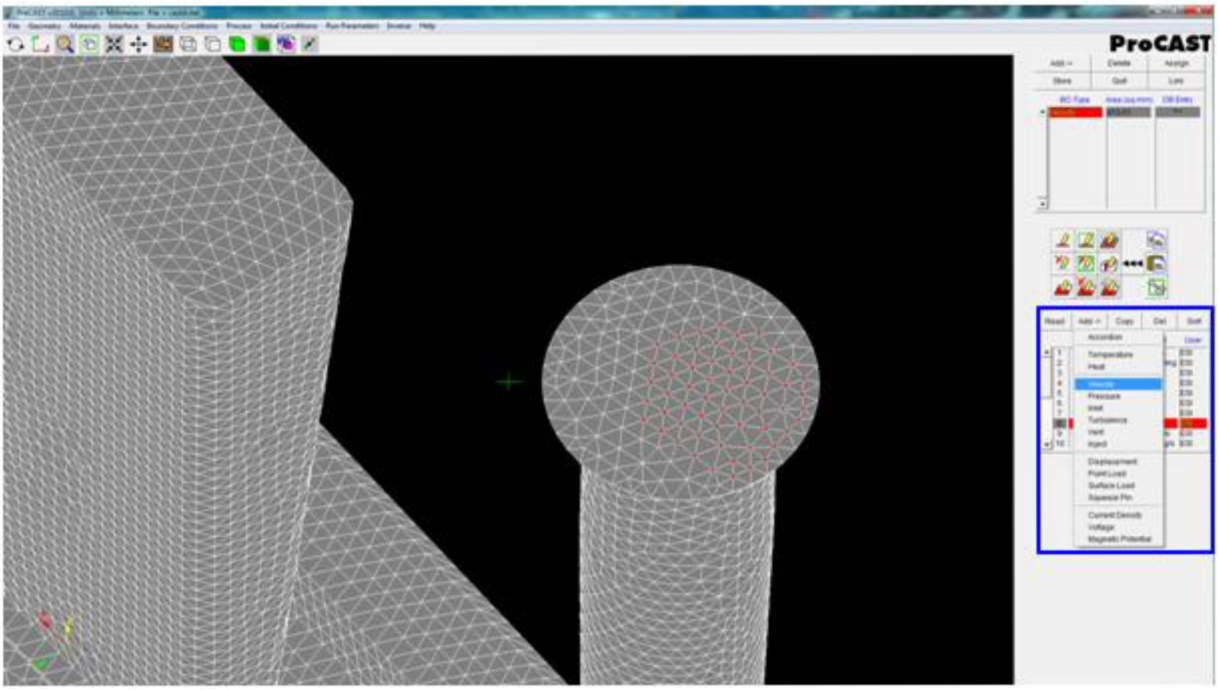


Рисунок 3.23 – Добавление скорости падения струи расплава в качестве граничного условия

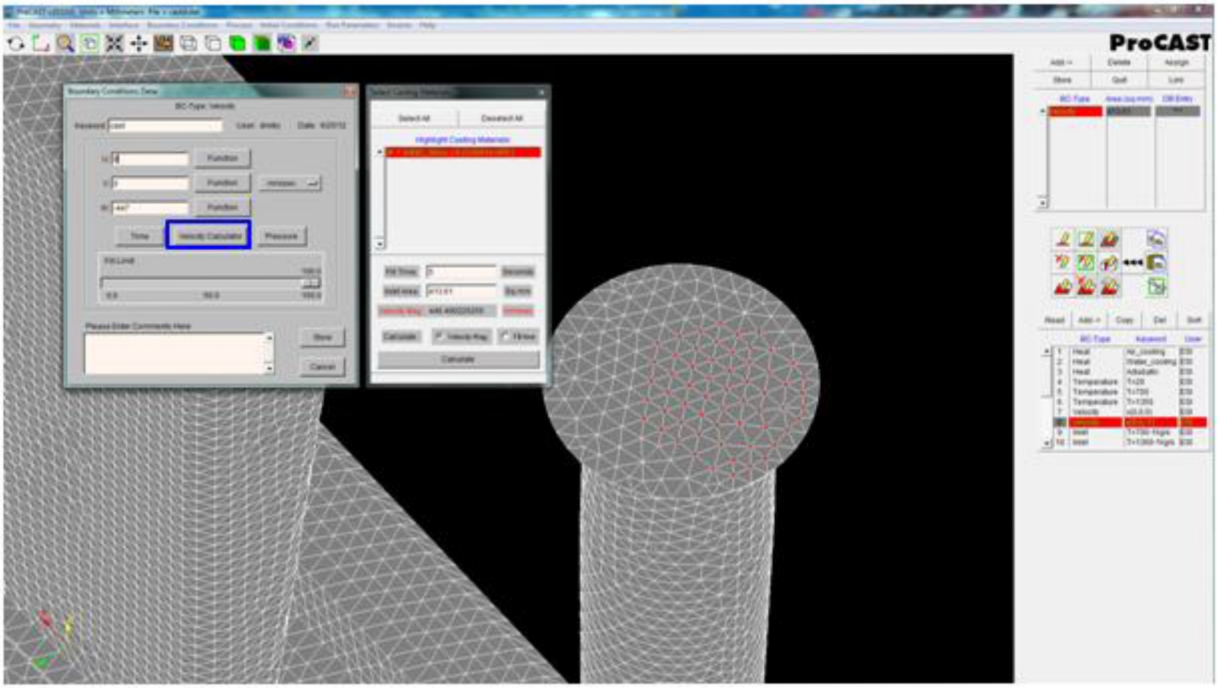


Рисунок 3.24 – Расчет скорости падения струи расплава

Для подтверждения выполненных действий нажмите ЛКМ на кнопку *Store*. В результате база данных граничных условий пополнилось новым условием, которое отображается в нижнем окне. Нажмите кнопку *Assign* для присвоения введенных значений скорости падения струи расплава.

Подобным образом создайте второе граничное условие *Temperature*, нажав ЛКМ на кнопку *Add* окна, расположенного в верхней части экрана. Это граничное условие задает температуру струи расплава. Скопируйте уже выделенную область узлов из граничного условия *Velocity* в *Temperature*. Нажмите для этого ЛКМ на значение в столбце *Area (sq.mm)* напротив *Velocity* и затем нажмите на кнопку *Copy* – , расположенной в средней правой части экрана. Затем нажмите ЛКМ на значение в столбце *Area (sq.mm)* напротив *Temperature* и на кнопку *Paste* – , расположенной там же. Подтвердите это действие нажатием ЛКМ на кнопку *Store*. В качестве значения температуры струи расплава выберите описанным выше образом стандартное значение из базы под номером 5 (T=700) и нажмите ЛКМ на кнопку *Assign* (рисунок 3.25).

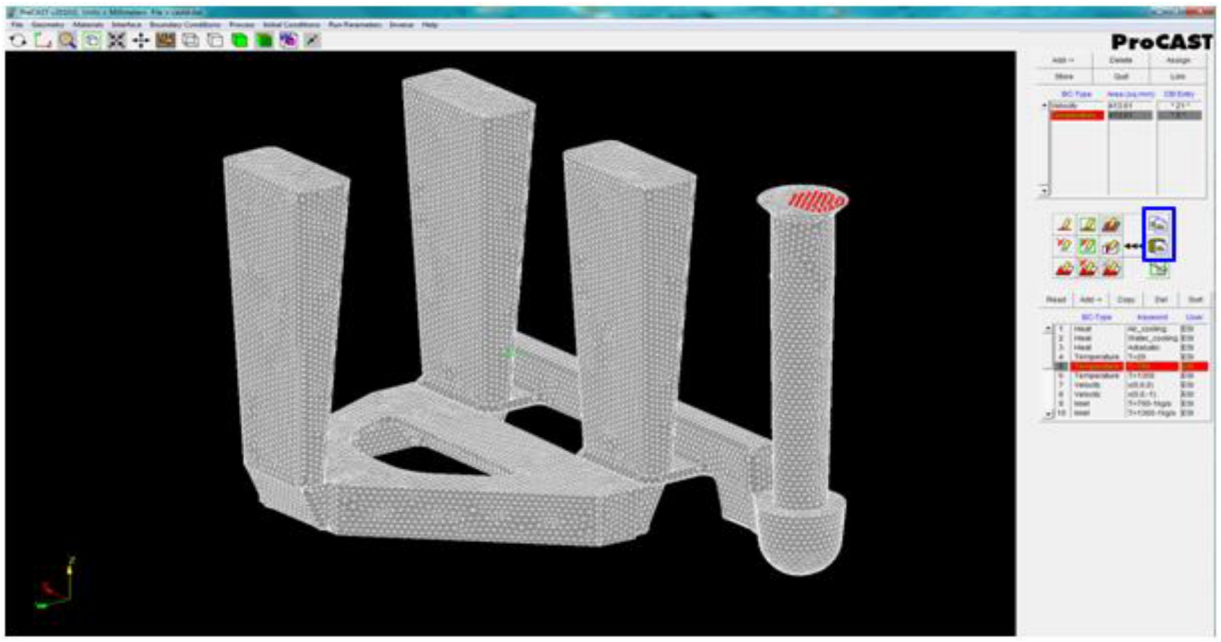


Рисунок 3.25 – Добавление температуры струи расплава в качествеграничного условия

Для определения вектора силы тяжести последовательно нажмите ЛКМ на вкладку *Process* и кнопку *Gravity*. В появившемся окне дважды нажмите ЛКМ на *Z:*, а затем на кнопку *Apply* (рисунок 3.26).

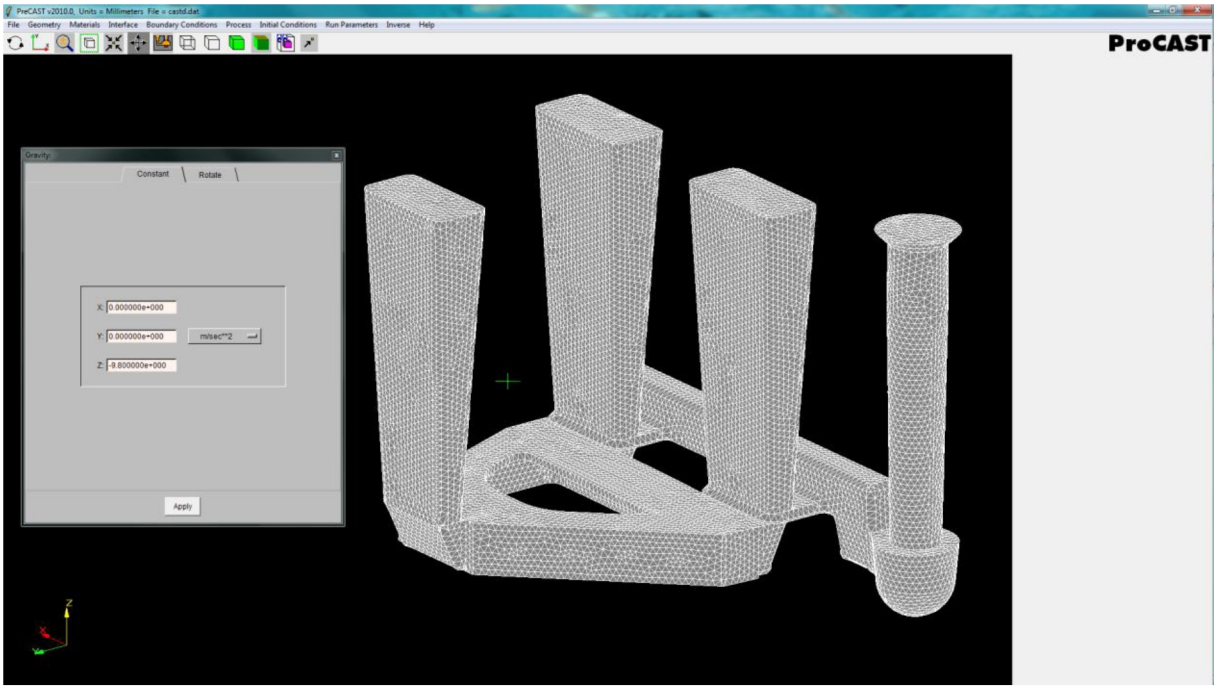


Рисунок 3.26 – Определения вектора силы тяжести

Для назначения начальных условий нажмите ЛКМ на вкладку *InitialConditions* и из выпадающего меню выберите пункт *Constant*. Для каждого материала вводим значения начальных температур (рисунок 3.27). Нажмите ЛКМ на материал отливки (Al_AlSi7Cu3) и в свободное поле введите с помощью клавиатуры значение температуры равное 700 (температура расплава составляет 700°С), а затем нажмите на кнопку *Enter* на клавиатуре. Подобным образом присвойте материалу формы температуру, равную 20 (температура формы составляет 20°С).

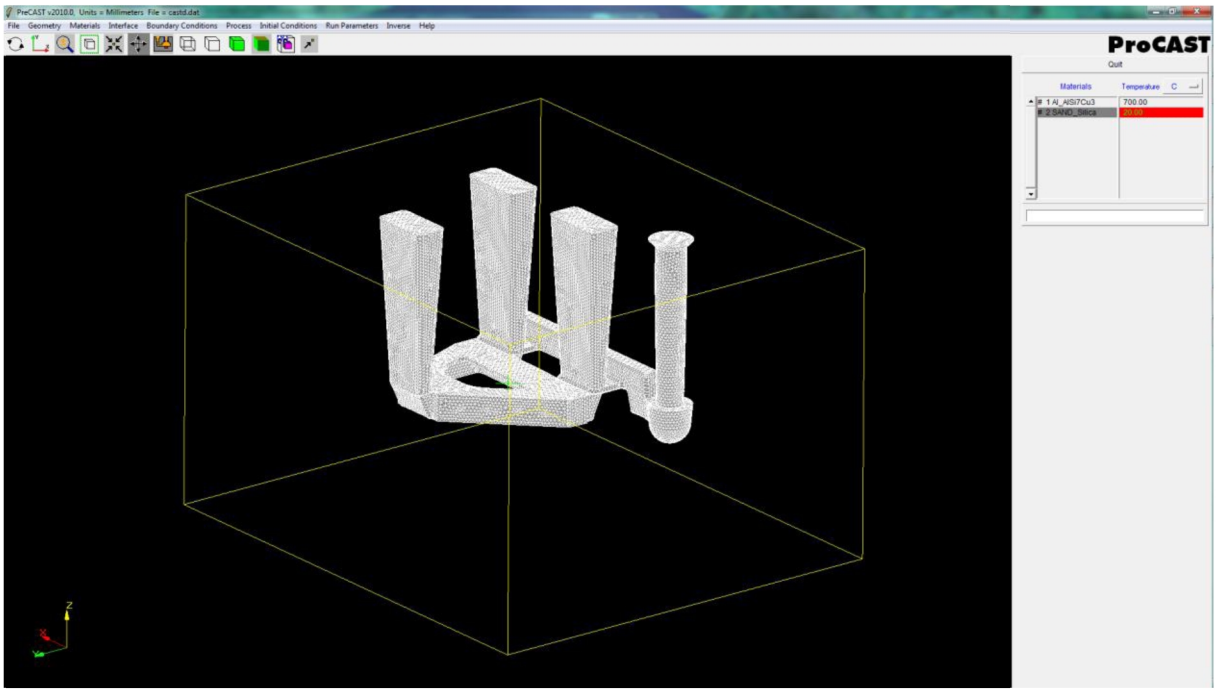


Рисунок 3.27 – Назначения начальных условий

3.7.4. Задание параметров расчета

Для запуска задачи на расчет осталось задать параметры расчета. Для этого нажмите ЛКМ на вкладку *Run Parameters*, в появившемся окне перейдите в меню *Preferences*инажмитеЛКМнакнопку*Select Pre-defined Set*. Из выпадающего меню выберите *Gravity Filling*, при этом часть параметров будет настроено автоматически.

Затем перейдите в раздел *General* → *Standart*. Введите следующие параметры: *NSTEP* = 20000, *TSTOP* = 500. Кроме того измените единицы измерения давления на *MPa*, которые будут использоваться при просмотре результатов (рисунок 3.28).

В разделе *Flow* во вкладке *Standart* установите значение параметра PREF равное 0, а параметра *LVSURF*= 1 (рисунок 3.29). После этого сохраните сделанные изменения нажав ЛКМ на кнопку *Apply*.

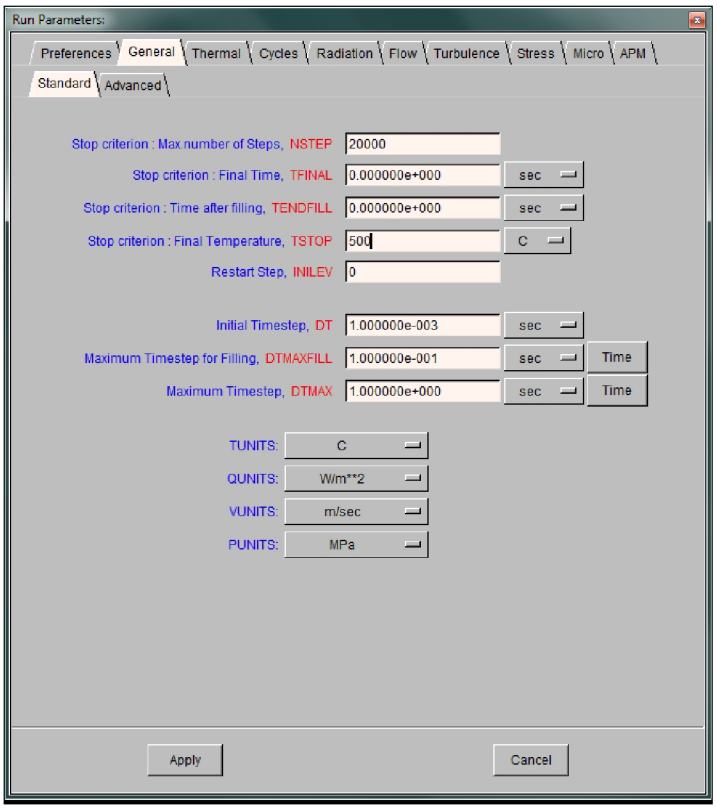


Рисунок 3.28 – Основные параметры расчета

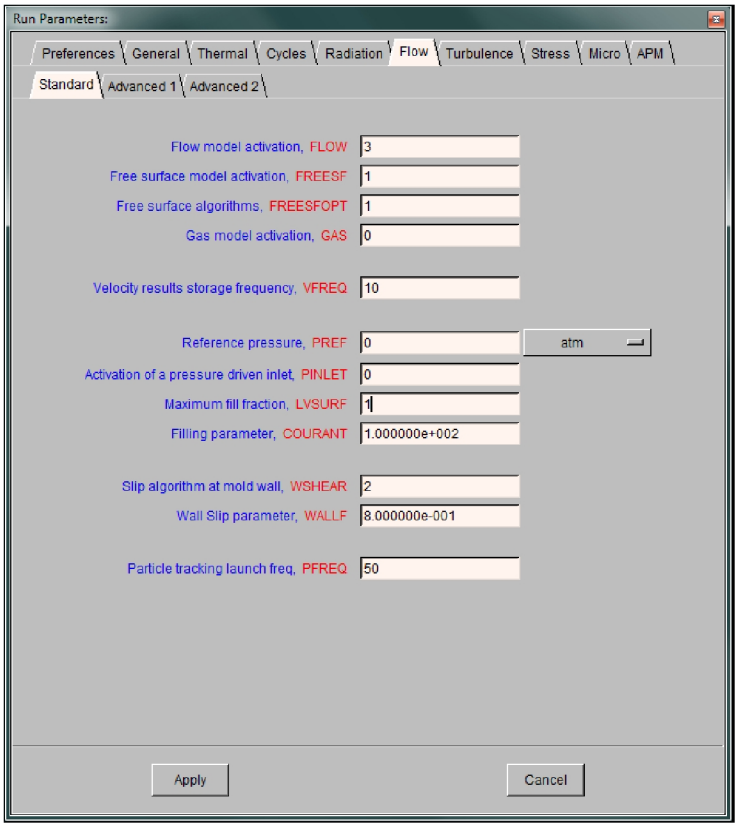


Рисунок 3.29 – Параметры заполнения формы

Далее необходимо сохранить файл, для этого нажмите последовательно ЛКМ на кнопки *File* → *Save*. Запустится процесс оптимизации и по его окончании программа закроется.

Запустите модуль PreCAST, поставьте галочку напротив *Updateoption (-u)* и нажмите на кнопку *ExecuteDataCAST*. Аналогичным образом поступите с модулем *ProCAST*. В результате задача запустится на расчет и в ProCAST Manager можно отслеживать информацию о расчете нажав на кнопку Status.

3.7.5. Визуализация полученных результатов моделирования

Контролировать правильность расчета можно в ходе его выполнения. Для этого необходимо нажать ЛКМ на кнопку *Return to File Manager*, вернуться в ProCAST Manager и запустить постпроцессор, нажав ЛКМ на надпись *VisualCAST*.

В итоге в постпроцессор загрузятся результаты решения данной задачи (рисунок 3.30).

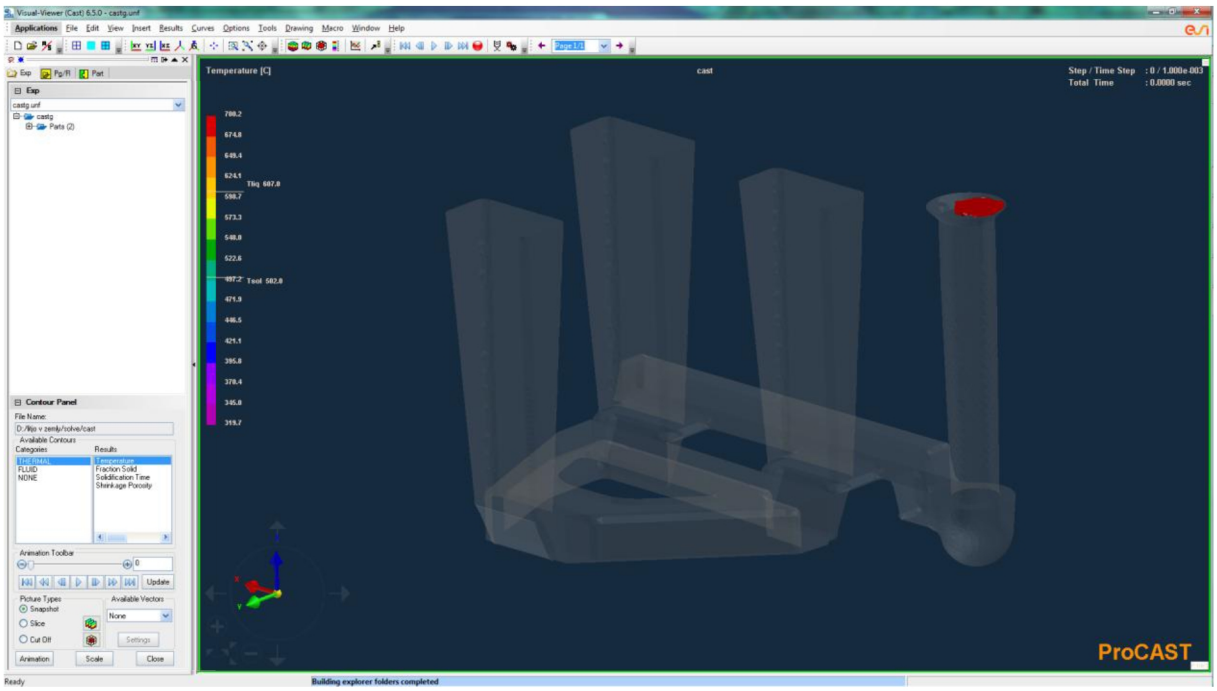


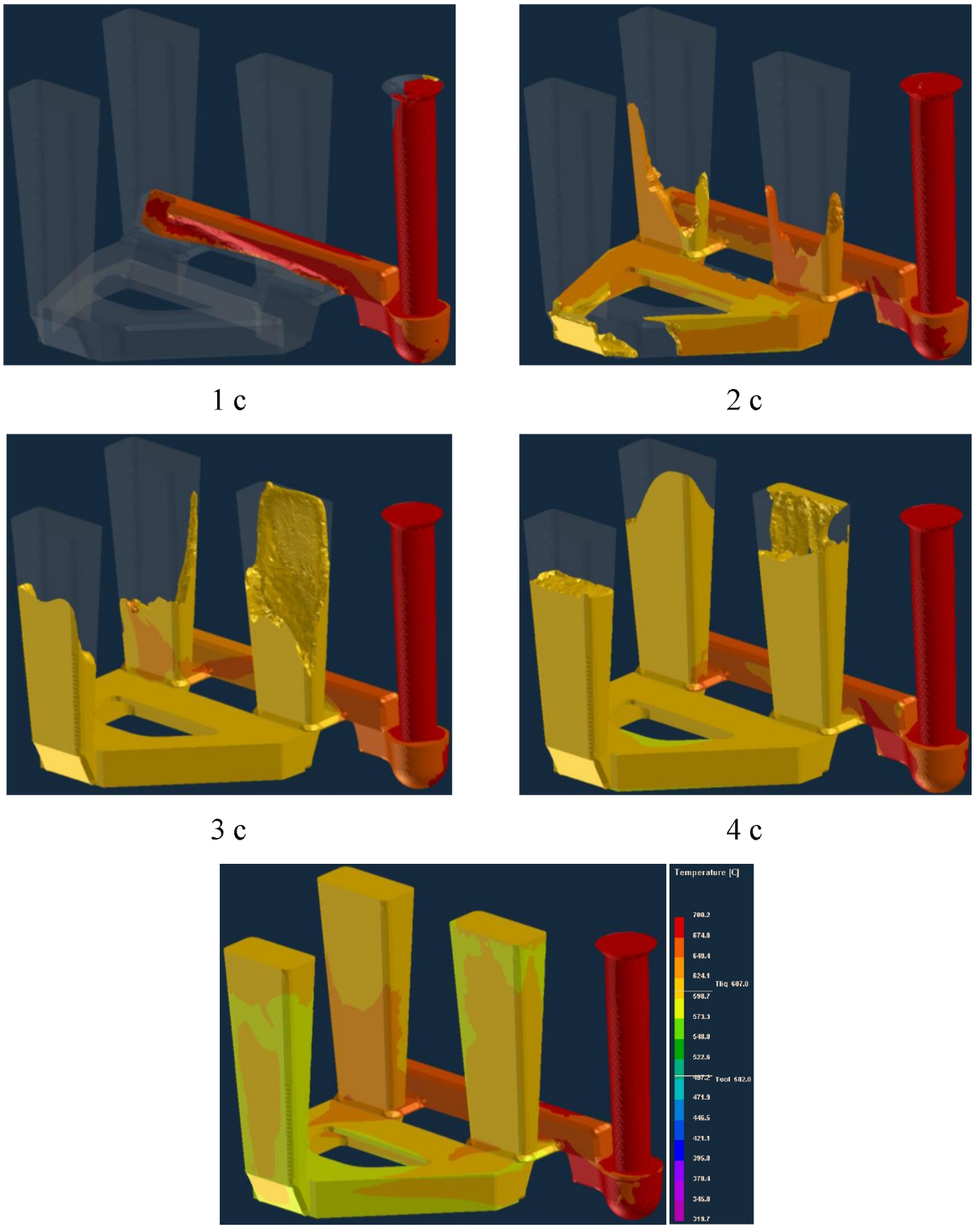
Рисунок 30 – Результаты компьютерного моделирования

VisualCAST обладает множеством функций как отображения самой модели, так и различных параметров, рассмотрим некоторые из них. Для наиболее наглядного отображения результатов модель необходимо сориентировать в пространстве. Это можно сделать с помощью интерактивной системы координат, расположенной в нижнем левом углу экрана, а также с помощью кнопок мыши: нажатие на среднюю кнопку (scroll) вращает модель, а ее поворот изменят масштаб; нажатие на правую кнопку перемещает модель.

Для того чтобы посмотреть изменение температурных полей отливки в процессе заполнения формы выберите при помощи нажатия ЛКМ на *Controur Panel* → *Temperature*, расположенной в нижней левой части экрана и нажмите ЛКМ на кнопку Play – , которая расположена на панели *Animation Toolbar*. В результате запустится процесс заполнения формы расплавом и последующая его кристаллизация. Основные стадии гидродинамического процесса заполнения формы показаны на рисунке 3.31.

Кроме этого, гидродинамический процесс заполнения формы расплавом позволяет оценить конструкцию литниковой системы и выбор места подвода расплава. Правильная работа литниковой системы во многом определяет качество будущей отливки и позволяет избежать следующих дефектов: неслитин, спаев и недоливов; неметаллических включений в виде пены, окисных плёнок и газовых раковин; усадочных раковин, рыхлот и пористости, трещин и коробления; ужимин, пригара и других дефектов, обусловленных неравномерным прогревом формы и механическим разрушением (разрывом) поверхности форм и стержней, а также их смещением вследствие динамического и теплового воздействия струи расплава.

Для того, чтобы отобразить скорость движения расплава в процессе заполнения формы (рисунок 3.32) выберите при помощи нажатия ЛКМ на *Controur Panel* → *Fluid* → *FluidVelocity-Magnitude* и нажмите ЛКМ на кнопку Play.

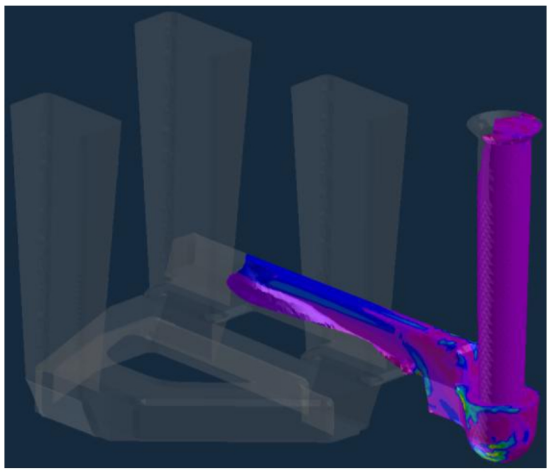


1 с 2 с

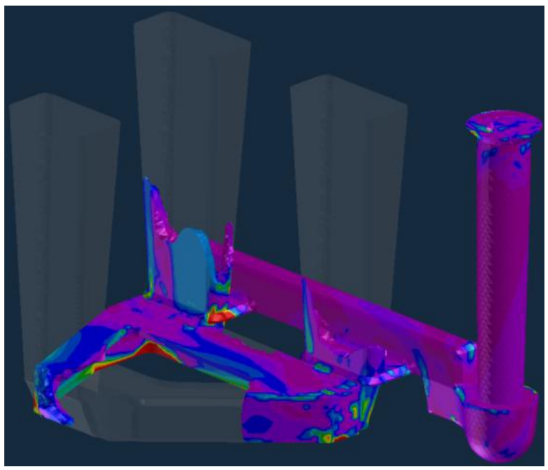
3 с 4 с

5 с

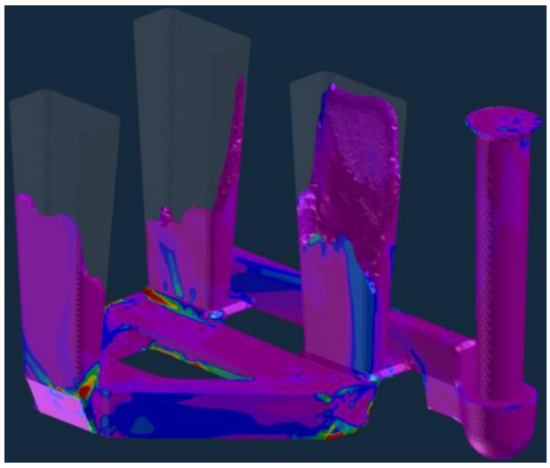
Рисунок 3.31 – Изменение температуры расплава во время заполнения формы



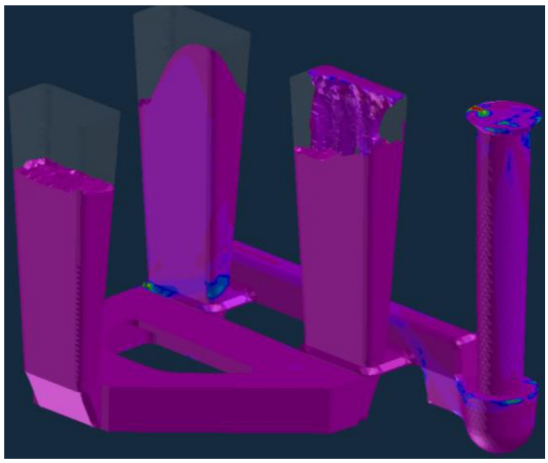
1 с



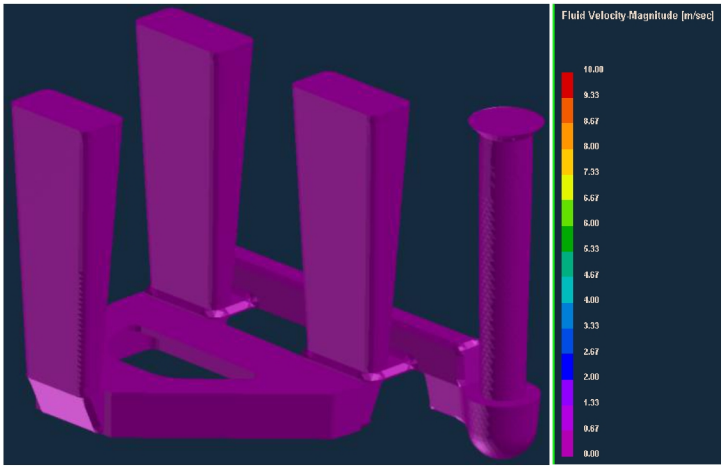
2 с



3 с



4 с



5 с

Рисунок 3.32 – Скорость расплава во время заполнения формы

Для данного примера скорости движения расплава завышены, т.к. с целью экономии расчетного времени время заполнения формы установлено меньше, чем на самом деле.

Также в результате расчета можно предсказать возможные литейные дефекты. Так, например, для отображения возникающей в процессе кристаллизации усадочной пористости по объему отливки (рисунок 3.33) нажмите ЛКМ на панель *Controur Panel* и выберите *ShrinkagePorosity*.

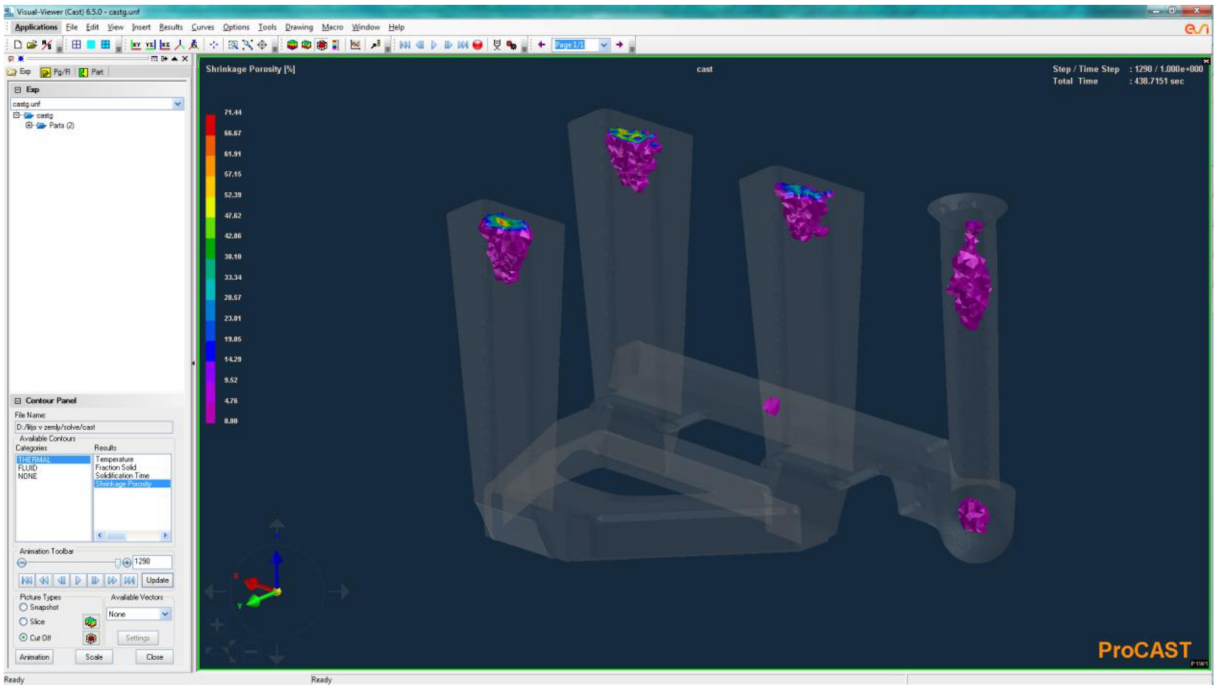


Рисунок 3.33 – Усадочная пористость в отливки

4. МОДЕЛИРОВАНИЕ ЛИТЬЯ В КОКИЛЬ В PROCAST

4.1. Общие сведения о малой комплексной пробе на жидкотекучесть Нехендзи-Купцова

Возможности ProCAST рассмотрим на примере моделирования процессов получения малой комплексной пробы на жидкотекучесть Нехендзи-Купцова (рисунок 4.1), которая представляет собой усовершенствованный вариант U-образной пробы Нехендзи-Самарина. Конусная часть пробы 1 служит для определения объемной усадки; U-образный пруток 2 – для определения жидкотекучести; вертикальный пруток 3 – для определения линейной усадки. Внешний вид кокиля показан на рисунке 4.2.

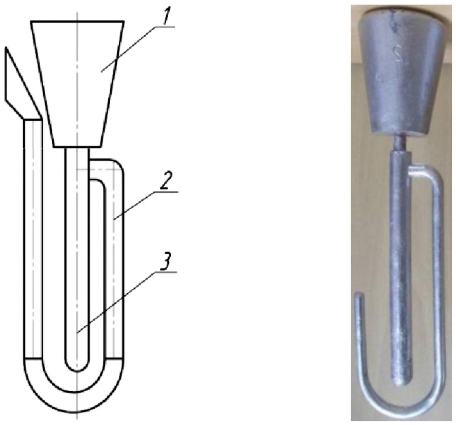


Рисунок 4.1 – Малая комплексная проба Нехендзи-Купцова



Рисунок 4.2 – Внешний вид кокиля для получения пробы на жидкотекучесть Нехендзи-Купцова

4.2. Построение геометрии конечно-элементной модели

Начинаем работу с импортирования геометрии модели и разбиении ее на конечные элементы. Для этого запускаем модуль MeshCAST и с помощью меню **File → Open** импортируем предварительно созданную модель формы (файл под названием "test.x_t") в сторонней CAD-системе, сохраненной в формате Parasolid (рисунок 4.3).

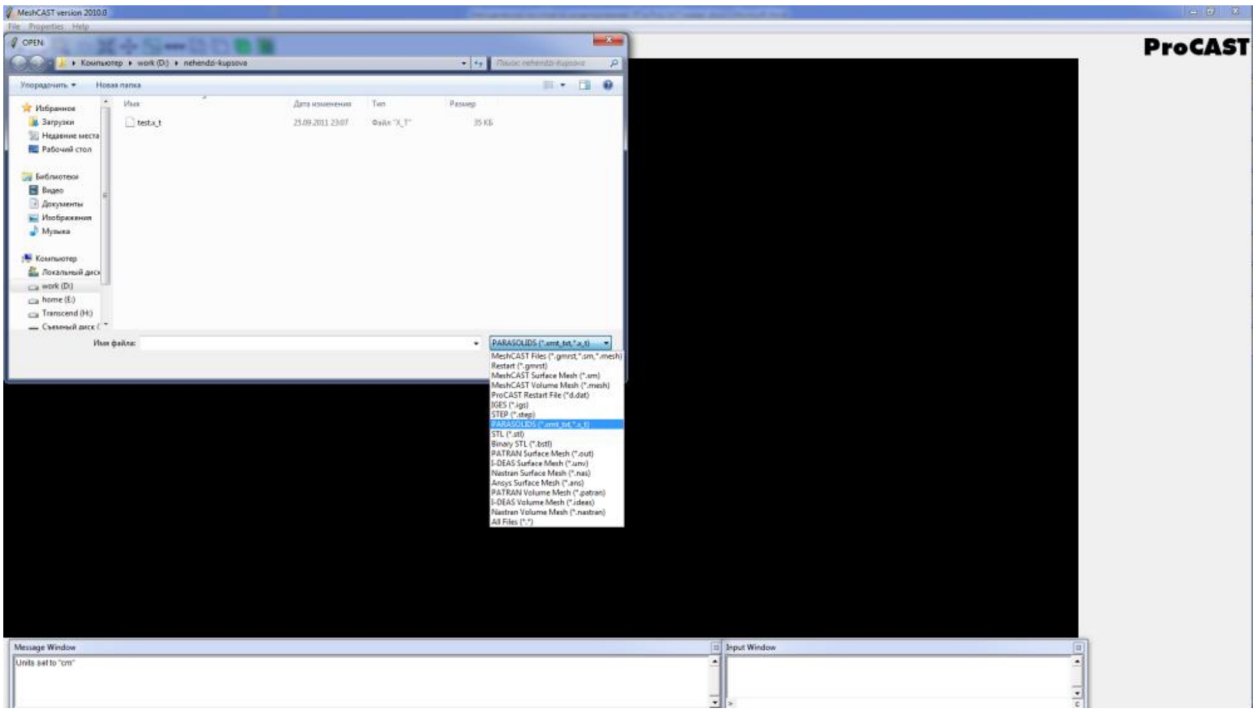


Рисунок 4.3 – Импорт модели в модуль MeshCAST

После того как была загружена модель необходимо установить единицы измерения. Для этого в меню **REPAIR TOOLS** (рисунок 4.4) переходим в раздел **Tools** (шаг 1), выбираем **Change Units** (шаг 2), где устанавливаем в качестве единиц измерения миллиметры и нажимаем кнопку **Execute**(шаг 3) как показано на рисунке 4.4.

В результате программа автоматически закроется и создаст новый файл "test.gmrst". Необходимо заново загрузить модуль MeshCAST и открыть вновь созданный файл стандартным образом.

В данном случае в CAD-системе построена только кокильная форма, отливку же мы построим непосредственно в модуле MeshCAST, создав всего две поверхности. Для этого с помощью команды **Select** меню REPAIR FACILITATION TOOLS (шаг 1), пересекая курсором, выделим два ребра (рисунок 4.5). Далее, на основании выделенных ребер построим поверхность с помощью команды **Add Plane** меню **Surface Operations** (шаг 2).

Таким же образом создадим и вторую поверхность (рисунок 4.6).

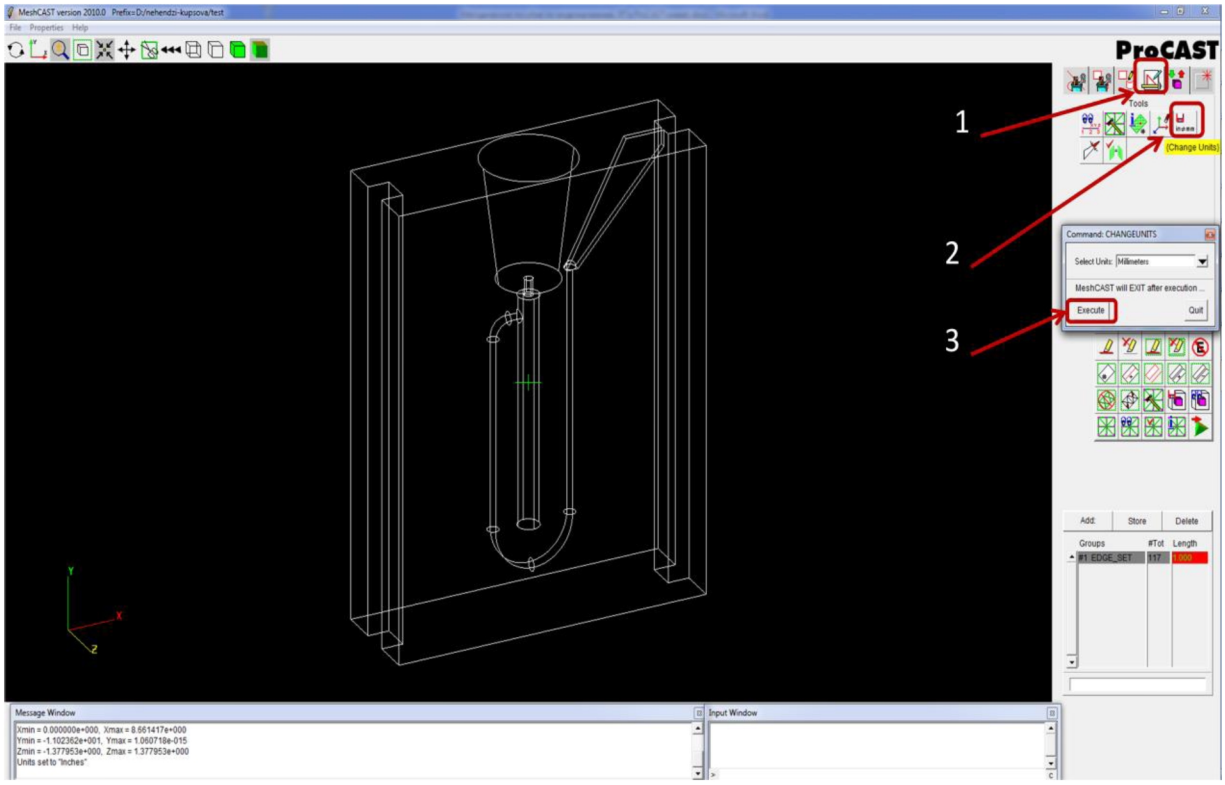


Рисунок 4.4 – Выбор единиц измерения

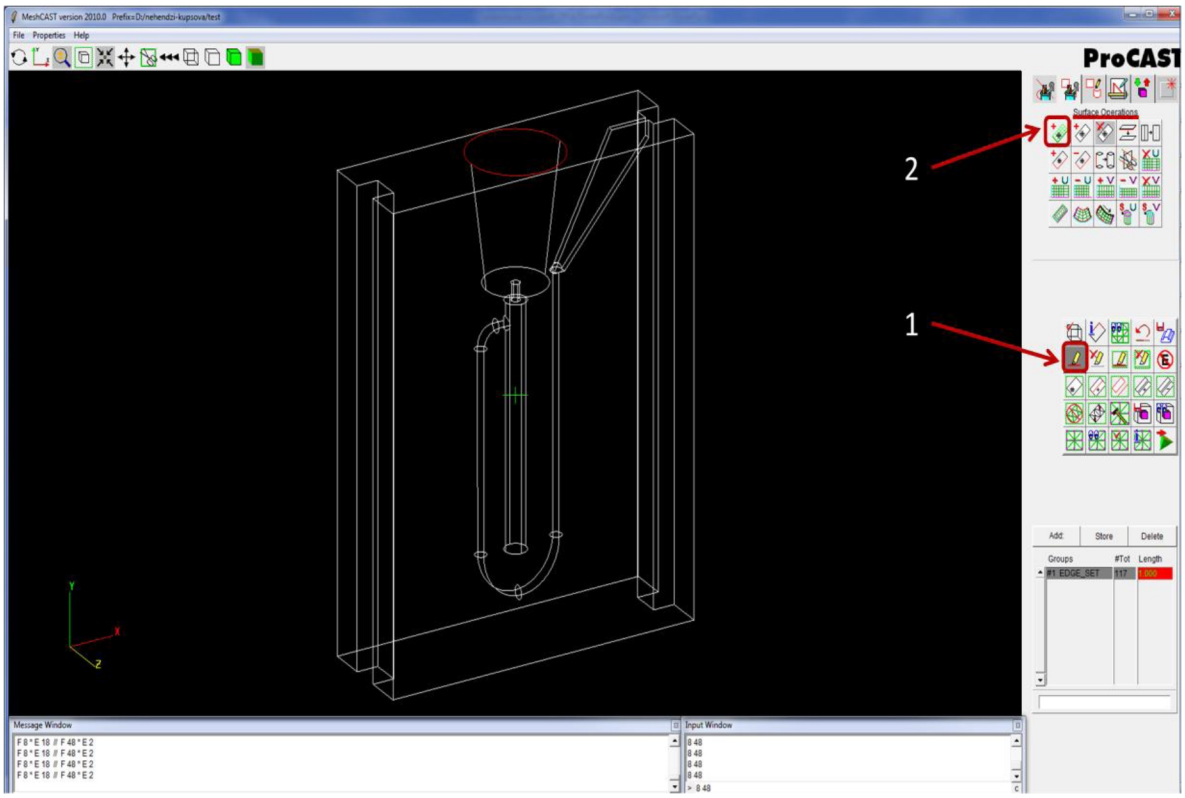


Рисунок 4.5 – Создание новой поверхности

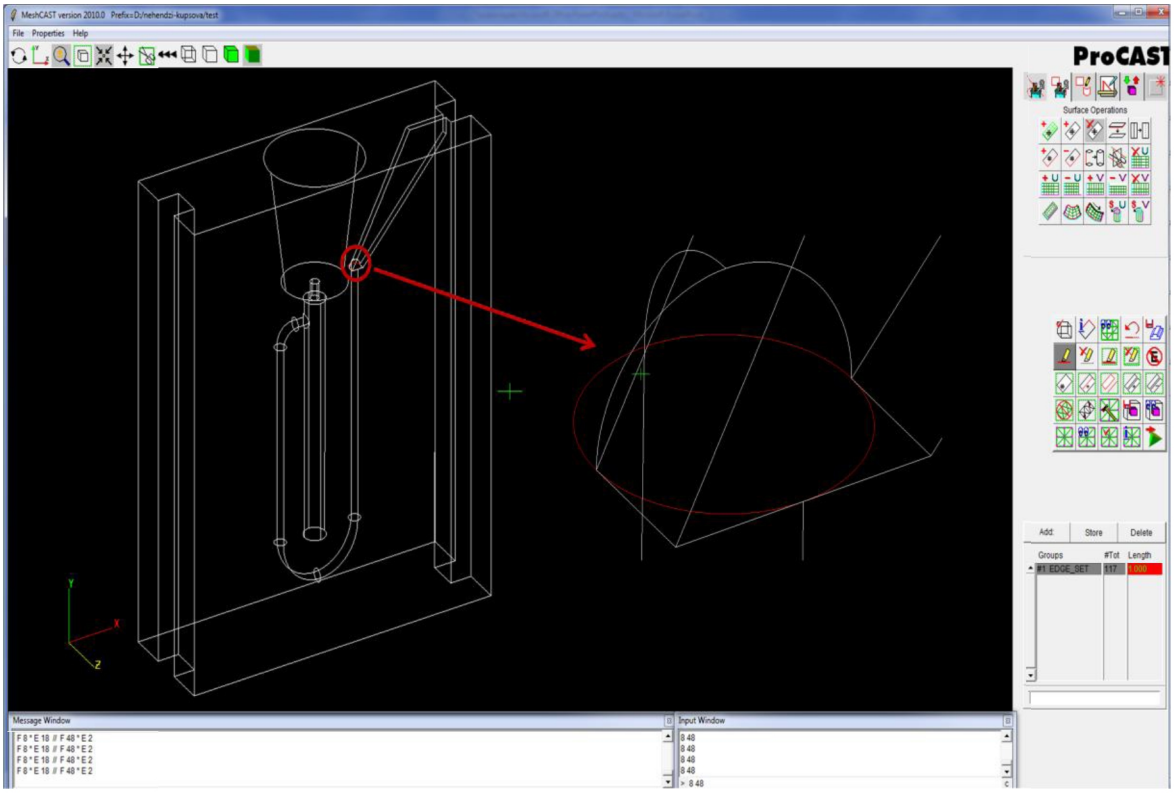


Рисунок 4.6 – Создание новой поверхности

После всех этих процедур приступаем к созданию поверхностной конечно-элементной сетки, от качества которой зависит объемная сетка и точность расчетов в целом. Поэтому геометрию формы необходимо разделить на несколько наборов с различной величиной конечных элементов. Так, на внешних поверхностях нет необходимости создавать мелкие элементы, тем более, что это значительно увеличит время расчета. А вот на внутренних поверхностях формы, формирующих отливку необходимо создать сетку, корректно описывающую их геометрию. На данный момент вся геометрия формы принадлежит одному набору **#1 EDGE_SET** (рисунок 4.7). Это можно проверить нажав в меню наборов в колонке **Groups** на пока единственный **#1 EDGE_SET**. После чего все ребра, принадлежащие данному набору будут окрашены в красный цвет. Данный прием очень удобно использовать при сложной геометрической модели, разбитой на множество наборов.

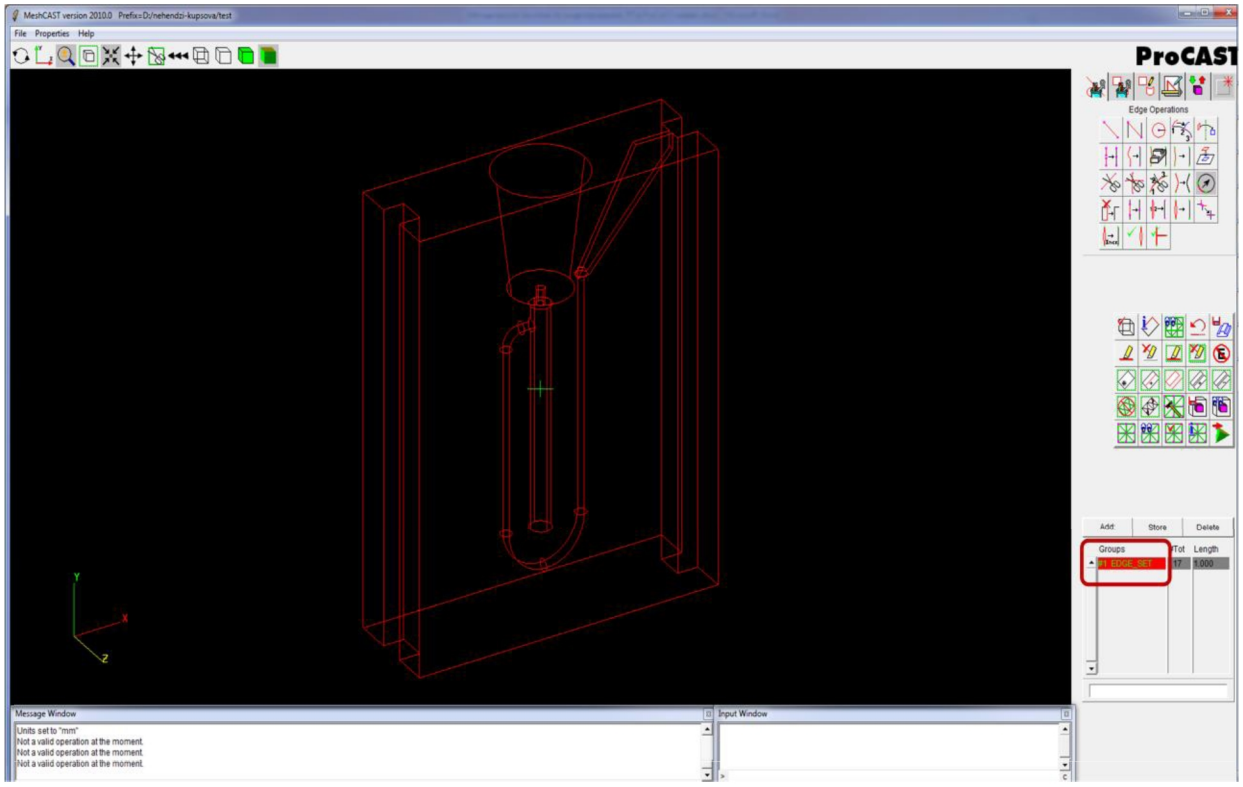


Рисунок 4.7 – Существующий набор ребер

Для создания новых наборов необходимо нажать на кнопку **Add** (шаг 1) меню наборов, далее нажать на кнопку **Select** меню REPAIR FACILITATION TOOLS (шаг 2) и пересекая курсором необходимую часть геометрии модели выделить набор ребер как показано на рисунке 4.8. При пересечении курсором ребро окрашивается в красный цвет. После выделения всех ребер необходимо подтвердить создание нового набора нажатием кнопки **Store** (шаг 3).

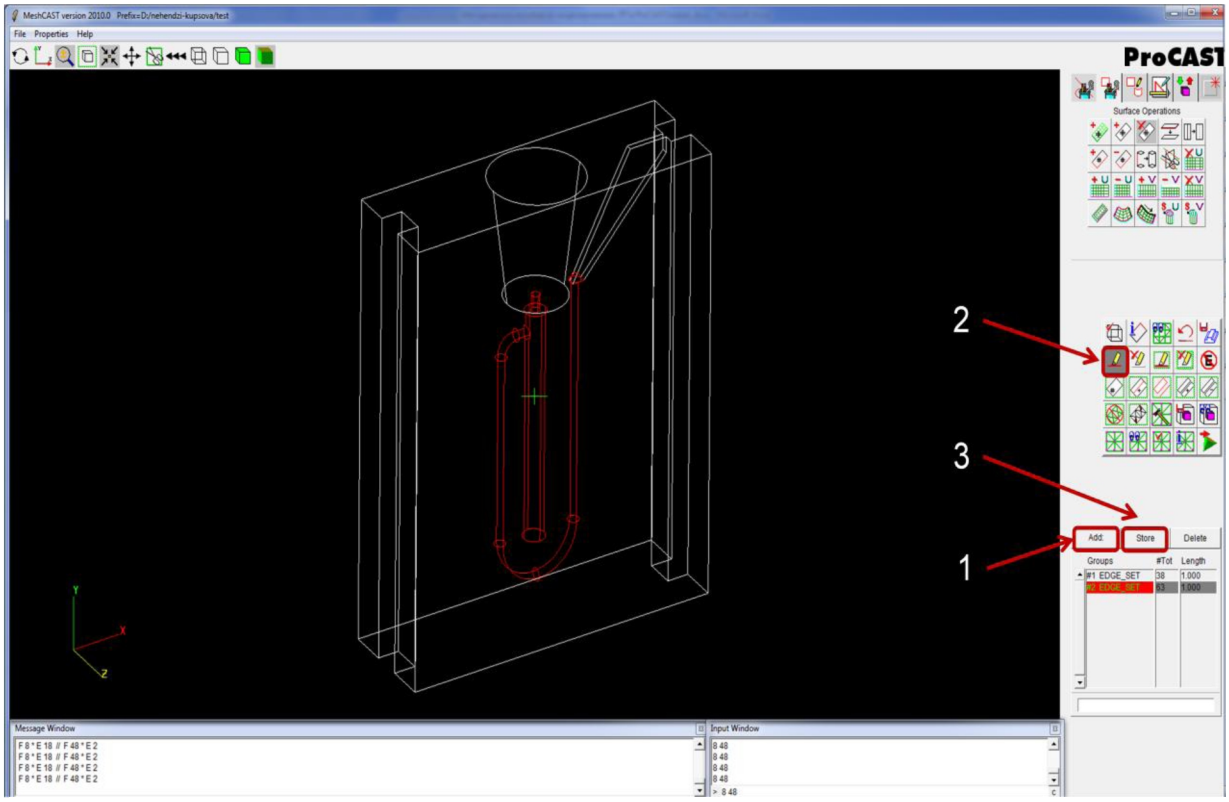


Рисунок 4.8 – Создание нового набора ребер

После это можно проверить правильность своих действий нажав на **#2 EDGE_SET** в меню наборов. Должны высветиться красным цветом все ребра, принадлежащие второму, только что созданному набору (рисунок 4.9).

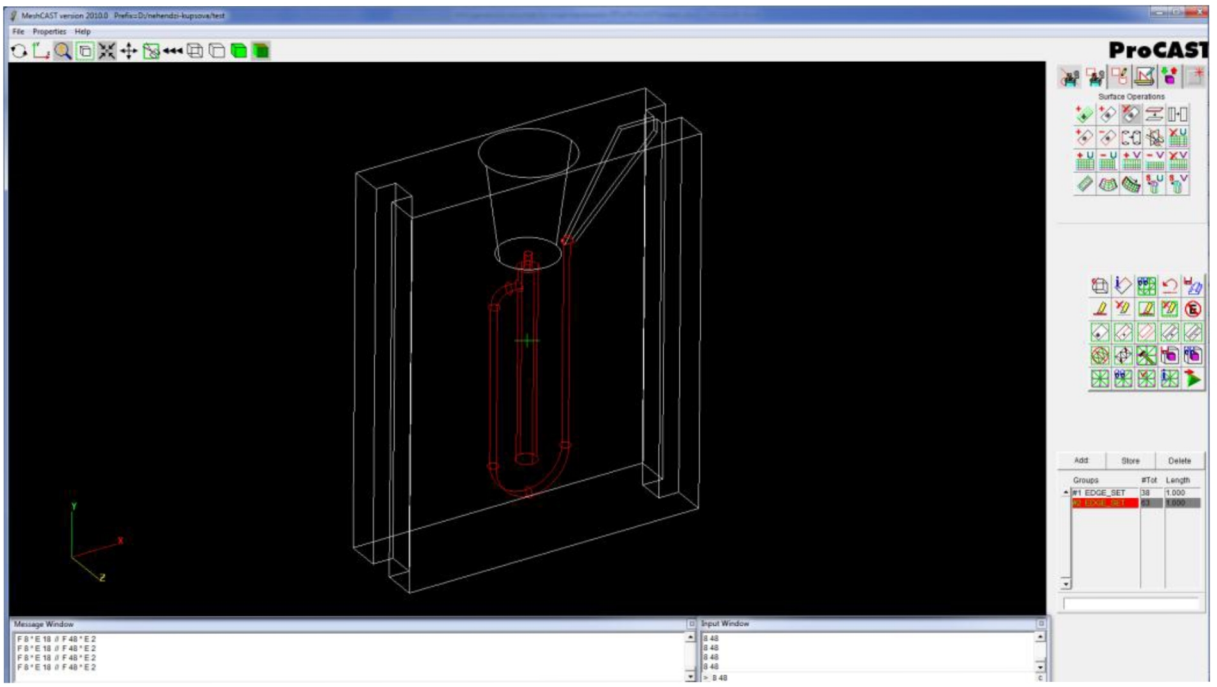


Рисунок 4.9 – Ребра, принадлежащие новому набору

Необходимо повторить ту же последовательность действий для создания третьего набора **#3 EDGE_SET**, показанного на рисунке 4.10.

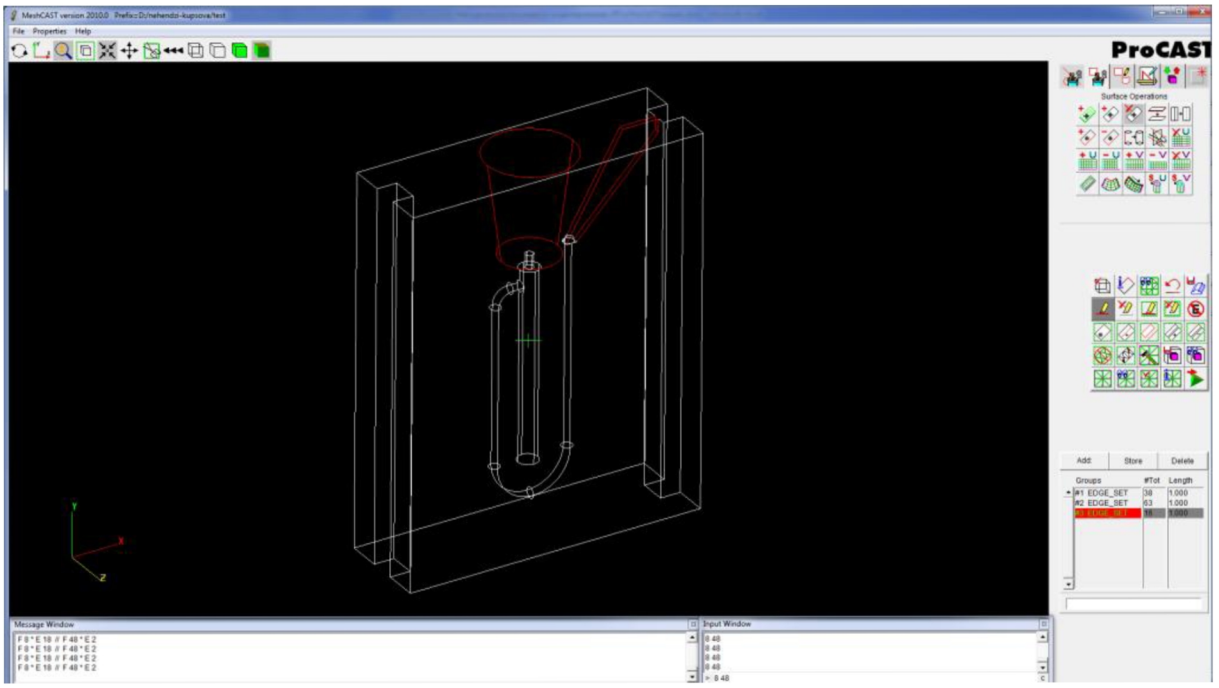


Рисунок 4.10 – Третий набор ребер

Элементы геометрии модели, принадлежащие каждому из трех наборов будут разбиты на сетку с разным размером конечных элементов. Это делается для того, чтобы обеспечить компромисс между качеством конечно-элементной сетки и продолжительностью расчета. Таким образом, отливка будет разбита на мелкую конечно-элементную сетку (размер 1,5 мм), прибыль – несколько крупнее (размер 3 мм), а кокиль еще крупнее (размер 5 мм).

Для того, чтобы указать размер конечного элемента (рисунок 4.11) необходимо ввести его значение в строку, расположенной под меню наборов (шаг 1), выделить в интересующем наборе уже установленное значение (по умолчанию 1) (шаг 2) и нажать на клавиатуре кнопку **Enter.**

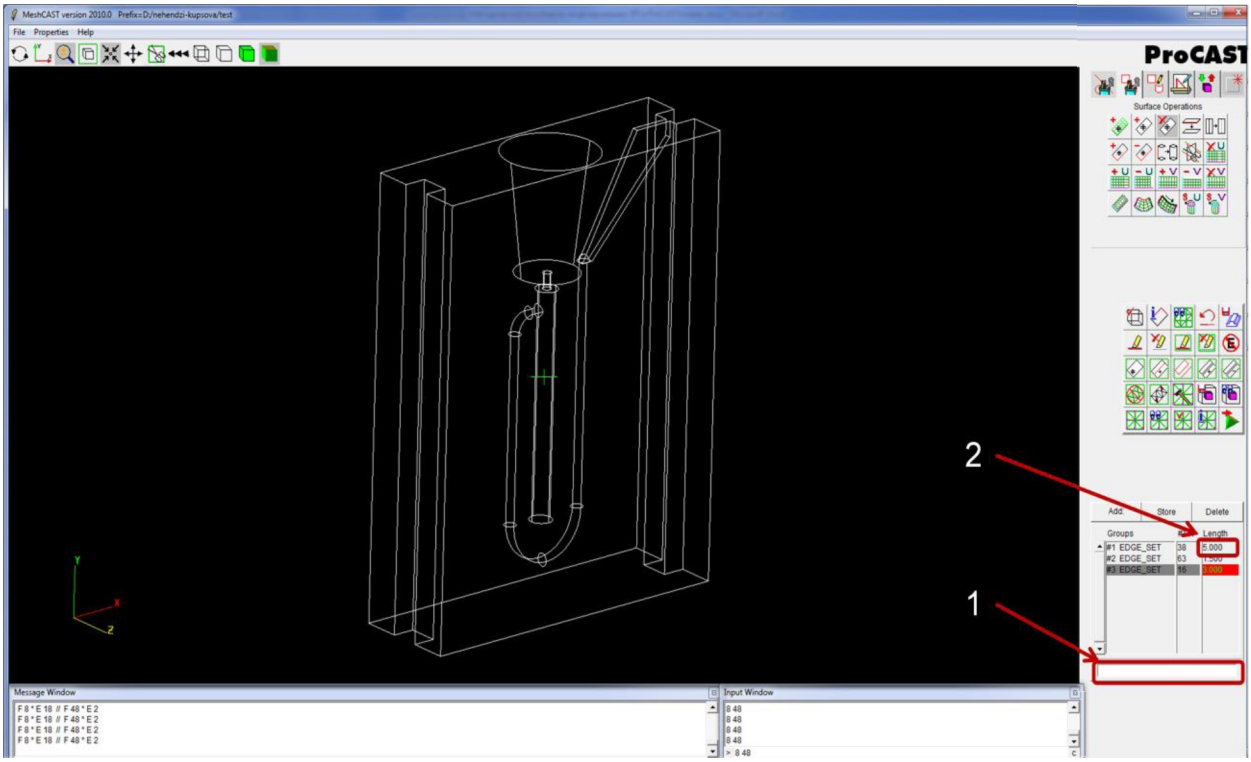


Рисунок 4.11 – Установка размера конечных элементов

Эту последовательность действий необходимо повторить для каждого созданного набора.

После этого генерируем поверхностную конечно-элементную сетку нажав на кнопку **GenerateSurfaceMesh** (рисунок 4.12). После чего,

автоматически начнется построения конечно-элементной сетки в автоматическом режиме, а в дополнительном окне будет отражаться ход этого построения**.**

Посмотреть сгенерированную поверхностную сетку можно нажав на кнопку **ShowMesh** (шаг 1) (рисунок 4.12), а для создания объемной конечно-элементной сетки необходимо нажать кнопу **Go Volume Meshing** (шаг 2).

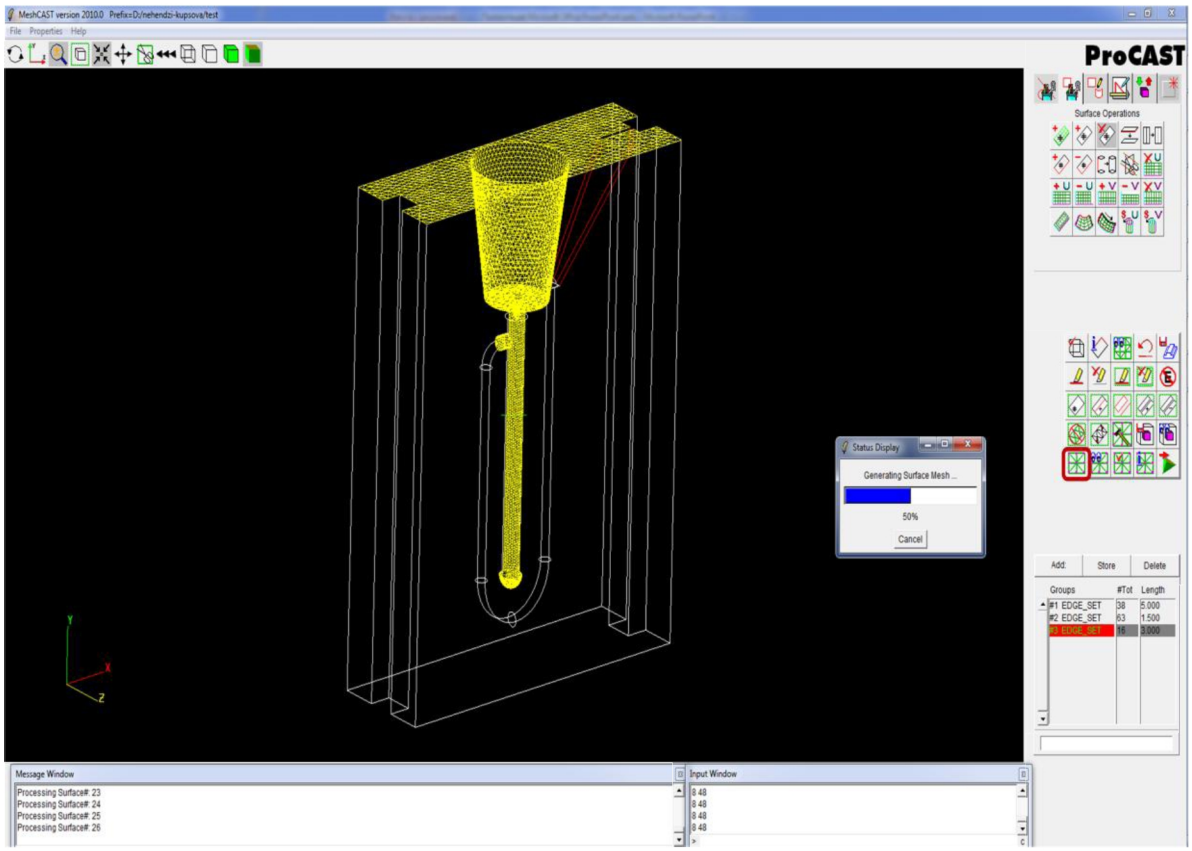


Рисунок 4.12 – Процесс генерирования поверхностной конечно-элементной сетки

После этого активируется среда построения объемной сетки **MESHING ENVIRONMENT**, в которой произведем проверку полученной поверхностной конечно-элементной сетки, нажав на кнопку **CheckMesh** (шаг 1) (рисунок 4.13). В результате в модели высветятся красным цветом все "плохие" конечные элементы, которые необходимо отредактировать. Модуль MeshCAST позволяет автоматически исправить их, а если этого не

достаточно, то предусмотрены расширенные возможности редактирования конечных элементов в ручном режиме. В нашем случае нажав на кнопку **FixBadTriangles** (шаг 2) мы автоматически исправим все "плохие" конечные элементы и последующая проверка больше их не покажет.

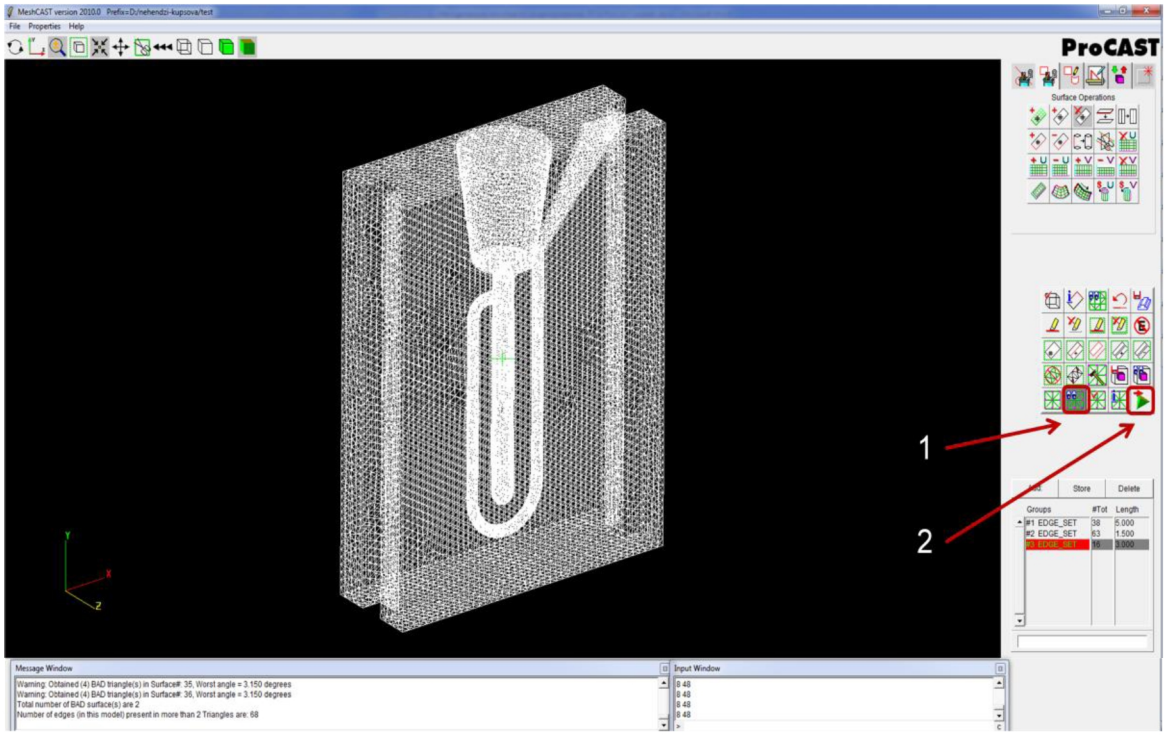


Рисунок 4.13 – Полученная поверхностная конечно-элементная сетка

На рисунке 4.15 показана полученная объемная конечно-элементная сетка нашей модели, которая состоит из двух объемом: кокиля и отливки.

На этом работа в модуле MeshCAST закончена, остается сохранить созданную математическую модель с помощью меню File → Save. В результате в рабочей директории появится новый файл **test.mesh**, работу с которым необходимо продолжить в модуле PreCAST.

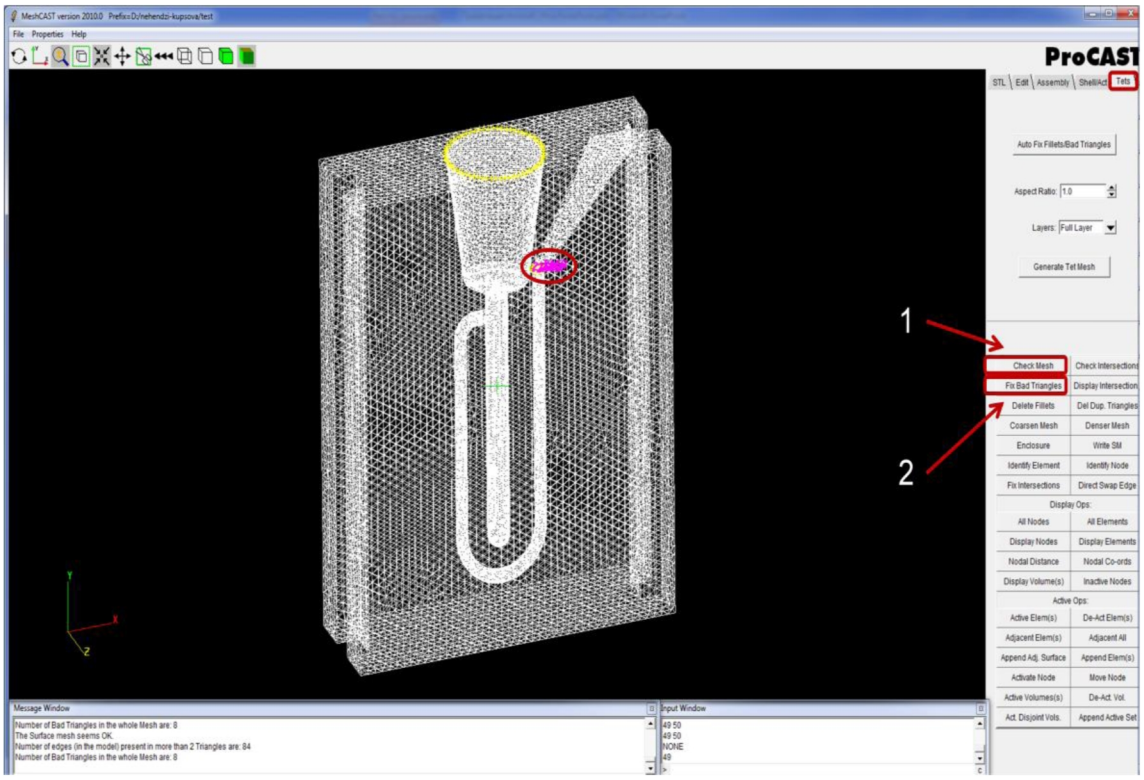


Рисунок 4.14 – Проверка конечно-элементной сетки
на наличие "плохих" элементов

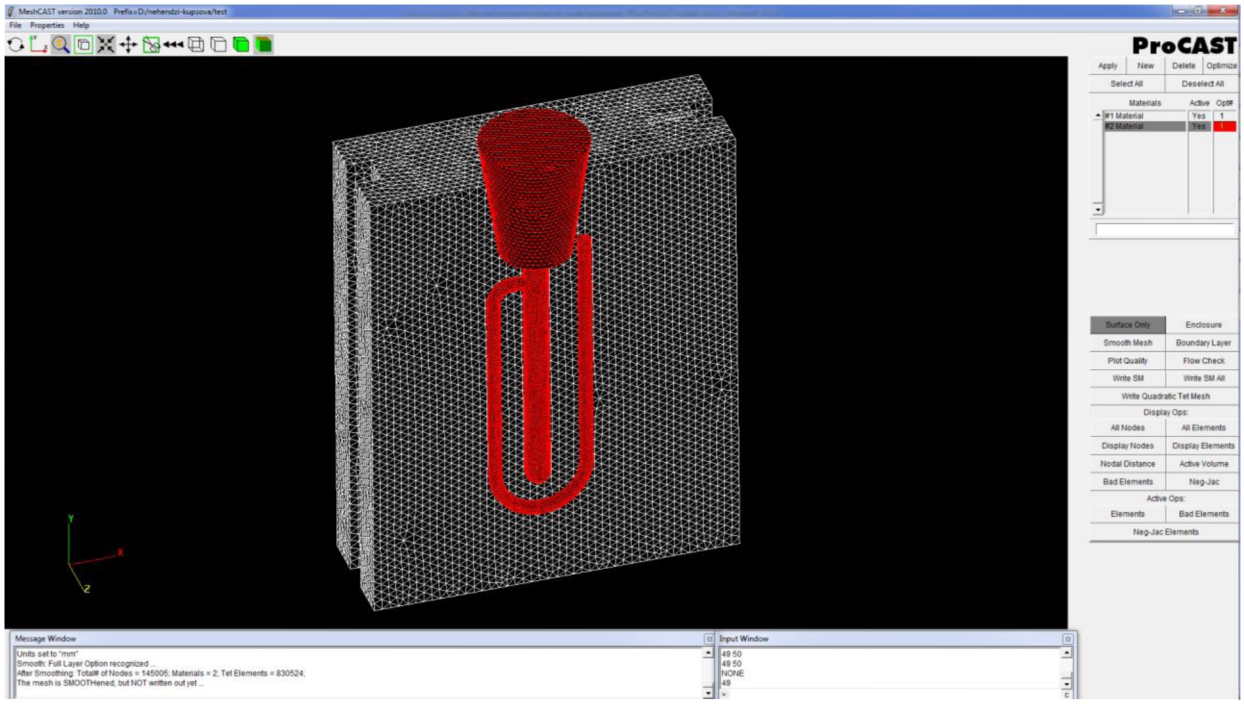


Рисунок 4.15 – Математическая модель

4.3. Задание граничных и начальных условий

Запускаем модуль PreCAST как показано на рисунке 4.16

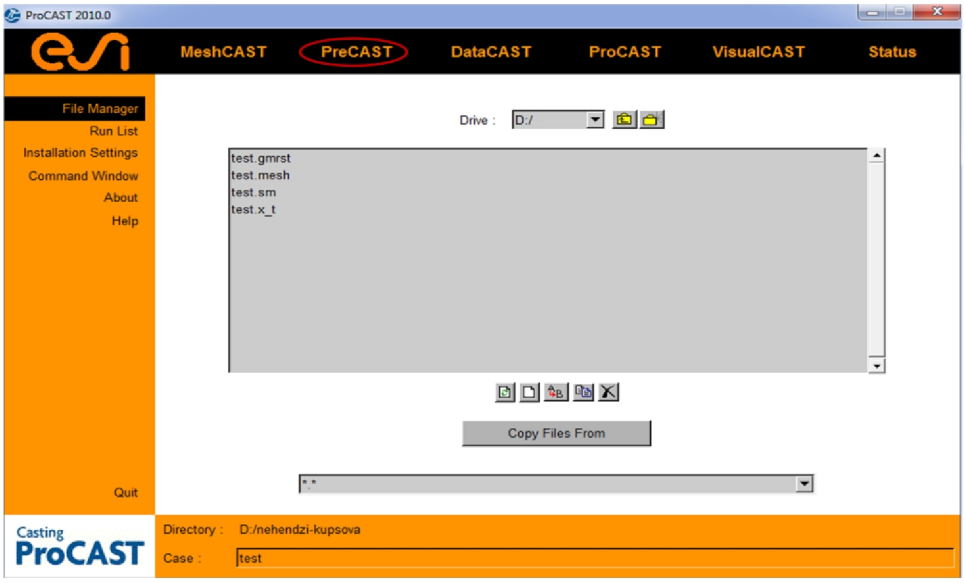


Рисунок 4.16 – Запуск модуля PreCAST

В результате загрузится полученная математическая модель и дополнительное окно со следующей информацией (рисунок 4.17): число материалов в модели, общее количество узлов и элементов, габаритные размеры модели и другое. Здесь очень важно проверить единицы измерения и размеры модели.

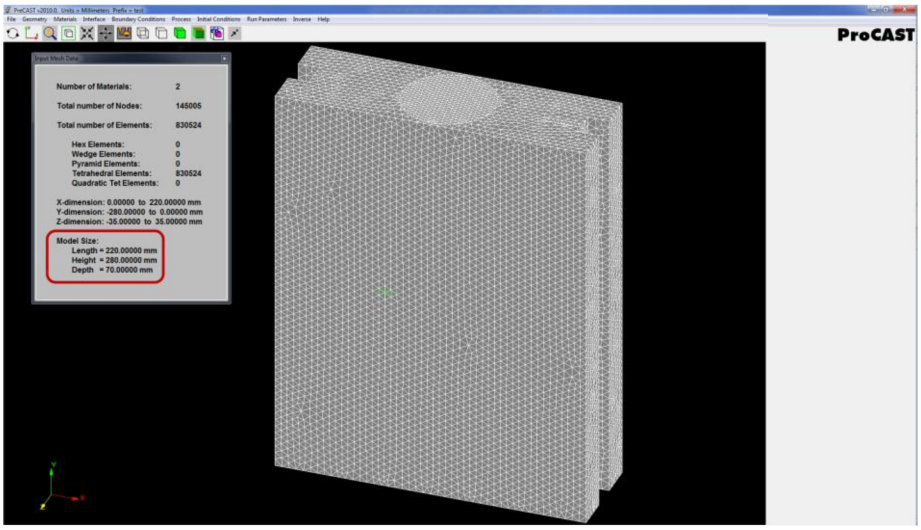


Рисунок 4.17 – Математическая модель

После этого необходимо оптимизировать модель, для это надо выбрать в меню **File** функцию **Optimize** (рисунок 4.18). При оптимизации PreCAST переименует все узлы в модели для увеличения скорости расчета. Оптимизация будет выполнена перед выходом из модуля PreCAST.

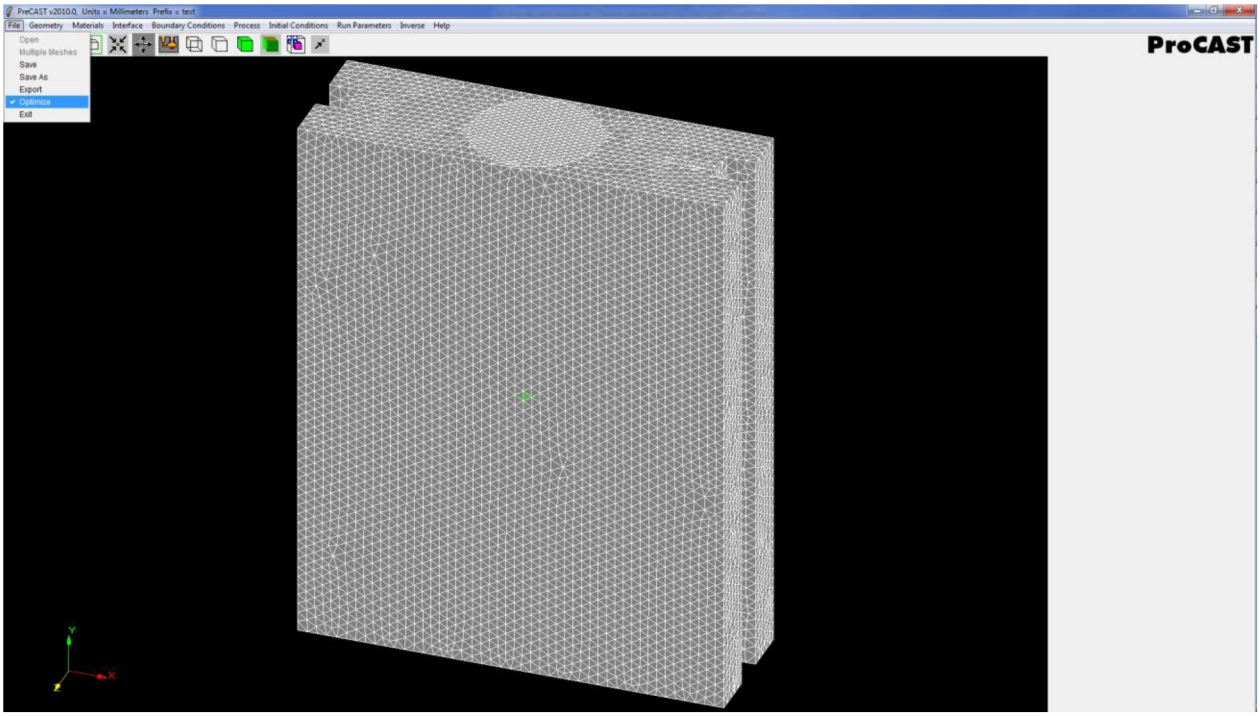


Рисунок 4.18 – Оптимизация модели

Теперь назначим материалы в нашей модели. Для этого в меню **Materials** выбираем кнопку **Assign** (шаг 1) (рисунок 4.19). Из существующей базы данных, находящейся в нижнем правом углу интерфейса модуля PreCAST выбираем свой материал для каждого объема модели (шаг 2) и присваиваем его нажав на кнопку **Assign** (шаг 3). Итак, в качестве материала формы (в списке материалов под номером 1) выбираем Fe_GG_20 (чугун), а в качестве материала отливки (в списке материалов под номером 2) – Al_AlSi9Mg (аналог сплава АК9ч). Далее назначим тип каждого материала, для этого надо кликнуть левой кнопкой мыши на против каждого из материалов модели в столбце **Type** и из появившегося меню необходимо выбрать с помощью левой кнопки мыши **Mold** для формы, **Casting** для

отливки (шаг 4). В этом разделе остается только установить с помощью левой кнопки мыши **Yes** (шаг 5) на против отливки в столбце **Empty**, это будет означать что объем отливки пуст. Это необходимо делать для моделирования гидродинамических процессов заполнения отливки.

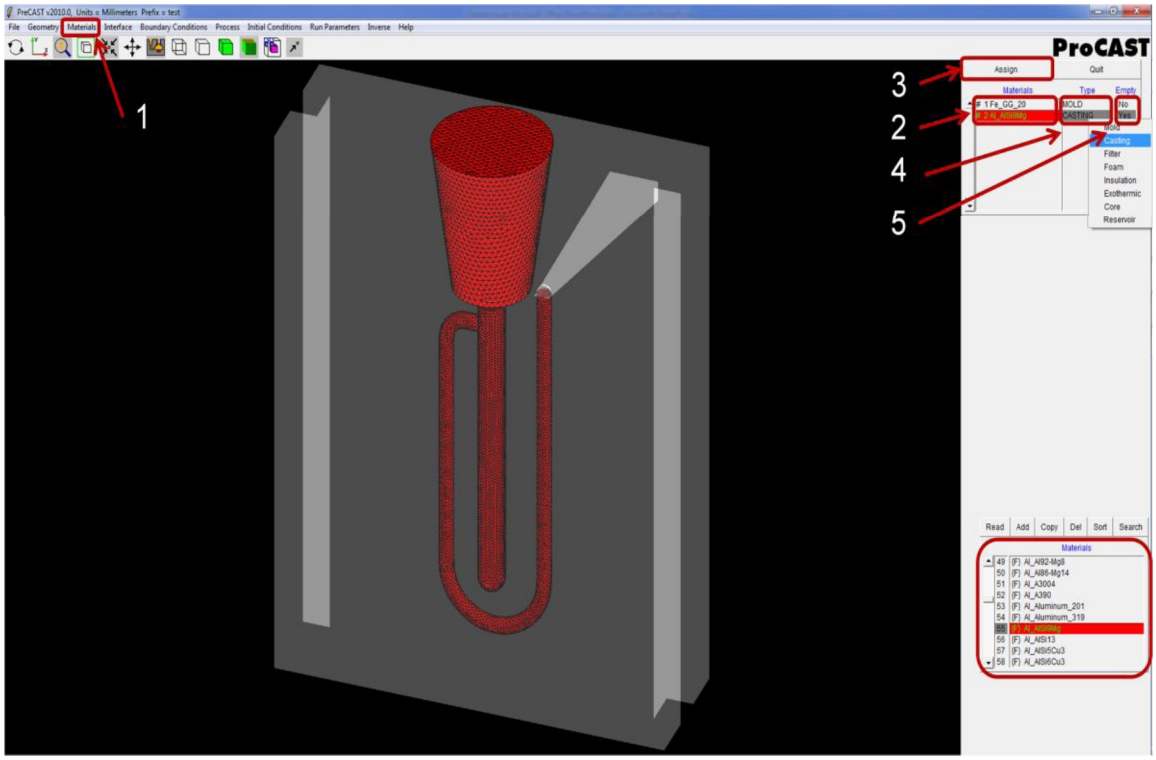


Рисунок 4.19 – Назначение тепловых свойств материалам отливки и формы

Для моделирования возникающих в отливке напряжений и деформаций во время ее кристаллизации необходимо задать для этого соответствующие деформационные свойства материалам отливки и формы. Для это в меню **Materials** выбираем кнопку **Stress** (рисунок 4.20).

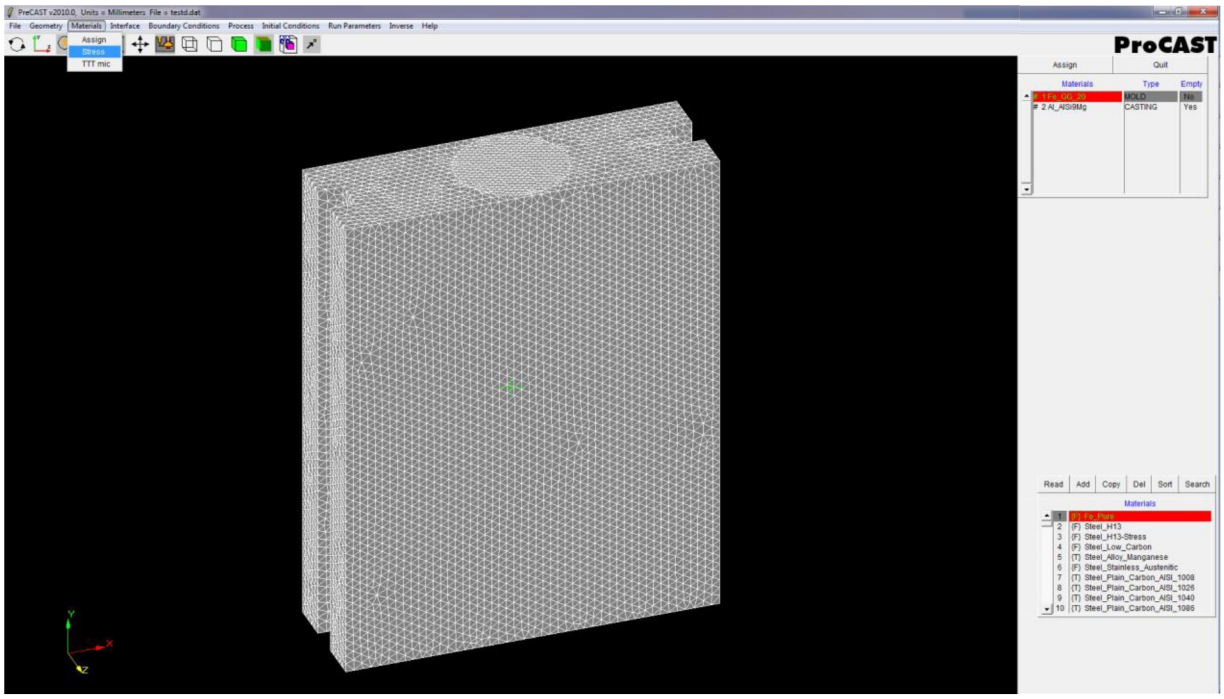


Рисунок 4.20 – Меню для задания соответствующих свойств материалам отливкии формы при расчете напряжений и деформаций, возникающих в отливкев процессе ее кристаллизации

Рассмотрим форму как идеально жесткое тело, а отливку будет рассчитываться по упруго-пластичной модели. Для этого выбираем описанным выше способом материалы из существующей базы данных как показано на рисунке 4.21.

После выбора материалов необходимо определить поверхности раздела между формой и отливкой в меню **Interface** (шаг 1) (рисунок 4.22).В данном меню появляются два окна в правой части экрана. Верхнее окно содержит список всех возможных поверхностных контактов в модели, нижнее окно включает базу данных по коэффициентам теплопередачи на границе раздела. Так как в данном случае модель состоит только из двух объемов – отливки и формы, то возможен только одна контактная пара (**Material Pair**). "2 и 1" означает, что существует контакт между материалами 2 и 1. Кликом правой кнопки мыши можно изменить порядок пары (**Важно** – в ProCAST принято, чтобы отливка была всегда первой!). Устанавливаем границу раздела (шаг 2)

как показано на рисунке 4.22. После этого с помощью левой кнопки мыши устанавливаем тип контакта в **COINC** (шаг 3) и подтверждаем выбор нажатием кнопки "**Apply**". Препроцессор автоматически создаст двойные узлы и появится сообщение, подтверждающее увеличение количества узлов в модели.

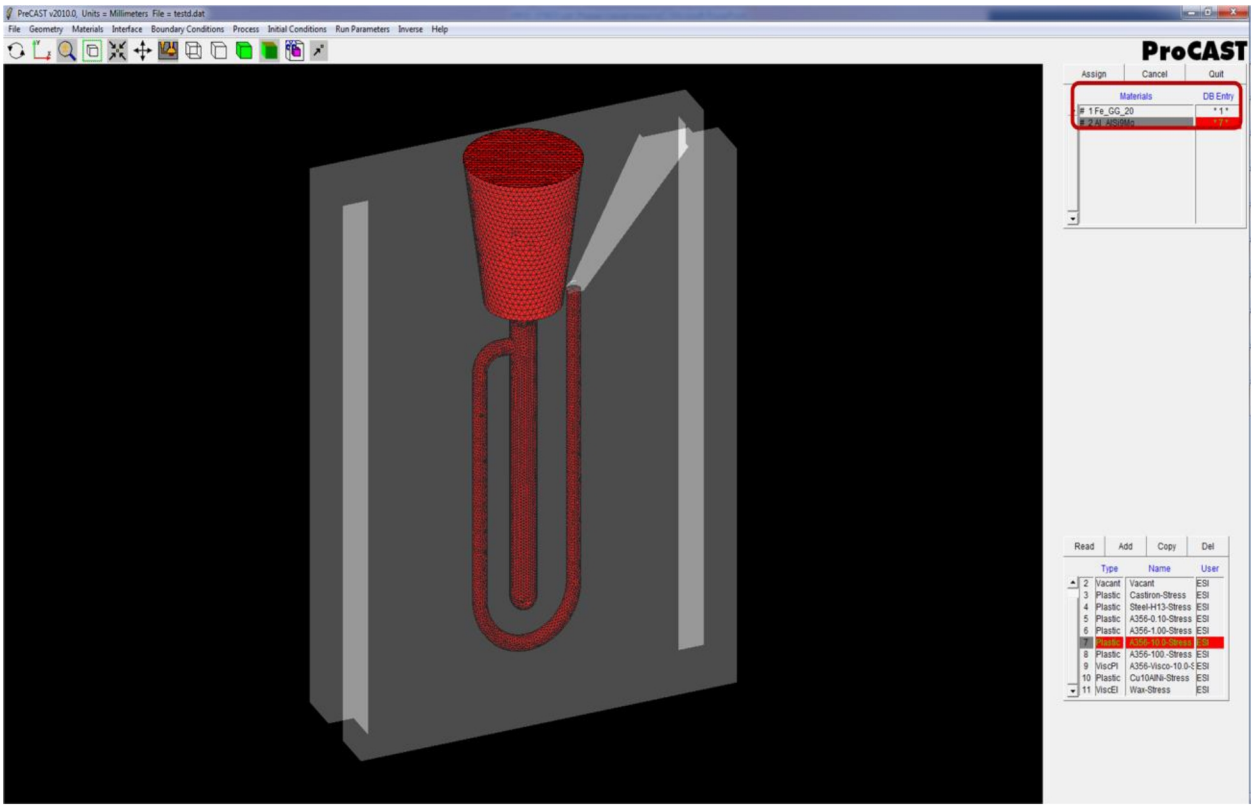


Рисунок 4.21 – Назначение деформационных свойств материалам отливки и формы

В этом разделе остается только задать коэффициент теплопередачи на границе раздела. В нашем случае коэффициент теплопередачи между отливкой и формой будет равен 3000 Вт/(м^2·К). Среди стандартных коэффициентов в базе данных такого значения нет, поэтому добавим его. Для этого нажмем на кнопку **Add** (шаг 4), в появившемся окне введем нужное нам значение и подтвердим ввод кнопкой **Store** (шаг 5). На против контактной пары в столбце **DB Entry** устанавливаем номер 8 (введенный

нами коэффициент теплопередачи) (шаг 6). Сохраняем все введенные данные в этом разделе нажав на кнопку **Assign** (шаг 7).

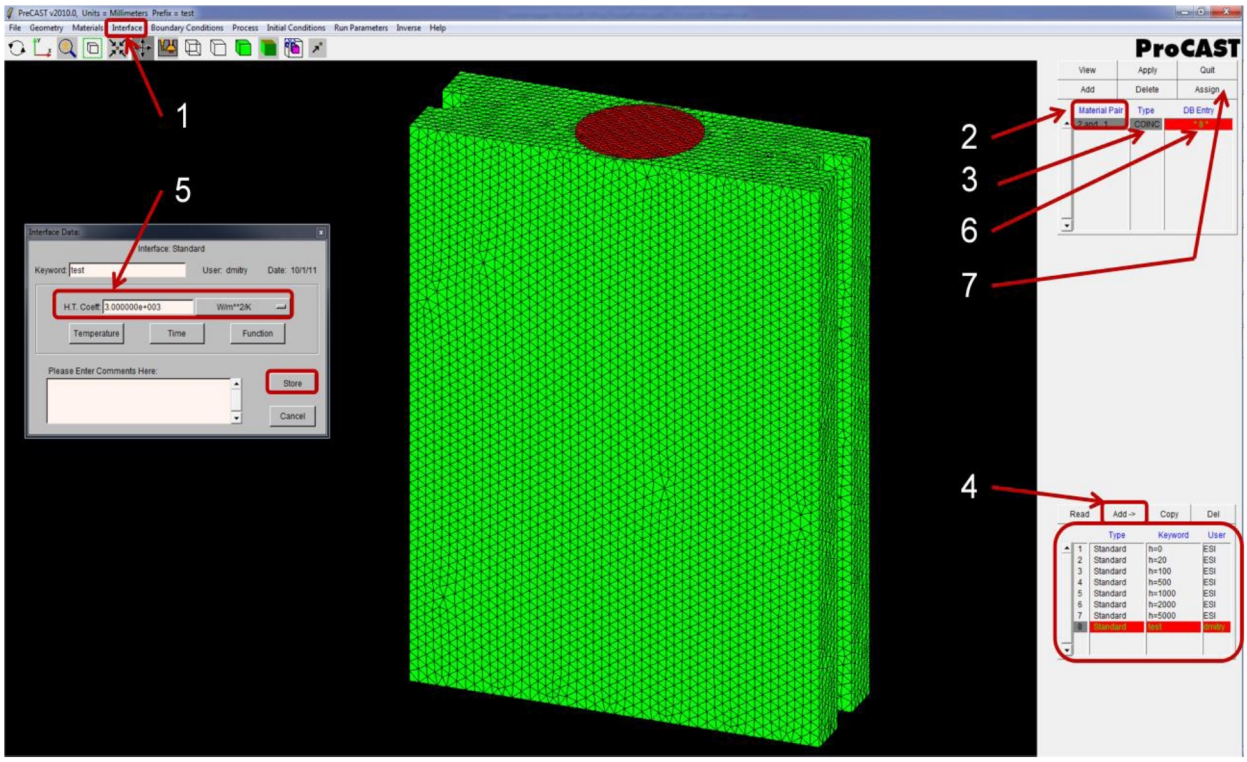


Рисунок 4.22 – Определение границы раздела между отливкой и формой

Переходим к заданию граничных условий. Вразделе**Boundary Conditions** выбираем**Asign Surface** (рисунок4.23).

Для создания граничных условий нажимаем кнопку **Add** и из выпадающего меню выбираем **Heat** (рисунок 4.24).

Выбираем все внешние поверхности принадлежащие кокилю с помощью соответствующего инструмента выбора (шаг 1) (рисунок 4.25), после чего выбранные поверхности окрашиваются в красный цвет и сохраняем с помощью кнопки **Store** (шаг 2). Затем определяем значение граничного условия из базы данных. В нашем случае кокиль будет охлаждаться на воздухе, что соответствует 1 значению в базе данных (шаг 3). Устанавливаем это значение в выбранное граничное условие с помощью кнопки **Assign** (шаг 4).

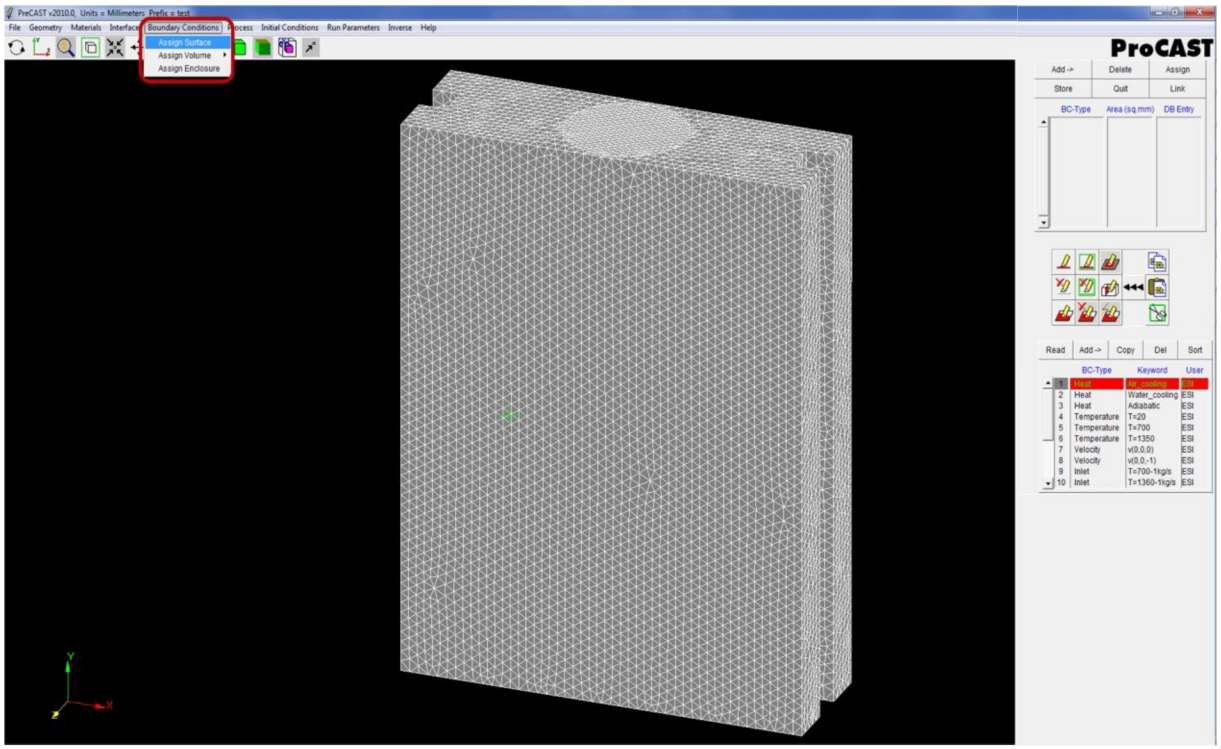


Рисунок 4.23 – Задание граничных условий

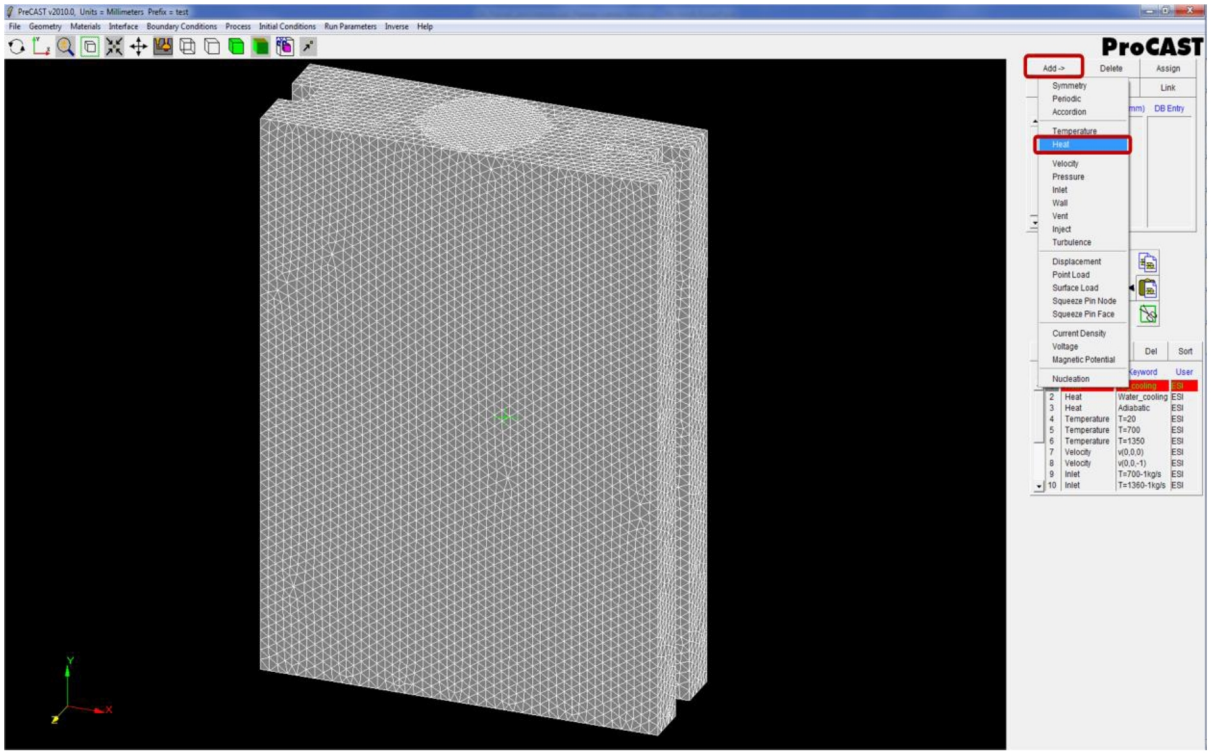


Рисунок 4.24 – Добавление граничных условий

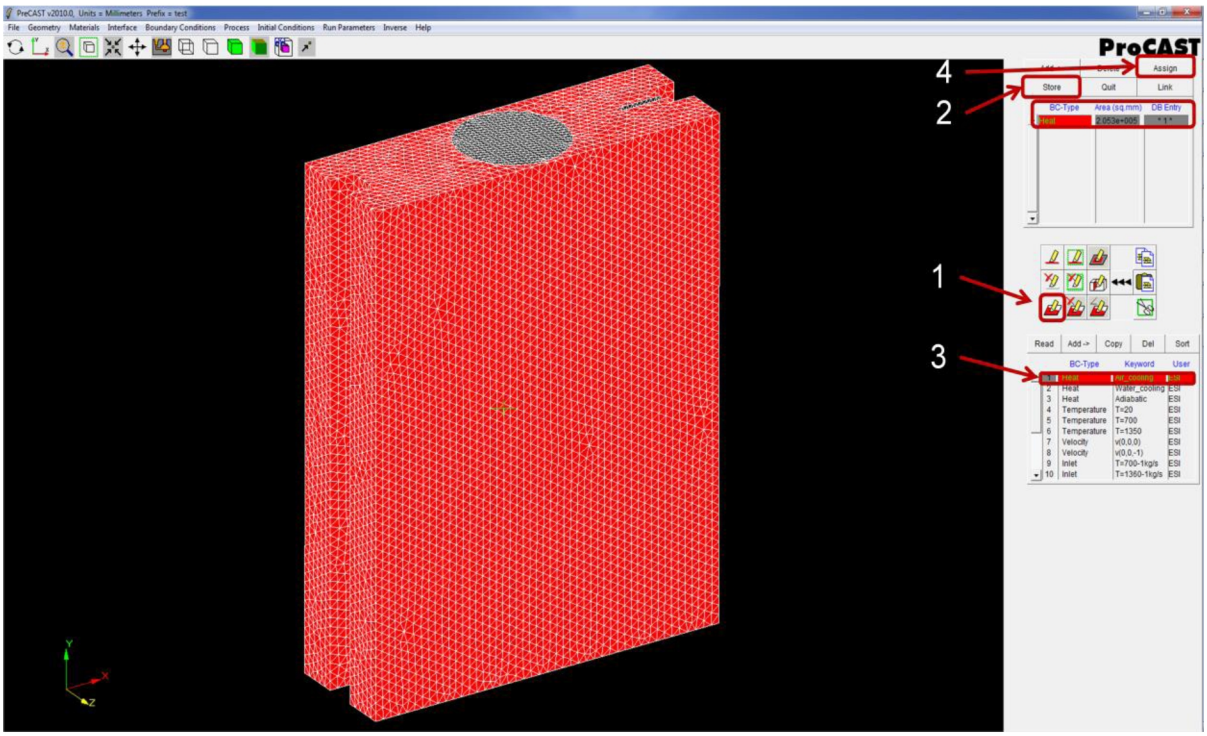


Рисунок 4.25 – Определение параметров граничного условия Heat

Таким же образом добавляем следующее граничное условие **Inlet** (расход металла) (рисунок 4.26). С помощью инструмента выбора (шаг 1) указываем сечение струи расплава (выделяем приблизительно такую же область как на рисунке 4.24) и подтверждаем выделение кнопкой **Store** (шаг 2). Далее добавляем параметры для граничного условия **Inlet** нажав на кнопку **Add** (шаг 3). В появившемся окне заполняем соответствующие строки как показано на рисунке 4.24 (шаг 4) и нажимаем кнопку **Time** (шаг 5). В появившемся новом окне вводим данные (шаг 6) в соответствии с рисунком, контролируя их на графике (шаг 7). После это сохраняем введенные значения нажав кнопки сначала **Save**, а затем**Store** (шаг 8). Выбираем в базе данных вновь созданные параметры (шаг 9) и присваиваем их граничному условию **Inlet** (шаг 10).

А также для расчета напряжений и деформаций возникающих в отливке при ее кристаллизации необходимо установить граничное условие **displacements**, для того чтобы избежать перемещения модели (рисунок 4.27).

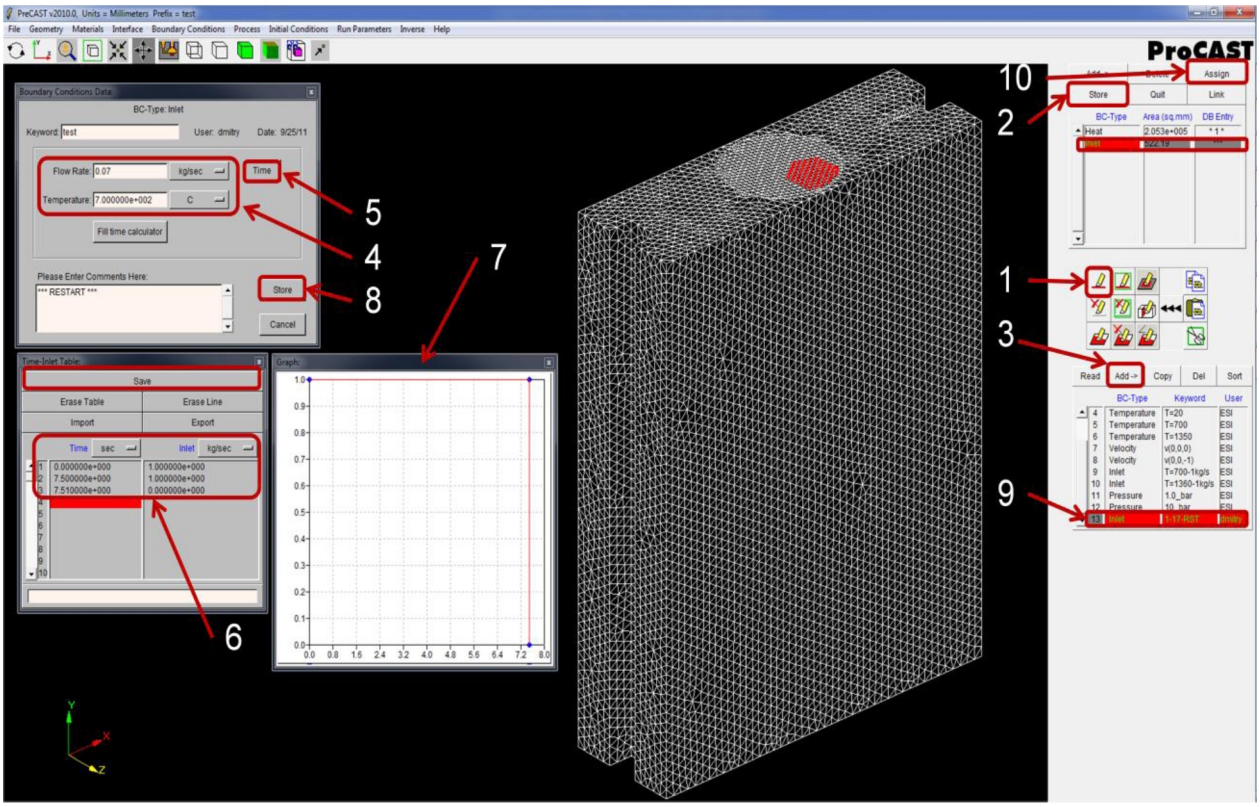


Рисунок 4.26 – Создание граничного условия Inlet

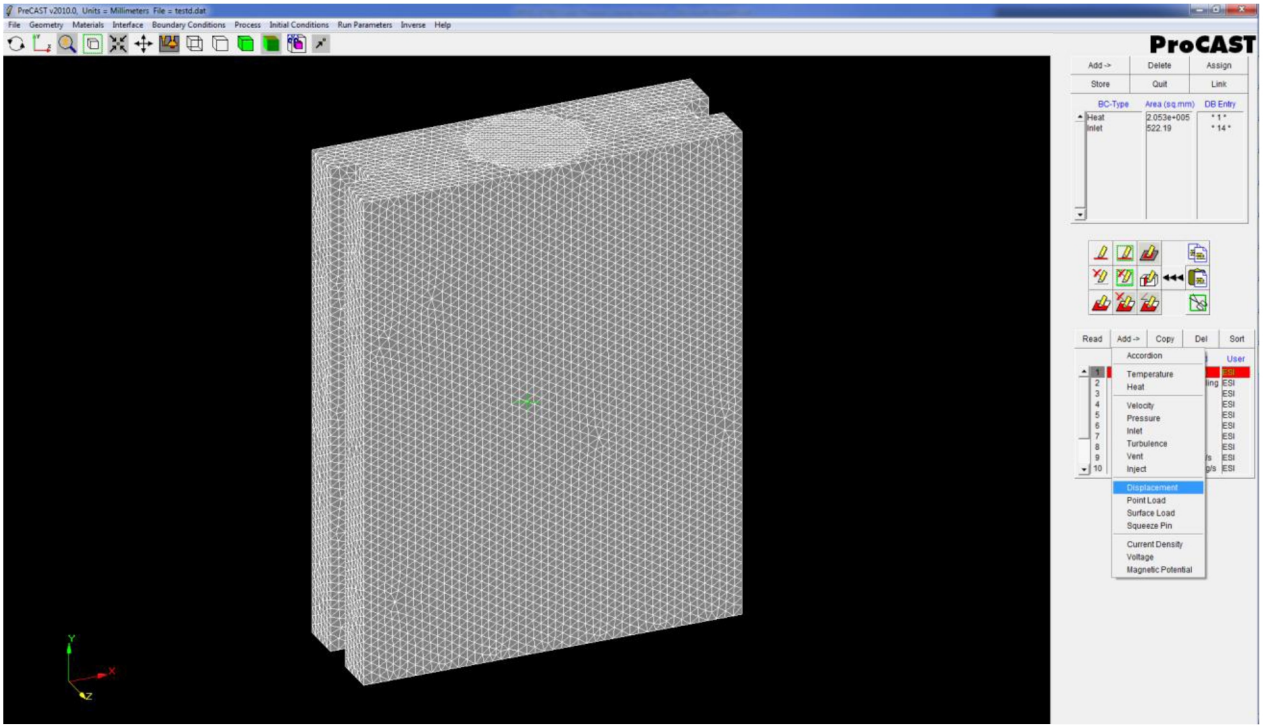


Рисунок 4.27 – Создание граничного условия Displacements

И в открывшемся окне зададим перемещения по всем трем координатам равным нулю (рисунок 4.28).

Для того, чтобы зафиксировать форму неподвижной достаточно выделить поверхности, показанные на рисунке 4.29, на которые задать созданное граничное условие **Displacements**.

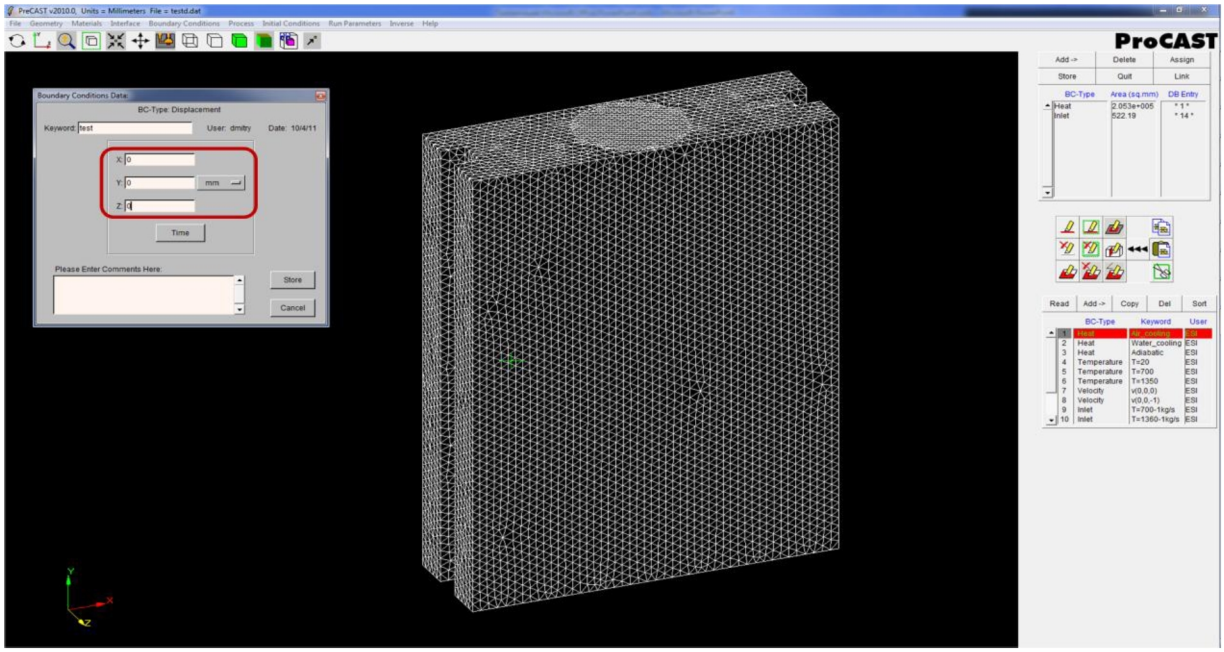


Рисунок 4.28 – Задание запрета перемещений формы

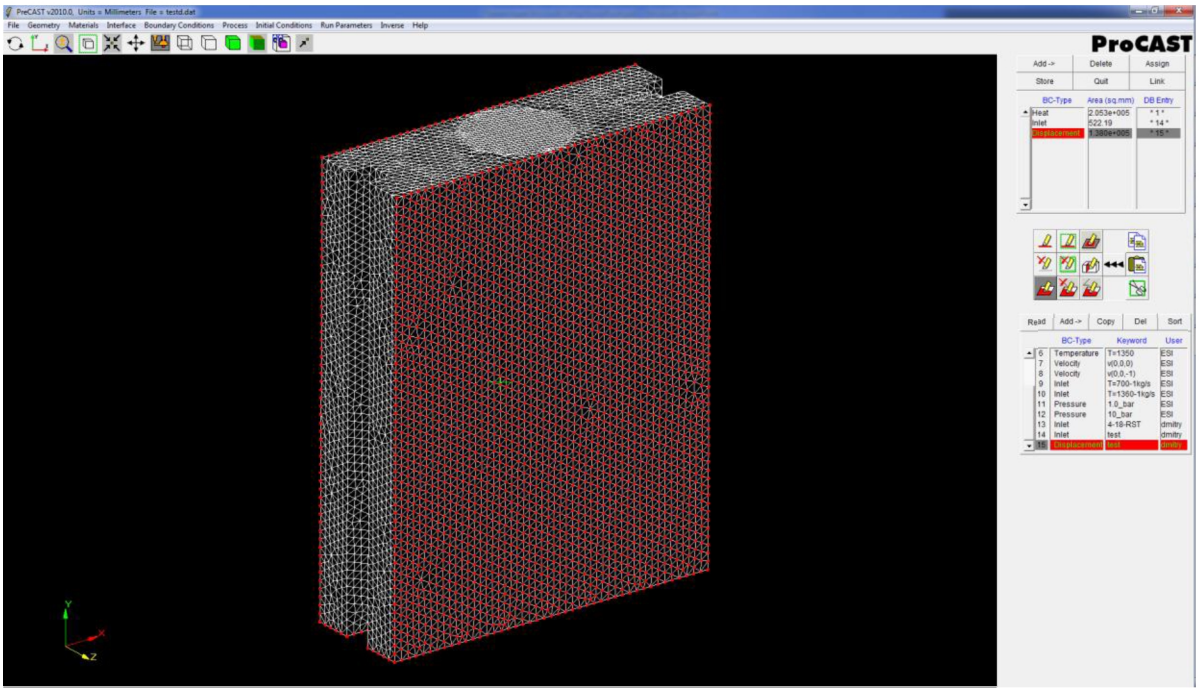


Рисунок 4.29 – Поверхности формы с нулевыми перемещениями

Переходим к разделу **Process** (шаг 1) (рисунок 4.30), где необходимо определить вектор силы тяжести. Для этого необходимо сориентироваться с помощью системы координат, расположеной в левом нижнем углу. В данном случае вектор силы тяжести должен быть направлен по оси **Y** в отрицательном направлении. Для этого дважды кликаем левой кнопкой мыши на **Y** при этом значение -9,8 вводится автоматически (шаг 2) (один клик левой кнопки на **X**, **Y** или **Z** автоматически вводит значение 9,8). Подтверждаем сделанные изменения нажатием кнопки **Apply** (шаг 3).

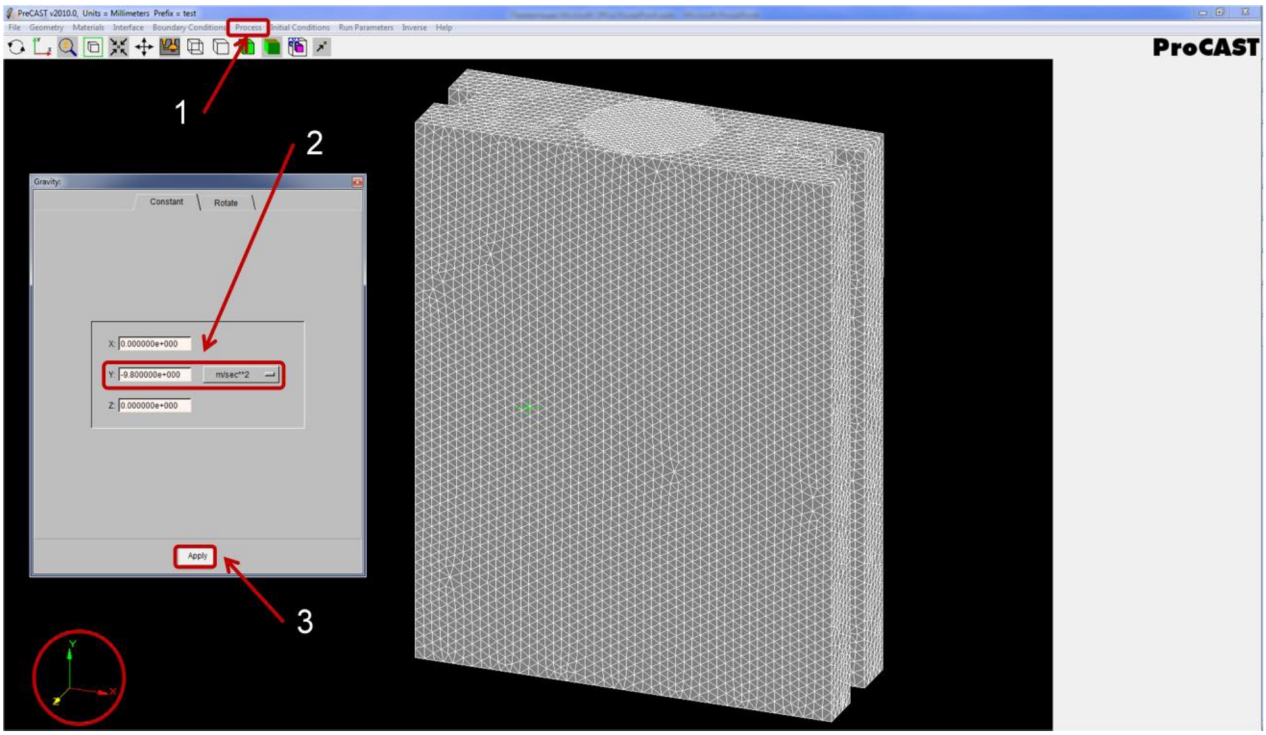


Рисунок 4.30 – Определение вектора силы тяжести

Далее присваиваем начальные условия (рисунок 4.31). Вменю**Initial Conditions** выбираем **Constant** (шаг 1). Для каждого материала вводим значения начальных температур (шаг 2) кокиля (100°C) и отливки (700°C). Эти значения необходимо написать в строке ввода (шаг 3) и нажать кнопку Enter на клавиатуре.

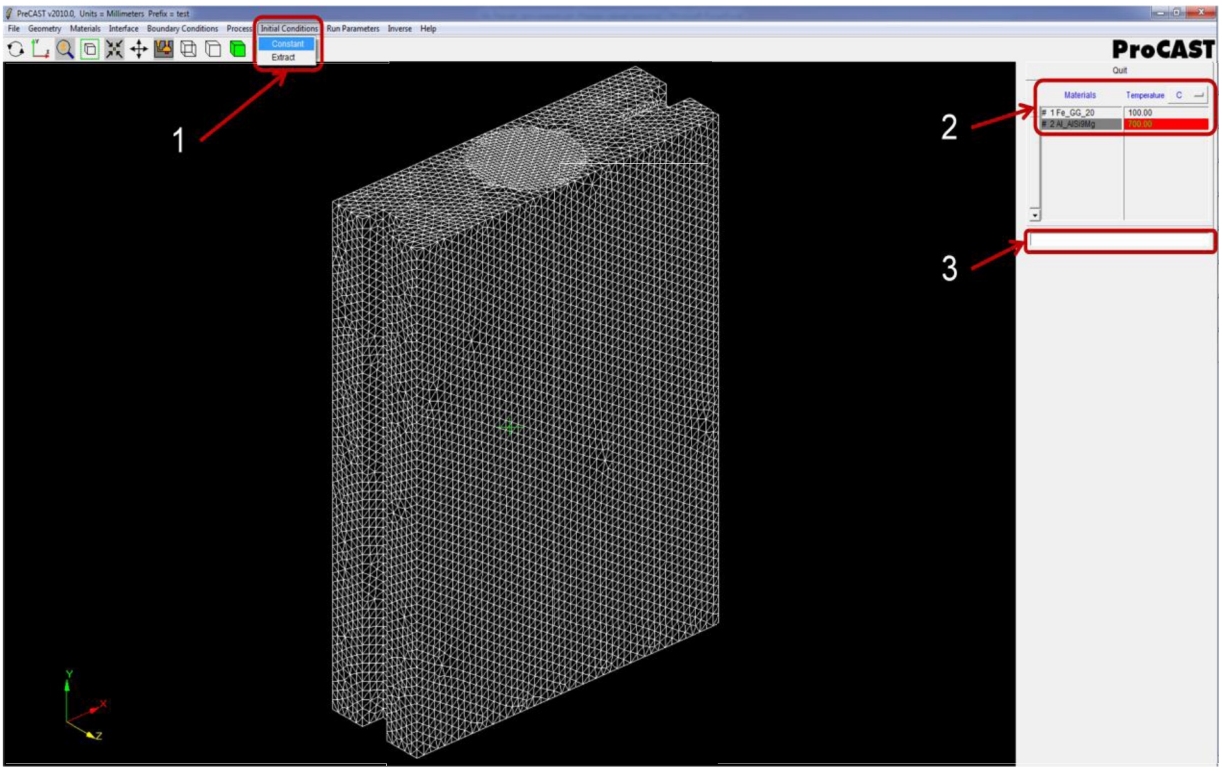


Рисунок 4.31 – Определение начальных условий

Для завершения работы в модуле PreCAST осталось задать параметры расчета. Переходим в раздел **Run Parameters** (шаг 1) (рисунок 4.32) и в появившемся окне переходим в меню **Preferences** (шаг 2). Из выпадающего меню выбираем **Gravity Filling** (гравитационная заливка) (шаг 3) при этом часть параметров будет настроено автоматически.

Затем переходим в раздел **General** (шаг 1) (рисунок 4.33) и выбираем **Standart** (шаг 2). Вводим максимальное количество шагов расчета – 20000 (шаг 3), для того чтобы расчет не закончиться преждевременно. В качестве критерия окончания расчеты указываем температуру, равную 400°C до которой будет производиться расчет (шаг 4). Здесь же можно указать единицы измерения, которые будут использоваться при просмотре результатов (шаг 5).

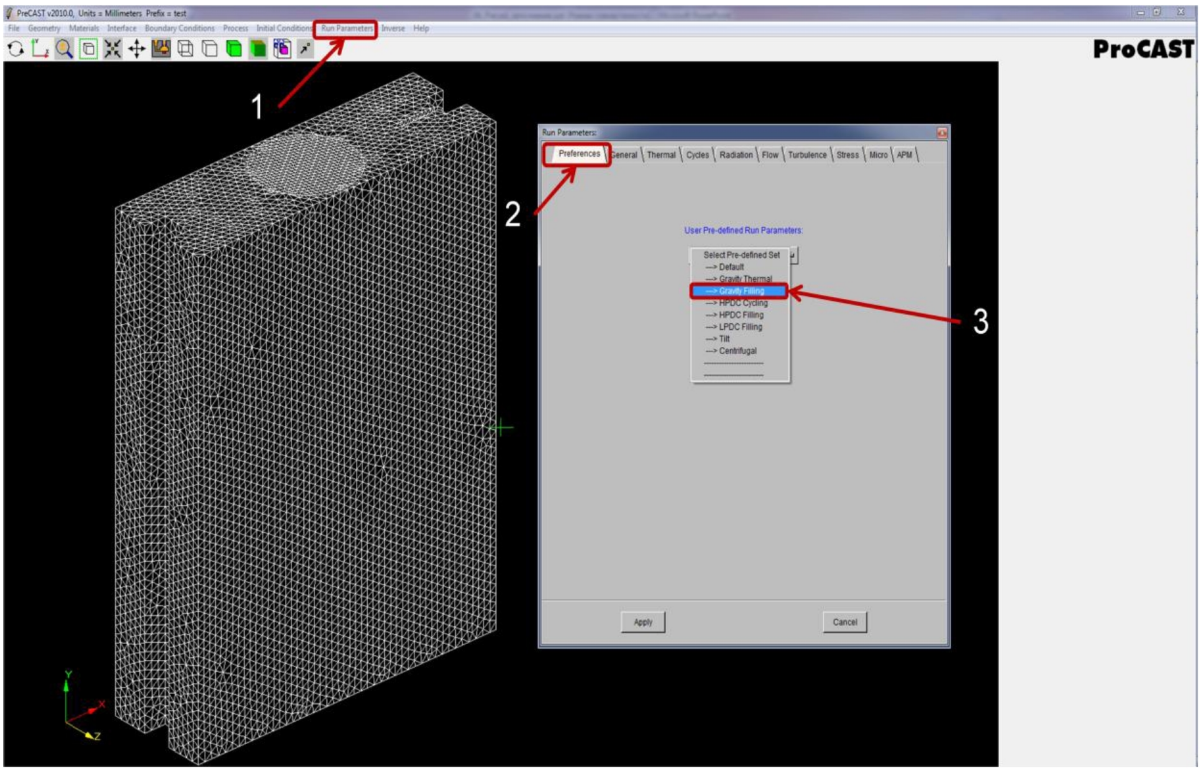


Рисунок 4.32 – Меню Run Parameters

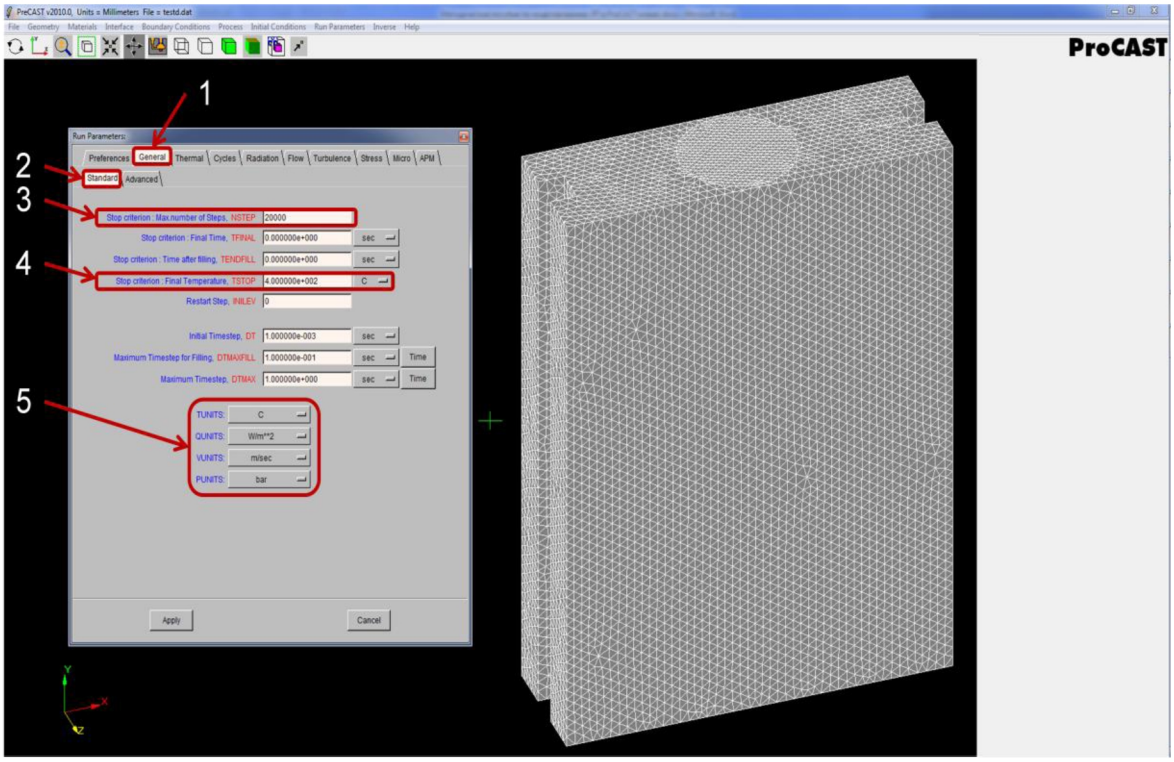


Рисунок 4.33 – Настройка параметров расчета в разделе General меню Run Parameters

В разделе **Thermal** (рисунок 4.34) выбираем **Standart** и устанавливаем значение параметра **PIPEFS** равное нулю, это необходимо для расчета напряжений и деформаций в отливке.

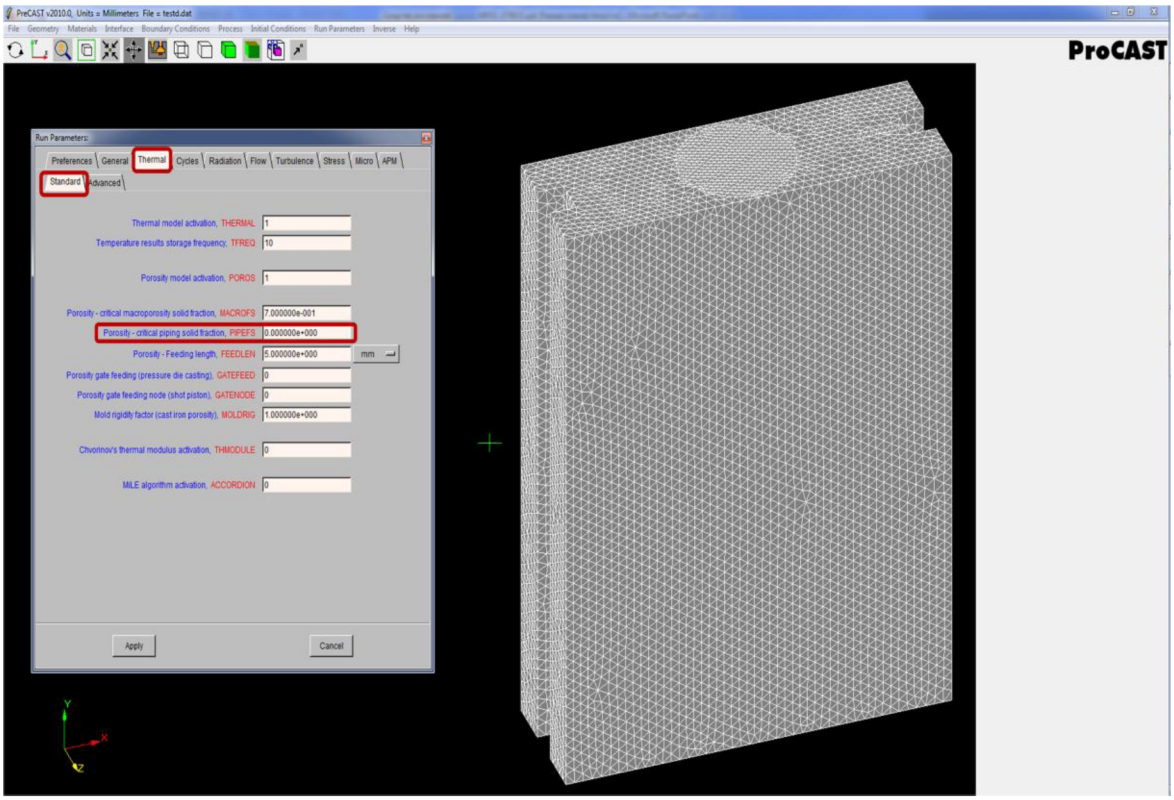


Рисунок 4.34 – Настройка параметров расчета в разделе Thermal меню Run Parameters

После этого переходим в раздел **Flow** (шаг 1) (рисунок 4.35) и выбираем вкладку **Standart** (шаг 2). Указываем давление равным нулю (шаг 3), а значение параметра **LVSURF**устанавливаем равным 1 (шаг 4). После этого сохраняем сделанные изменения нажав кнопку **Apply** (шаг 5).

В разделе **Stress** (шаг 1) (рисунок 4.36) выбираем вкладку **Standart** (шаг 2). Для активации модуля напряжений устанавливаем значение параметра **STRESS** равное 1 (шаг 3) и выбираем адекватную частоту сохранения расчетных шагов (шаг 4, 5).

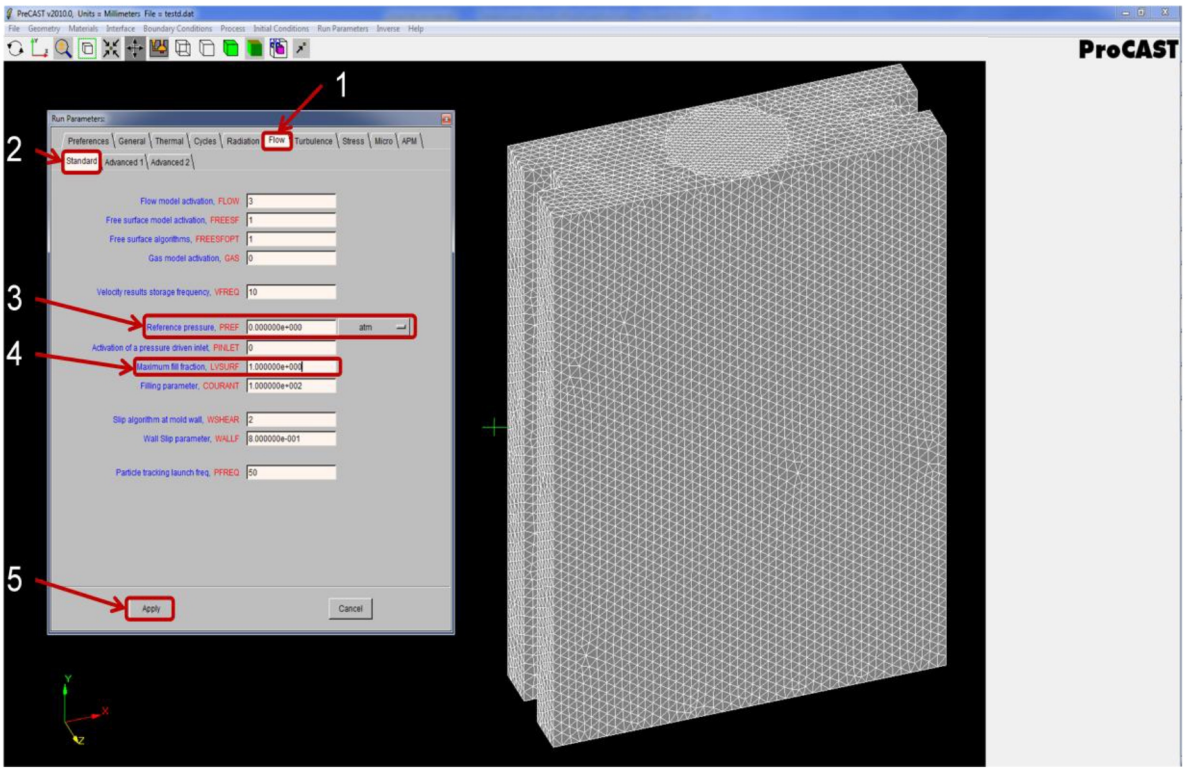


Рисунок 4.35 – Настройка параметров расчета в разделе Flow меню Run Parameters

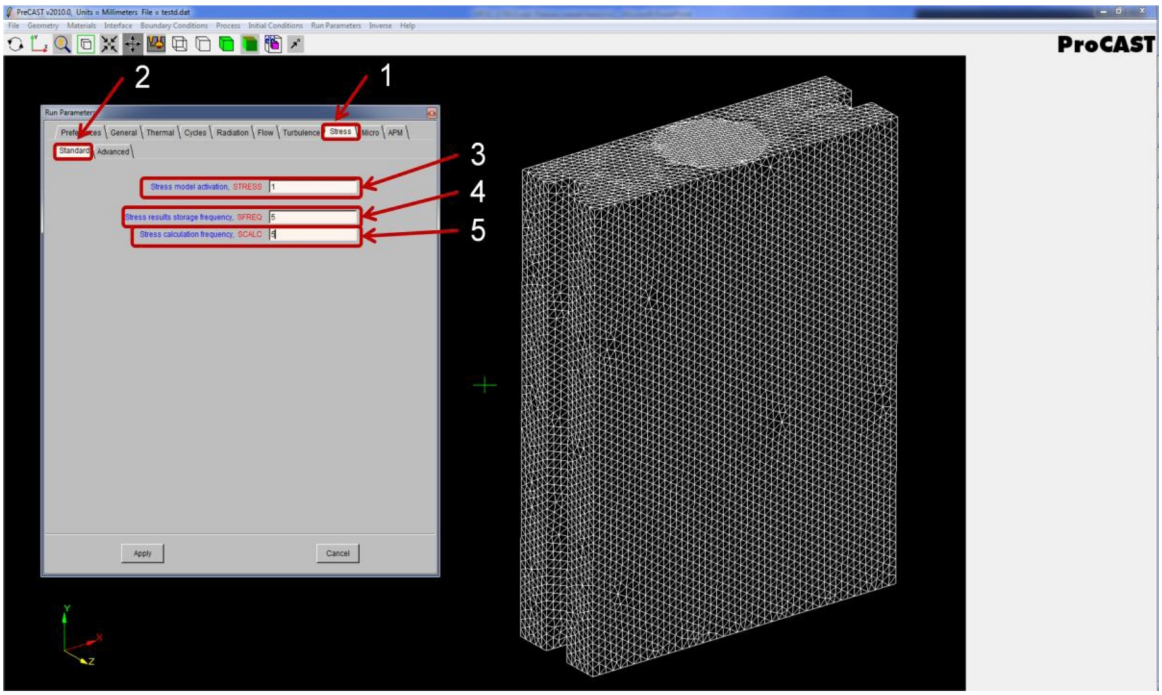


Рисунок 4.36 – Настройка параметров расчета в разделе Stress меню Run Parameters

Далее оптимизируем и сохраняем через меню **File** сделанные настройки в модели и параметрах расчета. Запускаем модуль PreCAST (рисунок 4.37), ставим галочку напротив **Updateoption (-u)** и нажимаем на кнопку **ExecuteDataCAST**. Аналогичным образом поступаем с модулем ProCAST (рисунок 4.38).

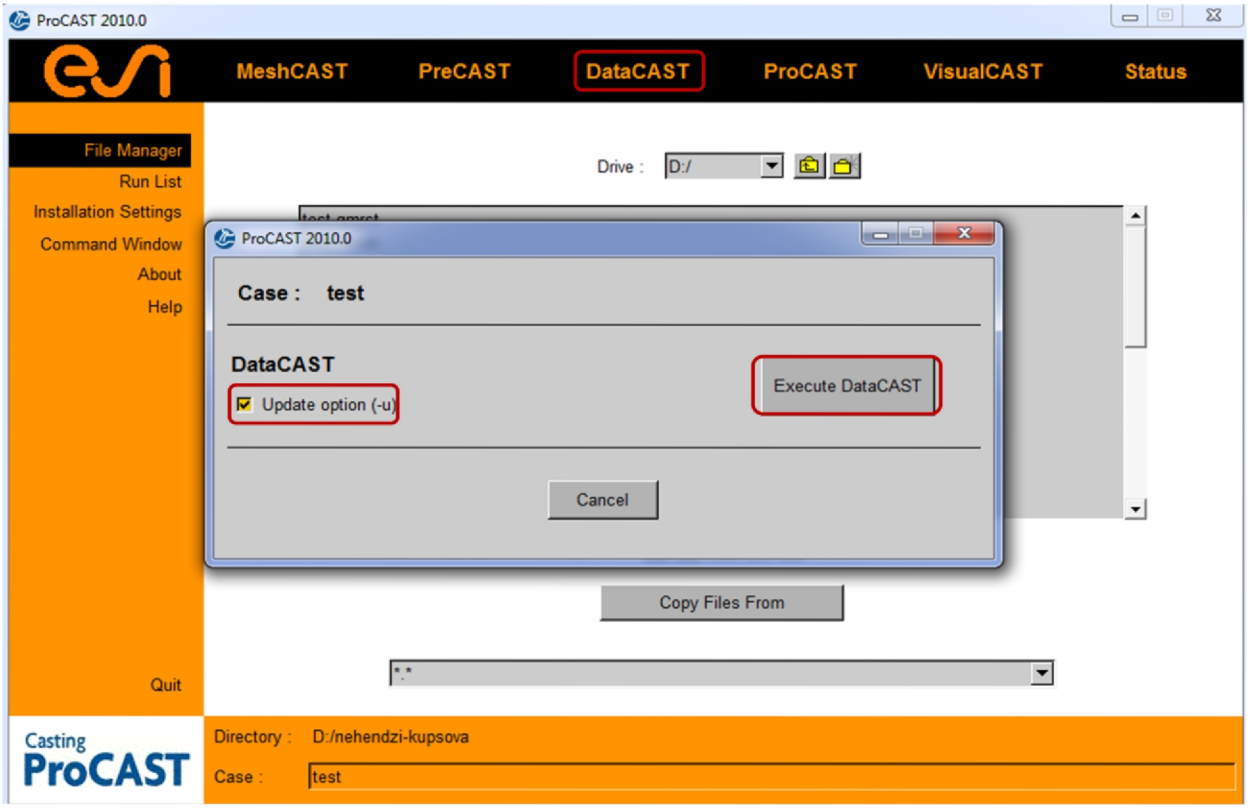


Рисунок 4.37 – Запуск модуля PreCAST

В результате задача запускается на счет и в менеджере ProCAST можно отслеживать информацию о расчете (рисунок 4.39).

4.4. Оценка полученных результатов

Контролировать правильность расчета можно в ходе его выполнения. Для этого необходимо с помощью кнопки Return to File Manager вернуться в менеджер ProCAST и запустить постпроцессор, нажав на VisualCAST (рисунок 4.40).

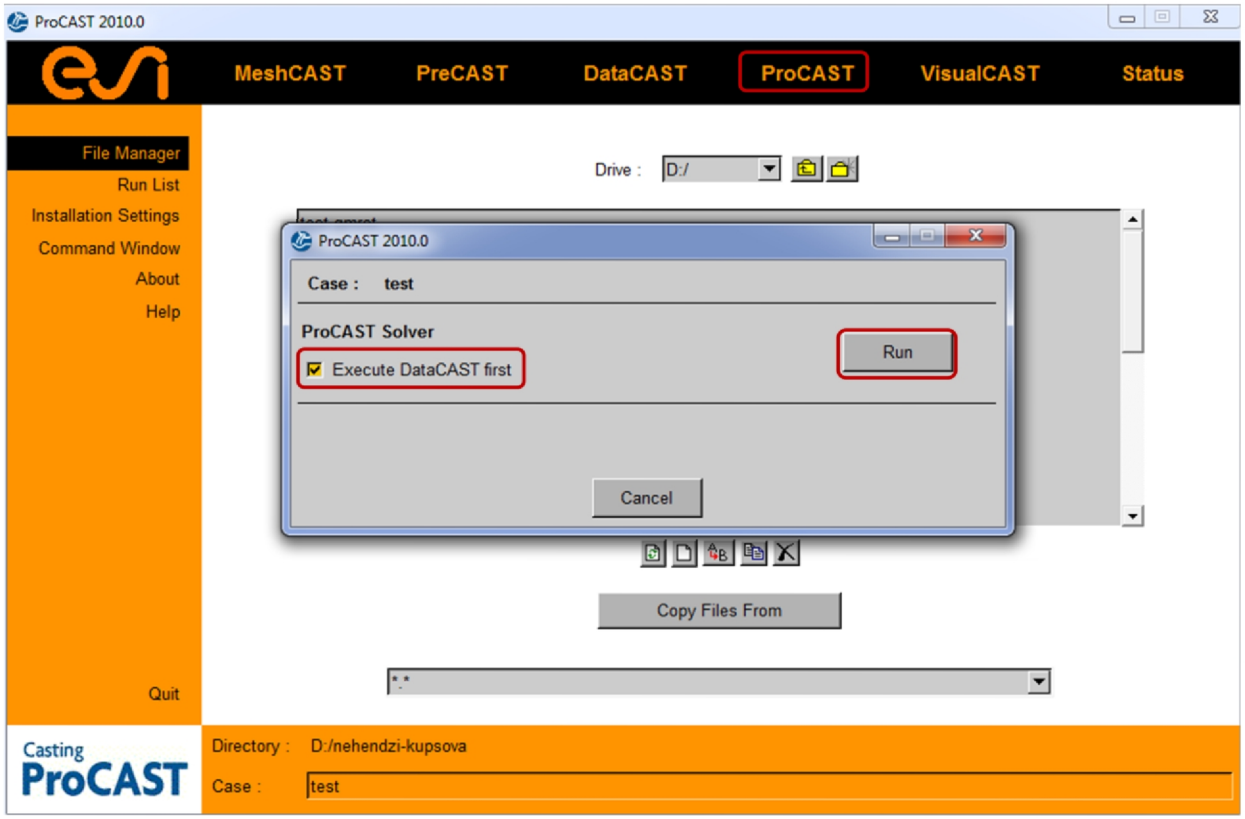


Рисунок 4.38 – Запуск модуля ProCAST

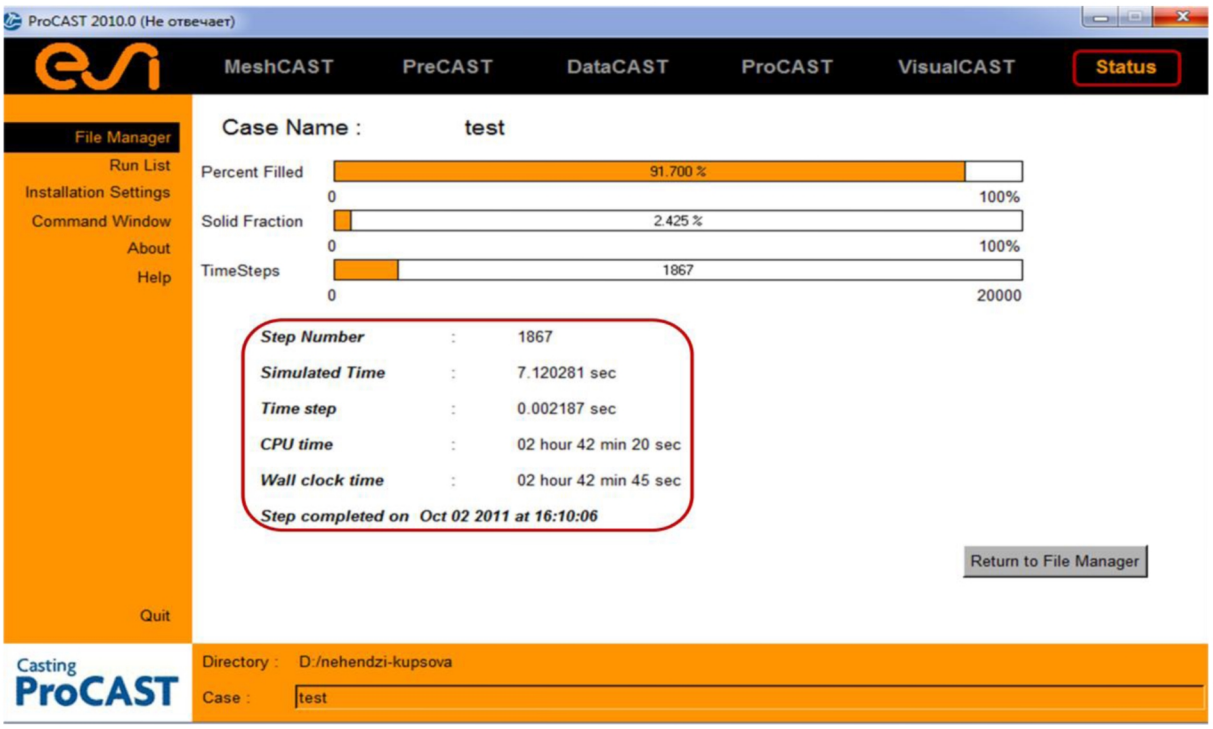


Рисунок 4.39 – Отображение информации о расчете в менеджере ProCAST



Рисунок 4.40 – Запуск постпроцессора VisualCAST

В результате загрузится решаемая задача в постпроцессор (рисунок 4.41). VisualCAST обладает множеством функций как отображения самой модели, так и различных параметров, рассмотрим некоторые из них. В зоне интерфейса под номером 1 отображается название задачи. В разделе под номером 2 отображаются части модели и их общее количество, а в разделе 3 - настройка анимации расчета и отображения различных параметров расчета, например, температуры, давления, скорости, пористости и др. Раздел 4 состоит из шкалы значений параметров, на рисунке 4.41 показано поле температур. Чтобы настроить параметры этой шкалы необходимо дважды нажать левой кнопкой мыши на нее. В зоне окна постпроцессора под номером 5 показана интерактивная система координат, с помощью которой можно настроить отображение модели или ее части. Это же можно сделать с помощью кнопок мыши: средняя кнопку вращает модель, а правая перемещает ее. И наконец в зоне под номером 6 отображается количество

шагов расчета и значение текущего шага по времени, а также общее время процесса.

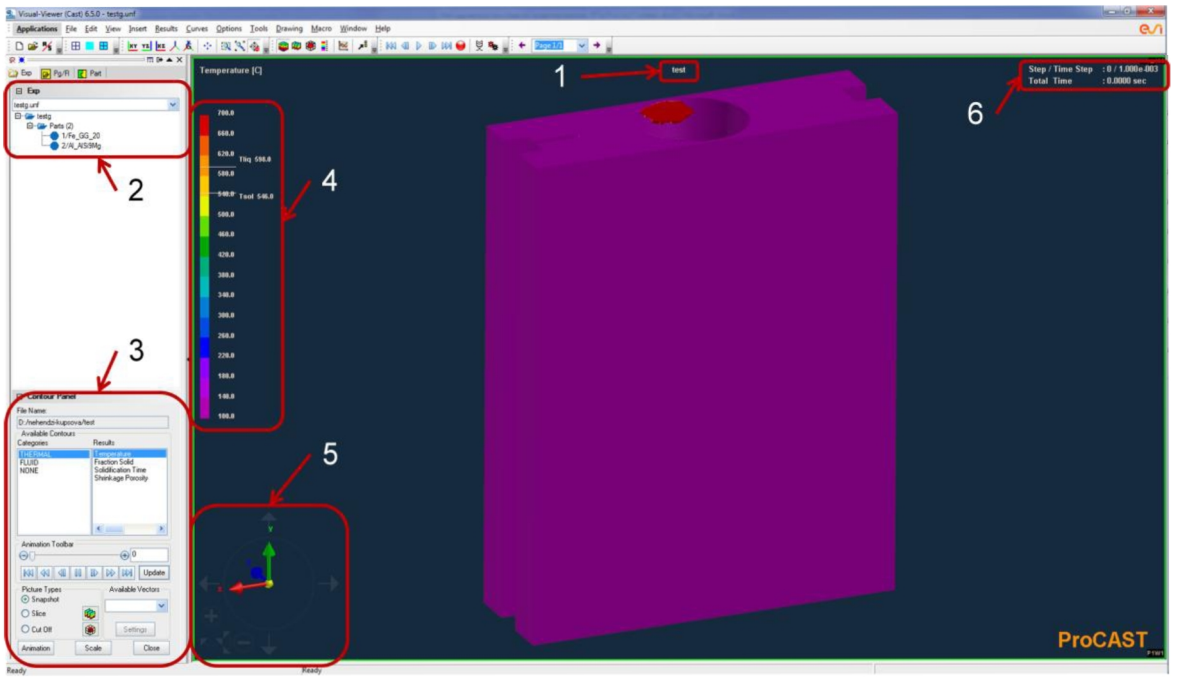


Рисунок 4.41 – Постпроцессор VisualCAST

Приведем параметры шкалы и отображение отливки к виду, показанному на рисунке 4.42.

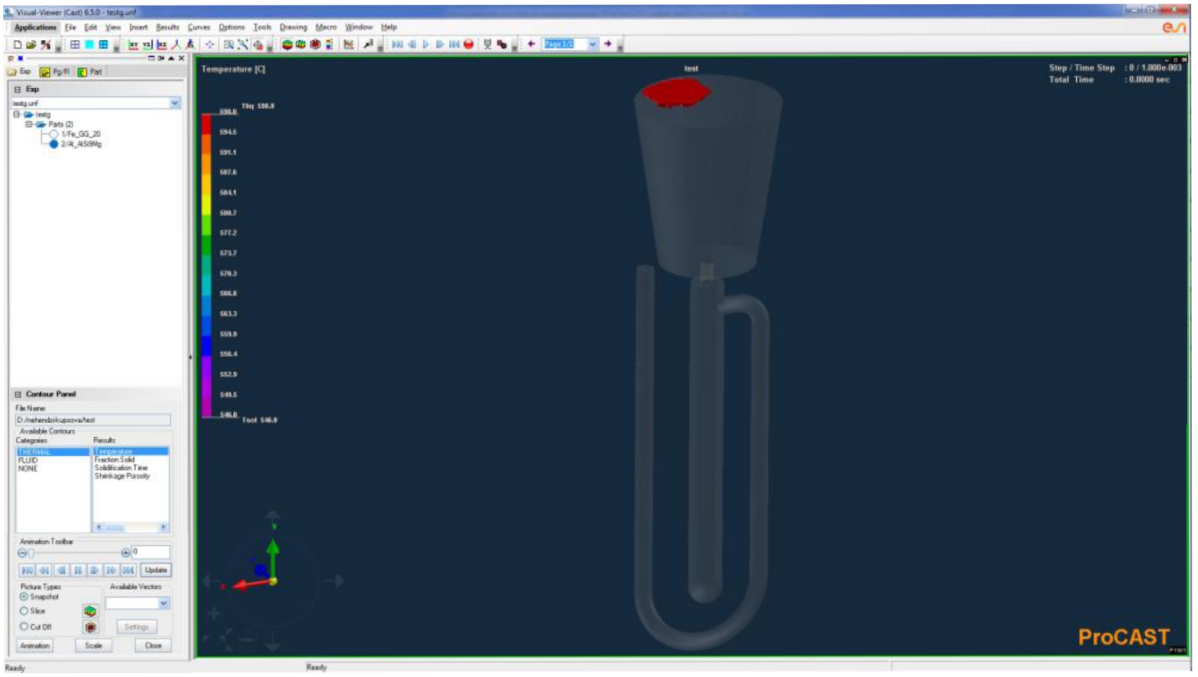
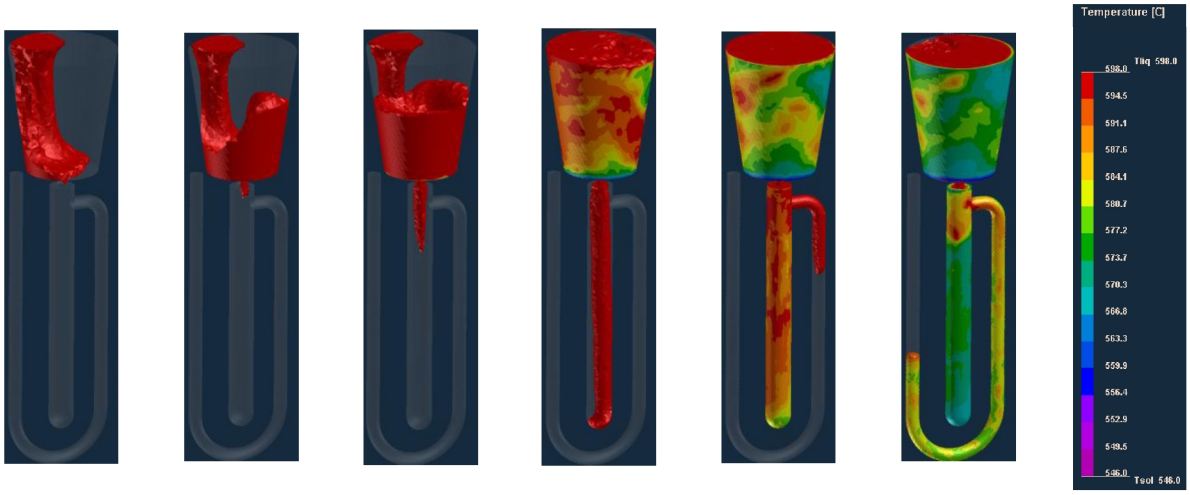


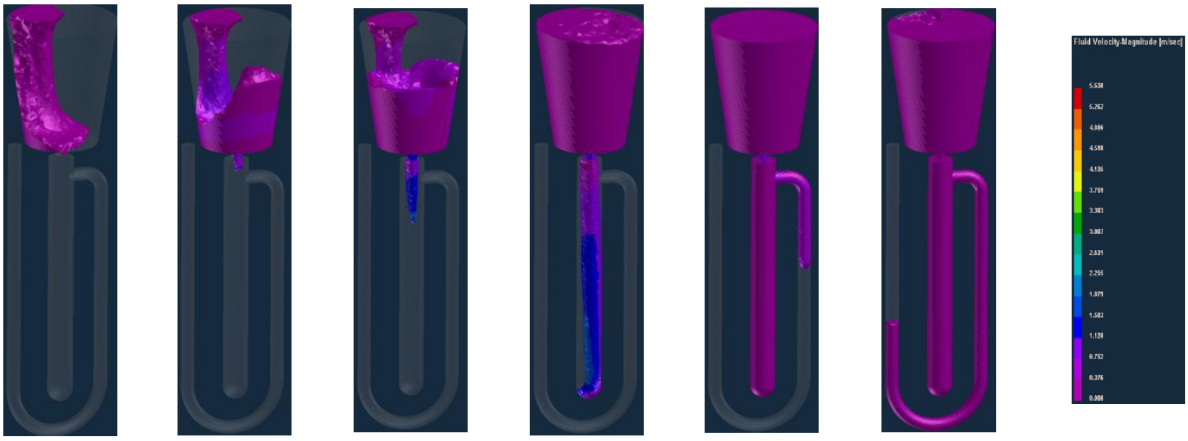
Рисунок 4.42 – Отображение отливки в окне постпроцессора

На рисунках 4.43-4.44, в качестве примера, показаны характерные стадии гидродинамического процесса заполнения кокиля расплавом.



1,32 с 1,9 с 3 с 6,52 с 7,2 с 7,64 с

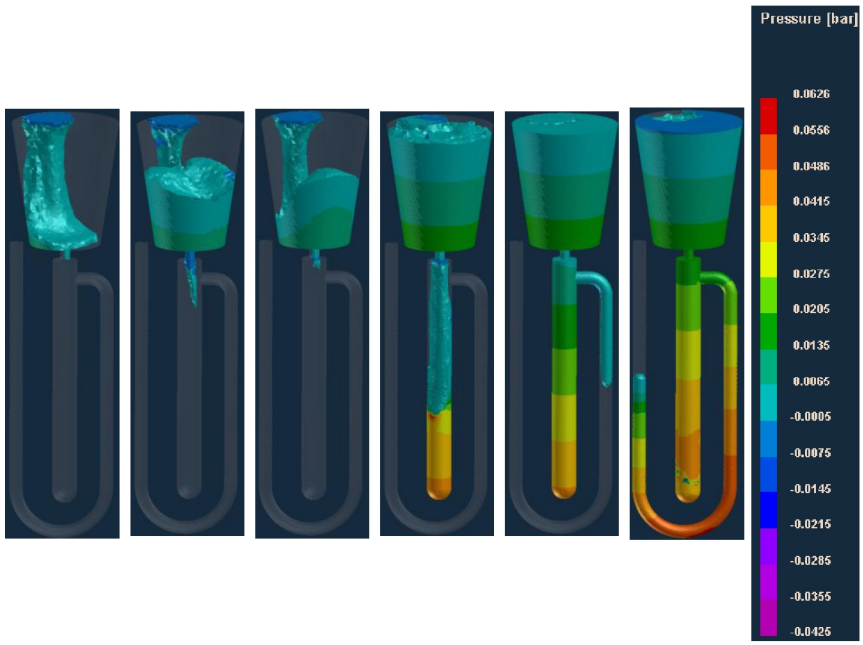
Рисунок 4.43 – Распределение температурных полей в процессе затвердевания расплава



1,32 с 1,9 с 3 с 6,52 с 7,2 с 7,64 с

Рисунок 4.44 – Распределение полей скоростей расплава в процессе заполнения кокиля

А на рисунке 4.45 показано давление гидростатического напора в процессе заполнения кокиля расплавом.



1,32 с 1,9 с 3 с 6,52 с 7,2 с 7,64 с

Рисунок 4.45 – Распределение давления гидростатического напора при заполнении формы расплавом

Помимо этого, можно предсказать возможные литейные дефекты. Так, например, на рисунке 4.46 показана, возникающая в процессе кристаллизации, усадочная пористость по объему отливки.

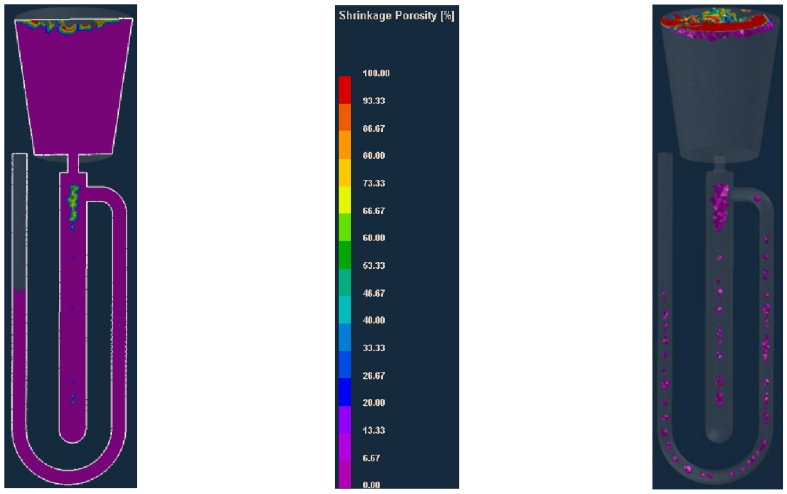


Рисунок 4.46 – Усадочная пористость

Процесс остывания отливки проходит, как правило, неравномерно из-за наличия в ней тонких и массивных частей, неравномерной толщины стенок формы и из-за того, что часть отливки граничит непосредственно с внешней средой. В связи с этим в отливке формируются остаточные напряжения учет которых является важной задачей. ProCAST позволяет "предсказать" эти напряжения и с помощью оптимизации литейной формы свести их к минимуму. Так, в нашем случае для визуализации рассчитанных напряжений необходимо выбрать меню **Stress** и, например, истинные напряжения (**EffectiveStress**). В результате начнется процесс их расчета как показано на рисунке 4.47.

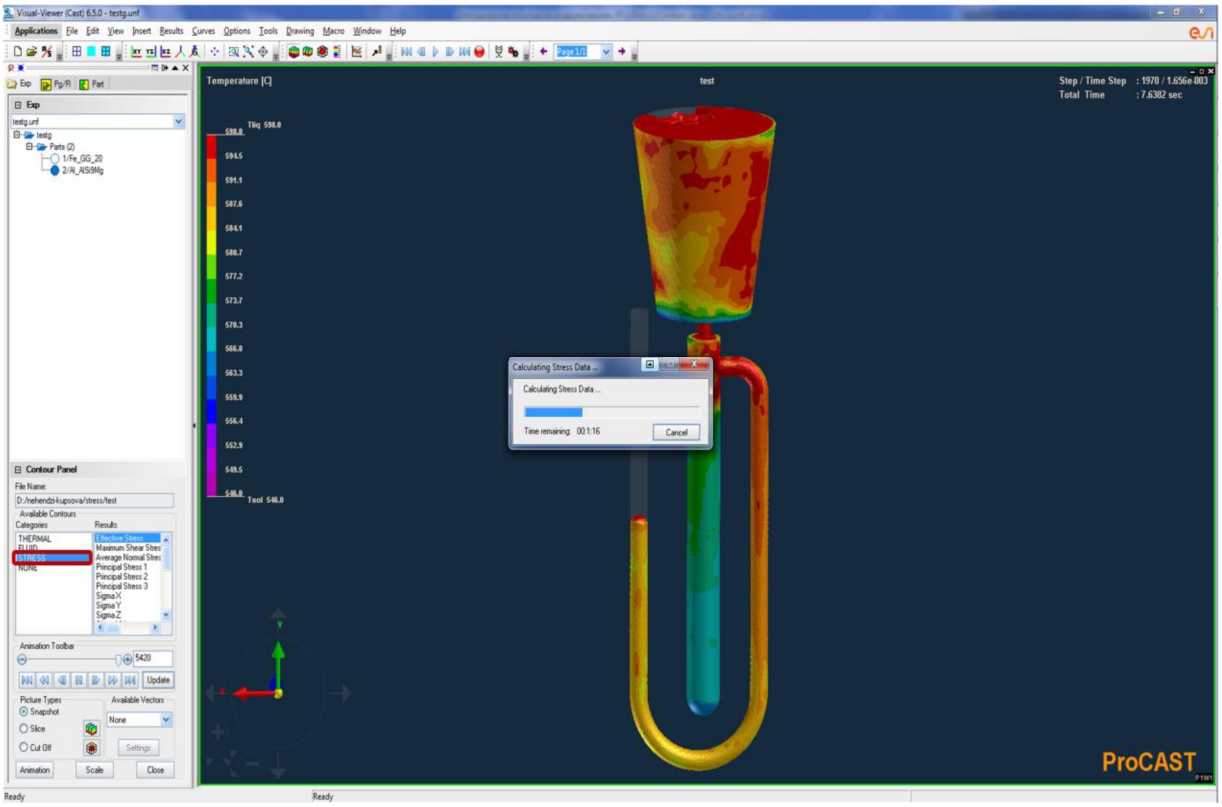


Рисунок 4.47 – Расчет истинных напряжений в отливке

На рисунке 4.48 показаны рассчитанные истинные напряжения в отливке. На рисунке 4.49 показаны зоны контактного давления (**ContactPressure**).

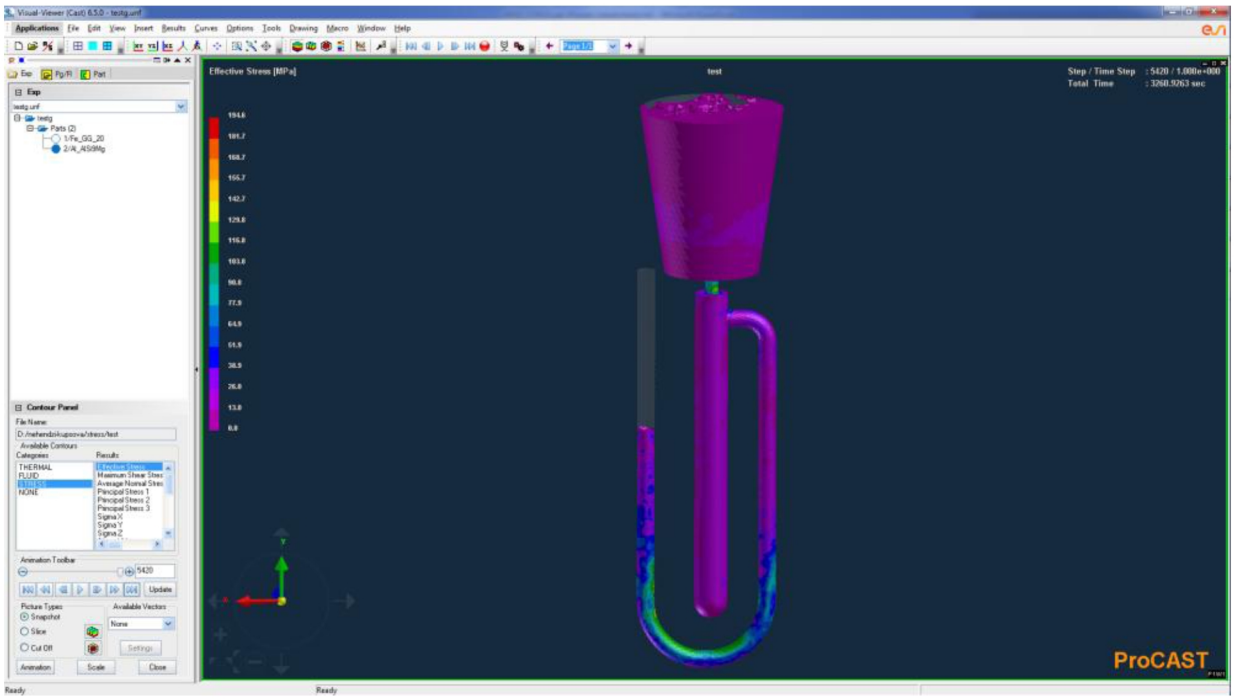


Рисунок 4.48 – Истинные напряжения в отливке

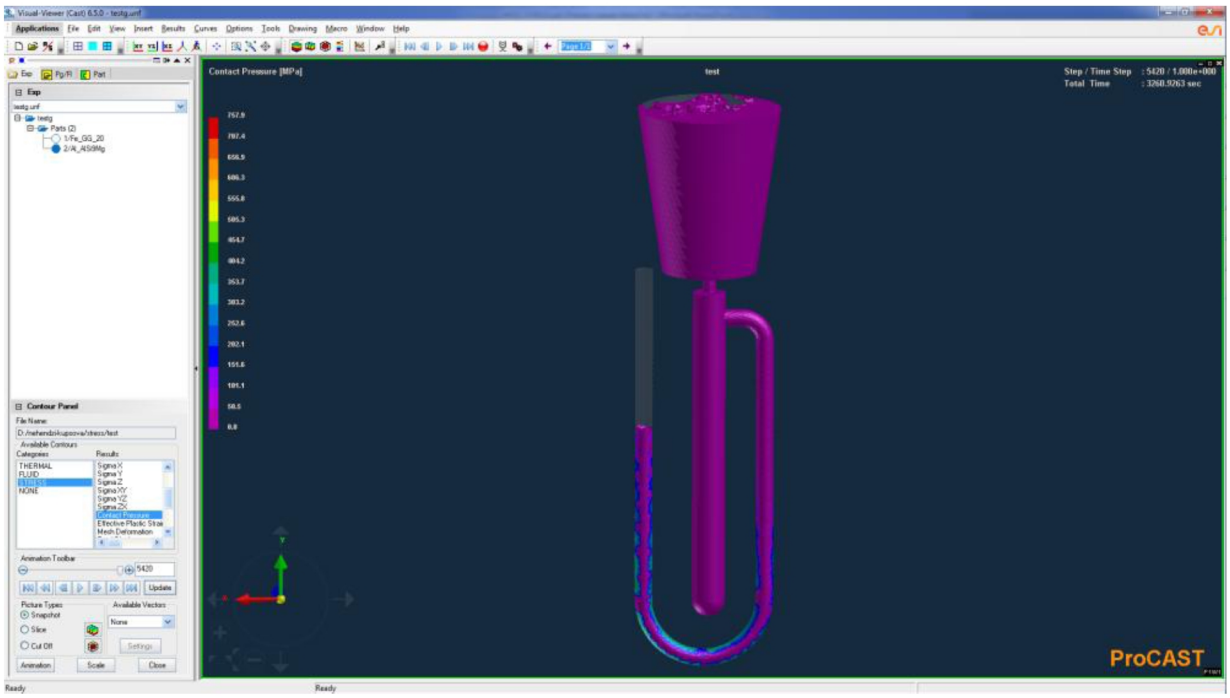


Рисунок 4.49 – Зоны контактного давления

Проба Нехедзи-Купцова является комплексной, по длине вертикального прутка можно оценить линейную усадку сплава. Результаты моделирования перемещений отливки вдоль оси Y (**Y Displacement**) показаны на рисунке 4.50.

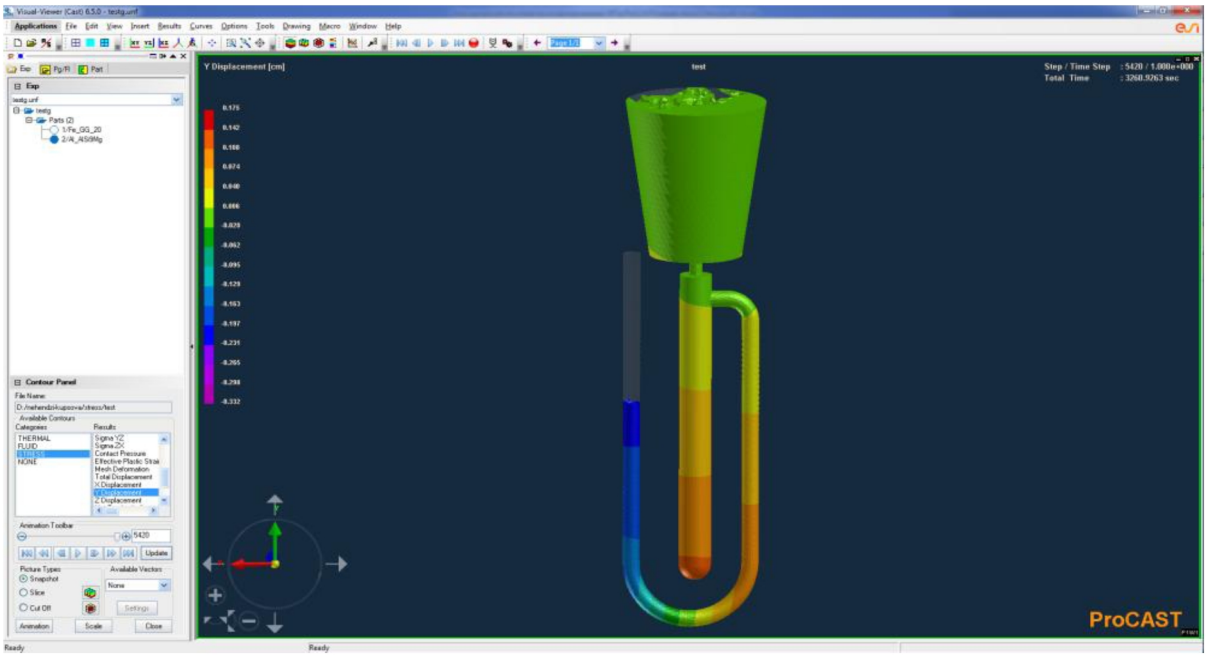


Рисунок 4.50 – Перемещение отливки вдоль оси Y

А на рисунке 4.51 показаны места формирования и величины зазоров между отливкой и формой(**Gap Width**).

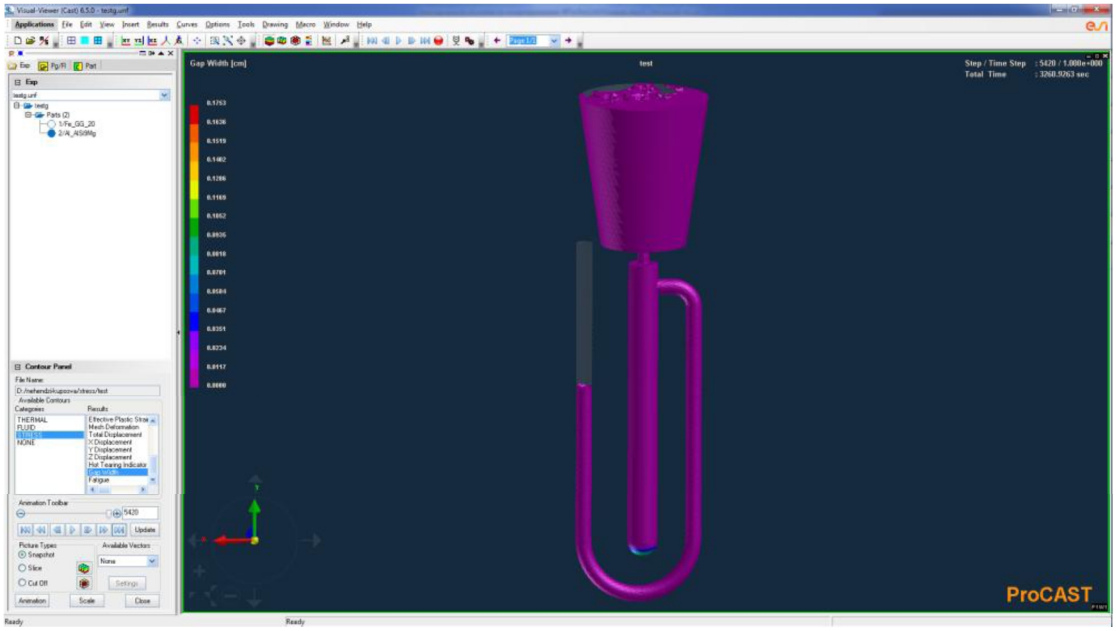


Рисунок 4.51 – Формирование зазоров между отливкой и формой

Таким образом, компьютерное моделирование позволяет оценить спроектированную литейную форму и разработанную технологию на компьютере, не прибегая к дорогому и длительному методу проб и ошибок.

ВВЕДЕНИЕ

Применение моделирования технологий литья на современном предприятии является необходимым условием их внедрения в производство.

В-первою очередь эта особенность затрагивает предприятия авиационной промышленности, которые обладают широкой номенклатурой сложных фасонных отливок.

В связи с тем, что постоянно происходит усложнение функциональных возможностей программного обеспечения, особые требования предъявляются к специалистам, выполняющим проектирование процессов. Подготовка кадров требует регулярного отслеживания современных тенденций в данной области.

Приведенные в работе материалы помогут студентам успешно освоить программное обеспечение Pro-Cast.

БИБЛИОГРАФИЯ

1. Айзикович В.Я. Исследование и внедрение технологического процесса литья лопаток в формы с заданным исходным распределением температуры: Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. М., 1977. - 22 с.

2. Баландин Г.Ф. Теория формирования отливки - М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 1998. - 360 с.

3. Баландин Г.Ф. Формирование кристаллического строения отливок. М.: Машиностроение, 1973.-288 с.

4. Бертман В.А. Компьютерное моделирование заполнения керамических форм тонкостенных панельных отливок, получаемых литьем по выплавляемым моделям: Дис. Канд. Техн. Наук. - М., -1996.

5. Бертман В.А., Ноляков С.Н. Компьютерное моделирование тонкостенных отливок при литье по выплавляемым моделям // Литейное производство. 1998, № 1. - С.31 - 32.

6. Вейник А.И. Расчет отливки. - М.: Машиностроение, 1967. - 404 с.

7. Вейник А.И. Теория затвердевания отливки. - М.: Машгиз, 1960. - 436с.

8. Великанов Г.Ф., Примак И.Н., Десницкий В.В., Русинов А.П. Автоматизированное проектирование оптимальной технологии изготовления отливок//Литейное производство. 1985. №11. -С. 31 - 51.

9. Воробьев И.Л. Математическая теория кристаллизации отливок // Проблемы автоматизированного производства отливок. — М.: Труды МВТУ, 1980.№330. – С.31-51.

10. Галдин Н.М., Чистяков В.В., Шатульский А.А. Литниковые системы и прибыли для фасонных отливок. - М.: Машиностроение, 1992. - 256 с.

11. Голод В.М., Тихомиров М.Д., Сабиров Д.Х. Системный анализ процесса формирования отливки (прикладные аспекты) // Литейные

материалы, технологии, оборудование. Сб.науч.тр. ЦНИИМ. Спб., 1995. - С. 26 -30.

12. Гуляев Б.Б. Литейные процессы. М. - Л.: Машгиз, 1960. - 416 с.

13. Гуляев Б.Б. Теория литейных процессов. Л.: Машиностроение, 1976. - 216 с.

14. Десницкий В.В. Автоматизированное проектирование технологии изготовления отливок-Д.: Ленинградский университет, 1987. - 164 с.

15. Дубицкий Г.М. Литниковые системы. —М.: Машгиз, 1962. - 156 с.

16. Использование систем CAD/CAM в литейном производстве Великобритании // FoundryTradeJournal. 1987. 161, №337. - С. 193 - 197.

17. Ищенко В.В. Автоматизированное проектирование отливок. Ч.3. - М.: Гостелерадио, 1990. - 38 с.

18. Кумапин И.Б. Вопросы теории литейных процессов. М.: Машиностроение, 1976.-216 с.

19. Латышев М.С. Автоматизированное проектирование литниково-питающих систем и технологических средств воздействия на формирование газотурбинных лопаток при литье по выплавляемым моделям. Канд. диссертация. М.: МАТИ-РГТУ, 2003. - 188 с.

20. Литье по выплавляемым моделям. / Изд. 4-е. под. ред. В.А. Озерова. М.: Машиностроение, 1997. - 448с.

21. Моисеев В.С. Разработка методов проектирования литниково-питающих систем и средств управления затвердеванием отливок на основе решения комплекса технологических задач.: Дис. докт. техн. наук.-М.: 1997.-379 с.

22. Моисеев В.С. Расчеты средств воздействия на затвердевание отливок в САПР литейной технологии. // Литейное производство. 1995, № 12. - С.21-23.

23. Моисеев В.С., Неуструев А.А. Интегрированный подход к проектированию литниково-питающих систем отливок // Научн. Труды МАТИ, ВЫП.1 (73). М.: ЛАТМЭС, 1998. - С. 103 - 106.

24. Моисеев В.С., Смыков А.Ф. Оптимизационный подход к расчету литниково-питающих систем и средств воздействия на направленность затвердевания отливок. // Литейное производство. 2000, № 7. — С.49 — 51.

25. Неуструев А.А. Автоматизированное проектирование технологии литья легких сплавов // Литейное производство. — 1985. — №11. - С.13-15.

26. Неуструев А.А. Разработка нового метода автоматизированного проектирования технологических процессов литья // Сб. трудов юбилейного науч.- технич. семинара. М.: Изд-во МАТИ-РГТУ, 2000. - С. 114 -122.

27. Неуструев А.А., Смыков А.Ф., Денисов А.Я. и др. Автоматизированное проектирование техпроцессов литья по выплавляемым моделям турбинных лопаток. // Литейное производство. 2002. №7. - С. 23 - 27.

28. Неуструев А.А., Смыков А.Ф., Модин СВ. Автоматизированное проектирование ЛПС для литья но выплавляемым моделям крупных турбинных лопаток //Литейное производство. 1997. №7. - С 33-37.

29. Пантюхин В.П., Пеуструев А.А., Ковалев Ю.Г. Анализ затвердевания узлов отливок // Вопросы теории и технологии литейного производства. Сб. трудов ЧПИ, № 267. Челябинск: 1981. - С. 60 - 67.

30. Пелых С.Г., Семесенко М.П. Оптимизация литейных процессов. Киев: Вища школа, 1977. - 192 с.

31. Рабинович Б.В. Введение в литейную гидравлику. М.: Машиностроение, 1966. - 423 с.

32. Рыбкин В.А. Основные направления развития литья по выплавляемым моделям // Литейное производство. 1997. - JVb 6. - С. 19-21.

33. Рыжиков А.А. Теоретические основы литейного производства. М.-Свердловск: Машгиз, 1961. - 447 с.

34. Сердюхов Б.Л., Чудин В.А., Чуканова Е.Л., Сатарова В.А. Автоматизированное проектирование карт единичных технологических процессов изготовления отливок // Литейное производство. 1988. - JSfe 11.- С. 25 -26.

35.Кечин В.А., Селихов Г.Ф., Афонин А.Н. Проектирование и производство литых заготовок: Учеб. пособие / Владим. гос. ун-т. Владимир, 2002. - 228 с.

2. Формовочные материалы и технология литейной формы. Справочник / СС. Жуковский, ГА. Анисович, Н.И. Давыдов и др. М., 1993. 432 с.

36. Титов Н.Д., Степанов Ю.А. Технология литейного производства. М., 1974. 472 с.

37.Материаловедение и технология конструкционных материалов / Ю.П. Солнцев, В.А. Веселов, В.П. Демянцевич, А.В. Кузин М., 1996.575 с.