



## Компьютерный инженерный анализ

ТЕХНОЛОГИИ ЛИТЬЯ

ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА

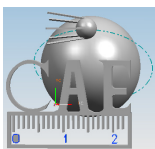
### Технологические программы CAE Моделирование технологии литья в LVMflow: затвердевание стальной отливки в песчано-глинистой форме

*Аннотация.* В руководстве к практической работе показаны основные приемы компьютерного моделирования литейных технологий в интерфейсе технологической программы CAE LVMFlow версии 6.3.

© О.М. Огородникова, 2021

*Полная ссылка на данное электронное издание:*

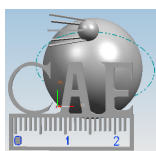
**Огородникова О.М.** Компьютерное моделирование литейной технологии в программной среде LVMflow [Электронный ресурс] / Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2018. – 38 с. Режим доступа: [https:// cae.urfu.ru](https://cae.urfu.ru) свободный.



## ОГЛАВЛЕНИЕ

2

ВВЕДЕНИЕ.....	3
1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ .....	4
1.1. Инструкция по использованию методических материалов .....	4
1.2. Аббревиатура CAD CAE CAM .....	5
1.3. Технологические данные решаемого примера .....	6
1.4. Общая информация о технологическом процессе литья.....	7
2. ПОДГОТОВКА ГЕОМЕТРИИ И РАСЧЕТНОЙ СЕТКИ .....	8
2.1. Запуск препроцессорного модуля геометрии .....	8
2.2. Импортное геометрии отливки .....	9
2.3. Импортное геометрии литниково-питающей системы .....	11
2.4. Преобразование геометрии в препроцессоре .....	13
2.5. Трансляция геометрической модели в формат LVMFlow .....	14
2.6. Запуск препроцессорного модуля для генерации сетки.....	15
2.7. Импортное геометрии в генератор расчетной сетки .....	16
2.8. Создание расчетной сетки .....	17
2.9. Задание размеров расчетной области .....	18
2.10. Задание размеров элементарных ячеек расчетной сетки .....	19
2.11. Изменение положения отливки по вертикали .....	20
2.12. Проверка качества расчетной сетки .....	21
2.13. Масштабирование и просмотр сетки по сечениям .....	22
2.14. Инструменты масштабирования .....	23
3. ПОДГОТОВКА РАСЧЕТНОЙ МОДЕЛИ .....	24
3.1. Выбор литейной стали из базы данных материалов.....	24
3.2. Назначение температуры расплава .....	25
3.3. Выбор материала литейной формы .....	26
3.4. Задание граничных условий .....	27
3.5. Просмотр геометрии по сечениям .....	28
3.6. Сохранение сеточной модели.....	30
4. ВЫПОЛНЕНИЕ РАСЧЕТОВ .....	31
4.1. Запуск процессорного модуля.....	31
4.2. Импортное расчетной модели в процессор .....	32
4.3. Запуск вычислений .....	33
5. АНАЛИЗ РАСЧЕТНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ .....	34
5.1. Запуск постпроцессорного модуля .....	34
5.2. Анализ усадочных дефектов .....	35
Индивидуальное задание.....	36
Заключение .....	36

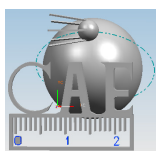


## ВВЕДЕНИЕ

Современные литейные технологии позволяют изготавливать качественные отливки сложной конфигурации, однако затраты на их изготовление и поиск оптимальных технологических решений остаются высокими. Применение наукоемких технологий, в частности, систем компьютерного моделирования процессов, происходящих во время формирования отливки, позволяет, с одной стороны, переходить к отливкам с более сложной геометрией и использовать широкую номенклатуру сплавов, с другой стороны, сокращать затраты на отладку технологии, заменяя натурный эксперимент вычислительным.

Компьютерное моделирование и оптимизация технологий, в том числе, литейных технологий, является важным направлением развития программных продуктов компьютерного инженерного анализа – *CAE – Computer Aided Engineering*. Специализированное программное обеспечение ориентировано на эффективную работу инженера-технолога и позволяет имитировать технологические процессы виртуально. Компьютерная программа дает возможность и опытному технологу, и начинающему инженеру проследить, что происходит при заполнении расплавом литейной формы и в дальнейшем, – при охлаждении и затвердевании металла. Технолог, пользуясь CAE-программой, выявляет дефекты различной природы в отливке на стадии проектирования, предлагает модификации конструкции и технологии, сравнивает прогнозируемое качество отливки для предложенных модификаций и выбирает в итоге наиболее оптимальный вариант технологии и литниково-питающей системы.

*LVMFlow* – российская программа CAE для анализа литейных технологий. Программа создана группой специалистов компании ЗАО НПО МКМ (г. Ижевск), где на протяжении 25 лет постоянно совершенствуются модели и алгоритмы, улучшается пользовательский интерфейс. Программа *LVMFlow* прошла основательное тестирование и проверку не только на российских предприятиях в Новосибирске, Красноярске, Ижевске, Нижнем Новгороде, Златоусте, но и за рубежом, где программу купили более сотни предприятий в США, Канаде, Бразилии, Швеции, Норвегии, Австралии, Турции. Программа *LVMFlow* неоднократно экспонировалась на международных выставках и конгрессах литейщиков. На зарубежном рынке программу *LVMFlow* под торговыми марками *NovaSolid* и *NovaFlow* распространяет шведская фирма *NovaCast Systems AB*, имеющая представительство в 16 странах.



# 1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

## 1.1. Инструкция по использованию методических материалов

Данные методические материалы используют оформительские преимущества электронных образовательных ресурсов перед традиционными печатными изданиями, прежде всего – красочность и наглядность представления инструкций с привлечением скриншотов.

Вертикальная организация текста позволяет открыть одновременно и упорядочить по горизонтали 2 окна – рабочее окно программы *LVMFlow* и данный текстовый документ. Следует читать текстовый документ методических материалов и выполнять необходимые действия в рабочем окне программы *LVMFlow*. К текстовому документу прилагаются файлы геометрии, которые следует импортировать и обработать в соответствии с текстом методических материалов.

Текст содержит следующие графические приемы методической разметки.

### Общие замечания

Замечания в желтом окне содержат дополнительную информацию о технологиях и расширяют кругозор.

### Замечания по LVMFlow

Замечания в зеленом окне касаются интерфейсов, преимуществ и специфики программного обеспечения *LVMFlow*.

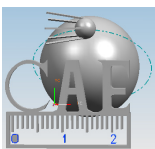
➤ Такой знак предлагает выполнить действие в интерфейсе программы в соответствии с последующим описанием.

**3D конвертер** – коричневыми буквами на желтом фоне выделены названия позиций или команд интерфейса, к которым следует обратиться.

**1**

**2**

– цифрами в зеленых квадратах отмечена последовательность перехода между позициями и командами интерфейса.



## 1.2. Аббревиатура CAD CAE CAM

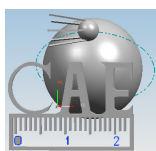
### CAD → CAE → CAM

Сквозная технология компьютерного проектирования и подготовки производства литых деталей включает оптимизацию технологии их изготовления способом литья с использованием программы CAE. Последовательность выполнения работы: CAD → CAE → CAD → CAM.

**CAD** – *Computer Aided Design* – конструирование с использованием компьютерных программ. Системы автоматизированного проектирования CAD обеспечивают геометрическое моделирование и визуализацию изделий или их деталей в двух и/или трех измерениях. В современные CAD-системы входят следующие модули: моделирование объемной конструкции; создание и оформление чертежей; ведение текстовой конструкторской документации; заполнение технологических карт.

**CAE** – *Computer Aided Engineering* – инженерные расчеты с использованием компьютерных программ. Средства CAE решают задачи по расчету напряжений, деформаций, теплообмена, распределения магнитного поля, потока жидкостей и других параметров сплошных сред, а также технических систем в целом. Различают CAE-программы конструкторского назначения, обеспечивающие расчетное обоснование конструкторского проекта, и CAE-программы технологического назначения, помогающие оптимизировать технологии изготовления деталей. LVMFlow является

**CAM** – *Computer Aided Modeling* – подготовка производства с использованием компьютерных систем. CAM-системы предназначены, в первую очередь, для проектирования технологий обработки изделий на станках с числовым программным управлением (ЧПУ) и выдачи управляющих программ для станков (фрезерных, сверлильных, эрозионных, пробивных, токарных, шлифовальных и др.). К системам автоматизированного производства относят также программные пакеты, управляющие движением роботов при выполнении технологических операций (например, автоматизированная сварка), при сборке компонентов и перемещении их между операциями, а также пакеты, позволяющие программировать координатно-измерительные машины, используемые для проверки размерной точности изделий. В CAM-системе используется трехмерная модель детали,



### 1.3. Технологические данные решаемого примера

**Объект моделирования:** стальная деталь «букса», литье в песчано-глинистую форму.

1. Материал отливки: сталь 20Л.
2. Температура заливки: 1550–1580 °С.
3. Время заливки: 20–25 с.
4. Формовка в двух опоках по сырому.
5. Плотность формы: 85–90 единиц.
6. Опоки: 910×610×400 (низ) / 250 (верх) [мм].
7. Формовочная смесь песчано-глинистая состава:

- оработанная горелая земля: 94,0–97,0 %;
- песок кварцевый ГОСТ 2138-91 3-5 К1-2 ОЗ-4 02(025): 3,0 – 6,0 %;

К формовочной смеси добавляется суспензия бентонитовая (сверх 100 %): 3,2 %; плотность: 1,10 – 1,30 г/см; РН = 10,5 – 12,5; активация бентонита производится при приготовлении суспензии оработанным щелочным раствором; РН = 11,0–12,5.

Свойства формовочной смеси:

- газопроницаемость  $\geq 100$  единиц;
- прочность на сжатие: 0,6–0,9 МПа;
- влажность: 38–4,4 %.

8. Стержень изготавливается по нагреваемой оснастке.

9. Состав стержневой смеси:

- формовочный песок: 100 %;

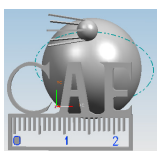
К стержневой смеси добавляются композиция фенол-формальдегидной смолы (сверх 100%): 2,4–2,6 %; пыль от электродуговых печей: 1,0 %; FeCl<sub>3</sub> (от веса композиции): 5,0–5,7 %; керосин: 0,05 %.

Состав композиции фенол-формальдегидной смолы:

- фенол-формальдегидная смола по ТУ 6-05-1164-87: 100 %;
- карбамид по ГОСТ 2081 85.

Свойства стержневой смеси:

- газопроницаемость  $\geq 100$  единиц;
- влажность: 1,0–1,4 %;
- сырая прочность на сжатие  $\leq 0,003$  МПа;
- прочность на растяжение в отвержденном состоянии  $\geq 2$  МПа.



## 1.4. Общая информация о технологическом процессе литья

### Отливка

В литейном производстве изготавливают отливки, заливая расплавленный металлический сплав заданного химического состава в литейную форму. Затвердевая при охлаждении, металлический сплав воспринимает и сохраняет геометрию полости формы. Отливки могут быть готовыми деталями или заготовками, которые в дальнейшем будут подвергнуты механической обработке на металлорежущих станках.

Литье в песчаные формы является универсальным способом изготовления отливок. Этим способом изготавливаются разнообразные по сложности отливки практически любой массы и размеров из сталей, чугунов и сплавов цветных металлов.

В данной практической работе компьютерному анализу будет подвергнут технологический процесс литья в песчано-глинистую форму, когда расплав заливается в разовую форму, изготовленную из плотно утрамбованного песка. Чтобы надежно связать песчинки в формовочной смеси, песок смешивают с глиной, водой и необходимыми связующими

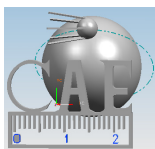
### Литейная форма

Литейная форма состоит из двух полуформ (верхней и нижней), которые изготавливаются в *опоках* – приспособлениях для удержания формовочной смеси. Для получения полостей, отверстий или иных сложных выемок в отливке на этапе изготовления в форму устанавливаются литейные *стержни*, которые фиксируются за счет *знаков* – выступов, входящих в соответствующие впадины формы.

Расплав заливают в литейную форму через литниковую систему.

Основные элементы литниковой системы:

- *литниковая чаша*, которая служит для приема расплавленного металла и подачи его в форму;
- *стояк* – вертикальный или наклонный канал для подачи металла из литниковой чаши в рабочую полость или к другим элементам;
- *шлакоуловитель*, с помощью которого удерживается шлак и другие неметаллические примеси;
- *питатель* – один или несколько, через которые расплавленный металл подводится в полость литейной формы.



## 2. ПОДГОТОВКА ГЕОМЕТРИИ И РАСЧЕТНОЙ СЕТКИ

### 2.1. Запуск препроцессорного модуля геометрии

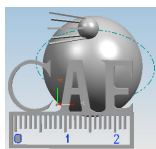
- Запустите программу, используя ярлык **NFS** программы LVMFlow на рабочем столе; появится стартовое окно программы (рис. 1) с вертикальным списком модулей.
- Запустите в стартовом окне из списка справа первый препроцессорный модуль программы **3D конвертер**.



Рис. 1. Стартовое окно программы LVMFlow

### Модульная структура программ CAE

Программы CAE имеют модульную структуру, в которую входят модули: процессор, препроцессор и постпроцессор. Процессор производит вычисления и является ядром программы. Соответственно, все операции подготовки расчетной модели концентрируются в препроцессоре, а представление расчетных результатов в графическом виде поручают





## 2.2. Импортирование геометрии отливки

Импортируйте в препроцессорный модуль геометрическую модель отливки в формате \*.STL. (рис.2).

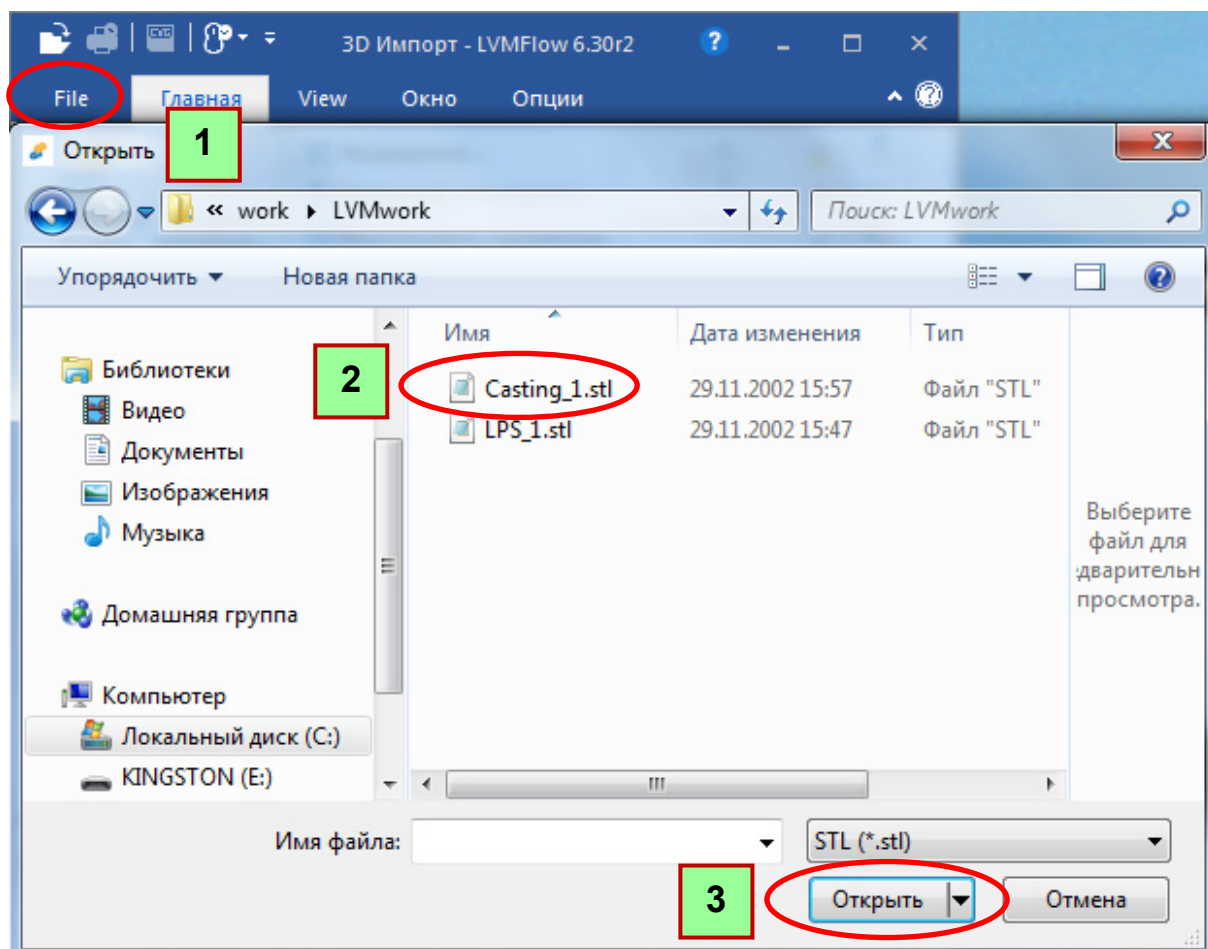
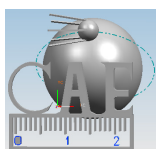


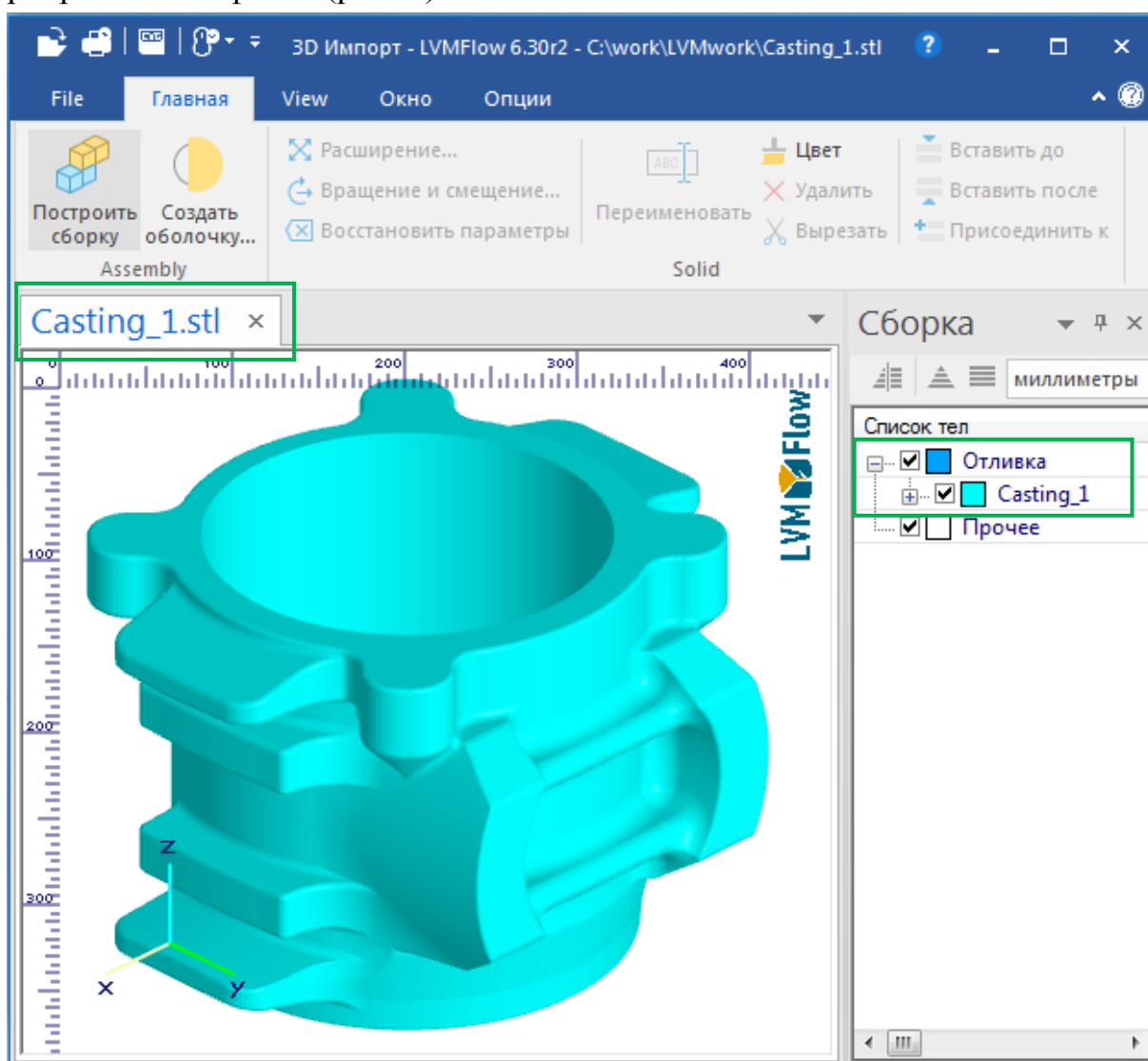
Рис. 2. Импортирование отливки

### Модуль «3D конвертер»

Транслятор геометрических файлов «3D конвертер» является входным модулем и осуществляет связь расчетной программы *LVMFlow* с CAD-системами геометрического моделирования. Основное назначение модуля заключается в преобразовании импортированных файлов формата STL во внутренний формат *LVMFlow*. Модуль позволяет собирать геометрическую модель сборки из нескольких файлов STL (отливка, прибыли, холодильники и другие элементы), поворачивать ее в пространстве, правильно ориентируя относительно направления



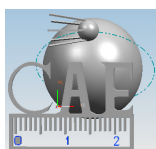
В рабочем окне появится отливка, справа в списке появится название импортированного файла (рис. 3).



**Рис. 3. Импортированная отливка в рабочем окне программы**

### **Геометрическая модель отливки**

Геометрическая модель отливки строится на основе геометрической модели детали. Геометрическая модель детали подвергается редактированию, к ней добавляются припуски на механическую обработку и литейные уклоны. Припуски на механическую обработку устанавливаются в зависимости от допусков размеров. Для верхних частей отливки предусматривают больший припуск на механическую обработку, поскольку там могут локализоваться неметаллические включения.



## 2.3. Импорт геометрии литниково-питающей системы

Импортируйте геометрическую модель литниково-питающей системы в формате \*.STL. Для этого откройте раздел меню **Файл** (рис. 4) и последовательно выберите строчки в падающем меню: **Добавить элементы оснастки** > **Отливка**. Откройте файл геометрии (рис. 5).

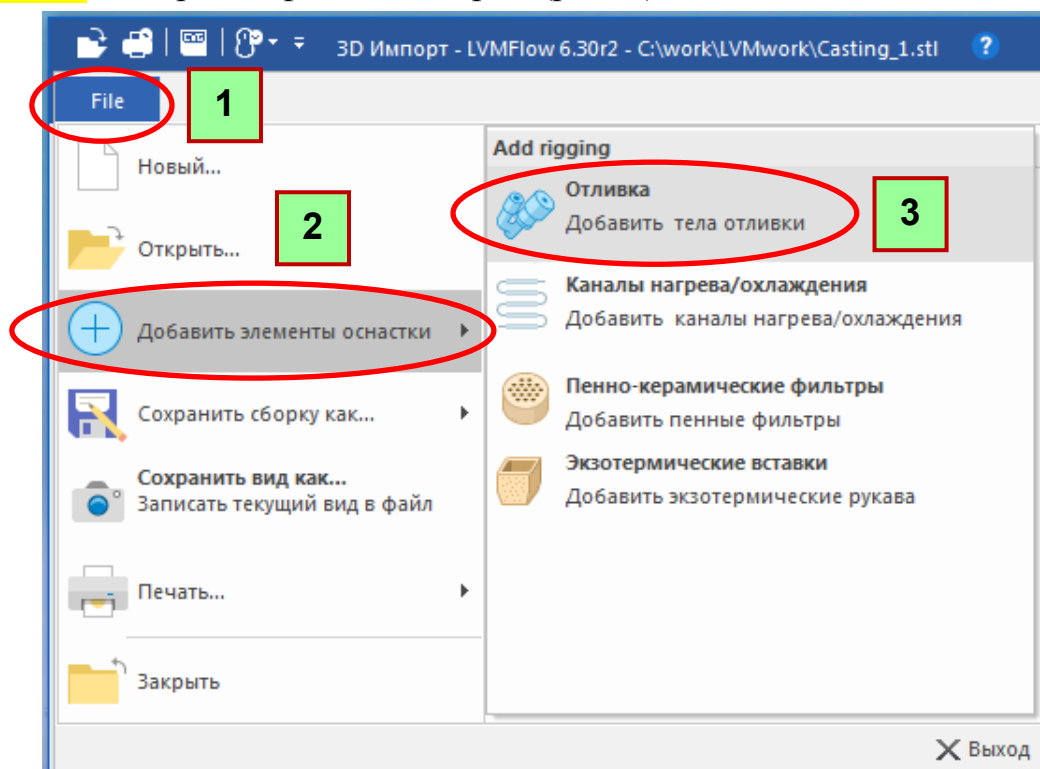


Рис. 4. Импорт литниково-питающей системы

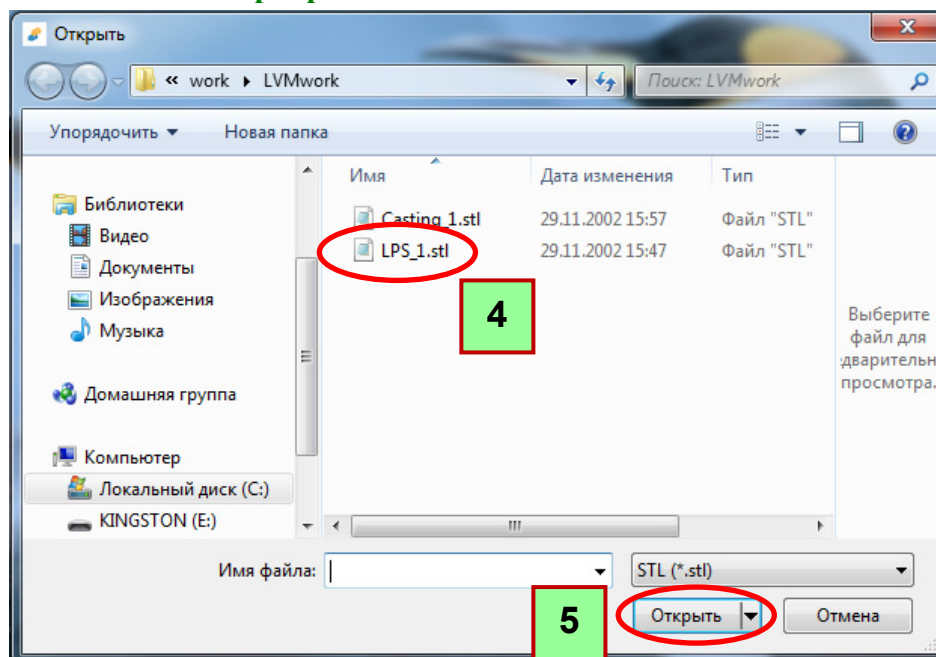
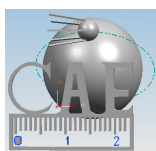


Рис. 5. Выбор файла с геометрией литниково-питающей системы



В рабочем окне к отливке добавится литниково-питающая система, которой автоматически присвоится желтый цвет (рис. 6). В списке добавится название соответствующего импортированного файла.

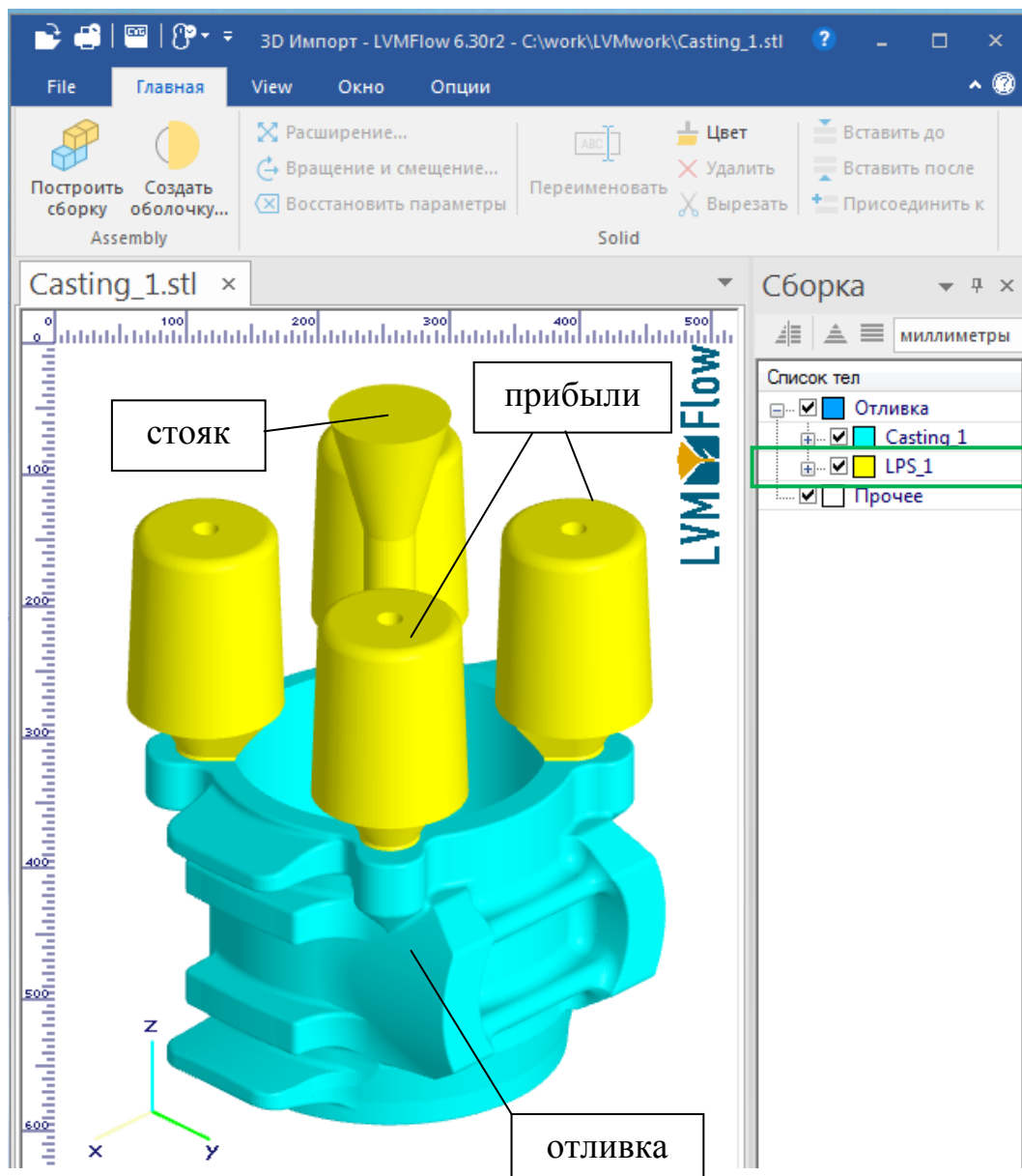
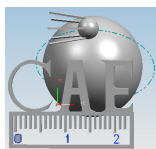


Рис. 6. Результат загрузки файлов геометрии – полная геометрическая модель

## STL

STL (*StereoLithography*) – *Standard Triangulation Language* – дословно переводится как «язык стандартной триангуляции», это не редактируемый формат представления геометрических моделей; в котором поверхности аппроксимируются треугольниками. Файлы STL могут быть как текстовыми (ASCII), так и двоичными, причем двоичные меньше текстовых по размеру.



## 2.4. Преобразование геометрии в препроцессоре

Для перемещения, поворота, масштабирования и визуального контроля над геометрической моделью в рабочем окне можно воспользоваться всплывающим меню, нажав правую клавишу мыши (рис. 7). Используйте также стандартные инструменты перемещения и поворота геометрической модели на панели инструментов.

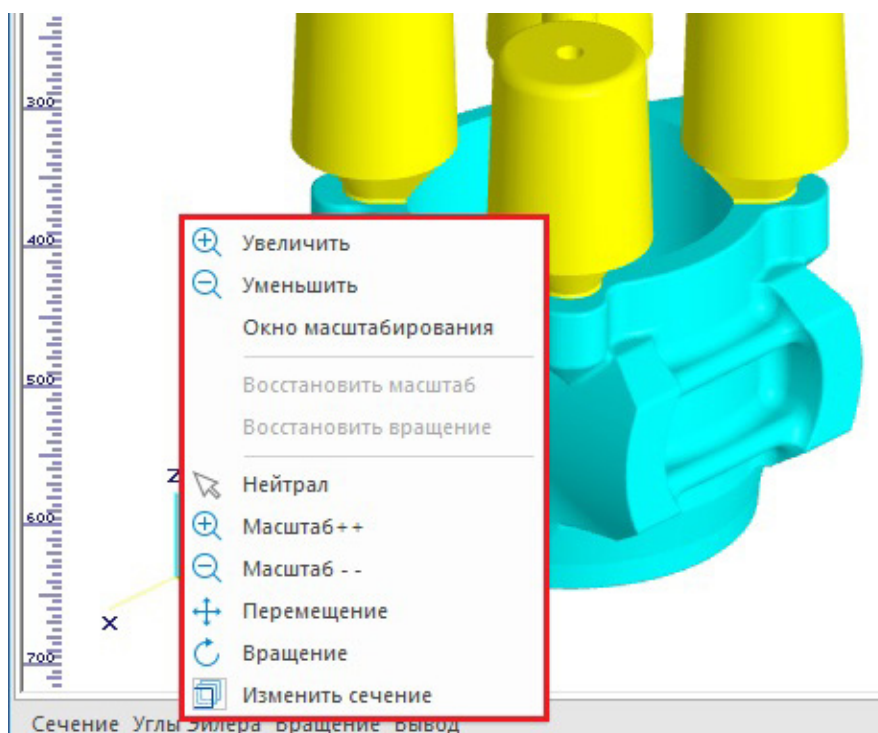
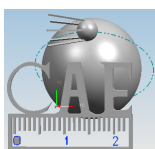


Рис. 7. Вращение, перемещение и масштабирование модели в рабочем окне

### Обозначение материалов цветом в препроцессоре

Препроцессор LVMFlow маркирует различные материалы геометрической модели цветом. Каждому используемому в конструкции элементу принято назначать свой цвет. Цвет определяет принадлежность к тому или иному материалу (литейная сталь, материал формы, холодильники и т.д.). По умолчанию в LVMFlow отливка маркируется голубым цветом. При сборке конструкции в модуле «3D Импорт» первому загружаемому из файла STL элементу конструкции присваивается голубой цвет. Каждому последующему элементу конструкции, присваивается новый цвет. Пользователь может переназначить цвет любому используемому элементу конструкции и материалу по своему усмотрению. Назначение марки материала, который соответствует выбранному цвету, будет произведено на следующем шаге в препроцессорном модуле «НАЧАЛЬНЫЕ УСЛОВИЯ».



## 2.5. Трансляция геометрической модели в формат LVMFlow

Сохраните геометрическую модель, при этом она транслируется во внутренний формат программы LVMFlow (рис. 8).

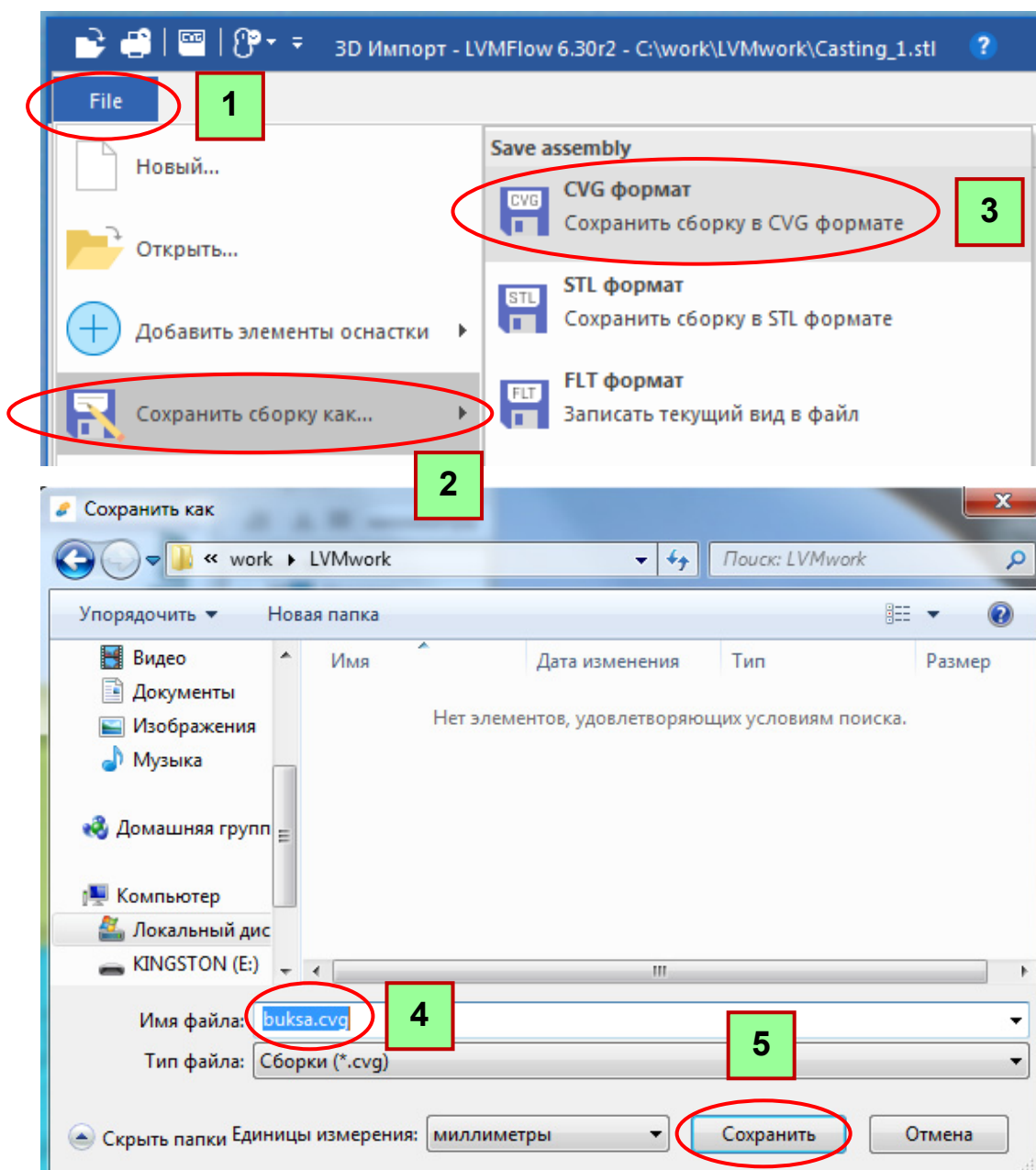
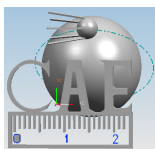


Рис. 8. Сохранение геометрической модели во внутреннем формате LVMFlow

### Геометрическая и сеточная модели

При создании пространственных моделей в препроцессорах CAE, дует различать геометрическую и сеточную модели. Геометрическая модель ограничивает область пространства, в которой решается расчетная задача. Геометрическая модель используется препроцессором для генерации сетки. На расчетной сетке задаются начальные и граничные условия.



## 2.6. Запуск препроцессорного модуля для генерации сетки

➤ Откройте препроцессорный модуль «Начальные условия» нажатием соответствующей клавиши в стартовом окне LVMFlow (рис. 9).

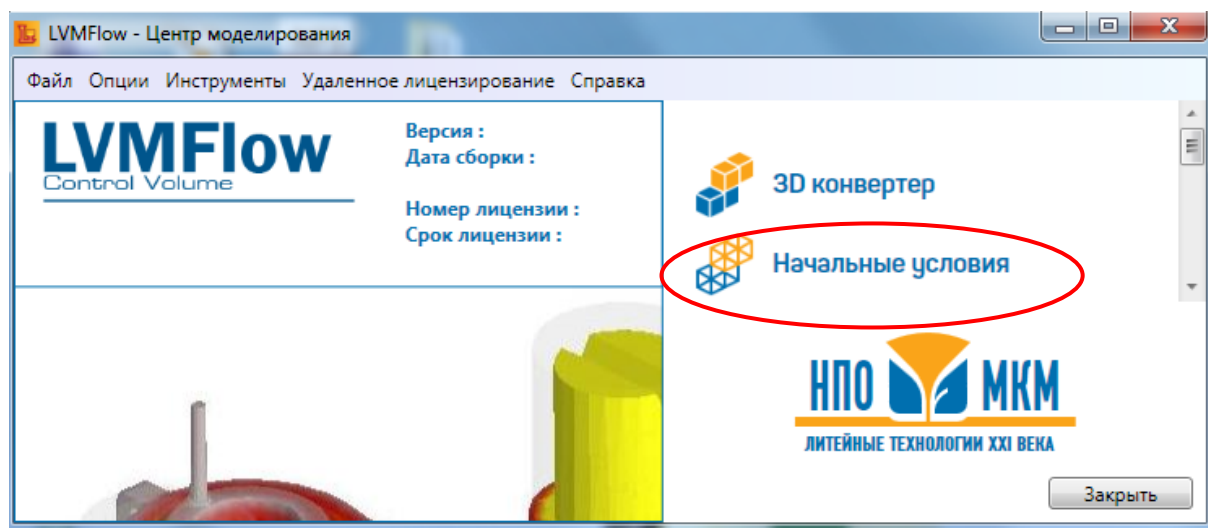


Рис. 9. Запуск препроцессорного модуля «Начальные условия»

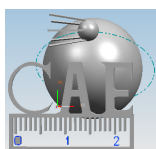
### Препроцессор LVMFlow

Программа LVMFlow построена по модульному принципу и состоит из нескольких модулей, работа в которых выполняется последовательно.

Основное назначение препроцессорного модуля «Начальные условия» заключается в создании расчетной сеточной модели. Здесь же задаются начальные и граничные условия: литейная сталь для отливки, материал и размер литейной формы, начальная температура литейной формы и заливаемого в нее расплава, а также другие технологические параметры, необходимые для проведения расчетов.

Входной информацией для модуля «Начальные условия» является геометрическая модель отливки и литниково-питающей системы во внутреннем формате программы LVMFlow. Стали, сплавы и материалы можно выбрать в базе данных материалов, при необходимости в базу данных можно внести уникальные материалы.

Используя геометрическую модель, препроцессор генерирует расчетную сетку, на которой далее будут вычисляться температурные поля и другие важные параметры, включая параметры, показывающие местоположение технологических дефектов. В LVMFlow элементарной ячейкой разностной расчетной сетки является куб.



## 2.7. Импортирование геометрии в генератор расчетной сетки

➤ Импортируйте геометрию отливки с литниково-питающей системой в препроцессорном модуле «Начальные установки» во внутреннем формате LVMFlow \*.cvg, обратившись в меню **Файл** > **Открыть** (рис. 10). Необходимый файл был создан на предыдущем в модуле «3D конвертер».

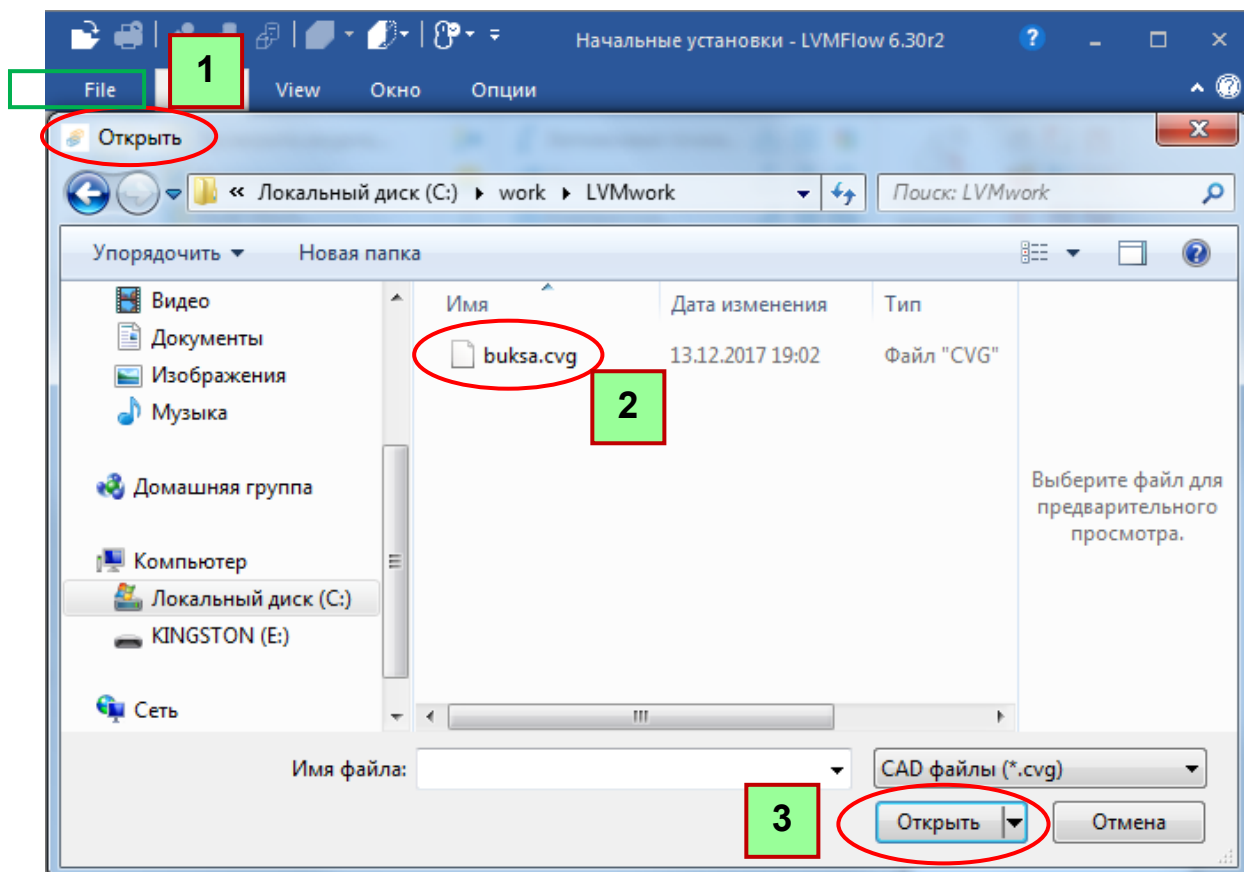
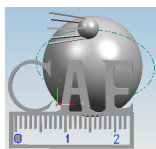


Рис. 10. Открытие файла геометрической модели в препроцессорном модуле «Начальные установки»

### Граничные условия

Моделируя литейные процессы, мы решаем дифференциальные уравнения, описывающие эти процессы, на расчетной сетке. Граничные условия являются дополнением к решаемому дифференциальному уравнению в частных производных и задают его поведение на границе рассматриваемой области. Обычно дифференциальное уравнение имеет не одно решение, а целое их семейство. Начальные и граничные условия позволяют выбрать единственное решение, соответствующее конкретному





## 2.8. Создание расчетной сетки

➤ Перейдите к созданию расчетной сетки (рис. 11). Для этого откройте раздел меню **Главная** и выберите пиктограмму **Создать модель**.

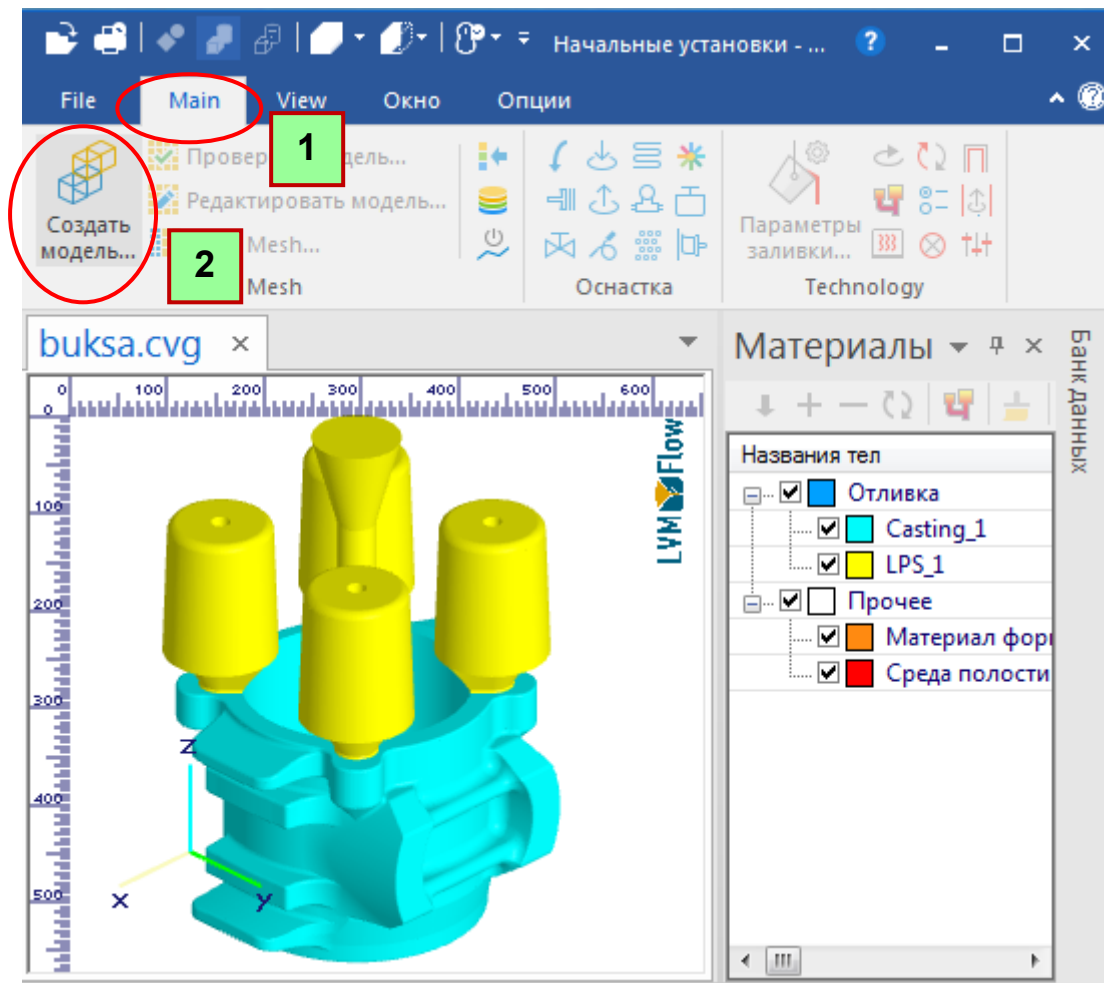
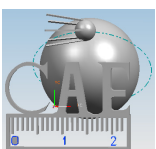


Рис. 11. Переход к диалогу о создании расчетной сетки

### Сеточная модель

Сеточная модель позволяет приближенно решить дифференциальное уравнение теплопроводности, которое описывает теплопередачу от затвердевающей отливки через форму в окружающую среду. Решение на сеточной модели является дискретным, поскольку выполняется на дискретном множестве точек – расчетных узлов, образующих расчетную сетку. В расчетных узлах вычисляются искомые значения температуры.

Сеточная модель состоит из элементарных ячеек – кубиков, вершинами которых являются расчетные узлы. Для автоматической генерации расчетной сетки достаточно ввести один параметр – размер ячейки (шаг сетки) либо задать общее количество узлов сетки.



## 2.9. Задание размеров расчетной области

Появится окно диалога (рис. 12), в котором следует назначить размеры опок, нижней и верхней, которые вместе определяют расчетную область. В нашем случае с учетом того, что в одну опоку формуется 2 буксы, следует назначить расчетную область **455×610×650** мм и ввести эти значения в поля ввода слева в окне диалога. Чтобы отливка была расположена по центру опоки, следует в полях ввода справа в окне диалога по оси *x* и по оси *y* ввести координаты середин соответствующих линейных размеров опоки.

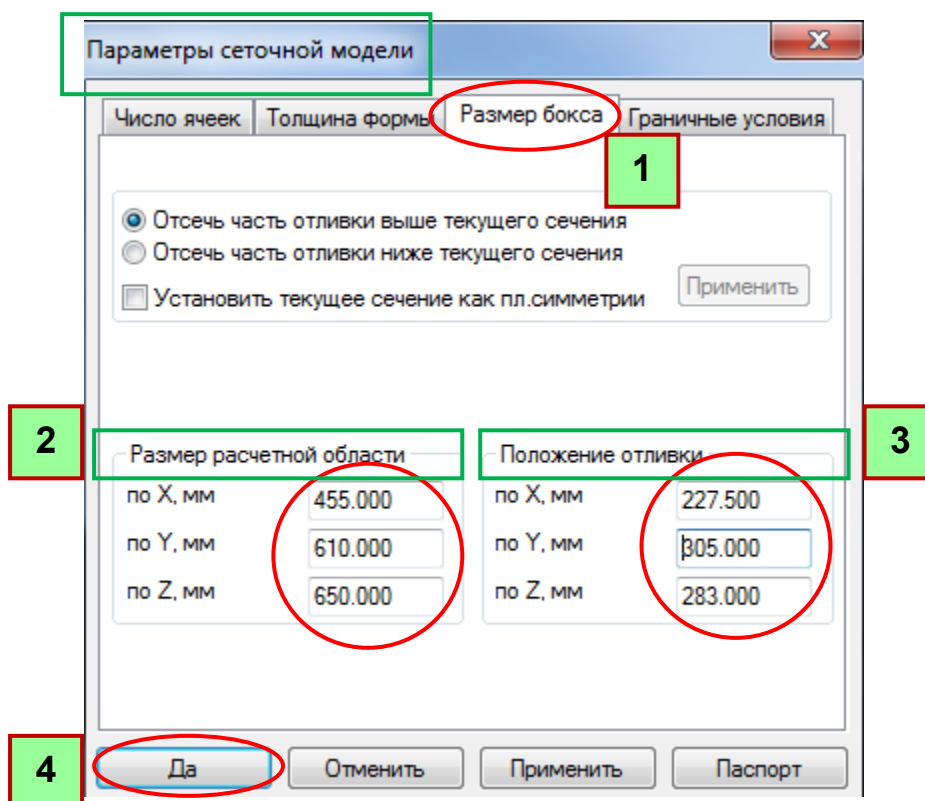
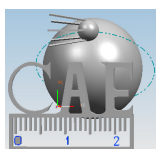


Рис. 12. Задание размеров опок как расчетной области

### Положение отливки в форме

Как правило, технологи рассматривает несколько вариантов положения отливки в форме, опираясь на общие рекомендации. Например, для предотвращения недоливов и спаев тонкие стенки отливки лучше располагать в нижней части формы вертикально или наклонно. Отливки, имеющие геометрию тела вращения с обрабатываемыми поверхностями, лучше располагать в вертикальном положении. Для отливок, имеющих полости, оформляемые стержнями, необходимо обеспечить надежную установку и фиксацию стержней на знаках в нижней полуформе, поскольку крепление стержней в верхней полуформе трудоемко и менее надежно.



## 2.10. Задание размеров элементарных ячеек расчетной сетки

➤ Задайте размеры элементарных ячеек расчетной сетки.

Для этого следует перейти на вкладку **Число ячеек** в окне диалога и в поле ввода **Размер ячеек** ввести расстояние между расчетными узлами в сетке (рис. 13). В нижней части окна дается информация о количестве узлов сетки и требуемом объеме памяти компьютера для расчета с заданным разбиением.

В нашем случае, если задать размер ячейки **3** мм, то в сетке будет создано более 6 миллионов ячеек, из них в самой отливке будет около полумиллиона расчетных узлов и для обработки заданного массива потребуется более 3000 МБ оперативной памяти. От заданного количества ячеек разностной сетки зависит точность вычислений при моделировании, время моделирования и подробность в представлении отливки ячейками сетки.

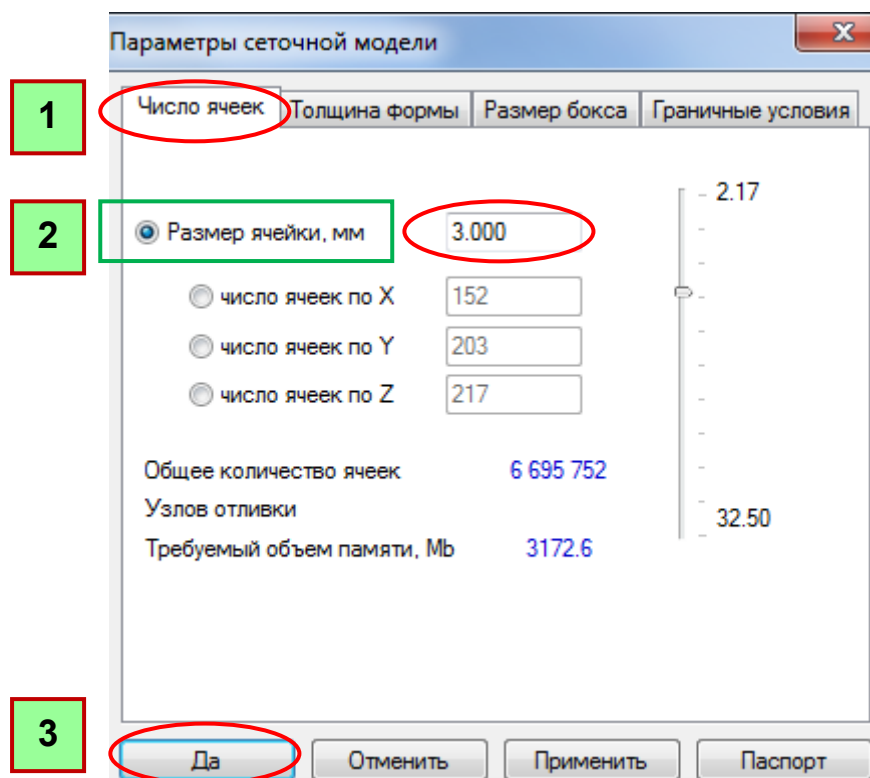
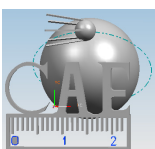


Рис. 13. Задание размера элементарных ячеек расчетной сетки

### Соотношение геометрической модели и расчетной сетки

Элементарные ячейки образуют регулярную прямоугольную сетку. Внутри ячейки может оказаться несколько локальных тел, разделенных внутренними по отношению к ячейке поверхностями раздела. Эти внутренние поверхности раздела в ячейках являются частями исходных границ импортированной геометрии STL.



## 2.11. Изменение положения отливки по вертикали

➤ Измените положение отливки в расчетной области по вертикали.

В рабочем окне появится оранжевый параллелепипед, который ограничивает расчетную область (рис. 14). Все, что попадет в пределы расчетной области, будет участвовать в моделировании.

Пользователь может многократно редактировать размеры расчетной области, размер ячейки и положение отливки внутри расчетной области. Для этого нужно снова нажать пиктограмму **Создать модель**. В нашем случае, чтобы стояк выходил на поверхность, следует изменить положение отливки по оси Z, задав в соответствующем поле ввода значение **378** мм.

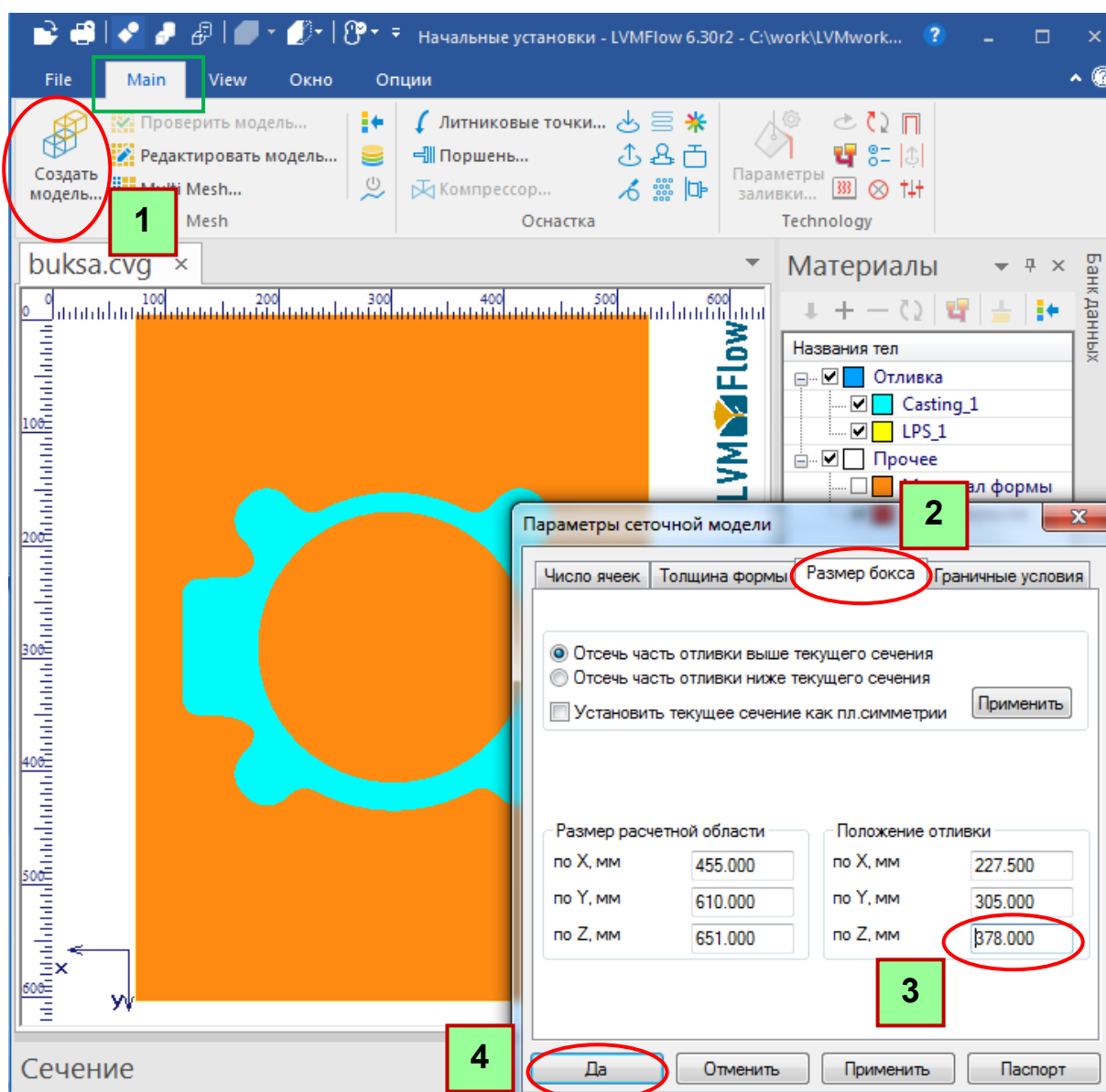
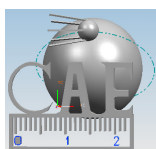


Рис. 14. Изменение положения отливки по вертикали



## 2.12. Проверка качества расчетной сетки

➤ Проверьте качество расчетной сетки. Функция просмотра сетки вызывается кнопкой **Вкл./выкл. вывод сетки** во вкладке **View**. Редактирование расчетной сетки вызывается кнопкой **Редактировать модель** во вкладке **Main**. В открывшемся окне диалога (рис. 15) нужно нажать кнопки **Проверить сетку** > **Закрыть зазор** > **Да**.

**!!! ВАЖНОЕ ЗАМЕЧАНИЕ:** редактирование сетки и закрытие зазоров может существенно улучшить результаты компьютерного моделирования.

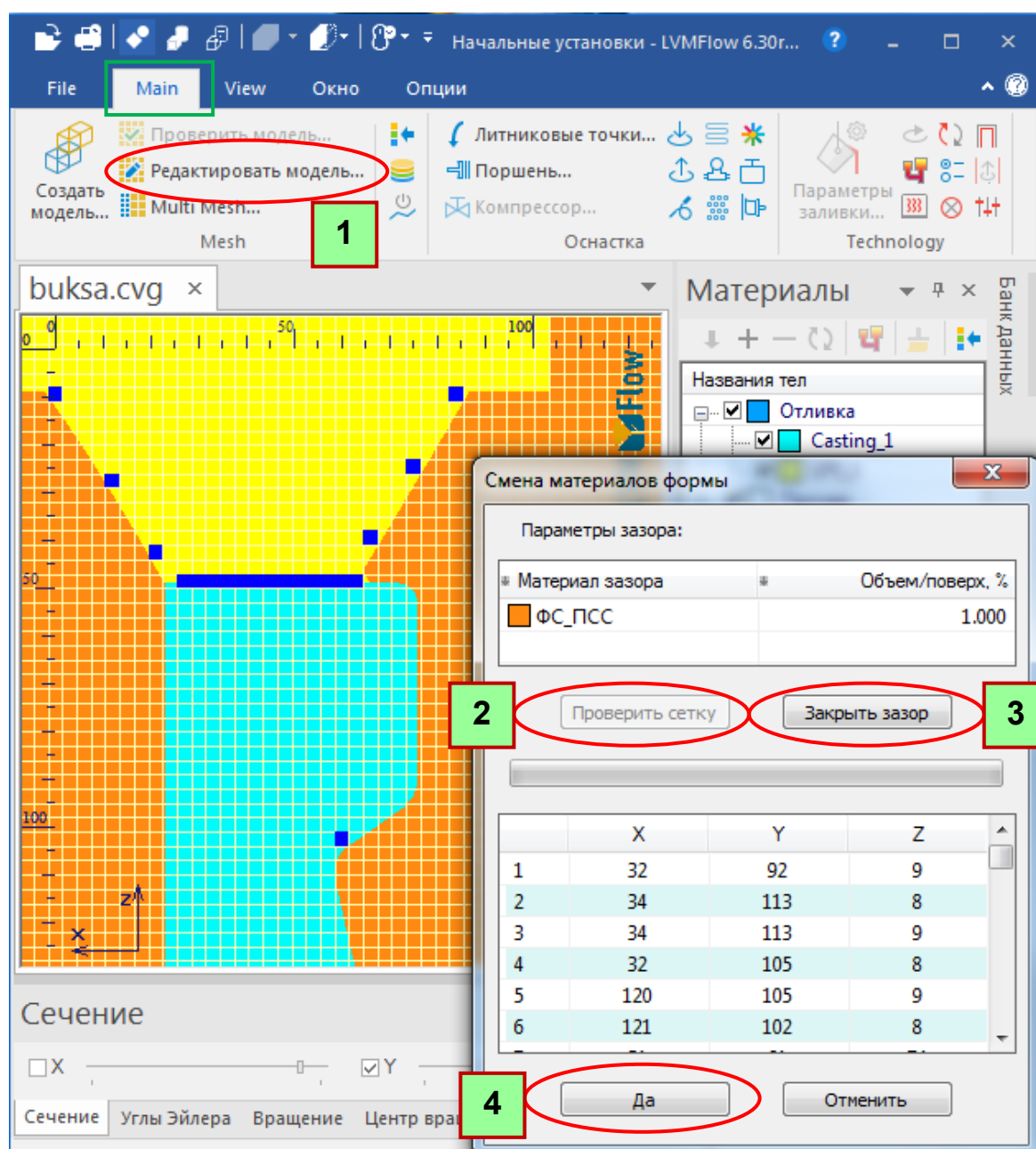
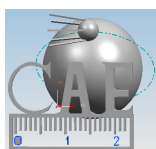


Рис. 15. Редактирование расчетной сетки



## 2.13. Масштабирование и просмотр сетки по сечениям

➤ Чтобы просмотреть сетку, увеличьте масштаб изображения, обратившись в раздел меню **View**. Голубым цветом в сечении расчетной модели отображены ячейки сетки, принадлежащие отливке, желтым – литниково-питающей системе, оранжевым цветом – материалу формы (рис. 16).

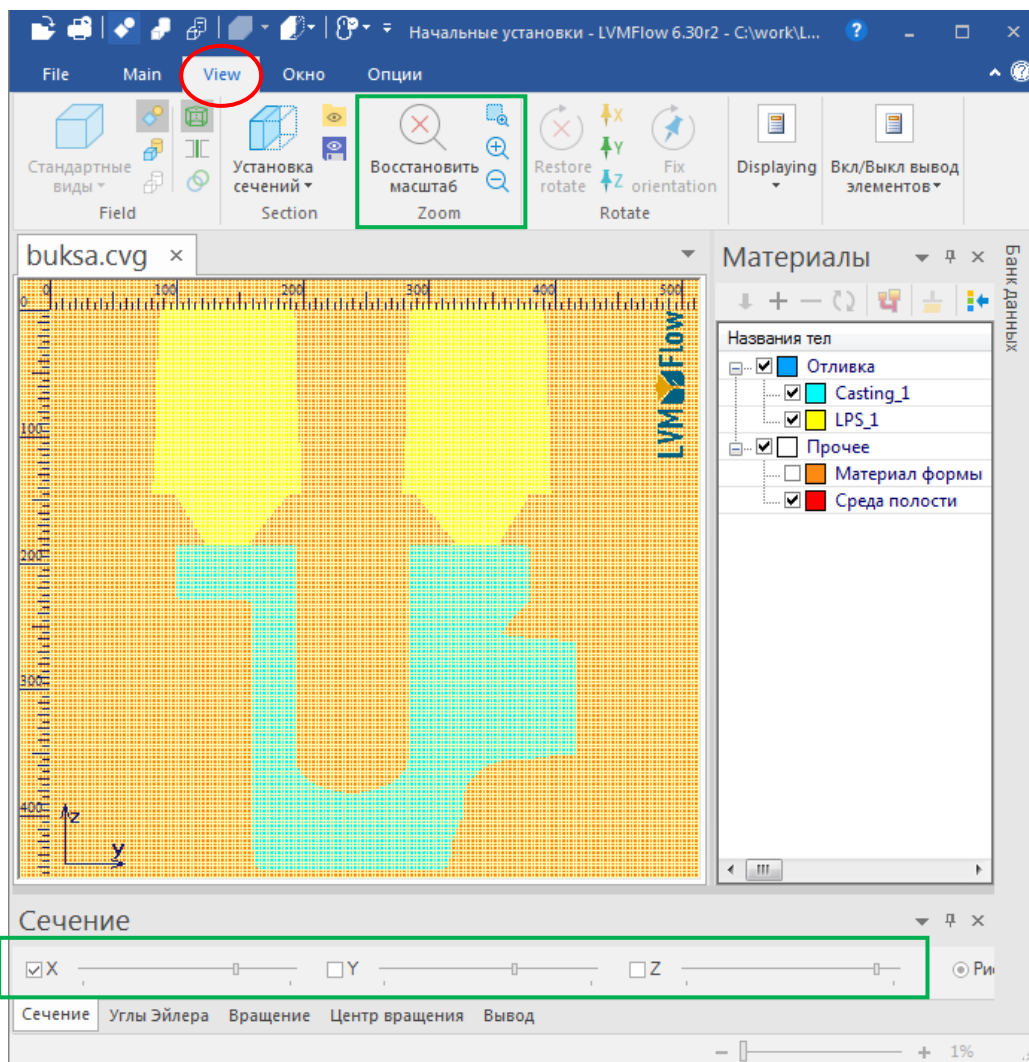
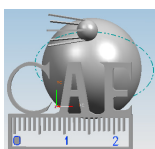


Рис. 16. Масштабирование изображения в рабочем окне


### Представление геометрии в рабочем окне


Изображение отливки и сетки можно изменять в сечениях, используя кнопки на горизонтальной панели инструментов в нижней части рабочего окна. Бегунок позволяет изменять положение сечения для выбранной системы плоскостей (YZ XZ XY).





## 2.14. Инструменты масштабирования


### Масштаб изображения в рабочем окне

В пиктографическом меню присутствует 4 инструмента для изменения масштаба: 

 **Увеличить.** Для увеличения изображения выберите этот инструмент и щелкните на изображении в рабочем окне левой кнопкой мыши.

 **Уменьшить.** Для уменьшения изображения выберите этот инструмент и щелкните на изображении в рабочем окне левой кнопкой мыши.

 **Окно масштабирования.** Выберите этот инструмент, переведите указатель мыши в нужную область, нажмите и отпустите левую кнопку мыши. Переместите указатель мыши в нужном направлении и снова нажмите левую кнопку. Выделенная квадратным контуром область будет увеличена до размеров рабочего окна. Для отказа от масштабирования щелкните правой кнопкой мыши.

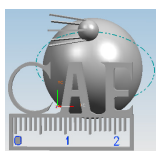
 **Восстановить.** Увеличивает картинку до размеров окна и восстанавливает первоначальное положение отливки. Для восстановления масштаба достаточно нажать эту пиктограмму.

### Литниковая система

По способу подвода расплава в рабочую полость формы литниковые системы делят на нижние, верхние и боковые. В данной работе применяется верхняя литниковая система.

*Достоинства верхней литниковой системы:* малый расход металла; конструкция проста и легко выполнима при изготовлении формы; подача расплава сверху обеспечивает благоприятное распределение температуры в залитой форме (температура увеличивается от нижней части к верхней), а, следовательно, и благоприятные условия для направленной кристаллизации и питания отливки.

*Недостатки:* падающая сверху струя может размыть песчаную форму, что приведет к появлению засоров; при разбрызгивании расплава возникает опасность его окисления и замешивания воздуха в поток с образованием оксидных включений; затрудняется улавливание шлаковых частиц.



### 3. ПОДГОТОВКА РАСЧЕТНОЙ МОДЕЛИ

#### 3.1. Выбор литейной стали из базы данных материалов

При автоматической генерации расчетной сетки материалы в расчетной модели назначаются по умолчанию. По техническому заданию мы заливаем сталь 20Л в песчано-глинистую форму. Изменим данные в окне материалов справа от рабочего окна (рис. 17). Выберем литейную сталь для отливки и материалы формы из базы данных.

➤ Выберите для отливки литейную сталь из базы данных материалов.

Щелкните правой клавишей на строчке с отливкой **Casting\_1** в окне материалов справа. Появится окно диалога. В списке **Класс материала** выберите раздел **Углеродистые стали**. Откройте список **Материал** и выберите сталь **20Л**. Нажмите кнопку **Да**. Аналогично задайте сталь 20Л для литниково-питающей системы (строчка **LPS**).

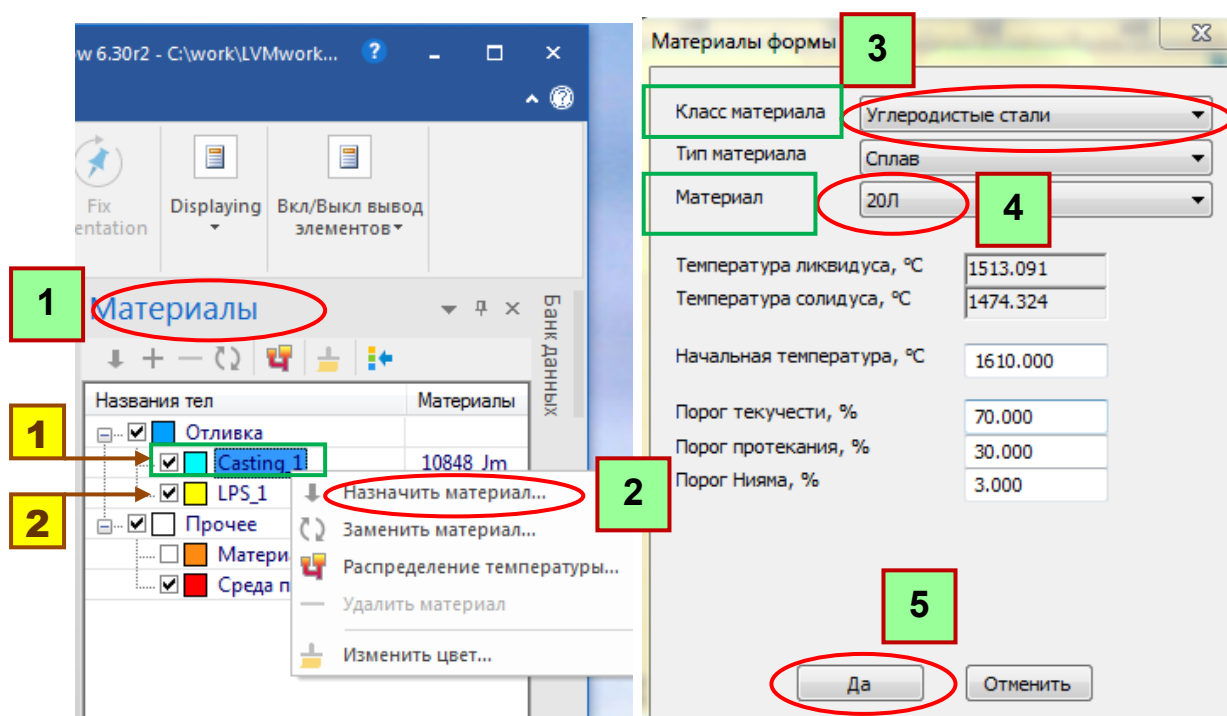
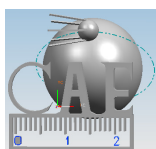


Рис. 17. Выбор литейной стали из списка

#### Этапы компьютерного моделирования

К основным этапам компьютерного моделирования относятся: постановка задачи; определение объекта моделирования; разработка концептуальной модели; формализация; планирование и проведение компьютерных экспериментов; анализ и интерпретация результатов.





## 3.2. Назначение температуры расплава

Согласно техническому заданию, при заливке температура стали составляет  $1580^{\circ}\text{C}$ . По умолчанию в базе данных материалов для литейной стали 20Л (рис. 18) указана начальная температура расплава  $1610^{\circ}\text{C}$ .

➤ Измените температуру расплава в позиции **Начальная температура**.

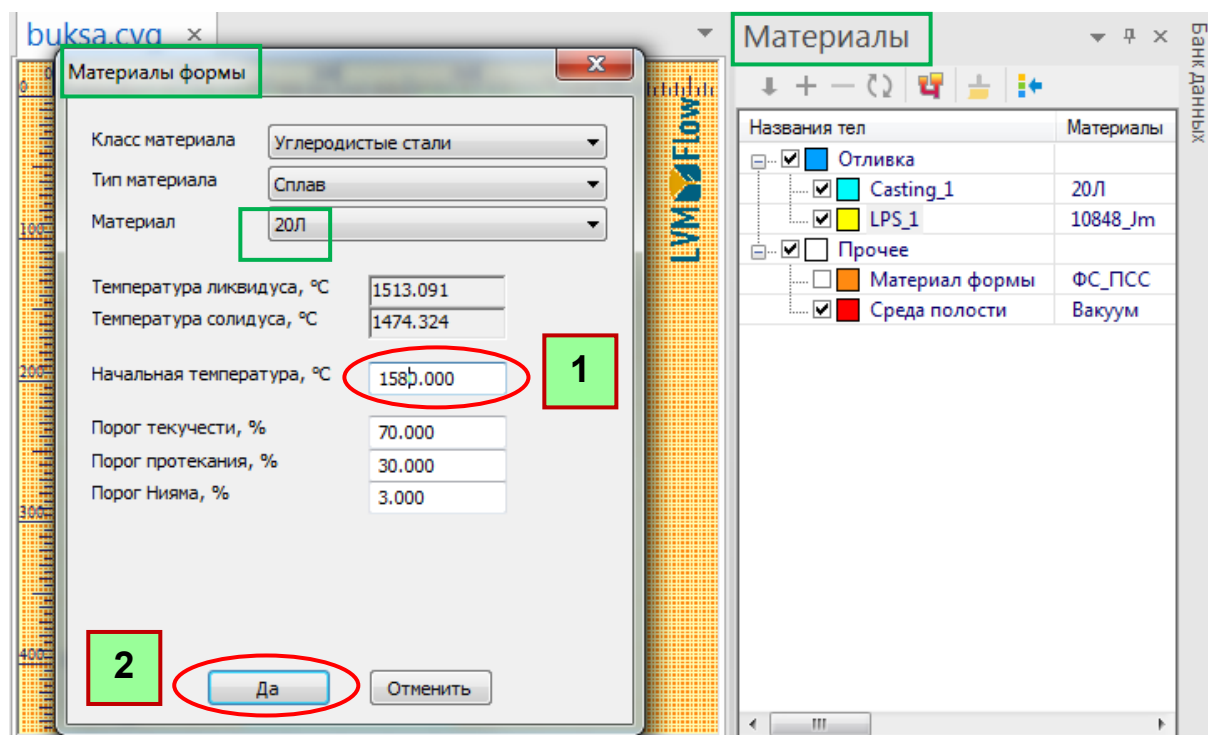


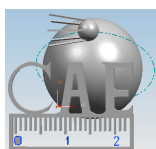
Рис. 18. Назначение температуры стали при заливке

### База данных материалов LVMFlow

Данные по материалам LVMFlow хранятся в формате MS ACCESS. База содержит данные по литейным сталям и сплавам, а также по материалам литейных форм, стержневым смесям другим материалам, задействованным в технологических процессах литья.

Литейные сплавы и стали разделены на классы в соответствии с химическим составом. Металлические сплавы, принадлежащие к одному классу, имеют общую базовую диаграмму фазовых состояний. Теплофизические свойства для каждого сплава (теплопроводность, удельная теплоемкость, плотность, коэффициент линейного расширения) вводятся и сохраняются в виде температурных зависимостей.

В отдельный класс вынесены материалы формы и вспомогательные материалы. Для этих материалов не задается диаграмма состояний и температурный интервал кристаллизации.



### 3.3. Выбор материала литейной формы

➤ Выбрать и назначить материал литейной формы из базы данных.

Выберите строчку **Материал формы** в окне материалов справа (рис. 19) и вызовите правой клавишей мыши или пиктограммой окно диалога для назначения материалов. По умолчанию в качестве материала формы сделан выбор, который настраивается пользователем. Следует выбрать песчано-глинистую смесь. Откройте список **Материал** в окне диалога и выберите позицию **Песок**.

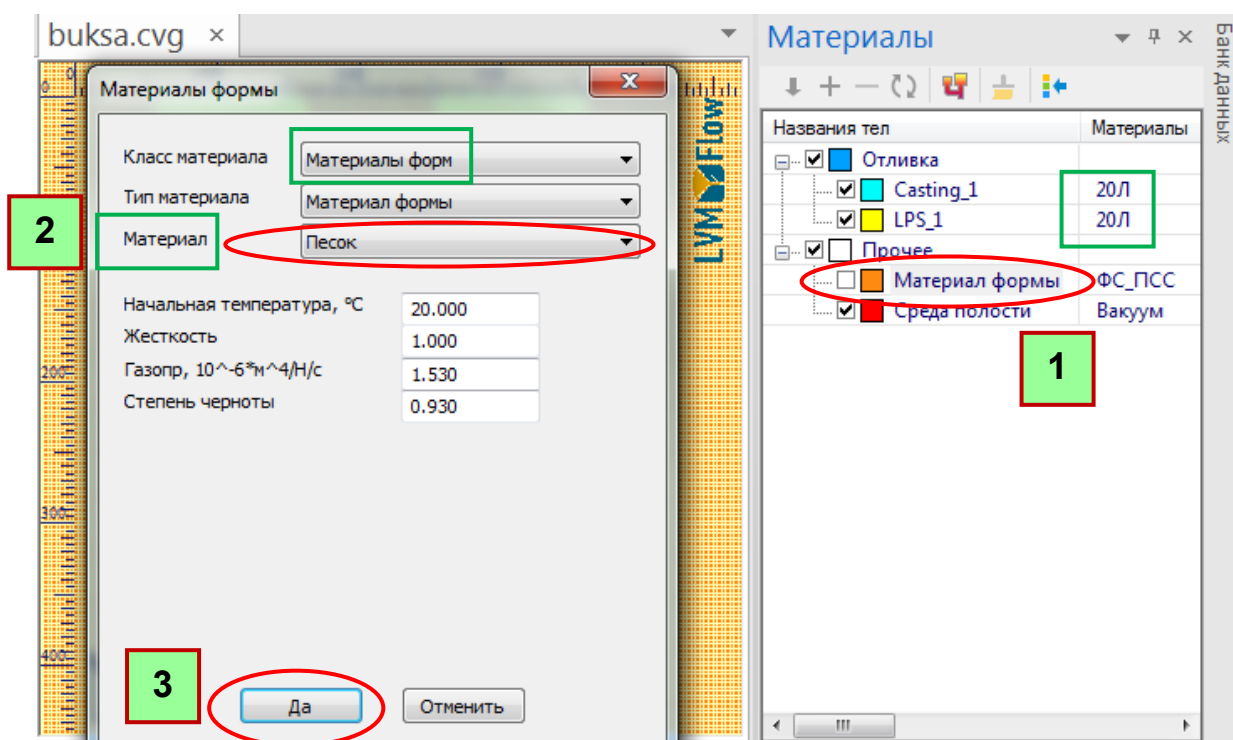
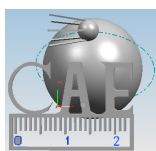


Рис. 19. Выбор материала формы из списка

#### Формовочные и стержневые смеси

Формы и стержни изготавливаются из специальных смесей, для приготовления которых используются природные и искусственные материалы.

*Песок* – основной компонент формовочных и стержневых смесей. *Глина* является связующим веществом, обеспечивающим прочность и пластичность, обладает термической устойчивостью. Для предотвращения пригара и улучшения чистоты поверхности отливок используют противопригарные материалы: для сырых форм – *припылы*; для сухих форм – краски. В качестве припылов используют: для чугунных отливок – смесь оксида магния, древесного угля, порошкообразного графита; для стальных отливок – смесь оксида магния и огнеупорной глины, пылевидный кварц. *Противопригарные краски* представляют собой водные суспензии этих материалов с добавками



### 3.4. Задание граничных условий

К важным граничным условиям нашей задачи относится место подвода расплава во время заливки, которое в расчетной модели называется литниковой точкой и задается сечением. Указываемое в сеточной модели сечение должно находиться на границе расчетной области.

➤ Перейдите в режим визуализации (рис. 20) горизонтальных сечений **XY** (ось **Z**) и бегунком справа на панели инструментов поднимитесь в верхнюю плоскость расчетной модели, переместив бегунок в крайнее правое положение.

➤ Нажмите в меню слева пиктограмму **Литниковые точки**. Появится окно диалога **Задание литниковых точек**.левой клавишей мыши при нажатой клавише **Shift** на клавиатуре укажите голубое сечение литниковой чаши на поверхности. Выбранное сечение окрасится в красный цвет.

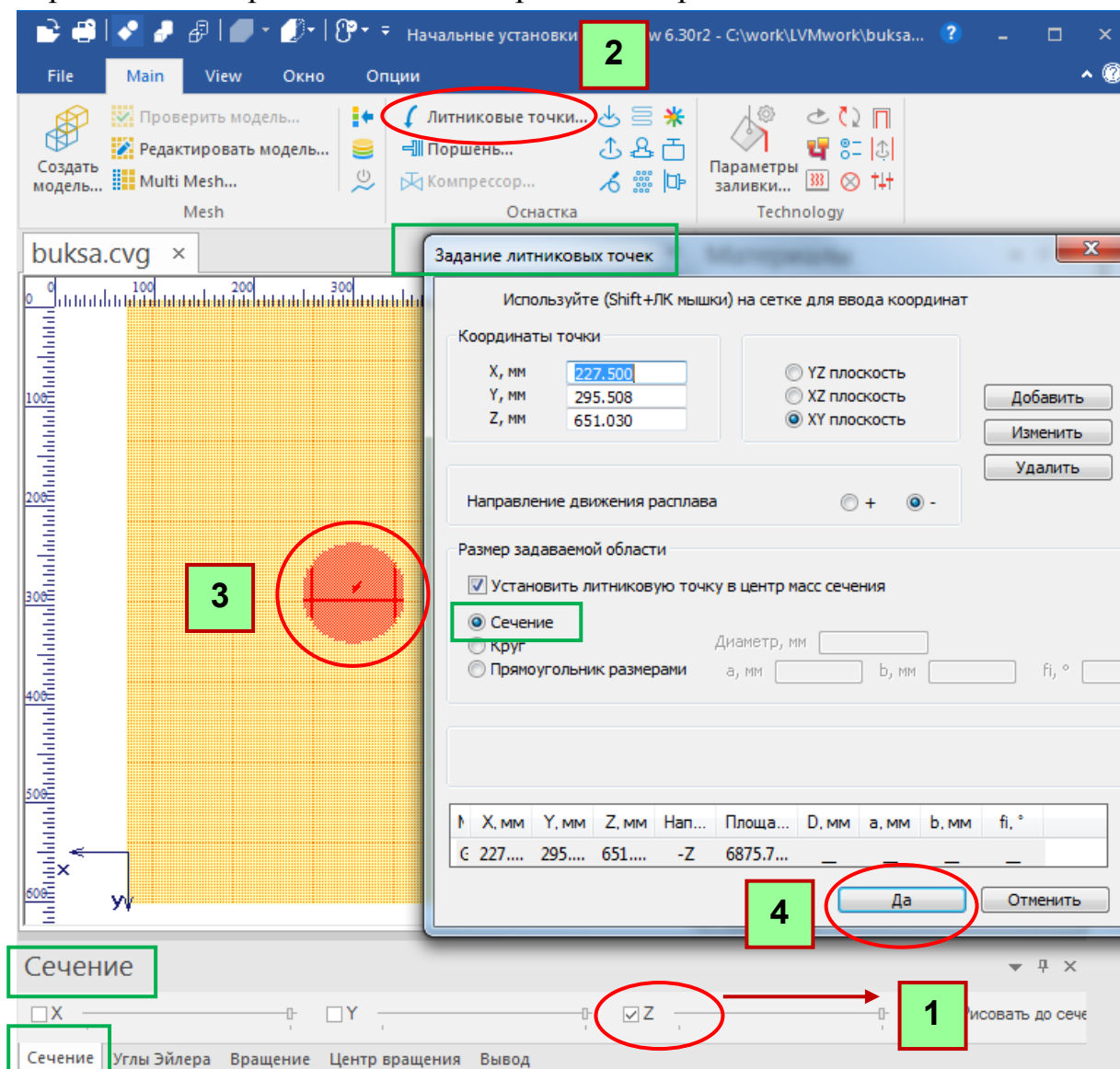
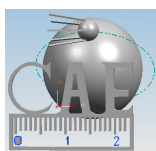


Рис. 20. Задание литниковой точки



### 3.5. Просмотр геометрии по сечениям

Можно скрыть литейную форму и просмотреть заполняемую полость формы по сечениям. Для этого ➤ нажмите кнопку **Вывод изометрии** на панели инструментов сверху. Двигая бегунок влево или вправо по шкале с нижней части рабочего окна, можно перемещать плоскость сечения.

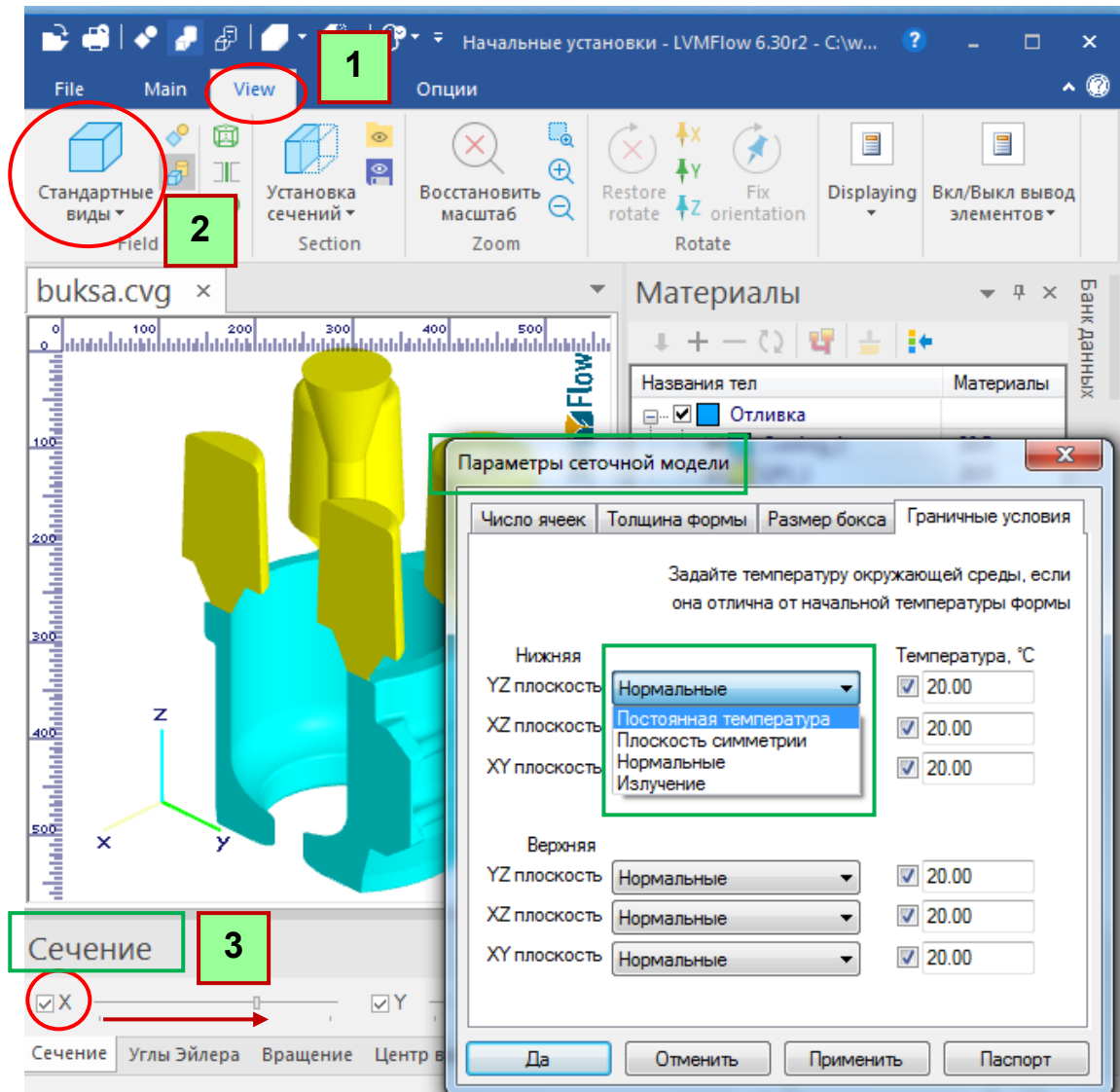
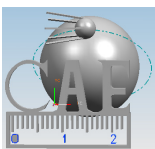


Рис. 21. Геометрия полости внутри литейной формы

### Задачи компьютерного моделирования

Компьютерное моделирование литейной технологии дает возможность наблюдать заполнение литейной формы расплавом, затвердевание отливки, формирование тепловых узлов и усадочных дефектов; выявлять места затрудненной усадки и возможное образование трещин при кристаллизации, прогнозировать механические свойства.



## Возможные граничные условия расчетной модели в LVMflow

Граничные условия задаются или принимаются по умолчанию при выборе параметров сетки (рис. 21). В дальнейшем граничные условия можно редактировать и переопределять, обращаясь вновь к настройкам сетки через пиктограмму **Создать модель**.

*Постоянная температура* задается, когда на поверхности поддерживается постоянная температура, например, при охлаждении водой.

*Плоскость симметрии* задается для симметричных объектов, когда в расчет берется половина геометрии. Тепловой поток через плоскость симметрии равен нулю.

*Нормальные условия* предполагают, что теплоотвод с поверхности осуществляется в бесконечную среду; эта опция задана по умолчанию.

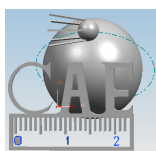
*Излучение* выбирается при использовании открытых прибылей. В этом случае поверхность граничит с атмосферой, и теплоотдача через данную поверхность осуществляется излучением и конвекцией.

## Технологические параметры процесса заливки

*Температура расплава*, поступающего в форму, влияет на скорость твердевания отливки, ликвацию химических элементов, образование дочных раковин и горячих трещин, а также на образование пригара. При ливке углеродистых и низколегированных сталей температура расплава, поступающего в форму, должна превышать температуру ликвидуса на 40–100 градусов. Чем массивнее отливка и сложнее геометрия пути, по которому идет расплав, тем больше снижается температура расплава при заливке. Понижение температуры расплава при прохождении литниковой системы обычно составляет 5–15 градусов.

*Скорость течения расплава* также является важной характеристикой технологического процесса. Повышенная скорость может вызывать эрозию стенок формы, что приводит к появлению в теле отливки песчаных засоров. Технологический процесс заливки литейной формы и конструкция литниковой системы оказывают большое влияние на качество отливок.

При разработке технологического процесса ведется расчет оптимальной массовой скорости заливки, осуществляется выбор типа ковша, рациональной конструкции литниковой системы и мест подвода питателей в полость формы.



### 3.6. Сохранение сеточной модели

➤ Сохраните сеточную модель для последующих расчетов, предварительно создав папку проекта **bukxa** (рис. 22) и обратившись в раздел меню **Файл** > **Записать**; выберите созданную папку в окне запроса.

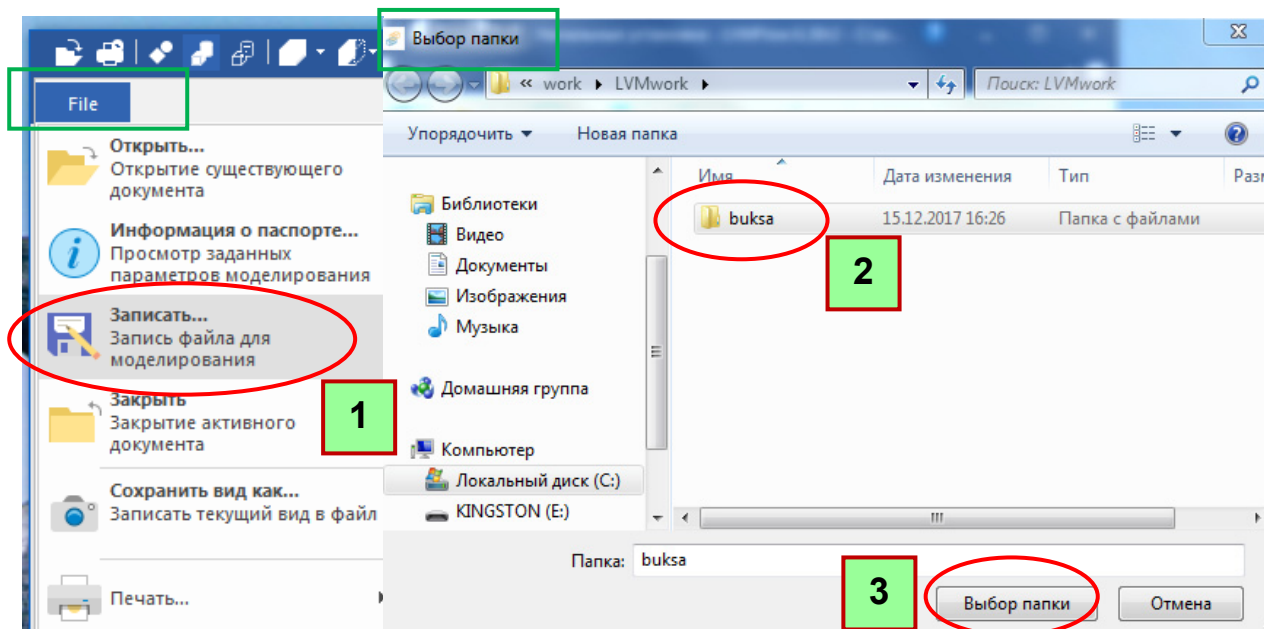


Рис. 22. Сохранение подготовленной сеточной модели

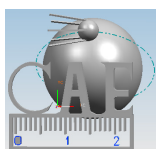
#### Температурное поле

При моделировании литейных технологий в первую очередь вычисляется распределение температуры в отливке и литейной форме, обусловленное всеми процессами распространения теплоты в системе.

Совокупность значений температуры  $T$  во всех точках тела в каждый момент времени  $t$  процесса распределения теплоты называется *температурным полем*, или распределением температуры в данном теле.

Температура – скалярная величина, поэтому температурное поле – скалярное поле. Температурное поле в трехмерном пространстве выражается непрерывной и дифференцируемой функцией четырех переменных – времени и пространственных координат  $T(x, y, z, t)$ .

Важное значение при анализе расчетных параметров и прогнозировании возможных проблем играет градиент температурного поля. Например, повышение температурного градиента на фронте направленной кристаллизации в случае изготовления литых лопаток приводит к образованию плотной тонкодисперсной микроструктуры с пониженной пористостью.



## 4. ВЫПОЛНЕНИЕ РАСЧЕТОВ

### 4.1. Запуск процессорного модуля

➤ Запустите модуль **Моделирование затвердевания**, выбрав соответствующую кнопку в стартовом окне программы (рис. 23).

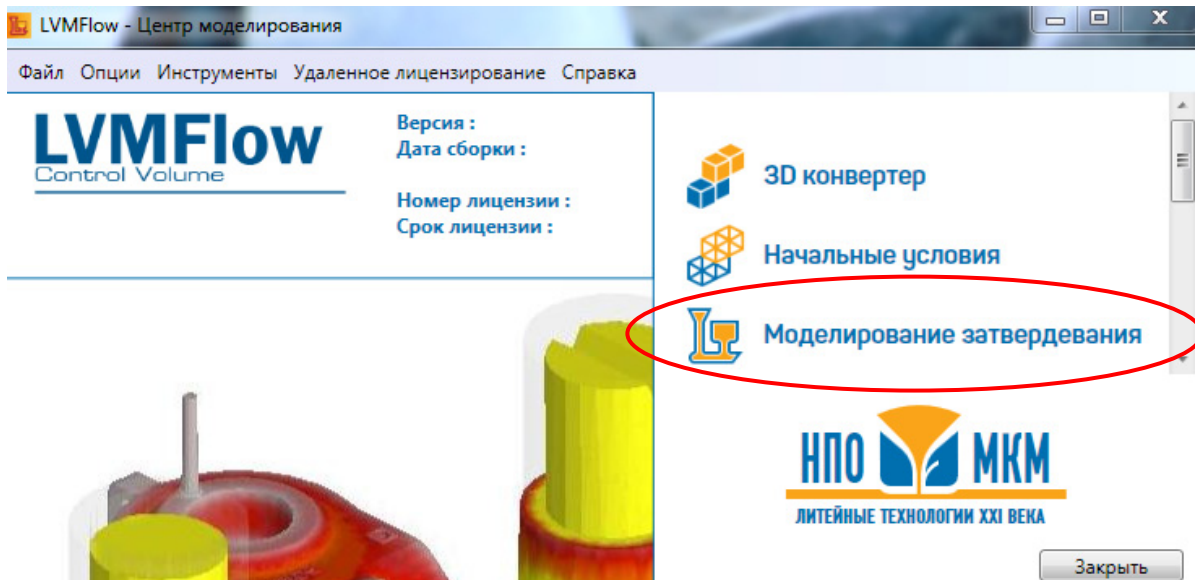


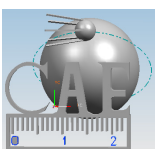
Рис. 23. Включение расчетного модуля «Моделирование затвердевания»

### Расчетные модули LVMFlow

Модуль **Моделирование затвердевания** моделирует процесс затвердевания отливки. При этом считается, что отливка уже заполнена металлом. Заполнение литейной формы расплавом не моделируется.

При моделировании в процессорном модуле «Моделирование затвердевания» заполнение литейной формы расплавом считается мгновенным; учитываются фазовые переходы и гравитация. Следует проверить, что отливка правильно ориентирована относительно гравитации. При решении задач затвердевания игнорируются особенности кристаллического строения твердого металла. Металл представляется сплошной средой. Затвердевание анализируется на основе теории теплопроводности с учетом особенностей теплообмена затвердевающего

Модуль **Полная задача** моделирует процесс заполнения формы металлом и процесс затвердевания отливки в полном варианте. Процесс расчета длится до момента полного затвердевания отливки.



## 4.2. Импортирование расчетной модели в процессор

➤ Откройте файл \*SIM с подготовленной расчетной моделью (рис. 24), в нашем случае маршрут такой: work > LVMwork > buksa > Simulation > buksa.sim.

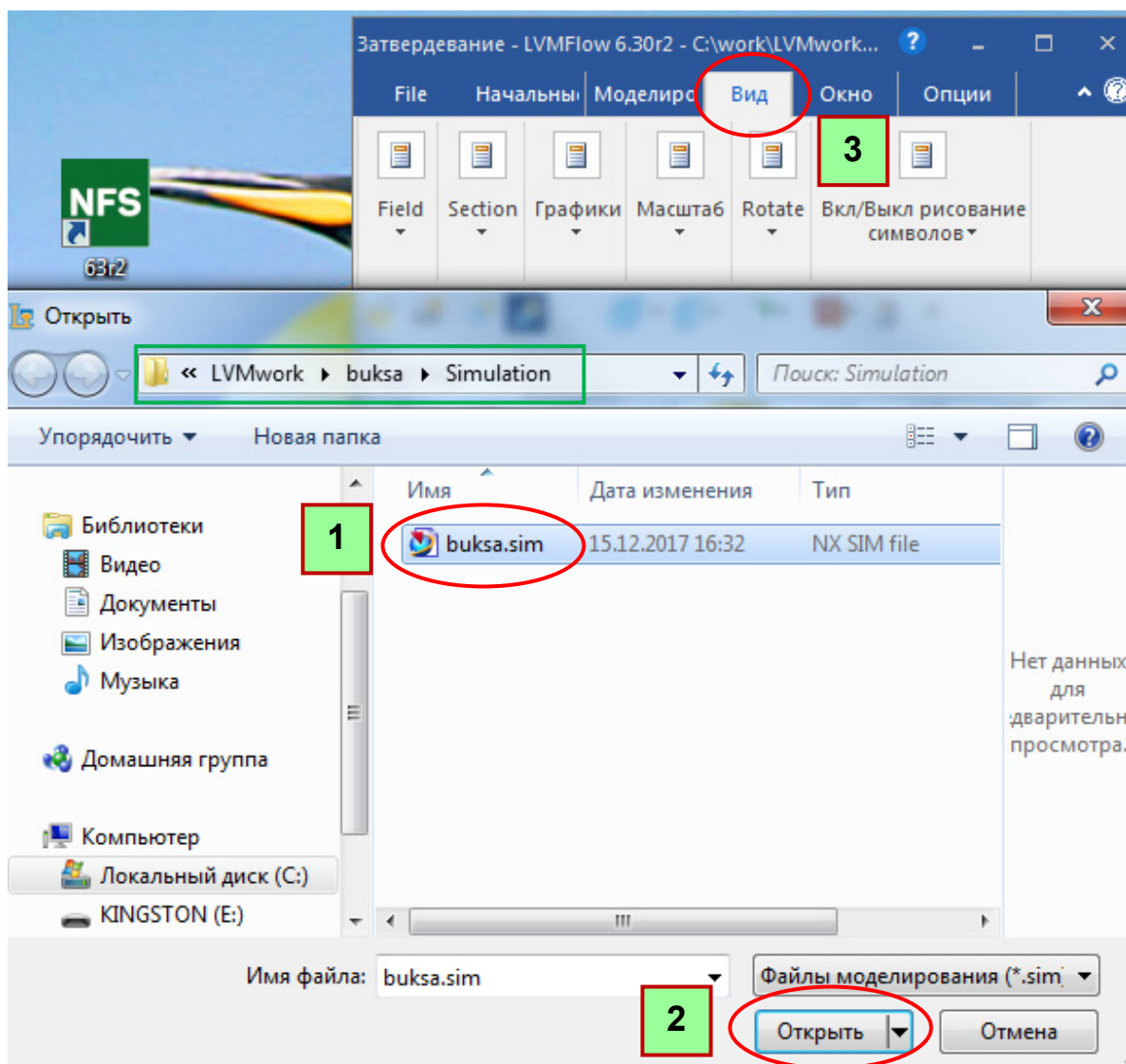
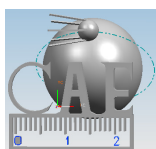


Рис. 24. Открытие файла с расчетной моделью

### Положение отливки и литниковая система


Выбранное положение отливки в форме должно способствовать конструированию наиболее простой литниковой системы. Литниковая система должна подводить расплав к полости формы по кратчайшему пути. Расплав должен поступать в полость формы спокойно, не фонтанируя и не размывая стержни и выступающие части формы.





### 4.3. Запуск вычислений

➤ Сделайте настройки (рис. 24) (например, во вкладке **Вид** нажмите пиктограмму **Полупрозрачная модель** и выберите в списке **Установить поле** позицию **4 вида**). При этом выводится 4 окна, высвечиваются поля сетки, температуры, жидкой фазы и усадки (рис. 25).

➤ Запустите расчет нажатием кнопки  **Включить моделирование** во вкладке **Моделирование**.

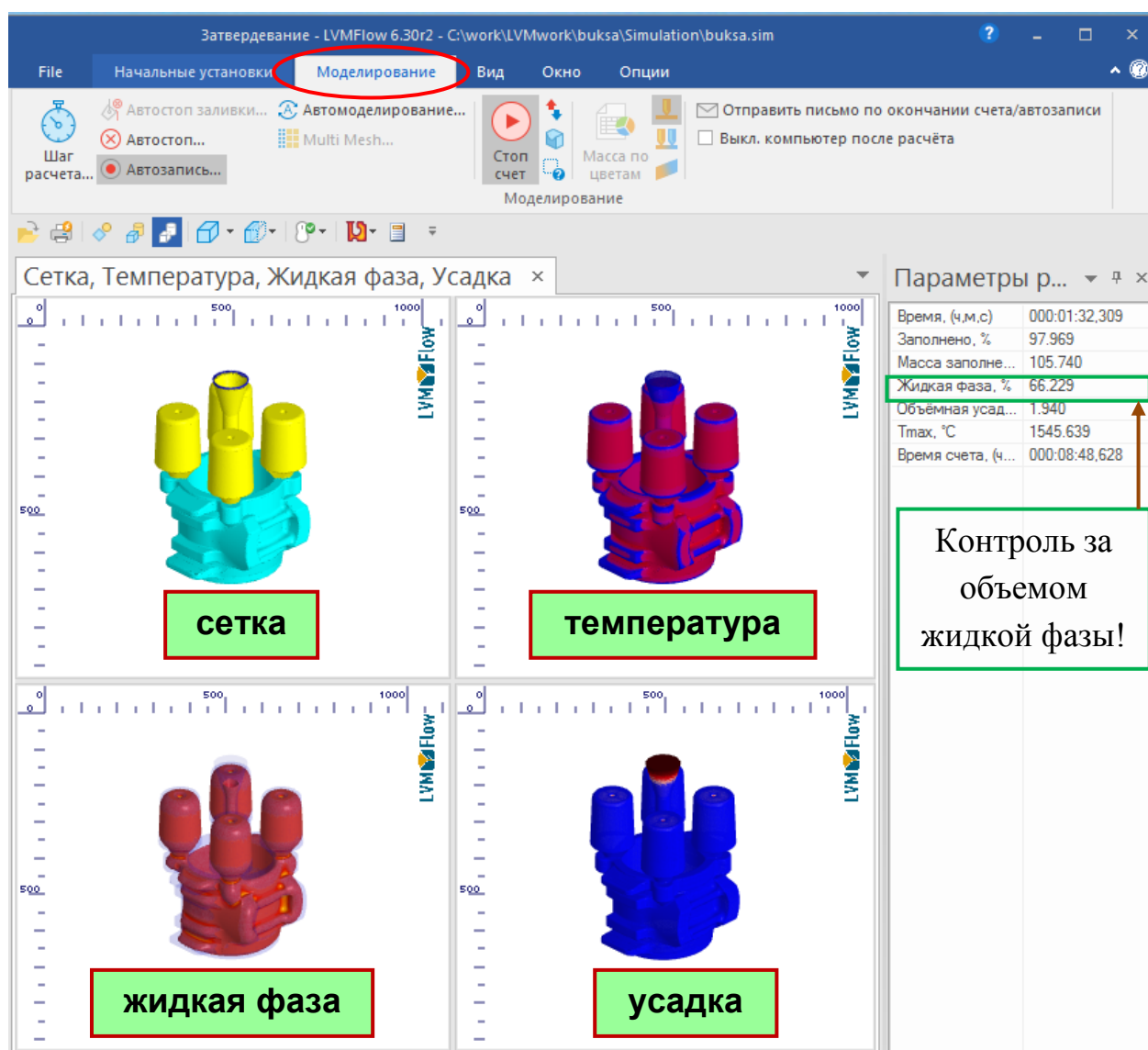
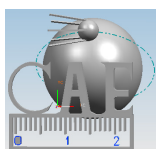


Рис. 25. Визуализация расчета в четырех окнах

Не останавливая расчет, можно наблюдать за изменением различных расчетных параметров. Пользователь может самостоятельно открыть несколько окон с интересующими его полями и автоматически расположить их все на экране, обратившись в меню: **Окно** > **Упорядочить**. Когда объем жидкой фазы снижается до 0%, расчет по умолчанию завершается.



## 5. АНАЛИЗ РАСЧЕТНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

### 5.1. Запуск постпроцессорного модуля

➤ Запустите постпроцессорный модуль **Банк паспортов** (рис. 26), выбрав соответствующую кнопку в стартовом окне программы. В постпроцессорном модуле доступны для просмотра и обработки расчетные результаты.

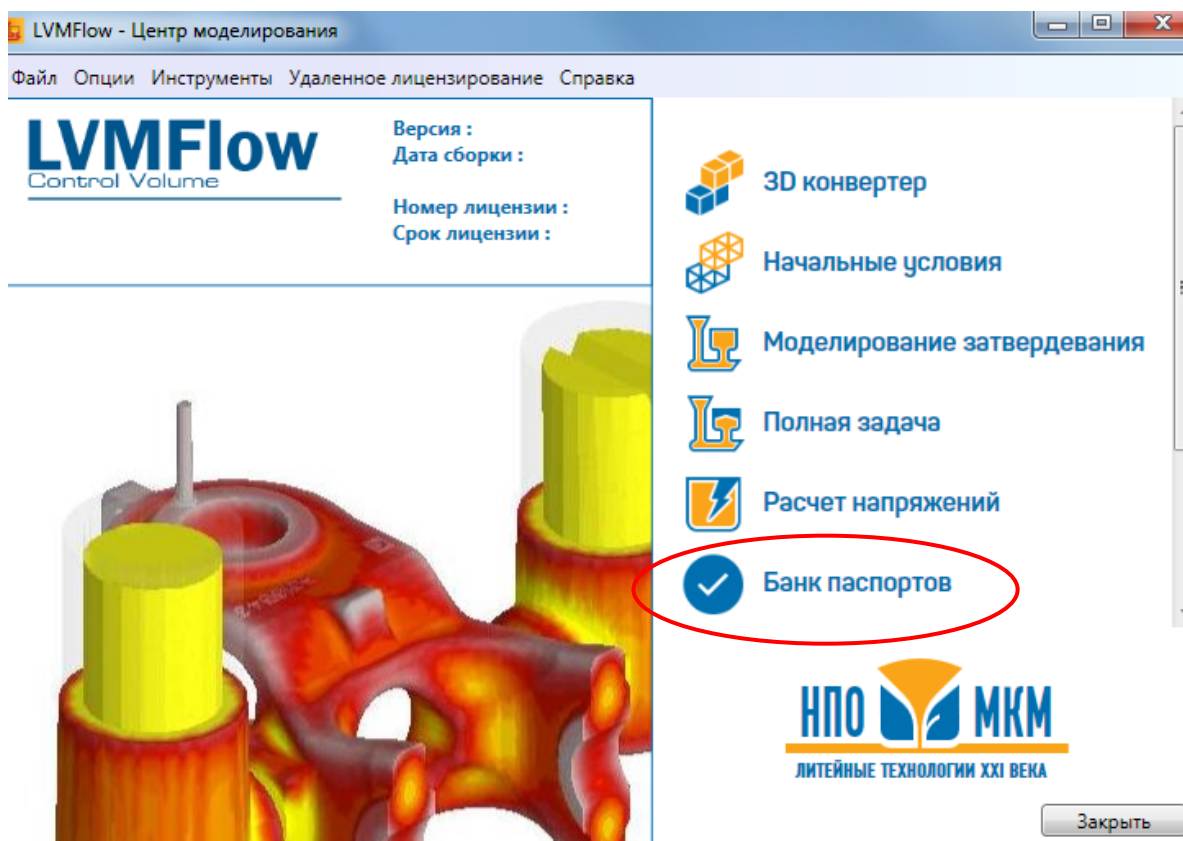
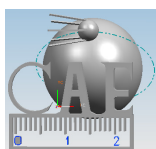


Рис. 26. Включение модуля «Банк паспортов»

### Типы усадочных дефектов

По механизму образования выделяют два типа усадочных дефектов в отливках: раковины (макропористость) и микропористость.

*Макропористость* образуется в отливке при недостатке питания выше зеркала расплава, когда отсутствует необходимый объем жидкого металла для компенсации усадки и при затвердевании появляются изолированные объемы расплава. *Микропористость* образуется в отливке при недостатке давления ниже зеркала в области теоретически достаточного питания. Снижение давления обусловлено затрудненным движением жидкой фазы в частично затвердевшем объеме. Для прогнозирования микропористости решается дифференциальное уравнение фильтрационного течения.



## 5.2. Анализ усадочных дефектов

➤ Перейдите к просмотру расчетных результатов и выберите в меню позицию **Усадочные поля** (рис. 27).

Bank паспортов - LVMFlow 6.30r2 - C:\work\LVMwork\buksa\buksa.psp

File Main Вид Окно Опции

Установить поле

4 вида

Температура

Жидкая фаза

Твердая фаза

Захват воздуха

Временные поля

Тепловой модуль

Усадочные поля

Усадка

2D-Дефекты

Материалы

Названия тел	Материалы	Начальная темп
<input checked="" type="checkbox"/> Casting_1	20Л	1580.
<input checked="" type="checkbox"/> LPS_1	20Л	1580.
<input type="checkbox"/> Материа...	Песок	20.
<input type="checkbox"/> Среда п...	Вакуум	20.

Индикация

[X.Y.Z], мм	[317.675 , 609.000 , 263.417]
2D-Дефекты, %	11.548
Сглаз	
Мин	0.000
Макс	1.000
Материал формы	
Мин	

Записи

Количество записей: 15

Время, (ч,м,с)	Заполнено, %	Масса, кг
2 <input type="checkbox"/> 000:00:01,600	99.811	105.740
3 <input type="checkbox"/> 000:00:14,666	99.305	105.740
4 <input type="checkbox"/> 000:00:26,289	99.010	105.740
5 <input type="checkbox"/> 000:00:35,720	98.813	105.740
6 <input type="checkbox"/> 000:01:04,014	98.340	105.740
7 <input type="checkbox"/> 000:01:19,734	98.125	105.740
8 <input type="checkbox"/> 000:01:57,460	97.690	105.740
9 <input type="checkbox"/> 000:02:44,617	97.248	105.740
10 <input type="checkbox"/> 000:03:47,494	96.769	105.740
11 <input type="checkbox"/> 000:05:02,945	96.299	105.740
12 <input type="checkbox"/> 000:06:56,123	95.779	105.740
13 <input type="checkbox"/> 000:09:42,746	95.153	105.740
14 <input type="checkbox"/> 000:16:28,300	94.105	105.740
15 <input checked="" type="checkbox"/> 000:17:09,170	94.026	105.740

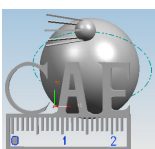
Сечение

Сечение Углы Эйлера Вращение Центр вращения Вывод

Рис. 27. Результат расчета усадочных дефектов

### Численный параметр усадки

Параметр «усадка» представляет вероятностное распределение усадочных дефектов. Например, 10 % усадки в расчетном узле означает, что в окрестности этого узла 90 % объема занимает металл и 10 % объема металлом не занято. Условно локальную усадку можно ассоциировать с плотностью металла в расчетном узле.



## ИНДИВИДУАЛЬНОЕ ЗАДАНИЕ

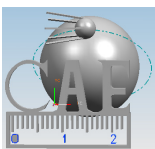
В качестве индивидуального задания следует провести компьютерный анализ технологии литья той детали, которая была построена на предыдущем занятии при изучении объемного моделирования в программе CAD/CAM ADEM. Следует построить такую литниково-питающую систему, которая обеспечивает отсутствие усадочных дефектов в отливке.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Следует особо отметить обучающую роль компьютерных систем, которые предоставляют возможность в сжатые сроки просмотреть несколько вариантов технологий и понять причины возможного появления брака. Моделирующая программа становится инструментом, который позволяет в относительно короткие сроки повысить квалификацию начинающего технолога и эффективность проектирования технологий.

## ИСТОЧНИКИ ИНФОРМАЦИИ

Основную информацию о программе LVMFlow можно найти на сайте разработчика: [http://www.wp\\_lvm.mkmssoft.ru](http://www.wp_lvm.mkmssoft.ru); дополнительную информацию также можно найти на сайте Техноцентра компьютерного инжиниринга УрФУ: <https://cae.urfu.ru>.



*Учебный электронный текстовый ресурс*

**Огородникова Ольга Михайловна**

**КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ  
ЛИТЕЙНОЙ ТЕХНОЛОГИИ  
В ПРОГРАММНОЙ СРЕДЕ LVMFLow**

Материалы для методических указаний к практической работе

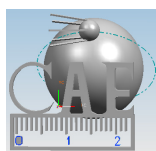
**Подготовка к публикации**      *А.В. Овчинниковой*  
   *Н.В. Лутовой*  
**Компьютерная верстка**      *О.М. Огородниковой*

**Рекомендовано Методическим советом УрФУ**  
**Разрешен к публикации 07.11.2018**  
**Электронный формат – pdf**  
**Объем 1,47 уч.-изд. л.**



620002, Екатеринбург, ул. Мира, 19

**Информационный портал УрФУ**  
<http://study.urfu.ru>



Екатеринбург · · УрФУ · · +7 (343) 375 94 03

[o.m.ogorodnikova@bk.ru](mailto:o.m.ogorodnikova@bk.ru) · · <http://cae.urfu.ru>

© О.М.Огородникова · · · Техноцентр компьютерного инжиниринга · · · 2021