



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова»



УТВЕРЖДАЮ  
Директор ИММиМ  
А.С. Савинов

20.02.2020 г.

**РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ (МОДУЛЯ)**

***ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В МЕТАЛЛУРГИИ***

Направление подготовки (специальность)  
22.04.02 Metallургия

Направленность (профиль/специализация) программы  
Литейное производство

Уровень высшего образования - магистратура

Форма обучения  
очная

|                     |  |
|---------------------|--|
| Институт/ факультет | Институт металлургии, машиностроения и материалобработки |
| Кафедра             | Литейных процессов и материаловедения                    |
| Курс                | 1  |
| Семестр             | 1  |

Магнитогорск  
2020 год

Рабочая программа составлена на основе ФГОС ВО по направлению подготовки 22.04.02 Metallургия (уровень магистратуры) (приказ Минобрнауки России от 24.04.2018 г. № 308)

Рабочая программа рассмотрена и одобрена на заседании кафедры Литейных процессов и материаловедения

19.02.2020, протокол № 8

Зав. кафедрой  Н.А. Феоктистов

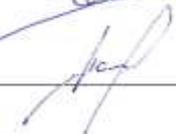
Рабочая программа одобрена методической комиссией ИММиМ

20.02.2020 г. протокол № 5

Председатель  А.С. Савинов

Рабочая программа составлена:

доцент кафедры ЛПиМ, канд. техн. наук

 Потанов М.Г.

Рецензент:

зав. кафедрой ПЭиБЖД, канд. техн. наук

 Перятинский А.Ю.

## Лист актуализации рабочей программы

---

---

Рабочая программа пересмотрена, обсуждена и одобрена для реализации в 2021 - 2022 учебном году на заседании кафедры Литейных процессов и материаловедения

Протокол от \_\_\_\_\_ 20\_\_ г. № \_\_\_\_  
Зав. кафедрой \_\_\_\_\_ Н.А. Феоктистов

---

---

Рабочая программа пересмотрена, обсуждена и одобрена для реализации в 2022 - 2023 учебном году на заседании кафедры Литейных процессов и материаловедения

Протокол от \_\_\_\_\_ 20\_\_ г. № \_\_\_\_  
Зав. кафедрой \_\_\_\_\_ Н.А. Феоктистов

### 1 Цели освоения дисциплины (модуля)

Целями освоения дисциплины являются:

- изучение принципов построения и эксплуатации информационных систем в технологических процессах в металлургии и литейном производстве;
- основ информационных систем оперативного производственного менеджмента с целью целенаправленного использования информации для повышения эффективности выполнения производственных задач;
- принципов хранения, обработки и эффективного поиска, анализа и синтеза информации в банках и базах данных.

### 2 Место дисциплины (модуля) в структуре образовательной программы

Дисциплина Информационные технологии в металлургии входит в часть учебного плана формируемую участниками образовательных отношений образовательной программы.

Для изучения дисциплины необходимы знания (умения, владения), сформированные в результате изучения дисциплин/ практик:

Для изучения дисциплины необходимы знания (умения, владения), сформированные на предшествующем уровне образования в результате изучения дисциплин Информатика и информационные технология, Математика, Физика, Химия.

Знания (умения, владения), полученные при изучении данной дисциплины будут необходимы для изучения дисциплин/практик:

- Моделирование и оптимизация технологических процессов
- Организация и математическое планирование эксперимента
- Организация научно-практических исследований
- Экспериментальные научно-технические исследования

### 3 Компетенции обучающегося, формируемые в результате освоения дисциплины (модуля) и планируемые результаты обучения

В результате освоения дисциплины (модуля) «Информационные технологии в металлургии» обучающийся должен обладать следующими компетенциями:

| Код индикатора | Индикатор достижения компетенции   |
|----------------|--|
| ПК-1           | Способен проводить работы по обработке и анализу научно-технической информации и результатов исследований  |
| ПК-1.1         | Решает профессиональные задачи по разработке планов и методических программ проведения исследований и разработок   |
| ПК-1.2         | Осуществляет сбор и изучение научно-технической информации по теме исследований и разработок   |
| ПК-1.3         | Оценивает результаты теоретического обобщения научных данных, результатов экспериментов и наблюдений   |
| ПК-3           | Способен подготовить информацию для разработки проектов планов и графиков мероприятий по внедрению новой техники, технологии литейного производства и сплавов        |
| ПК-3.1         | Оценивает техническую оснащенность, технологические и эксплуатационные особенности новой техники согласно требованиям к оборудованию накладываемой новой технологией |
| ПК-3.2         | Решает задачи по размещению нового оборудования и планировки отделений литейного цеха  |
| ПК-3.3         | Осуществляет контроль по внедрению новой техники и технологии  |

#### 4. Структура, объём и содержание дисциплины (модуля)

Общая трудоемкость дисциплины составляет 3 зачетных единиц 108 акад. часов, в том числе:

- контактная работа – 16,1 акад. часов;
- аудиторная – 16 акад. часов;
- внеаудиторная – 0,1 акад. часов
- самостоятельная работа – 91,9 акад. часов;

Форма аттестации - зачет

| Раздел/ тема дисциплины  | Семестр | Аудиторная контактная работа (в акад. часах) |           |             | Самостоятельная работа студента | Вид самостоятельной работы   | Форма текущего контроля успеваемости и промежуточной аттестации | Код компетенции                                |
|--|---------|--|-----------|-------------|---------------------------------|--|---|--|
|  |         | Лек.   | лаб. зан. | практ. зан. |                                 |  |   |  |
| 1.   |         |  |           |             |                                 |  |   |  |
| 1.1 Введение в информационные технологии. Базовые понятия. Терминология.   | 1       |  | 2         |             | 15                              | Проработка теоретического материала. Изучение дополнительного материала. | Устный опрос. Защита лабораторной работы №1.                    | ПК-1.1, ПК-1.2, ПК-1.3, ПК-3.1, ПК-3.2, ПК-3.3 |
| 1.2 Роль и значение информационных технологий при автоматизации производственных процессов металлургического производства и литейных процессов.            |         |  |           |             |                                 | Проработка теоретического материала. Изучение дополнительного материала. | Устный опрос. Защита лабораторной работы № 2                    |  |
| 1.3 Метрологические характеристики средств измерений.  |         |  | 4/2И      |             | 15                              | Проработка теоретического материала. Изучение дополнительного материала. | Устный опрос. Защита лабораторной работы №3                     | ПК-1.1, ПК-1.2, ПК-1.3, ПК-3.1, ПК-3.2, ПК-3.3 |
| 1.4 Методы и технические средства сбора, обработки и хранения информации о параметрах технологического процесса. АСУ ТП. Уровни, назначение и возможности. |         |  | 4/2И      |             | 15                              | Проработка теоретического материала. Изучение дополнительного материала. | Устный опрос. Защита лабораторной работы № 4.                   | ПК-1.1, ПК-1.2, ПК-1.3, ПК-3.1, ПК-3.2, ПК-3.3 |
| 1.5 Основы теории автоматического управления.  |         |  | 4/2И      |             | 15                              | Проработка теоретического материала. Изучение дополнительного материала. | Устный опрос. Защита лабораторной работы №5.                    | ПК-1.1, ПК-1.2, ПК-1.3, ПК-3.1, ПК-3.2, ПК-3.3 |

|   |  |       |  |      |   |   |  |
|---|--|-------|--|------|---|---|--|
| 1.6 Автоматизация технологического оборудования в металлургии и литейном производстве. Типовые схемы. Системы сбора, передачи, обработки и хранения информации о технологических процессах. |  | 2     |  | 31,9 | Проработка теоретического материала. Изучение дополнительного материала. Подготовка к зачету. | Устный опрос. Защита лабораторной работы № 6. | ПК-1.1, ПК-1.2, ПК-1.3, ПК-3.1, ПК-3.2, ПК-3.3 |
| Итого по разделу  |  | 16/6И |  | 91,9 |   |   |  |
| Итого за семестр  |  | 16/6И |  | 91,9 |   | зачёт   |  |
| Итого по дисциплине   |  | 16/6И |  | 91,9 |   | зачет   |  |

## 5 Образовательные технологии

Для реализации предусмотренных видов учебной работы в качестве образовательных технологий в преподавании дисциплины «Информационные технологии в металлургии» используются традиционная и модульно-компетентностная технологии.

Передача и закрепление необходимых теоретических знаний и формирование основных представлений по курсу «Информационные технологии в металлургии» происходит с использованием мультимедийного оборудования.

Материал закрепляется в ходе лабораторных работ, на которых выполняются групповые или индивидуальные задания по пройденной теме. При этом лабораторные занятия проводятся в интерактивной форме с использованием следующих методов интерактивного обучения:

□ проблемное обучение, которое заключается в стимулировании студентов к самостоятельной «добыче» знаний, необходимых для решения конкретной проблемы;

□ работа в команде, которая предусматривает совместную деятельность студентов в группе под руководством лидера, направленную на решение общей задачи синергичным сложением результатов индивидуальной работы членов команды с делением ответственности и полномочий;

□ междисциплинарное обучение, которое предусматривает использование знаний из разных областей, их группировка и концентрация в контексте конкретной решаемой задачи.

В ходе проведения лабораторных занятий предусматривается использование средств вычислительной техники при выполнении индивидуальных заданий и работ.

Самостоятельная работа стимулирует студентов к самостоятельной проработке тем в процессе выполнения лабораторных работ, а также в процессе подготовки к устному опросу, и итоговой аттестации.

## 6 Учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы обучающихся

Представлено в приложении 1.

## 7 Оценочные средства для проведения промежуточной аттестации

Представлены в приложении 2.

## 8 Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины (модуля)

### а) Основная литература:

1. Богданов, Е. П. Интеллектуальный анализ данных : практикум для магистрантов направления 09.04.03 «Прикладная информатика» профиль подготовки «Информационные системы и технологии корпоративного управления» / Е. П. Богданов. - Волгоград : ФГБОУ ВО Волгоградский ГАУ, 2019. - 112 с. - Текст : электронный. - URL: <https://znanium.com/catalog/product/1087885> (дата обращения: 01.09.2020). – Режим доступа: по подписке.

2. Кукушкина, В. В. Организация научно-исследовательской работы студентов (магистров) : учебное пособие / В. В. Кукушкина. — Москва : ИНФРА-М, 2021. — 264 с. — (Высшее образование: Магистратура). - ISBN 978-5-16-004167-4. - Текст : электронный. - URL: <https://znanium.com/catalog/product/1157859> (дата обращения: 01.09.2020). – Режим доступа: по подписке.

**б) Дополнительная литература:**

1. Литвиненко, А. М. Технологии разработки объектов интеллектуальной собственности : учебное пособие / А. М. Литвиненко, В. Л. Бурковский. — 3-е изд., стер. — Санкт-Петербург : Лань, 2018. — 184 с. — ISBN 978-5-8114-2513-6. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/105984> (дата обращения: 28.09.2020). — Режим доступа: для авториз. пользователей.

2. Социализация импакт-технологий в территориальном общественном самоуправлении на основе развития информационно-коммуникативной инфраструктуры : монография / И. А. Юрасов, В.А. Бондаренко, М. А. Танина, В. А. Юдина. — Москва : ИНФРА-М, 2019. — 209 с. - ISBN 978-5-16-107892-1. - Текст : электронный. - URL: <https://new.znaniium.com/catalog/product/1031615>.

**в) Методические указания:**

Методические указания приведены в приложение 3

**г) Программное обеспечение и Интернет-ресурсы:****Программное обеспечение**

| Наименование ПО                         | № договора              | Срок действия лицензии |
|---|-------------------------|------------------------|
| MS Windows 7 Professional(для классов)  | Д-1227-18 от 08.10.2018 | 11.10.2021             |
| MS Windows 7 Professional (для классов) | Д-757-17 от 27.06.2017  | 27.07.2018             |
| MS Office 2007 Professional             | № 135 от 17.09.2007     | бессрочно              |
| 7Zip                                    | свободно                | бессрочно              |
| FAR Manager                             | свободно                | бессрочно              |
| STATISTICA                              | К-139-08 от             | бессрочно              |

**Профессиональные базы данных и информационные справочные системы**

| Название курса   | Ссылка  |
|--|---|
| Электронная база периодических изданий East View Information Services, ООО                         | <a href="https://dlib.eastview.com/">https://dlib.eastview.com/</a>   |
| Национальная информационно-аналитическая система – Российский индекс научного цитирования          | URL: <a href="https://elibrary.ru/project_risc.asp">https://elibrary.ru/project_risc.asp</a>  |
| Поисковая система Академия Google (Google Scholar)   | URL: <a href="https://scholar.google.ru/">https://scholar.google.ru/</a>  |
| Информационная система - Единое окно доступа к информационным ресурсам                             | URL: <a href="http://window.edu.ru/">http://window.edu.ru/</a>  |
| Федеральное государственное бюджетное учреждение «Федеральный институт промышленной собственности» | <a href="https://www.fips.ru/2020-2021_m22_04_02-MMJM-20_24_plx_Информационные_технологии_в_металлургии.docx">2020-2021_m22_04_02-MMJM-20_24_plx_Информационные технологии в металлургии.docx</a> |
| Российская Государственная библиотека. Каталоги  | <a href="https://www.rsl.ru/ru/4readers/catalogues/">https://www.rsl.ru/ru/4readers/catalogues/</a>   |
| Электронные ресурсы библиотеки МГТУ им. Г.И. Носова  | <a href="http://magtu.ru:8085/marcweb2/Default.asp">http://magtu.ru:8085/marcweb2/Default.asp</a>   |
| Международная база полнотекстовых журналов Springer Journals                                       | <a href="http://link.springer.com/">http://link.springer.com/</a>   |

|  |   |
|--|---|
| Международная база научных материалов в области физических наук и инжиниринга          | <a href="http://materials.springer.com/">http://materials.springer.com/</a>         |
| Международная база справочных изданий по всем отраслям знаний SpringerReference        | <a href="http://www.springer.com/references">http://www.springer.com/references</a> |
| Архив научных журналов «Национальный электронно-информационный конкорциум» (НП НЭИКОН) | <a href="https://archive.neicon.ru/xmlui/">https://archive.neicon.ru/xmlui/</a>     |

### **9 Материально-техническое обеспечение дисциплины (модуля)**

Материально-техническое обеспечение дисциплины включает:

1. Учебная аудитория для проведения лабораторных занятий «Литейная лаборатория» оснащена лабораторным оборудованием:

Лабораторное оборудование:

1. Плавильные печи.
  2. Термические печи.
  3. Лаборатория контроля качества формовочной смеси.
  4. Твердомеры.
  5. Приборы для испытания образцов на износостойкость.
  6. Микроскоп.
  7. Шлифовальные машины.
  8. Фрезерный станок с числовым программным обеспечением.
  9. Дробилки.
  10. Центробежная машина литья.
  11. Вакуумная литейная установка.
  12. Компьютерной техникой с пакетом MS Office, с подключением к сети «Интернет» и с доступом в электронную информационно-образовательную среду университета.
- специализированной мебелью.

2. Учебная аудитория для групповых и индивидуальных консультаций, текущего контроля и промежуточной аттестации оснащена:

- компьютерной техникой с пакетом MS Office, с подключением к сети «Интернет» и с доступом в электронную информационно-образовательную среду университета;
- специализированной мебелью.

3. Помещение для самостоятельной работы оснащено:

- компьютерной техникой с пакетом MS Office, с подключением к сети «Интернет» и с доступом в электронную информационно-образовательную среду университета;
- специализированной мебелью.

4. Помещение для хранения и профилактического обслуживания учебного оборудования оснащено:

- специализированной мебелью: стеллажами для хранения учебного оборудования;
- инструментами для ремонта учебного оборудования;
- шкафами для хранения учебно-методической документации и материалов.

## 6 Учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы обучающихся

Аудиторная самостоятельная работа студентов на лабораторных занятиях осуществляется под контролем преподавателя в виде выполнения программ практических работ.

Внеаудиторная самостоятельная работа студентов осуществляется в виде чтения с проработкой материала, подготовкой данных для практических работ, выполнения и подготовке к их защите.

### Примерный перечень тем для самостоятельных работ согласно разделам:

#### Раздел 1. Применение математических таблиц для анализа данных в литейном производстве.

1.1. Применение математических таблиц для статистического анализа составов и свойств литейных сплавов.

1.2. Применение математических таблиц для статистического анализа технологических параметров и их связей с характеристиками литья.

1.3. Проведение анализа микро- и макроструктур и их характеристик компьютерными методами для оценки сплавов в литейном производстве.

1.4. Применение нейросетевых возможностей программных комплексов для обработки стохастических и больших данных в литейном производстве.

#### Раздел 2. Применение программных комплексов для подготовки и анализа технологий литейного производства.

2.1. Применение программных комплексов САД в подготовке, анализе и прототипировании для литейного производства.

2.2. Программные комплексы САМ для подготовки управляющих программ для CNC станков в условиях модельного производства, изготовления пресс-форм и кокилей

2.3. Оптимизация и анализ параметров и характеристик технологических процессов литейного производства с применением САЕ программ.

**При выполнении самостоятельных работ раздела №1** студенту выдается таблица содержащая базу данных по свойствам сплавов в зависимости от технологических условий получения отливок из них. Обучающийся должен провести статистическую обработку, выявить взаимосвязи, подготовить описательный и иллюстративный материал. Также необходимо провести нейросетевую обработку данной базы сплавов с помощью модуля «Модель» или при использовании нейросетевых возможностей иных математических (табличных) процессоров.

**При выполнении самостоятельных работ раздела №2** студенту выдается чертеж литейной модели промышленного или художественного назначения. Обучающийся должен подготовить 3D модель с применением САД программ. Подготовить управляющую программу для CNC станка, а так же провести анализ с применением системы САЕ LVM Flow.

### Примеры тестовых заданий

1. В каких случаях применяются пирометры?

- |                                       |   |
|---------------------------------------|---|
| а) при измерении высоких температур;  | в) при измерении температуры движущихся объектов; |
| б) при измерении температур ниже 0°C; | г) когда необходимо обеспечить высокую точность.  |

2. Какой метод измерения лежит в основе работы термопары и термометра сопротивления  
а) контактный; б) бесконтактный; в) косвенный.

3. Как изменяются свойства материала термометра сопротивления при изменении температуры  
а) изменяется электрическое сопротивление;  
б) изменяется плотность;

- в) изменяется длина проводника.
4. Как изменяется сопротивление у полупроводниковых термометров сопротивления при увеличении температуры
- а) увеличивается; б) уменьшается; в) не изменяется.
5. Основной закон, который лежит в основе работы термопары
- а) закон Планка; б) закон Томсона; в) закон Пельтье.
6. Сколько спаев бывает у термопары
- а) 1; б) 2; в) 3; г) зависит от условий измерения.
7. Какие спаи термопары помещаются в измерительную среду
- а) рабочие; б) холодные; в) горячие; г) свободные.
8. Для чего вводят поправку на температуру холодных спаев, чтобы
- а) температура холодных спаев была ноль;
- б) температура холодных спаев была равна температуре горячих спаев.
9. Какой метод измерения лежит в основе работы пирометров
- а) контактный; б) бесконтактный; в) прямой.

### Вопросы для устного опроса:

1. Информационные технологии в автоматизации производственных процессов.
2. Структура информационной технологии и законы ее построения.
3. Метрологические характеристики средств измерений.
4. Проведение поверки.
5. Технические средства и методы автоматизированного сбора, обработки и накопления информации о параметрах технологических процессов.
6. Классификация средств и методов измерений.
7. Погрешности измерений.
8. Измерение температуры, классификация методов измерения.
9. Измерение давления, классификация методов измерения.
10. Измерение расхода жидкости и газа, классификация методов измерения.
11. Измерение уровня жидкости и сыпучих материалов, классификация методов измерения.
12. Автоматический газовый анализ.
13. Использование ЭВМ в системах управления.
14. Промышленные контроллеры.
15. Программное обеспечение ЭВМ. Пакеты стандартных прикладных программ.
16. Основные требования при проектировании баз данных.
17. Структурная схема системы автоматического управления.
18. Система автоматического регулирования (САР). Контур регулирования.
19. Классификация систем регулирования и управления.
20. Принципы регулирования, используемые в системах автоматического управления
21. Анализ эффективности АСУ.
22. Типовые динамические звенья САР. Соединение звеньев САР.
23. Статические характеристики объекта управления.
24. Динамические характеристики объекта управления.
25. Законы регулирования. И, П, ПИ и ПИД регуляторы.
26. Показатели качества в системах автоматического управления.
27. Функциональные схемы автоматизации агрегатов металлургического производства.
28. Условные обозначения приборов, средств автоматизации, основных контролируемых и регулируемых величин.
29. Типовые САР.
30. Автоматизация дуговых печей.
31. Автоматизация индукционных печей.
32. Автоматизация термических печей проходного.
34. Автоматизация процессов приготовления формовочных смесей.
35. Автоматизация процессов изготовления литейных форм.

- 34. Автоматизация процессов изготовления стержней.
- 34. Автоматизация процессов заливки литейных форм.
- 34. Автоматизация процессов выбивки литейных форм.

Предусмотрено выполнение индивидуального занятия по тематике автоматизации и систем АСУ  
ТП литейного производства.

7 Оценочные средства для проведения промежуточной аттестации

а) Планируемые результаты обучения и оценочные средства для проведения промежуточной аттестации:

| Структурный элемент компетенции  | Планируемые результаты обучения  | Оценочные средства  |
|--|--|---|
| ПК-1: Способен проводить работы по обработке и анализу научно-технической информации и результатов |  |   |
| ПК-1.1   | Решает профессиональные задачи по разработке планов и методических программ проведения исследований и разработок | <p><b>Перечень теоретических вопросов к зачету:</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Методы исследования – теоретические, экспериментальные (лабораторные или производственные).</li> <li>2. Математическое моделирование;</li> <li>3. Физическое моделирование;</li> <li>4. Натурное моделирование</li> <li>5. Понятие о сплавах. Классификация сплавов.</li> <li>6. Основные способы получения сплавов.</li> <li>7. Современное состояние и перспективы развития литейного производства.</li> <li>8. Методы оптимизации</li> <li>9. Методика обработки экспериментальных данных</li> </ol> |
| ПК-1.2   | Осуществляет сбор и изучение научно-технической информации по теме исследований и разработок                     | <p><b>Перечень теоретических вопросов к зачету:</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Измерительные информационные системы</li> <li>2. Способы представления информации</li> <li>3. Компьютерные технологии, используемые при поиске информации</li> <li>4. Информационные технологии, используемые при поиске информации</li> <li>5. Методики поиска и обработки информации из различных источников</li> </ol>   |

| Структурный элемент компетенции   | Планируемые результаты обучения   | Оценочные средства   |
|---|---|--|
|   |   | <p>6. Представление информации в требуемом формате</p> <p>7. Анализ информации из различных источников</p> <p>8. Сетевые технологии при сборе информации</p>   |
| ПК-1.3  | Оценивает результаты теоретического обобщения научных данных, результатов экспериментов и наблюдений      | <p><b>Практическое задание:</b></p> <p>Пример.</p> <p>1. На основе статистических данных скорректировать химический состав ИЧХ28Н2 с целью повышения износостойкости деталей из него.</p> <p>2. На основе статистических данных скорректировать режим ТО листопрокатных валков ЛПХНД.</p> <p>3. На основе литературно-патентного исследования предложить новый состав сплава для отливки «Зуб ковша экскаватора»</p> <p>4. Разработать технологию изготовления отливки с целью снижения доли брака.</p> <p>5. Скорректировать технологию выплавки стали с целью снижения количества не металлических включений.</p> <p>6. Скорректировать технологию выплавки стали с целью снижения вредных выбросов.</p> |
| ПК-3: Способен подготовить информацию для разработки проектов планов и графиков мероприятий по внедрению новой техники, технологии литейного производства и сплавов |   |  |
| ПК-3.1  | Оценивает техническую оснащенность, технологические и эксплуатационные особенности новой техники согласно | <p><b>Перечень теоретических вопросов к зачету:</b></p> <p>1. Технические средства для измерения</p>   |

| Структурный элемент компетенции | Планируемые результаты обучения  | Оценочные средства  |
|---------------------------------|--|---|
|                                 | требованиям к оборудованию накладываемой новой технологией                             | <p>параметров технологического процесса</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>2. Виды стандартов.</li> <li>3. Нормативные документы</li> <li>4. Государственные и отраслевые стандарты для разработки проекта по АСУ ТП</li> <li>5. Технические средства автоматизации</li> <li>6. Средства автоматического регулирования</li> <li>7. Средства сигнализации</li> <li>8. Статический и динамический режим работы объекта управления.</li> <li>9. Статическая характеристика объекта управления</li> </ol> |
| ПК-3.2                          | Решает задачи по размещению нового оборудования и планировки отделений литейного цеха. | <p><b>Примеры индивидуальных заданий:</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Особенности планировки АЛЛ НИИ тракторсельхозмаш</li> <li>2. Особенности планировки АЛЛ Кюнкель-Вагнер (КВ 301)</li> <li>3. Особенности планировки АЛЛ SPO</li> <li>4. Планировочные решения по плавильному отделению с дуговыми печами</li> <li>5. Планировочные решения по плавильному отделению с дуплекс процессом.</li> </ol>  |
| ПК-3.3                          | Осуществляет контроль по внедрению новой техники и технологии                          | <p><b>Перечень теоретических вопросов к зачету:</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Возможности применения нейросетевых программ в литейном производстве</li> <li>2. Применение компьютерных</li> </ol>   |

| Структурный элемент компетенции | Планируемые результаты обучения | Оценочные средства  |
|---------------------------------|---------------------------------|---|
|                                 |                                 | <p>технологий в подготовке и анализе технологий литейного производства</p> <p>3. Применение САД пакетов программ (AutoCad, Компас 3D) в подготовке и прототипировании в литейном производстве</p> <p>4. Программные комплексы подготовки управляющих программ для станков</p> <p>5. ЧПУ при их применении в модельном производстве.</p> <p>6. Анализ технологических процессов литейного производства с применением САЕ пакета LVM Flow.</p> <p>7. Применение компьютерных технологий анализа данных в литейном производстве</p> <p>8. Применение математических (табличных) процессоров для анализа характеристик и свойств сплавов в литейном производстве</p> <p>9. Применение математических (табличных) процессоров для анализа технологических параметров в литейном производстве</p> |

**б) Порядок проведения промежуточной аттестации, показатели и критерии оценивания:**

Промежуточная аттестация по дисциплине включает теоретические вопросы, позволяющие оценить уровень усвоения обучающимися знаний, и практические задания, выявляющие степень сформированности умений и владений, проводится в форме зачета.

Зачет проводится в устной форме по теоретическим вопросам и практическим заданиям.

***Показатели и критерии оценивания зачета:***

на оценку «зачтено» обучающийся должен показать высокий уровень знания материала по дисциплине не только на уровне воспроизведения и объяснения информации, но и продемонстрировать интеллектуальные навыки решения проблем, нахождения уникальных ответов, вынесения критических суждений; продемонстрировать знание и понимание законов дисциплины, умение оперировать этими знаниями в профессиональной деятельности;

на оценку «не зачтено» обучающийся не может показать знания на уровне воспроизведения и объяснения информации по дисциплине, не может показать интеллектуальные навыки решения простых задач, умение критически оценивать свои личностные качества, намечать пути и выбирать средства развития достоинств и устранения недостатков.

# **STEELUNIVERSITY.ORG**

Информационные технологии в металлургии и машиностроении

Лабораторный практикум

Учебное пособие для студентов, обучающихся по направлениям подготов-ки:  
22.04.02 "Металлургия"

## АННОТАЦИЯ

Steeluniversity.org - это бесплатный, отмеченный наградами интернет-проект, разработанный [International Iron and Steel Institute](http://www.ironandsteel.org) (Международным Институтом Чугуна и Стали). В рамках проекта предлагается полный пакет интерактивных, информативных, интегрированных и отвечающих современным требованиям ресурсов электронного обучения металлургическим технологиям, охватывающих все аспекты производства - от производства чугуна и выплавки стали до получения металлопродукции, ее применения и утилизации.

steeluniversity.org предоставляет возможность изучения и применения основных научных, металлургических и инженерных принципов, термодинамики и кинетики, которые являются основополагающими для производства и использования стали. Центр проекта - это серия реалистичных, игровых моделей основных металлургических процессов.

Этот сайт предназначен для студентов, аспирантов, их преподавателей, лекторов и профессоров, а также для работников (как правило, с высшим образованием) компаний, имеющих отношение к металлургической промышленности, а также их руководителей. Некоторые модели подходят для использования старшеклассниками.

Эти ресурсы дополняют традиционное обучение. Благодаря этому проекту, университетские профессора и лекторы смогут использовать практические примеры из металлургической промышленности для иллюстрации и демонстрации базовых принципов и теоретических концепций, являющихся неотъемлемой частью развития знаний и понимания студентов.

Предназначено для студентов, обучающихся по направлениям подготовки: 22.04.02 "Металлургия".

## Содержание

|  |    |
|--|----|
| ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №1 Испытание на твердость                              | 4  |
| ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №2 Испытания на прочность                              | 11 |
| ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №3 Модель кислородно-<br>конвертерной обработки стали  | 15 |
| ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №4 Моделирование электроду-<br>говой печи              | 23 |
| ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №5 Динамическая модель не-<br>прерывной разливки стали | 36 |
| ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №6 Моделирование литейной<br>технологии                | 49 |
| Библиографический список   | 63 |

# ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №1

## Испытание на твердость

### Введение

В этом разделе вы научитесь проводить несколько виртуальных испытаний на твердость и соотносить результаты с другими свойствами стали, а также сферами ее применения.

Если представить все в упрощенном виде, твердость любого вещества легко определить - например, очевидно, что мел мягче стали, это определяется на ощупь или при царапании. Это свойство отражает способность противостоять пластической деформации. Простой относительный метод сравнения твердости был впервые представлен в виде шкалы Мооса. Сравнение твердости по этой шкале осуществлялось по методу царапания, смысл которого заключается в том, что одно вещество считается более твердым, чем другое, если оно может поцарапать его поверхность. По этой схеме, тальк является самым мягким веществом, ему присвоен класс 1, а алмазу, который может поцарапать все прочие вещества, присвоен класс 10. Однако при современных требованиях к материалам требуется более точная шкала, в особенности потому, что по шкале Мооса большинство металлов и сплавов относятся к одному и тому же классу.

### Как измеряется твердость I

Мера твердости определяется путем вдавливания одного материала в другой с известной механической силой. Так как способность материала противостоять деформации зависит от его предела текучести и пластичности, то, используя такой метод сравнения, можно измерить относительную прочность. При использовании очень прочного материала в качестве индентора, такого как алмаз, можно сказать, что деформируется только испытываемый материал.

Сейчас существует множество видов подобных испытаний. Все они основываются на принципе, что твердость является мерой способности материала противостоять пластической деформации. Очевидно, что для заданной силы размер лунки будет пропорционален пределу текучести вещества.

# Испытание на

На какой стали вы хотите провести испытание на твердость?

- Судовая толстолистовая сталь - уже подготовленная
- Повторное упрочнение
- Высокоуглеродистый стальной пруток
- Высокопрочная низколегированная сталь

Приступайте к испытанию на твердость вашей стали.  
Теперь нажмите "Далее"

Продолжить

Расположите образец для испытания так, чтобы он соприкасался с алмазным индентором.:

- Стрелками вверх и вниз поднимайте или опускайте образец для испытания
- При правильном расположении вам будет разрешено продолжить



Продолжить

## Как измеряется твердость II

Контактное напряжение увеличивается по мере уменьшения радиуса закругления. Следовательно, присутствие нагрузки или комбинации сил, действующих на границе контакта, вызовет напряжение одного или обоих материалов сверх предела текучести.

Если  $\sigma_{ys}$  для А очень высокое по сравнению со значением для В, тогда А подвергнется упругой деформации. В точке контакта напряжение с легкостью превышает предел текучести, начинается пластическое течение, и индентор внедряется в материал.

Таким образом, в испытании на твердость используется индентор и нагрузочное устройство.

Представьте себе индентор в форме конуса. Если нагрузка дается на конус, напряжение на конце конуса, контактирующем с испытываемым материалом, теоретически будет обусловлено радиусом конца, который будет очень маленьким. Соответственно, напряжение будет очень высоким, оно с легкостью превысит напряжение текучести испытываемого материала.

Таким образом, начинается пластическая деформация испытываемого материала, и конус внедряется в испытываемый материал. Этот процесс продолжится, пока напряжение не станет меньше предела текучести испытываемого материала.

$$A = F / (\sigma_{ys} + \Delta\sigma)$$

Следовательно, диаметр индентора пропорционален пределу текучести материала, эта зависимость была бы линейной, если бы характеристики наклепываемости были аналогичными. Однако, есть несколько проблем, связанных с вышеупомянутым отношением:

- Конец индентора может деформироваться
- Напряжение воздействует на поверхность индентора
- Сила трения не учитывается

В этой анимации рассматриваются принципы, на которых основываются все испытания на твердость.

Применяются инденторы различных форм и размеров, однако твердость измеряется путем установления соотношения между размером лунки и приложенной силой.

Для стали используются три основных вида испытаний:

- по Виккерсу
- по Бринеллю
- по Роквеллу

Иногда также применяются испытания по Швику и по Кнупу.

Формула Мейера  $P = k \times d^n$

где

$P$  –нагрузка кг;

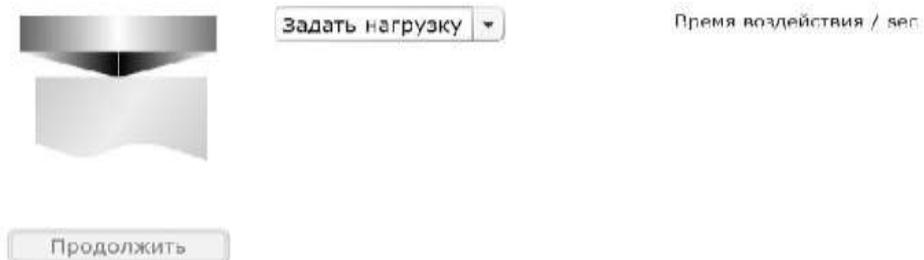
$D$  –диаметр лунки мм;

$k$  - материальная константа, сопротивление материала проникновению

$n$  - материальная константа, деформационное упрочнение (наклеп) металла.

**Испытать образец:**

- Выберите нагрузку из развертывающегося окна
- Подождите до истечения времени выдержки
- Нажмите "Продолжить", чтобы посмотреть получающуюся лунку



**Испытать образец:**

- Выберите нагрузку из развертывающегося окна
- Подождите до истечения времени выдержки
- Нажмите "Продолжить", чтобы посмотреть получающуюся лунку



Чтобы выполнить комплексное упражнение, включающее отбор образцов стального толстого листа, подготовку образцов и проведение виртуальных испытаний на растяжение, на прочность и на ударную вязкость по Шарпи, вам необходимо войти в систему, чтобы вы могли сохранять свои данные и использовать их впоследствии. Если вы хотите сделать это, используйте ссылку ниже. Вы также можете выполнять упражнения по отдельности.

**Измерить длину диагонали лунки**

- Отцентрируйте измерительное устройство
- Переключитесь на "Сним" в края лунки
- Переведите измеренный размер лунки в микронную шкалу
- Сохраните результаты (если применимо)



Отцентрировать измерительное устройство

Посмотреть твердость по Виккерсу

Начать снова с другим образцом стали

**Измерить длину диагонали лунки**

- Отцентрируйте измерительное устройство
- Перетащите правый "нож" к краю лунки
- Переведите измеренный размер лунки в твердость по Виккерсу
- Сохраните результаты (если применимо)



Отцентрировать измерительное устройство

0.307 mm

Посмотреть твердость по Виккерсу

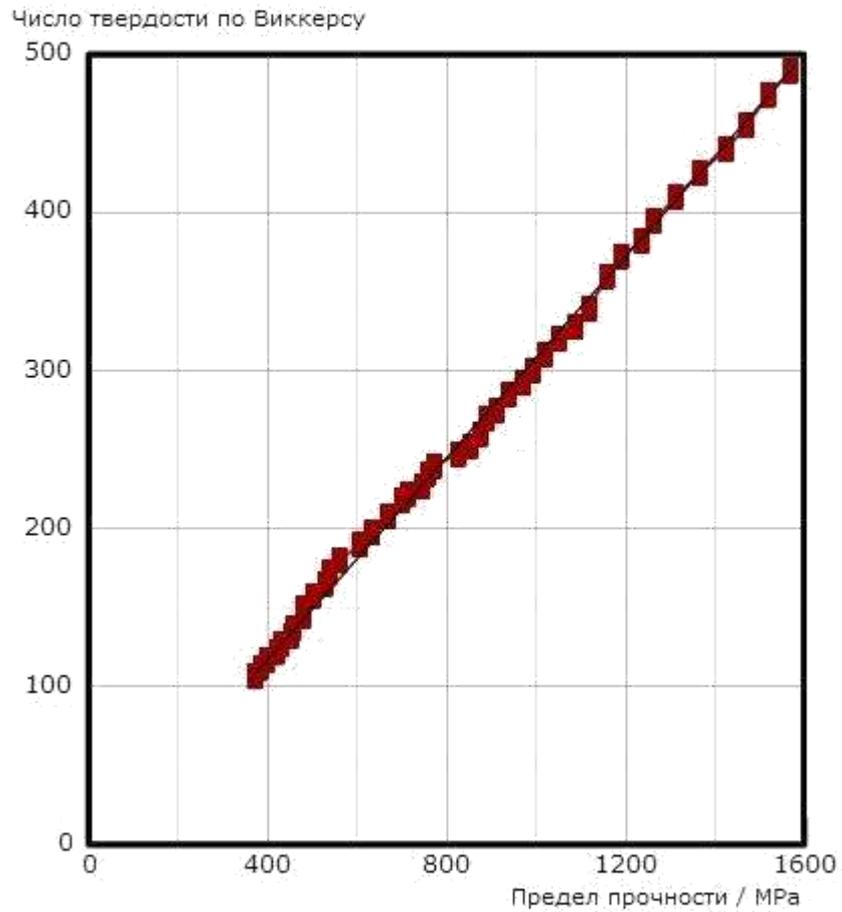
Измеренная твердость по Виккерсу = 69

Отлично, вы точно измерили твердость этого образца для испытаний.

Начать снова с другим образцом стали

Твердость стали тесно связана с пределом прочности.

### Отношение между твердостью по Виккерсу и прочностью на растяжение



### Испытание на твердость: Резюме

В этом разделе вы научились проводить различные виртуальные испытания на твердость и соотносить результаты с другими свойствами стали и сферами применения.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №2

### Испытания на прочность

**Цель работы:** Исследование процесса растяжения металлического образца вплоть до его разрыва и испытание образца с выбранными характеристиками на растяжение.

#### **Выполнение работы:**

Для начала работы выбираем проведение испытание на растяжение на повторно упрочненной полосовой стали.

www.2020university.org/content/html/yu/terole/lect.asp?sa=0 - Google Chrome  
www.raaluniversity.org/portals/html/yu/terole/lect.asp?sa=0

# Испытание на

**Выбрать из:**

- Проведите испытание на растяжение на образцах судового листа, которые вы уже подготовили
- Проведите испытание на растяжение на повторно упрочненной полосовой стали
- См. результаты испытания высокоуглеродистого стального прутка и проволоки
- См. результаты закаленной и отпущенной высоколегированной стали (300M)

Теперь вы проведете испытание на растяжение повторно упрочненной полосовой стали.  
Теперь нажмите "Дальше"

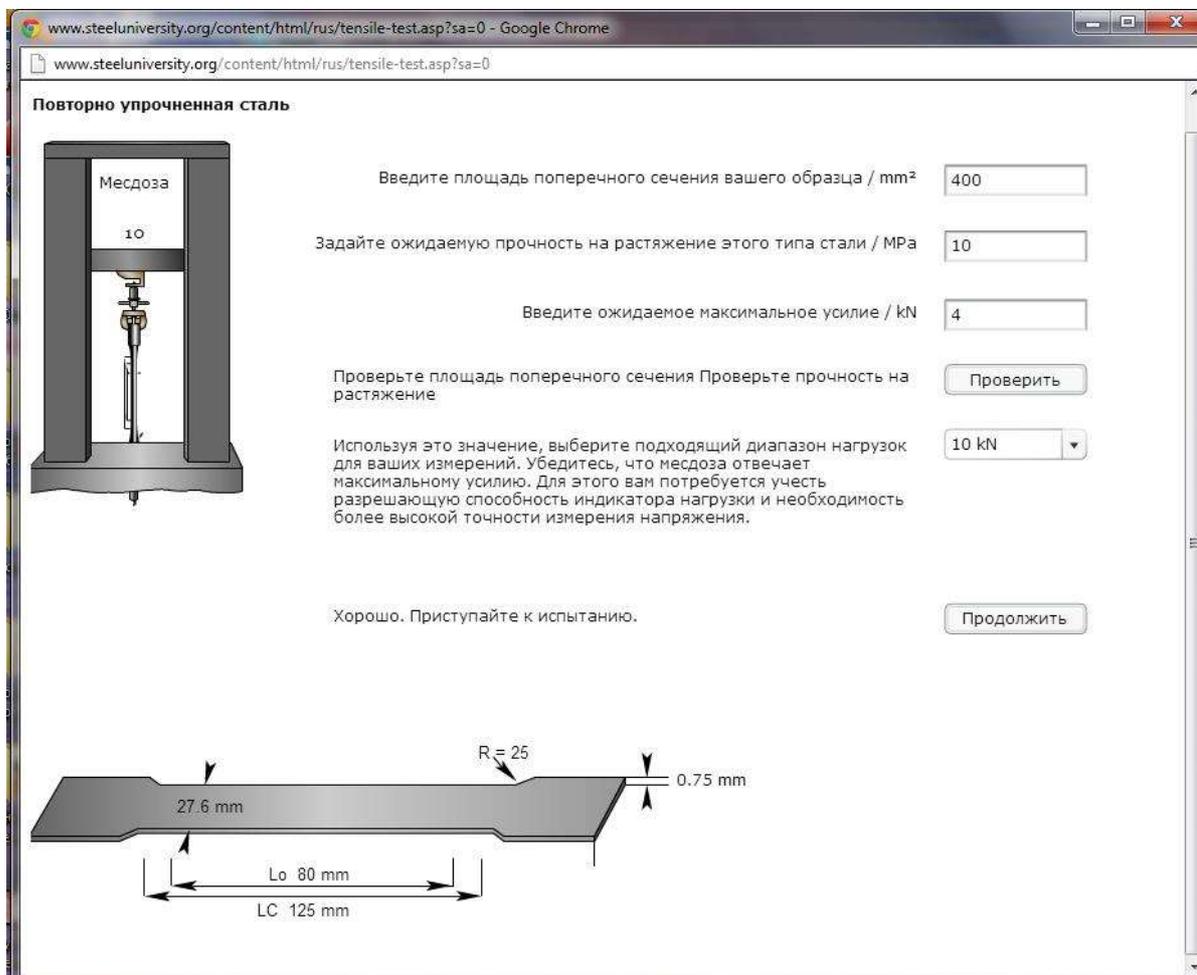
Продолжить

Испытания проводим с использованием месдозы.

*Месдоза* представляет собой стальной цилиндр, разделенный на две части резиновой мембраной. Верхняя часть цилиндра, соединенная с манометрами, наполнена глицерином или маслом, а в нижней части помещается

поршень. К нижней части поршня прикрепляется нож, который производит давление на испытуемый образец при подъеме подвижной поперечины.

Для начала работы выбираем параметры испытуемого образца и усилие месдозы.



Основные параметры испытания материала на растяжение:

### Модуль упругости

Модуль упругости это мера жесткости материала, однако, она действует только на линейном участке кривой. Если образец подвергается нагрузке на линейном участке, то материал вернется в исходную форму при прекращении действия нагрузки. В точке отклонения кривой от прямой закон Гука больше не применяется, и образец подвергается остаточной деформации. Эта точка называется "пределом упругости или пределом пропорциональности". Начиная с этой точки при проведении испытания на растяжение материал подвергается пластической деформации при любом даль-

нейшем увеличении нагрузки или напряжения. Он не возвращается в исходную форму после прекращения действия нагрузки.

## Предел текучести

"Предел текучести" материала - это величина напряжения, прилагаемого к материалу, при котором начинается его пластическая деформация по мере нагружения.

### 1.1.1 Деформация

Вы также можете определить степень растяжения или удлинение образца при проведении испытания на растяжение. Либо путем абсолютного измерения изменения длины образца, либо путем относительного измерения - "деформации". Деформация сама может быть "условной" и "истинной". Определение условной деформации - самый простой и широко распространенный способ. Это отношение изменения длины к начальной длине,

$e = \frac{L - L_0}{L_0} = \frac{\Delta L}{L_0}$ . Истинная деформация отчасти похожа на условную, но основывается на "мгновенной" длине образца по мере проведения испытания,

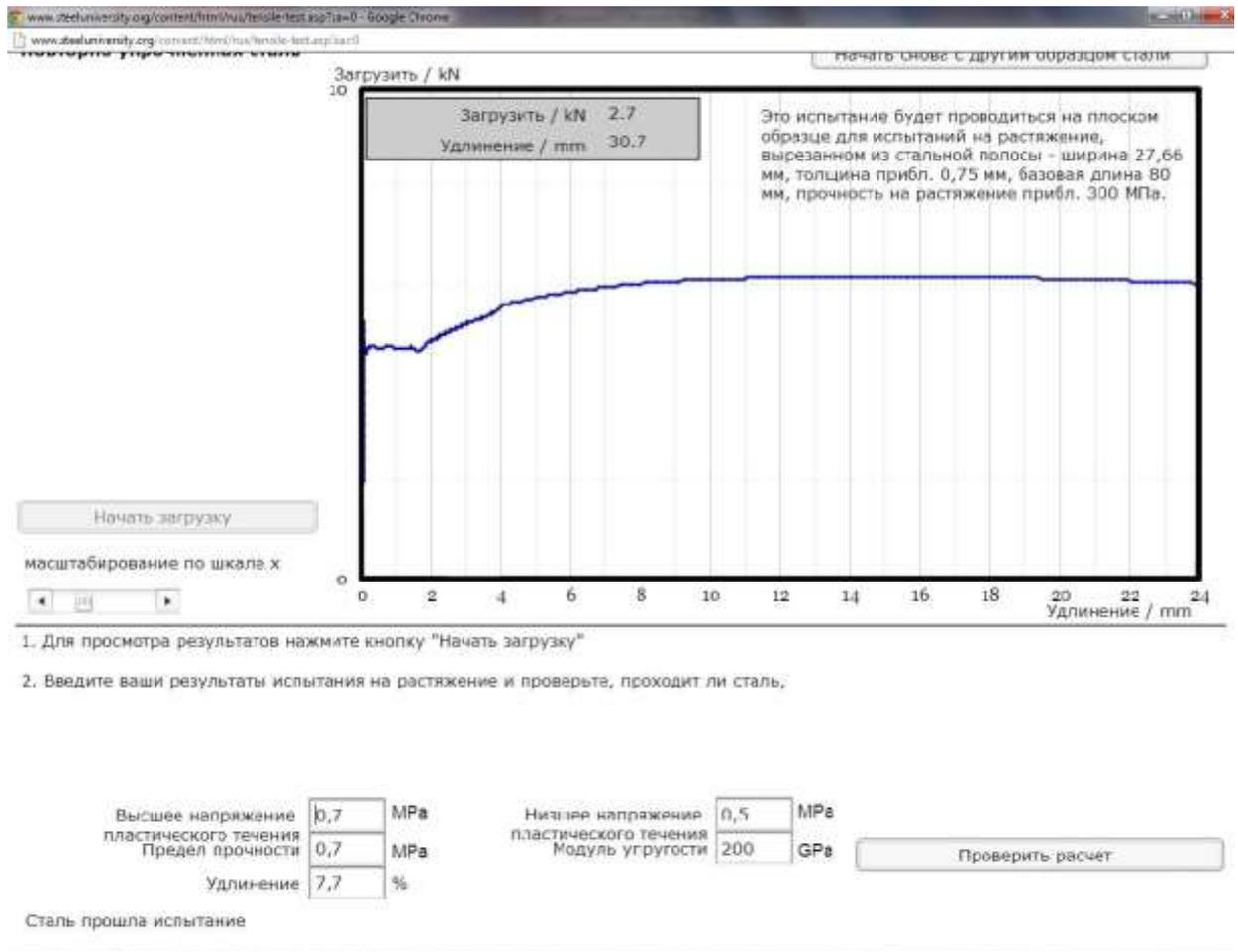
$\varepsilon = \ln\left(\frac{L_i}{L_0}\right)$ , где  $L_i$  - "мгновенная" длина, а  $L_0$  - начальная длина.

### 1.1.2 Предельное напряжение при растяжении

Одним из определяемых свойств материала является предельное напряжение при растяжении. Это максимальная нагрузка, которую выдерживает образец при испытании. Предельное напряжение при растяжении может быть,

а может и не быть равным пределу прочности при растяжении. Все зависит от типа испытываемого материала: он может быть хрупким, вязким или хрупко-вязким. Иногда материал может быть вязким при лабораторном испытании, однако в других условиях и под воздействием экстремально холодных температур, он может перейти в хрупкое состояние.

Целью нашего исследования является получение графика, показывающего удлинение образца от нагрузки.

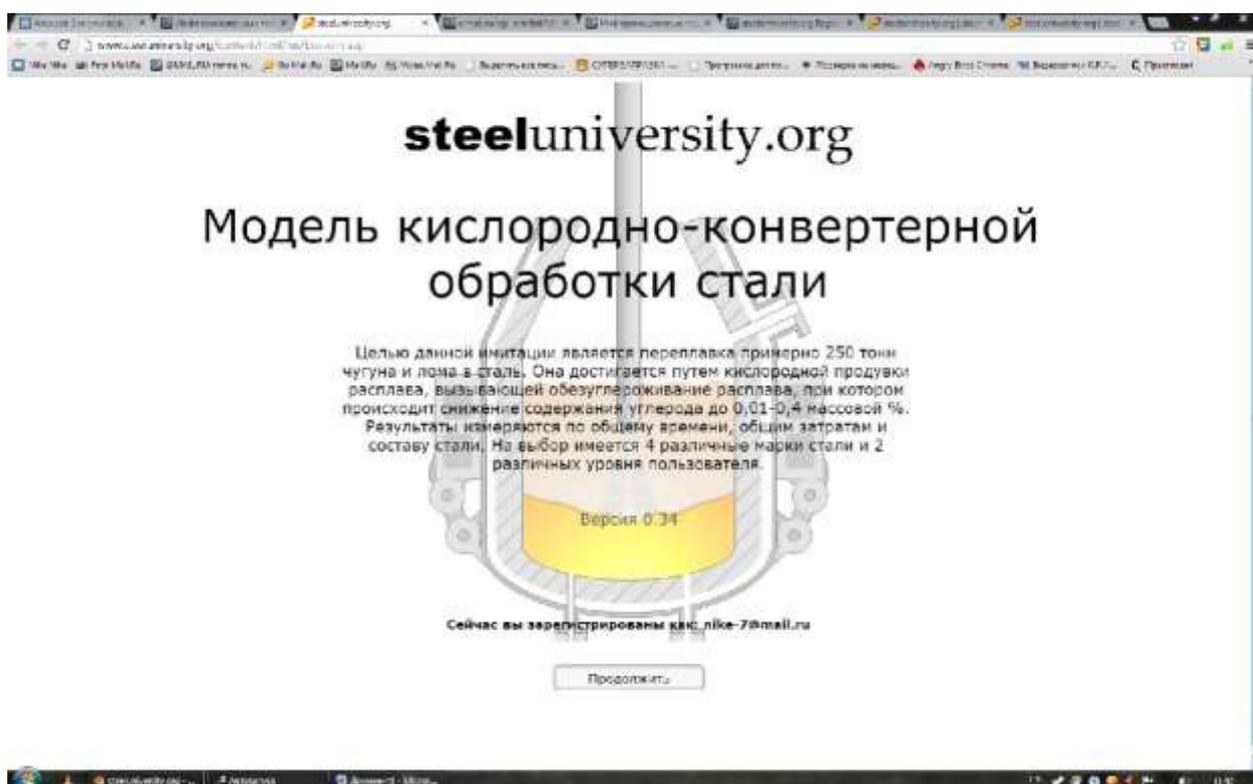


Вводим полученные результаты и получаем что сталь прошла испытание на растяжение.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №3

### Модель кислородно-конвертерной обработки стали

**Цель работы:** Цель работы с моделью заключается в управлении ки-слородным конвертером, обработке чугуна посредством различных добавок и кислородной продувки и выпуска плавки необходимого состава в ковш с соблюдением временных и температурных ограничений.



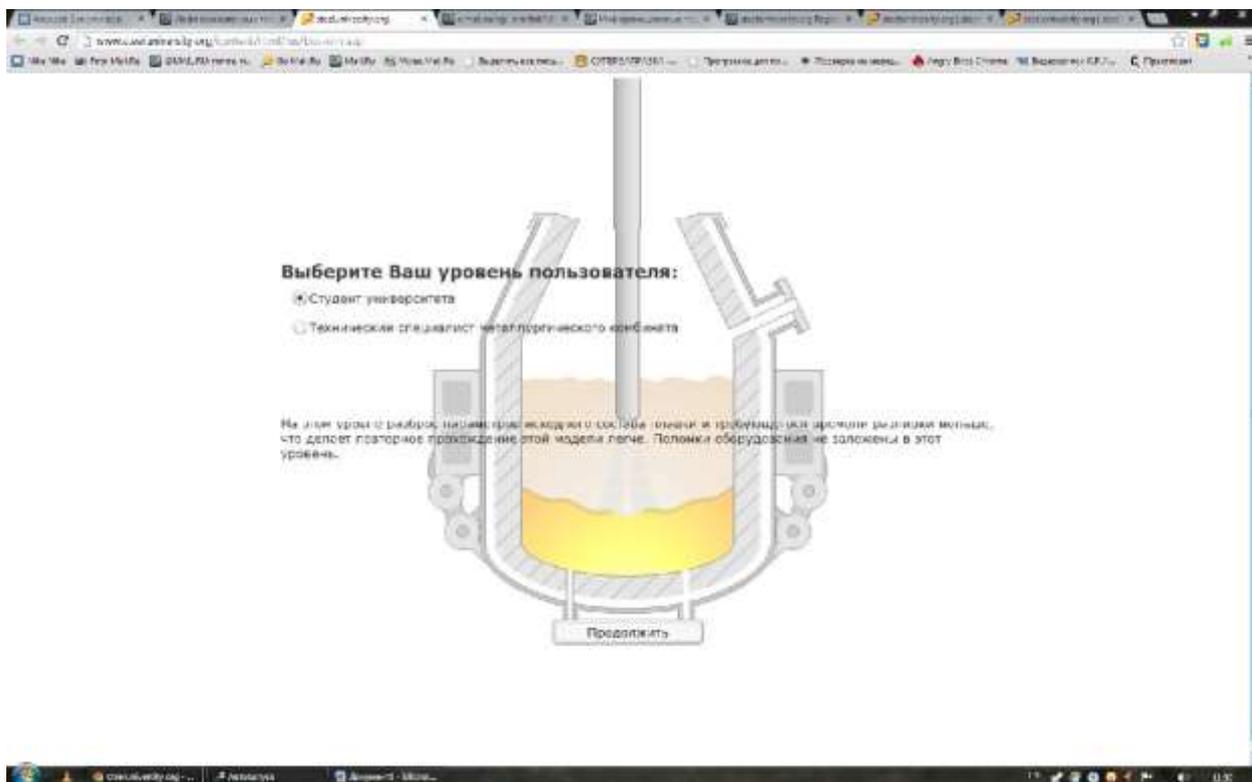
**Опции модели:** Студенческий уровень.

На этом уровне пользователь должен подойти к проблеме с научной точки зрения, используя соответствующие термодинамические и кинетические теории для принятия решений по различным технологическим опциям.

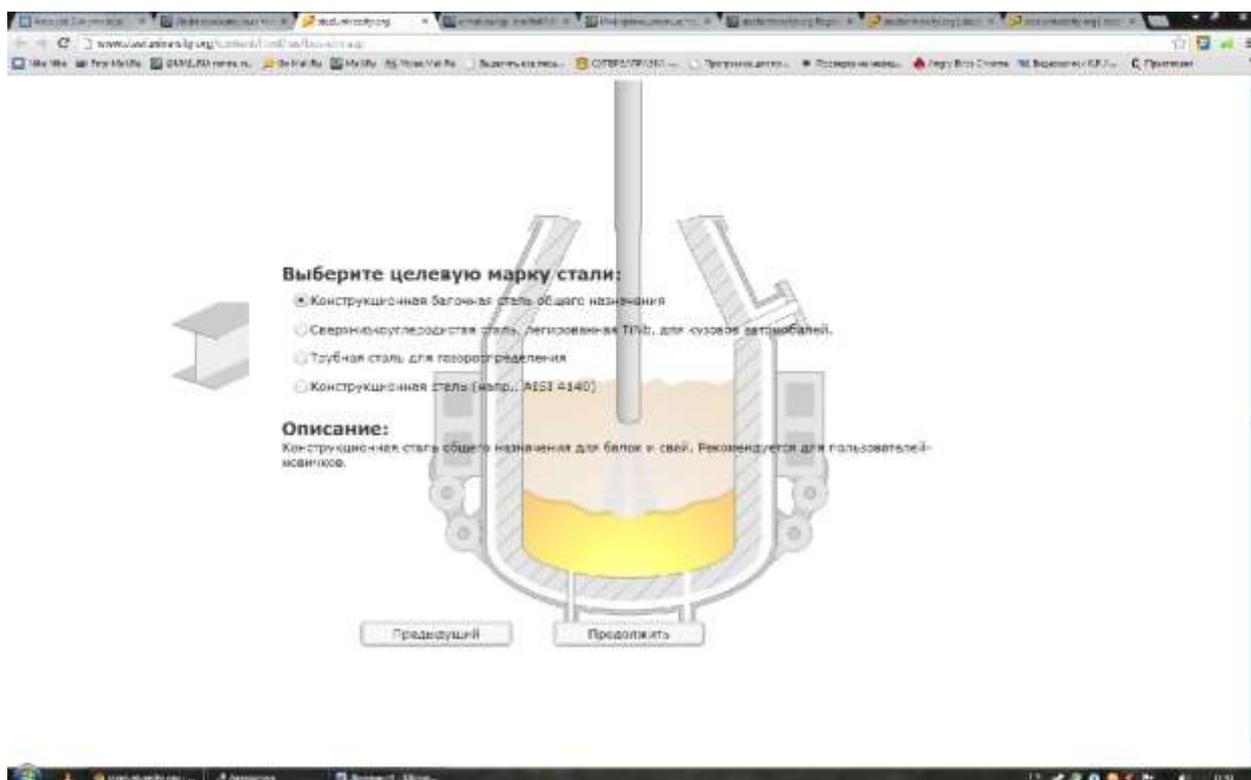
#### Скорость модели

Моделирование можно осуществлять с разной скоростью – от  $\times 1$  до  $\times 32$ . Скорость можно изменять в любой момент работы с моделью. Однако

скорость будет автоматически переключаться на  $\times 1$ , когда будут происходить важные события.



**Конструкционная сталь (CON)** общего назначения– это достаточно нетребовательная марка, требующая минимальной обработки, поэтому она рекомендуется для новичков. Вашей основной целью здесь будет яв-ляться обеспечение содержания углерода от 0.1 до 0.16%.



**Таблица 5-1: Максимальное содержание различных элементов для четырех марок стали, используемых в модели / весов.%.**

| Элемент | CON    | ULC   | LPS   | ENG   |
|---------|--------|-------|-------|-------|
| C       | 0.16   | 0.01  | 0.08  | 0.45  |
| Si      | 0.25   | 0.25  | 0.23  | 0.40  |
| Mn      | 1.5    | 0.85  | 1.1   | 0.90  |
| P       | 0.025  | 0.075 | 0.008 | 0.035 |
| S       | 0.10   | 0.05  | 0.01  | 0.08  |
| Cr      | 0.10   | 0.05  | 0.06  | 1.2   |
| B       | 0.0005 | 0.005 | 0.005 | 0.005 |
| Cu      | 0.15   | 0.08  | 0.06  | 0.35  |
| Ni      | 0.15   | 0.08  | 0.05  | 0.30  |
| Nb      | 0.05   | 0.03  | 0.018 | 0     |
| Ti      | 0.01   | 0.035 | 0.01  | 0     |
| V       | 0.01   | 0     | 0.01  | 0.01  |
| Mo      | 0.04   | 0.01  | 0.01  | 0.30  |
| Ca      | 0      | 0     | 0.005 | 0     |

**Таблица 5-2: Целевые температуры выпуска для четырех марок стали / °С.**

|     | Минимум | Максимум |
|-----|---------|----------|
| CON | 1630    | 1660     |
| ULC | 1665    | 1695     |
| LPS | 1655    | 1685     |
| ENG | 1655    | 1685     |

## Планирование работы

До начала моделирования вы должны спланировать свою работу. Во-первых, вам нужно выполнить расчет теплового и материального баланса, чтобы определить количество чугуна, лома, железной руды, добавок шлака

и общего объема кислорода для обезуглероживания чугуна до требуемого содержания углерода и температуры.

Затем вам нужно подумать, как получить целевые значения в заданное время.

Таблица 6-2: Состав и стоимость доступных добавок.

| Добавка          | Состав   | Стоимость / тонна |
|------------------|--|-------------------|
| Чугун            | 4.5%С, 0.5%Mn, 0.4%Si, 0.08%P, 0.02%S + Fe остаток.  | \$185             |
| Легковесный лом  | 0.05%С, 0.12%Mn, 0.015%P, 0.015%S, 0.06%O, 0.003%Сe, 0.26%Cr, 0.02%Cu, 0.14%Mo, 0.001%Nb, 0.4%Ni, 0.001%Sn, 0.015%Ti, 0.005%V, 0.009%W + Fe остаток. | \$190             |
| Тяжеловесный лом | 0.05%С, 0.12%Mn, 0.015%P, 0.015%S, 0.06%O, 0.003%Сe, 0.26%Cr, 0.02%Cu, 0.14%Mo, 0.001%Nb, 0.4%Ni, 0.001%Sn, 0.015%Ti, 0.005%V, 0.009%W + Fe остаток. | \$150             |
| Железная руда    | 99.1%FeO, 0.3%Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , 0.5%CaO, 0.1%MgO, 0.001%P   | \$85              |
| Известь          | 94.9%CaO, 1.2%Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , 1.8%MgO, 2.1%SiO <sub>2</sub>   | \$85              |
| Доломит          | 59.5%CaO, 38.5%MgO, 2%SiO <sub>2</sub>   | \$85              |

## Температура

Для достижения необходимой температуры выпуска нужно учесть влияние различных добавок на температуру стали.

1. В условиях выдержки, когда подача перемешивающего газа пре-кращается, и продувка кислородом не осуществляется, сталь охлаждается со скоростью около 1 - 2°С мин-1.

2. Для большинства добавок, добавка одной тонны (1000 кг) приводит к дополнительному снижению температуры примерно на 5°С.

3. Реакции окисления фосфора и кремния являются в высокой степени экзотермическими и приводят к выделению тепла в количестве около 26 МДж/т. от окисления 0.1% соответствующего элемента на каждую тонну металла, что является эквивалентом примерно 3 °С/т. от окисления 0.1%.

4. Реакция окисления углерода также является экзотермической и приводит к выделению тепла в количестве около 13 МДж/т. от окисления 0.1% соответствующего элемента на каждую тонну металла, что является эквивалентом примерно 1.4 °С/т. от окисления 0.1%.

5. Для увеличения чугуна или стали необходимо 9.0 или 9.4 МДж/т., соответственно.

Рассчитав общее время от завалки до выпуска стали из конвертера возможно составить график зависимости температуры от времени.

**Этапы процесса кислородной продувки** Кислородно-конвертерный процесс обычно включает следующие три

реакционных периода: окисление кремния, полное обезуглероживание и диффузию углерода.

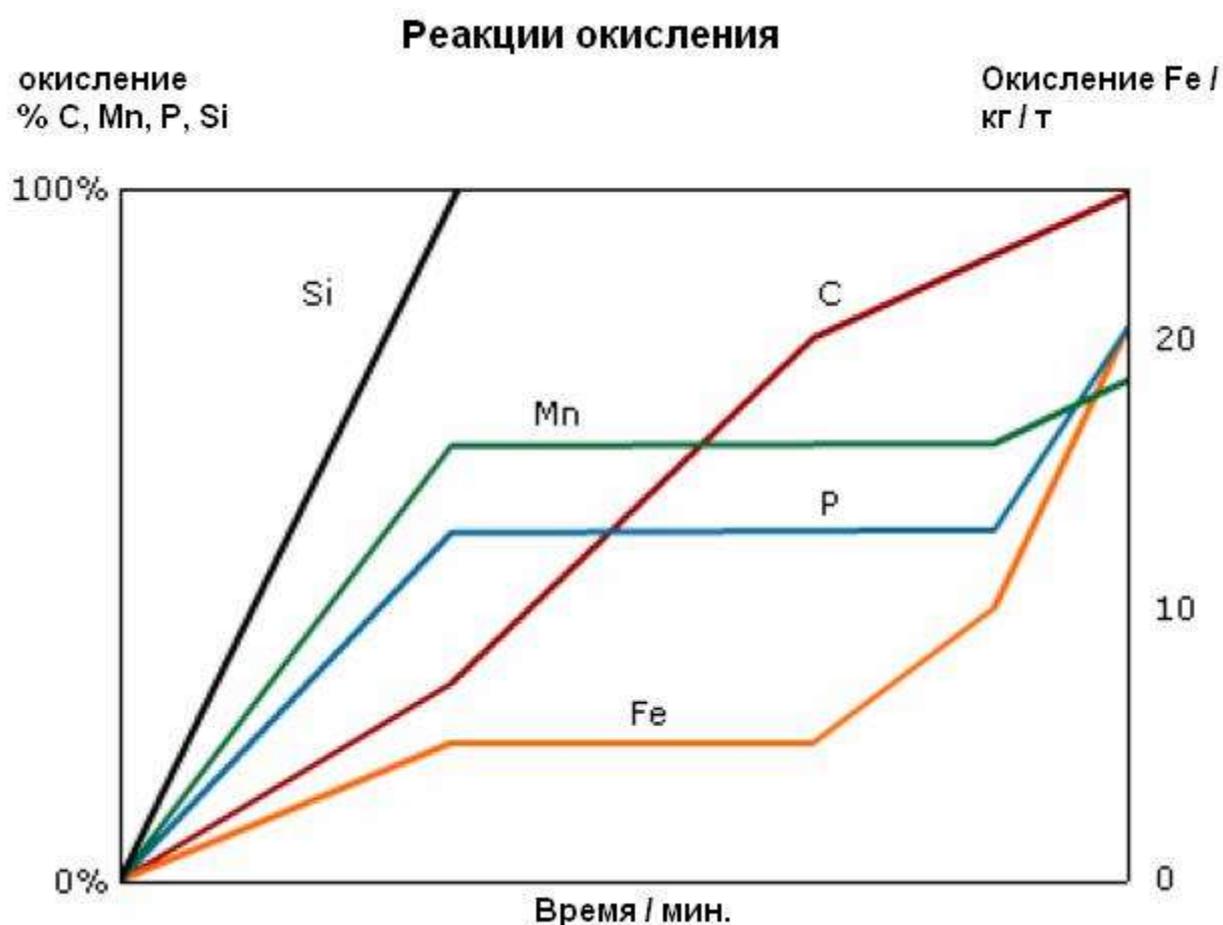
### Период окисления кремния

В течение первой трети (приблизительно) продувки окисляется большая часть Si, а также некоторая часть Fe. Хорошей практикой является увеличение содержания FeO для наведения пенящегося шлака в самом начале продувки, и затем его стабилизация путем опускания фурмы, пока пена не перестанет подниматься.

В течение этого периода происходит окисление основного количества P и Mn. Остаток введенного в расплав кислорода вступает в реакцию с углеродом.

## Период полного обезуглероживания

При нормальных условиях весь введенный в расплав кислород вступает в реакцию с углеродом. Однако если фурма расположена слишком высоко, часть кислорода вступает в окислительные реакции с Fe. С другой стороны, если фурма опущена слишком низко, ранее образовавшийся FeO (пенящийся шлак) восстанавливается, и высвободившийся кислород вступает в реакцию с C.



## Период диффузии углерода

В конце продувки содержание углерода составляет менее 0.8%С, скорость обезуглероживания значительно снижается, и теперь все более ограничивается диффузией углерода в стали.

## Управление в процессе работы с моделью

После начала работы с моделью вы можете вывести на экран и/или воспроизвести различные источники информации, нажав на соответствующую клавишу; клавиши указаны в меню в нижнем левом углу экрана.

Используются следующие клавиши:

**A:** Добавка легирующих материалов

**C:** Просмотреть состав стали в зависимости от времени

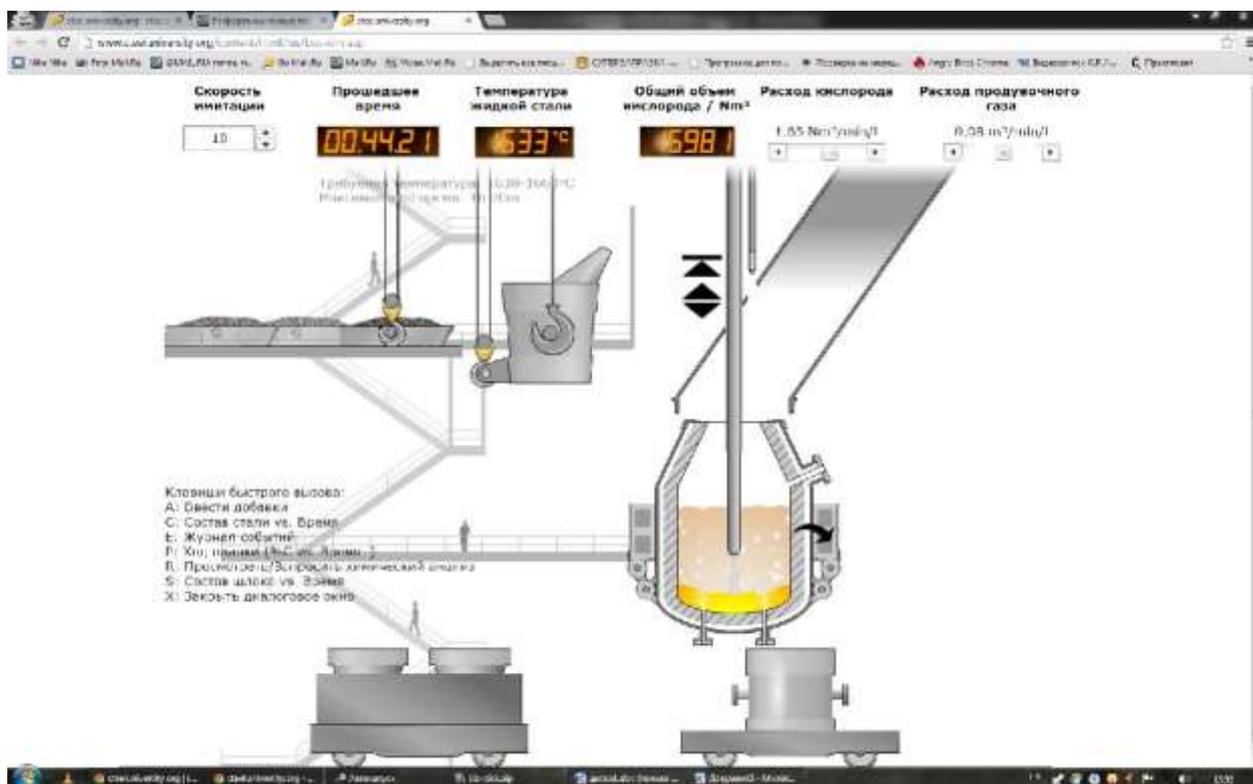
**E:** Журнал регистрации событий

**P:** Просмотреть технологический маршрут плавки (%C в зависимости от времени)

**R:** Просмотреть / запросить анализ

**S:** Просмотреть состав шлака в зависимости от времени

**X:** Закрыть диалоговые окна



## Результаты моделирования

После выпуска стали из конвертера работа с моделью завершается, отображаются результаты плавки, а также общие производственные затраты (в \$ на тонну).

**Резюме результатов:**

**Установки модели:**  
Уровень Пользователя: Студент университета  
Марка Стали: Конструкционная сталь

**Данные успешно созданы**

|                                    | Значение            | Фактическое |   |
|------------------------------------|---------------------|-------------|---|
| Контроль химического состава стали | Продвинуто в модели | ✓           |   |
| Контроль химического состава ванны | Продвинуто в модели |             |   |
| Объем ванны / м <sup>3</sup>       | 10.200              | 10.170      | ✓ |
| Температура выпуска / °C           | 1630, 1660 °C       | 1640 °C     | ✓ |

[Просмотреть журнал событий](#)

**Разбивка затрат:**

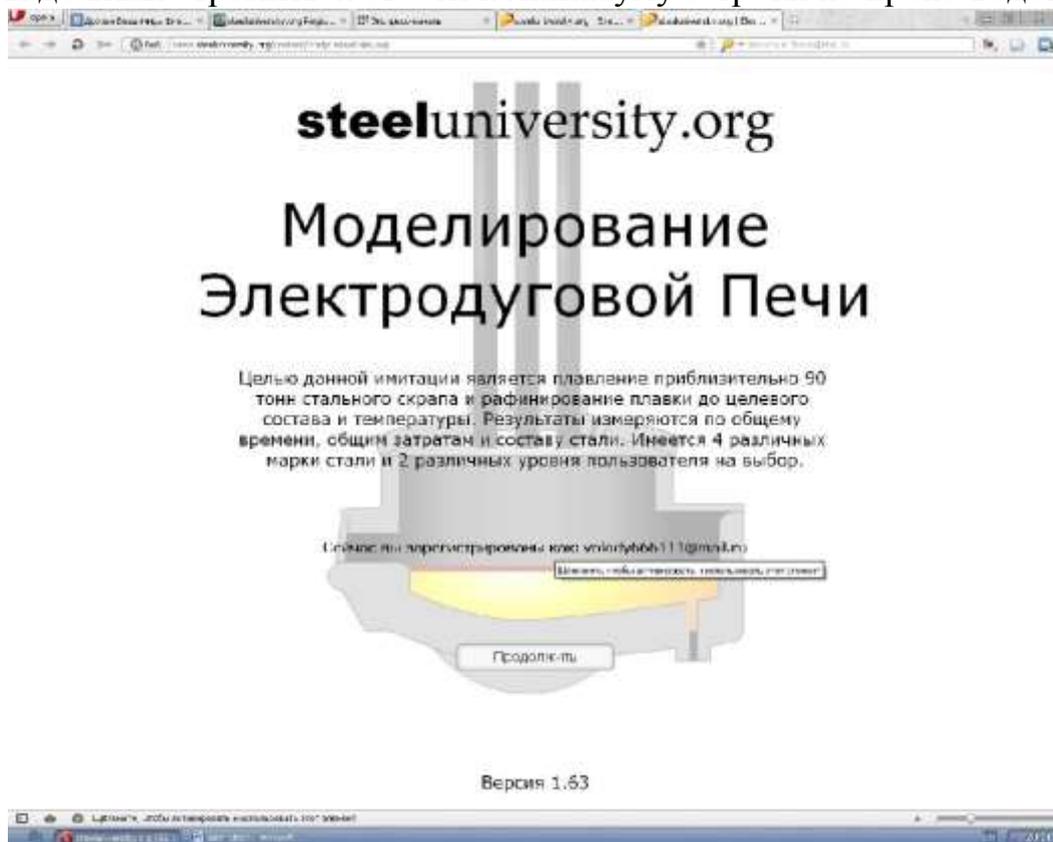
|                            |                     |
|----------------------------|---------------------|
| Железный чуган             | \$17000             |
| Добавки                    | \$1746,75           |
| Прочие расходные материалы | \$3959              |
| <b>Общие затраты:</b>      | <b>\$42406</b>      |
|                            | <b>(\$424,06/t)</b> |

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №4

### Моделирование электродуговой печи

**Цель работы:** Цель работы с моделью заключается в том, чтобы отобрать и расплавить лом в ЭДП с достижением целевого состава выбранной марки стали, и осуществить выпуск металла с соблюдением необходимых временных и температурных пределов.

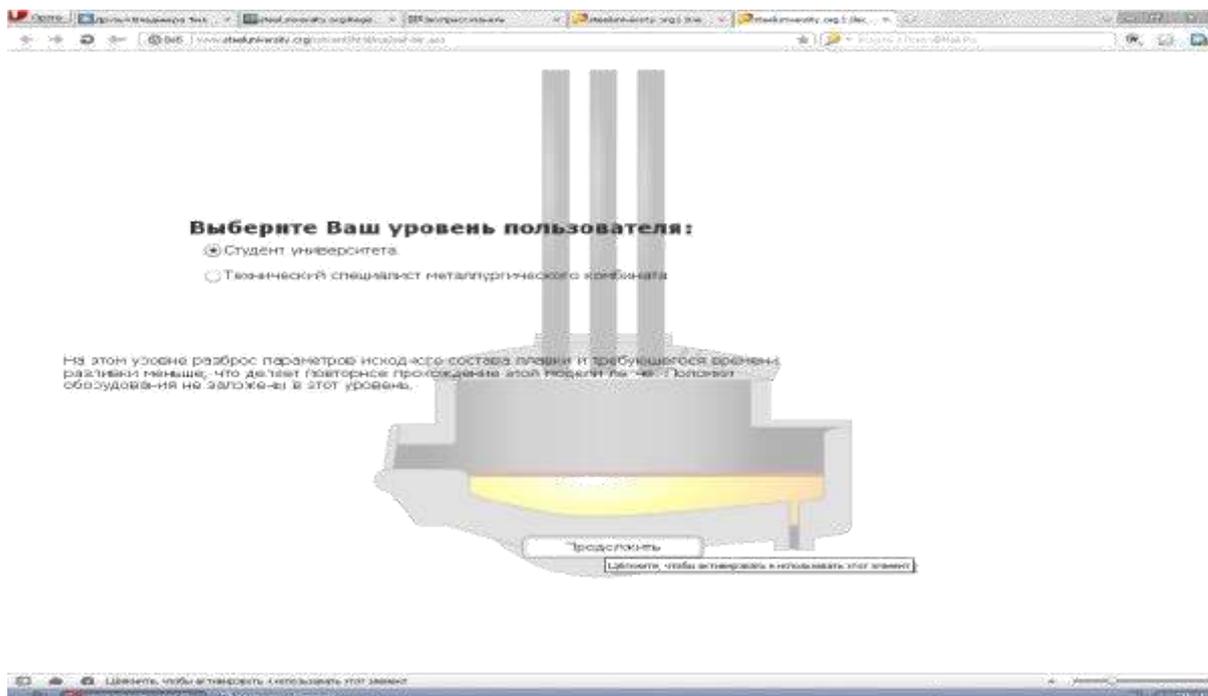
Также вы должны стремиться свести к минимуму затраты на производство.



#### Опции модели

#### Скорость модели

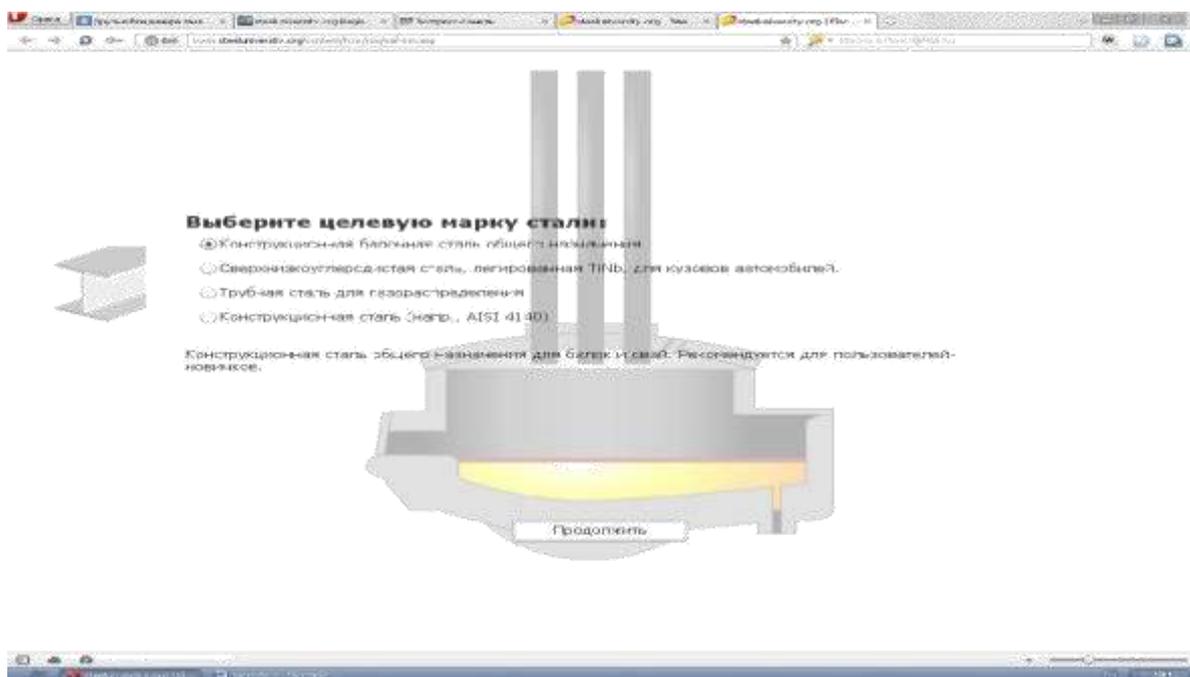
Моделирование ЭДП можно осуществлять с разной скоростью – от  $\times 1$  до  $\times 32$ . Скорость можно изменять в любой момент работы с моделью. Увеличение скорости может быть удобно на определенных этапах работы. Однако некоторые операции требуют тщательного внимания, поэтому эту опцию нужно использовать осторожно.



**Конструкционная сталь** общего назначения – это достаточно нетребовательная марка, требующая минимальной обработки, поэтому она рекомендуется для новичков. Вашей основной целью здесь будет являться обеспечение необходимых уровней легирующих добавок.

Таблица 4-1 Целевой состав для четырех марок стали, используемых в модели ЭДП.

|    | Конструкционная сталь |        | Сверхнизкоуглеродистая сталь TiNb |       | Трубопроводная сталь |       | Машиностроительная сталь |       |
|----|-----------------------|--------|-----------------------------------|-------|----------------------|-------|--------------------------|-------|
|    | Мин.                  | Макс.  | Мин.                              | Макс. | Мин.                 | Макс. | Мин.                     | Макс. |
| C  | 0.10                  | 0.130  | 0.05                              | 0.10  | 0.040                | 0.060 | 0.30                     | 0.45  |
| Si | 0.10                  | 0.50   | 0.15                              | 0.50  | 0.10                 | 0.30  |                          | 0.50  |
| Mn | 1.00                  | 1.50   | 0.65                              | 1.20  | 0.90                 | 1.30  | 0.60                     | 1.20  |
| P  |                       | 0.025  | 0.055                             | 0.075 |                      | 0.008 |                          | 0.035 |
| S  |                       | 0.10   |                                   | 0.050 |                      | 0.010 |                          | 0.080 |
| Cr |                       | 0.10   |                                   | 0.050 |                      | 0.060 |                          | 1.2   |
| Al |                       |        |                                   | 0.055 |                      | 0.035 |                          | 0.030 |
| B  |                       | 0.0005 |                                   | 0.005 |                      | 0.005 |                          | 0.005 |
| Cu |                       | 0.15   |                                   | 0.080 |                      | 0.060 |                          | 0.35  |
| Ni |                       | 0.15   |                                   | 0.080 |                      | 0.050 |                          | 0.30  |
| Nb |                       | 0.050  |                                   | 0.030 |                      | 0.018 |                          |       |
| Ti |                       | 0.010  |                                   | 0.035 |                      | 0.010 |                          |       |
| V  |                       | 0.010  |                                   |       |                      | 0.010 |                          | 0.010 |
| Mo |                       | 0.040  |                                   | 0.010 |                      | 0.010 |                          | 0.30  |



## Планирование работы

До начала моделирования вы должны составить спланировать свою работу. Моделирование ЭДП состоит из трех визуальных этапов. На первых двух этапах вы подготовите материалы для производства выбранной марки стали, а на третьем, заключительном этапе вы будете осуществлять плавление своих материалов и рафинирование для доводки до целевого состава.

1. Выбор марки стали и смешивание различных видов металлолома таким образом, чтобы получить целевой состав
2. Загрузка выбранных материалов в корзины (бадью)
3. Завалка, расплавление и рафинирование в электродуговой печи  
Завалка лома в печь при помощи корзин Нагрев и расплавление лома Добавление легирующих и шлакообразующих смесей

Вдувание углеродсодержащих материалов и кислорода для вспенивания шлака

Контроль над оборудованием

Выпуск металла

## Подготовка лома

В начале работы вам предложат список со списком десять различных видов лома. Их названия соответствуют стандартам США – международного стандарта для классификации лома нет. Каждый из этих видов обладает такими свойствами, как состав, объемная плотность, форма и стоимость. В нашей модели фактический состав варьируется в пределах  $\pm 5\%$  по каждому элементу, содержащемуся в материале.

| Лом                                   | Средний состав / весовой %   | Объемная плотность / кг м <sup>-3</sup> | Форма* | Стоимость / тонна |
|---------------------------------------|--|---|--------|-------------------|
| Тяжеловесный лом №1                   | 0.025 %C, 0.017 %Si, 0.025 %P, 0.033 %S, 0.2 %Cr, 0.15 %Ni, 0.03 %Mo +Fe остаток.  | 0.85                                    | КЛ     | \$160             |
| Тяжеловесный лом №2                   | 0.03 %C, 0.022 %Si, 0.028 %P, 0.035 %S, 0.26 %Cr, 0.18 %Ni, 0.03 %Mo +Fe остаток.  | 0.75                                    | КЛ     | \$140             |
| Внутризаводской низколегированный лом | 0.17 %C, 0.04 %Si, 0.31 %Mn, 0.013 %P, 0.0014 %S, 0.26 %Cr, 0.4 %Ni, 0.001 %Nb,  | 3.0                                     | КЛ     | \$240             |
|                                       | 0.015 %Ti, 0.005 %V, 0.14 %Mo +Fe остаток.   |   |        |                   |
| Толстолистовой и конструкционный лом  | 0.25 %C, 0.25 %Si, 1.0 %Mn, 0.025 %P, 0.025 %S, 0.15 %Cr, 0.05 %Mo, 0.15 %Ni, 0.22 %Sn +Fe остаток.                                | 2.0                                     | КЛ     | \$290             |
| Внутризаводской лом нержавеющей стали | 0.015 %C, 0.33 %Si, 1.64 %Mn, 0.014 %P, 0.002 %S, 18.32 %Cr, 8.08 %Ni, 0.01 %Nb, 0.004 %Ti, 0.01 %V, 1.3 %Mo, 0.16 %N +Fe остаток. | 3.0                                     | КЛ     | \$330             |
| Бунты №1                              | 0.027 %C, 0.012 %Si, 0.12 %Mn, 0.01 %P, 0.006 %S, 0.032 %Cr, 0.02 %Ni, 0.001 %Ti +Fe остаток.                                      | 1.2                                     | МЛ     | \$180             |
| Бунты №2                              | 0.04 %C, 0.016 %Si, 0.12 %Mn, 0.014 %P, 0.008 %S, 0.04 %Cr, 0.03 %Ni, 0.0014 %Ti +Fe остаток.                                      | 1.1                                     | МЛ     | \$170             |
| Железо прямого восстановления         | 2.4 %C, 0.1 %P, 0.01 %S, 0.02 %Ti, 0.03 %Nb, 0.02 %V +Fe остаток.  | 1.65                                    | МЛ     | \$220             |
| Дробленый лом                         | 0.03 %C, 0.015 %Si, 0.02 %P, 0.03 %S, 0.12 %Cr, 0.1 %Ni, 0.02 %Mo +Fe остаток.   | 1.5                                     | ОМЛ    | \$200             |
| Мелкая обрезь №1                      | 0.03 %C, 0.01 %Si, 0.02 %P, 0.02 %S, 0.08 %Cr, 0.06 %Ni, 0.01 %Mo +Fe остаток.   | 1.5                                     | ОМЛ    | \$210             |

\* КЛ = Крупный лом, МЛ = Мелкий лом, ОМЛ = Очень мелкий лом

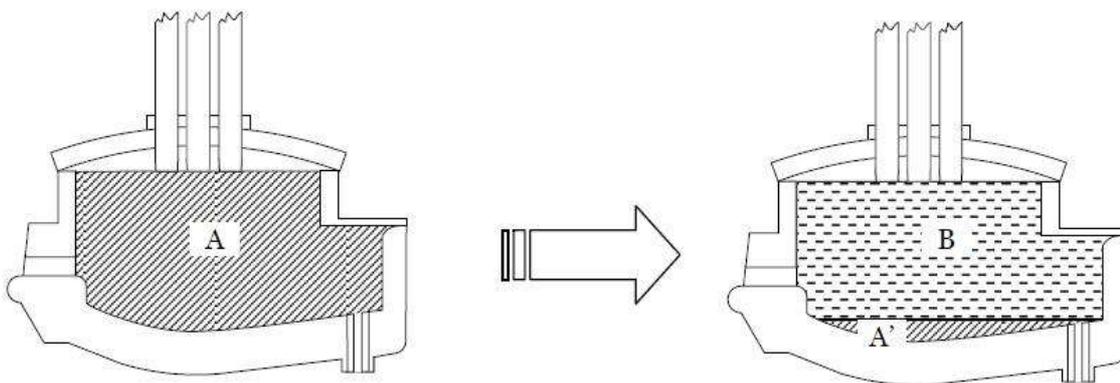
## Загрузка лома в корзины

После выбора лома и перехода на следующий этап, вы должны распределить лом по трем имеющимся корзинам. Учтите следующее:

Объем печи = 40 м<sup>3</sup>

Содержимое каждой корзины должно расплавляться последовательно, чтобы наиболее эффективно использовать емкость печи.

Ограничение по объему для первой корзины соответствует ограничению по объему печи (А на Рис. 6-2). Так как плотность жидкой стали гораздо выше объемной плотности лома, содержимое корзины значительно уменьшится в объеме после расплавления, за счет чего останется место для лома, загружаемого второй и третьей корзиной. Так как определенный объем печи будет занят расплавом из первой корзины, ограничения по объему для второй и третьей корзин определяются нетто-емкостью печи, т.е.  $[A - A' = B]$ .



### Выберите марку стали и определите свой состав скрапа

| Сырьевой материал                | Собственная единица \$/t | Масса t | Объем m³ | Загрузка \$ |
|----------------------------------|--------------------------|---------|----------|-------------|
| № 1 Тяжелый                      | 160                      | 1       | 1        | 160         |
| № 2 Тяжелый                      | 140                      | 0       | 0        | 0           |
| Внутренний Низколегированный     | 240                      | 4       | 1        | 960         |
| Толстолистовой и Конструкционный | 290                      | 6       | 3        | 1740        |
| № 1 Легкий                       | 180                      | 16      | 13       | 2880        |
| № 2 Легкий                       | 170                      | 26      | 22       | 4420        |
| Угль Прямое Восстановление       | 220                      | 1       | 1        | 220         |
| Дробильный (Мелкий)              | 200                      | 36      | 24       | 7200        |
| Токарная Стружка                 | 110                      | 0       | 0        | 0           |
| Сор ЭДП                          | -120                     | 0       | 0        | 0           |

**Итого:** **90**      **65**      **17580**  
      **= \$196/t**

Выберите стальную марку стали:  
 К01 стальной сталь

| Element | Result | Min | Max  |
|---------|--------|-----|------|
| C*      | 0.077  | 0.1 | 0.12 |
| Si**    | 0.031  | 0.1 | 0.3  |
| Mn*     | 0.137  | 1   | 1.5  |
| P       | 0.017  | 0   | 0.02 |
| S*      | 0.018  | 0   | 0.02 |
| Cr      | 0.092  | 0   | 0.1  |
| Mo      | 0.018  | 0   | 0.04 |
| Ni      | 0.027  | 0   | 0.15 |
| Cu      | 0.075  | 0   | 0.15 |
| Nb      | 0.000  | 0   | 0.05 |
| Ti      | 0.001  | 0   | 0.01 |

\*) Показывает элементы, которые являются (частично) избыточными во время загрузки с моделью изложенной стальной маркой.

Масса %

### Склад скрапа

Загрузите выбранный сырьевой материал в 3 корзины по порядку. Получайте об ограничении по объему и количеству грубого скрапа в каждой корзине. Делайте на следующей корзине, чтобы начать ее загрузку. Отметьте, что как только вы оставите корзину, вы не сможете вернуться, чтобы изменить ее содержание.

Бункеры для скрапа

№ 1 Тяжелый  
0 t    0 m³

Грубый скрап  
0.35 t/m³

№ 2 Тяжелый  
0 t    0 m³

Грубый скрап  
0.25 t/m³

Внутренний Низколегированный  
0 t    0 m³

Трубы скрап  
3 t/m³

Толстолистовой и Конструкционный F  
0 t    0 m³

Грубый скрап  
2 t/m³

№ 1 Легкий  
0 t    0 m³

Мелкий скрап  
1.2 t/m³

№ 2 Легкий  
0 t    0 m³

Мелкий скрап  
1.65 t/m³

Угль Прямое Восстановление  
0 t    0 m³

Дробильный (Мелкий)  
0 t    0 m³

Очень мелкий скрап  
1.5 t/m³

Токарная Стружка  
0 t    0 m³

Очень мелкий скрап  
1 t/m³

Сор ЭДП  
0 t    0 m³

Порошок  
0.9 t/m³

Передаваемая масса / t:

**Корзины для загрузки скрапа**

Общая стоимость / \$: 17580

Текущий объем: 23 m³

Предел объема: 36 m³

Текущий объем: 20 m³

Предел объема: 36 m³

Текущий объем: 22 m³

Предел объема: 32 m³

## Эксплуатация печи

Сейчас мы переходим к работе с электродуговой печью. Как упомянуто во введении, шлак играет важную роль в процессе. Таким образом, на этом этапе в печь также присаживают шлакообразующие смеси. Корзины одна за другой разгружаются в ЭДП, где осуществляется плавление лома.

### Завалка печи

При помощи крана поднимайте корзины и подавайте их к печи. Убедитесь, что свод печи поднят. Когда корзина будет наверху печи, нажмите на иконку дверцы на корзине, чтобы выгрузить ее содержимое в печь. Уберите кран / корзину, затем закройте свод.

Остальные корзины загружаются по тому же принципу.

### Электроды

Электроэнергия распределяется между тремя электродами, лом плавится за счет электрических дуг, образующихся между электродами и ломом. В процессе работы печи происходит износ электродов. Необходимо корректировать их положение, чтобы все три электрода постоянно находились в контакте с материалом, это обеспечивает эффективную передачу энергии.

### Настройки отводов трансформатора

Существует четыре настройки отводов:

| <b>Настройка отводов и соответствующие виды мощности. Настройки отводов</b> | <b>Уровень мощности</b> |
|---|-------------------------|
| 0   | 0<br>МВт                |
| 1   | 75<br>МВт               |
| 2   | 90<br>МВт               |
| 3   | 105<br>МВт              |
| 4   | 120<br>МВт              |

### Добавки

В течение всего процесса плавления и рафинирования вы можете добавлять материалы - для увеличения содержания легирующих, раскисления стали, десульфурации стали или увеличения массы шлака.

## **Плавление и рафинирование**

### **ШЛАКООБРАЗУЮЩИЕ СМЕСИ**

Такие свойства шлака, как вязкость, способность к удалению серы, фосфора и др. зависят от состава и температуры.

Некоторые оксиды металлов в шлаке являются кислыми, поэтому добавление основных ШОС способствует поддержанию основности шлака на должном уровне. Высокая основность шлака (т.е. высокое отношение содержания оксида кальция к оксиду кремния) также способствует удалению фосфора, однако необходимо соблюдать осторожность и не перенасыщать шлак известью, так как это приведет к повышению его вязкости и снижению эффективности.

Таблица 7-2. Список добавок, присаживаемых в печь во время плавления и рафинирования.

| Добавки              | Состав   | Объемная плотность/<br>т м <sup>-3</sup> | Форм-а            | Стои-мость/<br>тонна |
|----------------------|--|--|-------------------|----------------------|
| Al                   | 99.15 %Al, 0,82 %Fe, 0.03 %Cu  | 2.4                                      | Кусковая          | \$1400               |
| Углерод              | 99.9 %C, 0.011 %S  | 1  | Порошковая        | \$280                |
| Cr-карбид            | 7.82 %C, 0.23 %Si, 0.021 %P, 0.051 %S, 70.11 %Cr, 0.0092 %Ti   | 3.5                                      | Кусковая          | \$590                |
| Cr-карбид (низк. S)  | 8.12 %C, 0.34 %Si, 0.017 %P, 0.024 %S, 69.92 %Cr   | 3.5                                      | Кусковая          | \$660                |
| Доломит              | 38.5 %MgO, 2 %SiO <sub>2</sub> , 0.005 %P, 0.15 %S + CaO остаток.  | 1  | Порошковая        | \$120                |
| Пыль ЭДП             | 20.03 %Cr, 11.2 %Ni, 4.44 %Mn, 0.91 %Si, 0.019 %P, 0.003 %Ti, 0.001 %S + Fe остаток .                    | 0.9                                      | Порошковая        | \$-120               |
| FeMn, высоко-угерод. | 76.5 %Mn, 6.7 %C, 1.0 %Si, 0.03 %S, 0.3 %P + Fe остаток .  | 4.0                                      | Кусковая          | \$350                |
| FeMn, низко-угерод.  | 81.5 %Mn, 0.85 %C, 0.5 %Si, 0.1 %S, 0.25 %P + Fe остаток .   | 4.0                                      | Кусковая          | \$600                |
| FeMo                 | 0.044 %C, 0.14 %Si, 0.044 %P, 0.092 %S, 62.02 %Mo + Fe остаток   | 6  | Кусковая          | \$16800              |
| FeSi75               | 0.08 %C, 60.3 %Si, 0.014 %P, 0.002 %S, 1.23 %Al, 0.05 %Ti + Fe остаток .                                 | 2.5                                      | Кусковая          | \$700                |
| FeSi75 (низк. Ti)    | 0.008 %C, 75.6 %Si, 0.003 %P, 0.024 %Al, 0.014 %Ti + Fe остаток  | 2.5                                      | Кусковая          | \$840                |
| FeV                  | 0.25 %C, 0.72 %Si, 0.031 %P, 0.081 %S, 1.23 %Al, 78.82 %V + Fe остаток .                                 | 3.5                                      | Кусковая          | \$8400               |
| Плави-ко-вый шпат    | 20 %CaO, 20 %MgO, 20 %SiO <sub>2</sub> , 0.001 %P, 0.06 %S + CaF <sub>2</sub> остаток.                   | 1  | Порошковая        | \$180                |
| Оксид железа         | 0.3 %Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , 0.5 %CaO, 0.1 %MgO, 0.001 %P + FeO остаток .                       | 1.8                                      | Порошковая        | \$140                |
| Известь              | 1.2 %Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , 1.8 %MgO, 2.1 %SiO <sub>2</sub> , 0.01 %P, 0.01 %S + CaO остаток . | 1  | Порошковая        | \$120                |
| Прокат-ная окалина   | 0.65 %C, 0.4 %Si, 0.61 %Mn, 0.019 %P, 0.002 %S, 0.2 %Cr, 0.25 %Ni, 0.05 %V, 0.1 %Mo + Fe остаток.        | 1.6                                      | Порошковая        | \$0                  |
| SiC                  | 30 %C, 70 %Si  | 1.5                                      | Кусковая          | \$610                |
| SiCr                 | 1.82 %C, 25.33 %Si, 0.014 %P, 0.015 %S, 38.23 %Cr + Fe остаток.  | 3.5                                      | Кусковая          | \$940                |
| Токарная стружка     | 0.03 %P, 0.113 %S, 0.698 %Cr, 0.538 %Mo + Fe остаток.  | 1  | Очень мел-кий лом | \$110                |

## **Вдувание углеродсодержащих материалов и кислорода**

Во время и после расплавления материалов некоторые соединения и элементы начинают вступать в реакции друг с другом. Чтобы обеспечить необходимое количество соответствующих элементов в стали, этим реакциям можно способствовать за счет вдувания кислорода в стальную фазу через фурму.

По одной из реакций образуется окись углерода (СО), которая крайне важна для вспенивания шлака. При вдувании углеродсодержащих материалов в шлаковую фазу через фурму и его реакции с кислородом образуются пузырьки СО. Эти пузырьки затем вызывают вспенивание шлака. Вспененный шлак защищает ванну стали от контакта с атмосферой, а также способствует увеличению электрического КПД, покрывая электрические дуги от электродов, и эксплуатации печи на высоких мощностях без риска повреждения стенок и свода печи. Покрытие дуги шлаком также предотвращает контакт азота с дугой, при подобном контакте может произойти диссоциация азота и его переход в сталь.

В этой модели используются следующие затраты на вдувание углеродсодержащих материалов и кислорода:

Возможный расход углерода: 50-150 кг/мин

Стоимость: \$0.28 за кг

Возможный расход кислорода: 100-150 нм<sup>3</sup>/мин

Стоимость: \$0.10 за нм<sup>3</sup>

## **Удаление фосфора и серы**

К сожалению, условия, благоприятные для удаления фосфора, прямо противоположны условиям для удаления серы. Кроме того, даже после перехода этих элементов в шлаковую фазу они могут перейти обратно в сталь.

### *Фосфор*

Способность шлака к удержанию фосфора зависит от температуры и кислородной активности стали, а также основности и содержания FeO в шлаке. При высоких температурах и низком содержании FeO фосфор переходит из шлака обратно в жидкую сталь. Следовательно, его удаление обычно производится на начальных этапах обработки плавки, когда температура еще низкая.

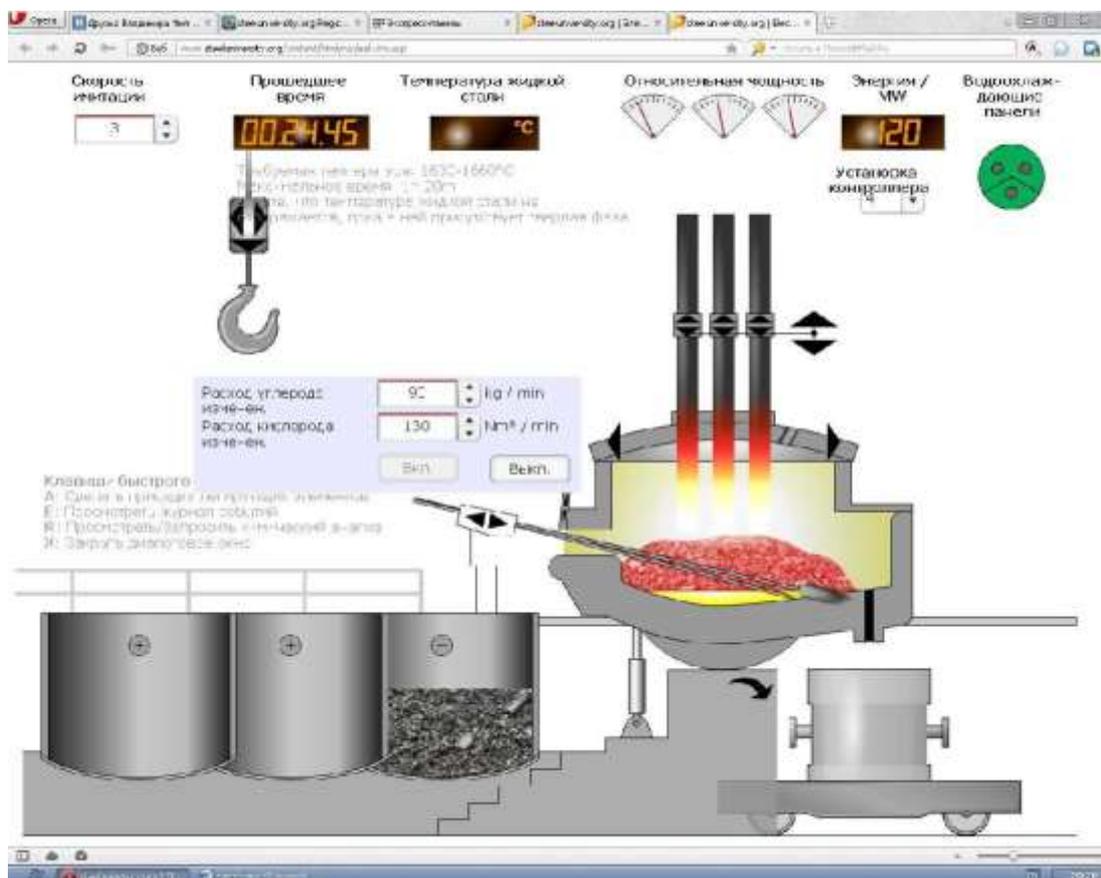
### *Сера*

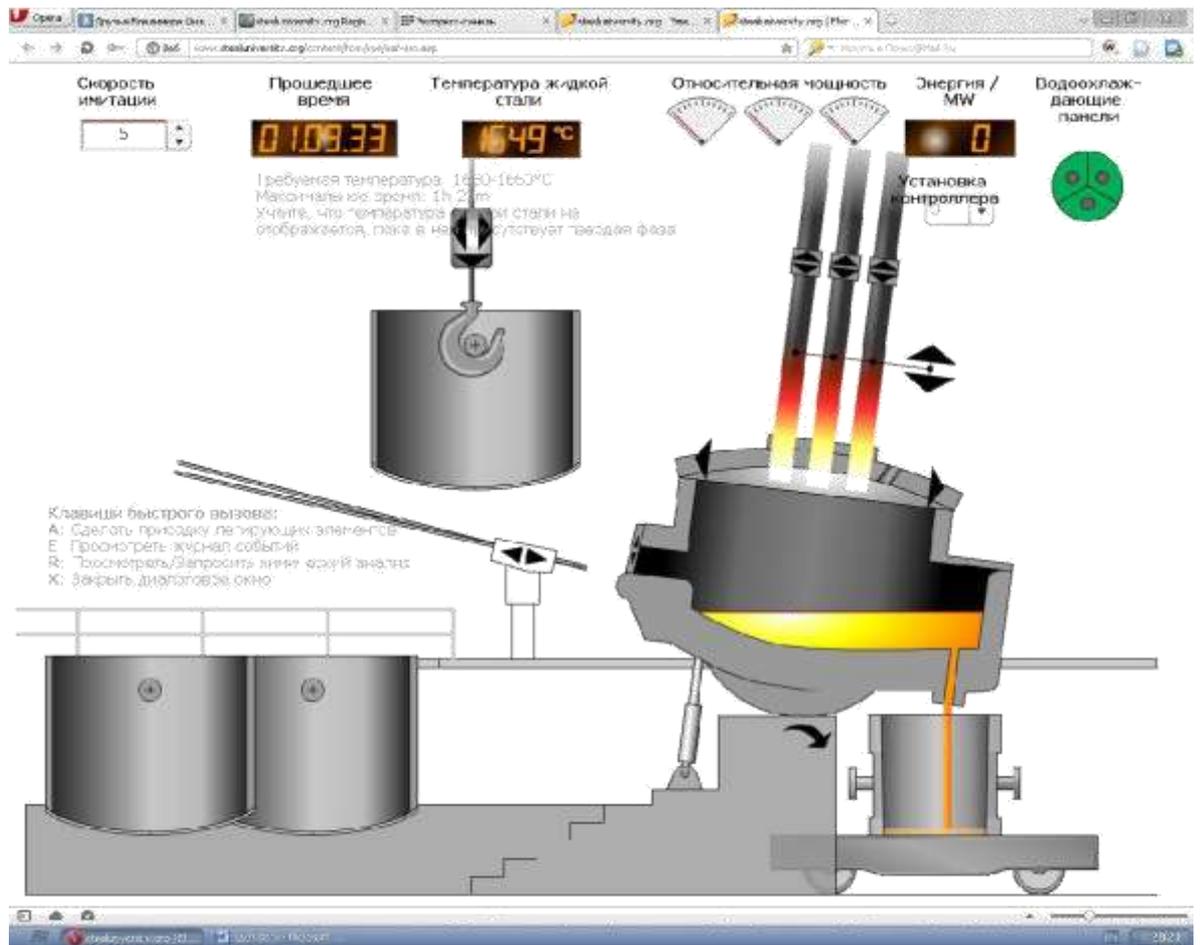
Чтобы удалить серу из жидкой стали, необходимо использовать сульфидообразующее вещество, такое как соединение кальция. Реакции образования сульфидов проходят в восстановительной атмосфере, при низком со-

держании кислорода, высокой массе шлака и высокой температуре. Эти условия характерны для завершающих этапов плавки.

### Выпуск плавки

Выпуск плавки можно начать, нажав кнопку поворота под печью. Выпуск плавки в ковш является завершающим этапом работы с моделью. По завершении выпуска металла, т.е. когда в печи стали больше не останется, вы автоматически перейдете на экран результатов.





## Обзор результатов

**Резюме результатов:**

Установка модели:  
уровень Пользователя: Студент университета  
Марио Сталли, конструкционная сталь

Successfully saved data

| Параметр                         | Значение                       | Фактический | Статус |
|----------------------------------|--------------------------------|-------------|--------|
| Конечный элементный состав стали | Щелкнуть для просмотра анализа |             | ✓      |
| Конечный элементный состав шлама | Щелкнуть для просмотра анализа |             |        |
| Общее время / минуты             | 1h:20m                         | 1h:11m      | ✓      |
| Температура заливки / °C         | 1650-1650 °C                   | 1649 °C     | ✓      |
| Вес в тоннах / kg                |                                | 8990t       |        |
| Электрическая энергия            | 34034 kWh                      | 379 kWh     |        |

Щелкнуть для просмотра назначения costs  
Щелкнуть для просмотра журнала

**Разбивка затрат:**

|                            |                |
|----------------------------|----------------|
| Энергия                    | \$19428        |
| Скрап                      | \$17580        |
| Дробленый                  | \$0            |
| Прочие расходные материалы | \$88,56623     |
| <b>Общие затраты</b>       | <b>\$37880</b> |
|                            | (\$47-44/h)    |

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №5

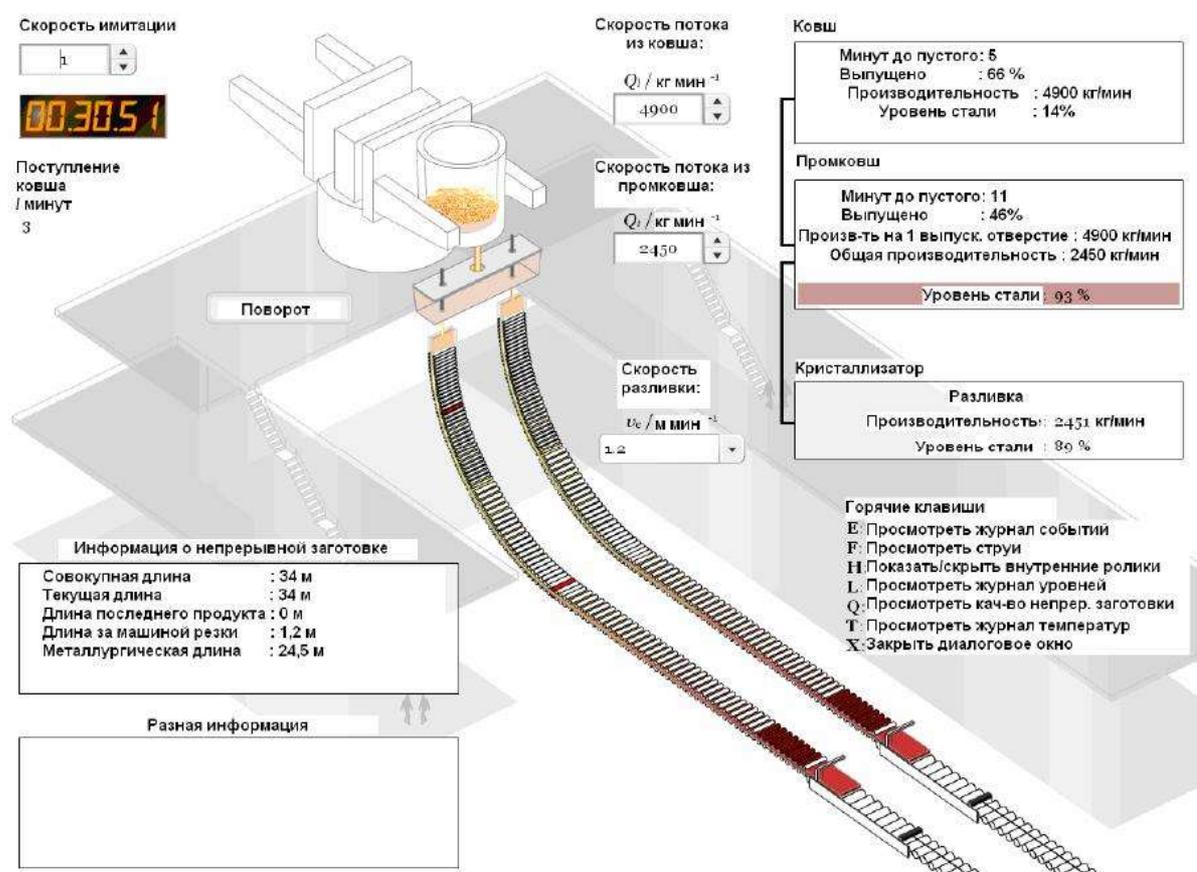
### Динамическая модель непрерывной разливки стали

**Цель работы:** Задача динамической модели – успешно произвести последовательную разливку трех ковшей, соблюдая установленные критерии качества поверхности, внутреннего качества и содержания включений.

Кроме того, нужно стремиться минимизировать затраты на проведение этой операции.



## Расположение оборудования цеха и описание



## Размеры разливочных машин

В динамической модели представлены три разных разливочных машины для разливания четырех разных марок стали. Это машины разливания слэбов, блюмов и заготовок. В таблице ниже перечислены свойства разных разливочных машин.

Таблица 5-1 Таблица свойств разливочных машин

| Тип                                     | Сляб   | Блюм   | Заготовка  |
|---|--|--|--|
| Марки стали                             | Сталь для трубопроводов<br>Сверхнизкоуглеродистая сталь  | Конструкционная сталь  | Машиностроительная сталь   |
| Размер ковша / метрических тонн         | 250  | 100  | 100  |
| Радиус / м                              | 9  | 12   | 8  |
| Количество ручьев                       | 2  | 5  | 6  |
| Скорость разливки / м мин <sup>-1</sup> | 1.0-2.0  | 1.2 - 1.8  | 3 - 5  |
| Сечение / мм                            | 1200 × 230<br>              | 250 × 250<br> | 130 × 130<br> |
| Типичное использование                  | Плоская продукция, т.е., толстый лист, тонкий лист, рулон  | Сортовая продукция, т.е., прутки, балки, сваи  | Сортовая продукция, т.е., прутки, швеллер, проволока   |
| Шаг роликов, секция I / мм              | 202 (35 роликов 45°)   |  |  |
| Шаг роликов, секция II / мм             | 283 (25 роликов 45°)   |  |  |
| Радиусы загиба/разгиба / м              | R <sub>56</sub> =9, R <sub>57</sub> =11.3, R <sub>58</sub> =15, R <sub>59</sub> =22.6, R <sub>60</sub> =45.2 |  |  |

## Опции

Перед началом моделирования важно все спланировать заранее. Первое – надо выбрать скорость разливки, которая позволит разлить сталь, соблюдая все критерии качества. Второе – для качества поверхности важно выбрать правильные настройки качания кристаллизатора. И, наконец, нужно наметить температуру жидкой стали и поступление второго и третьего ковша.

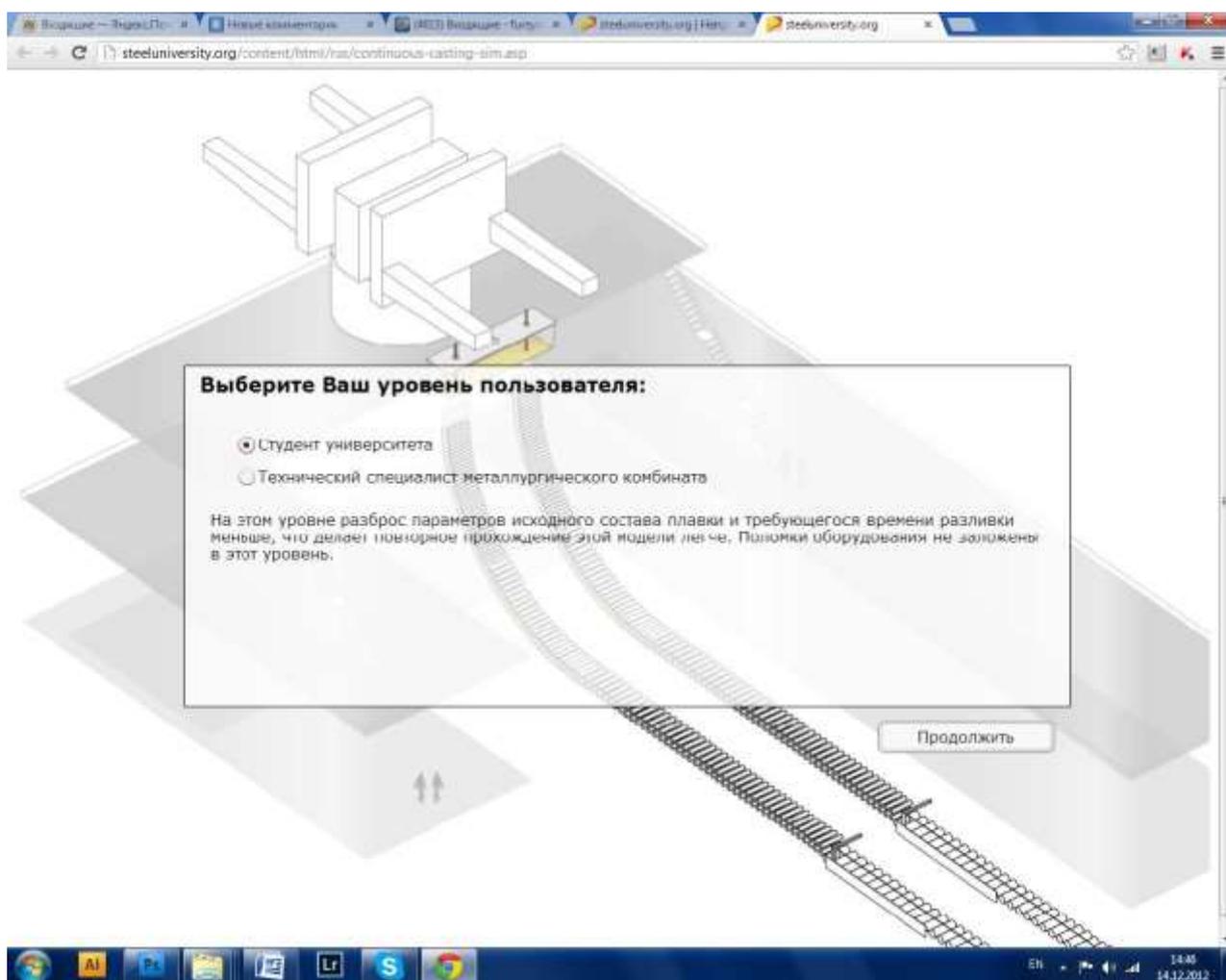
В этом разделе представлены ключевые научные теории и отношения, требующиеся для успешного моделирования. Он ни коим образом не был задуман как всестороннее рассмотрение теории непрерывной разливки или практика – за этим приглашаем пользователя обратиться к другим прекрасным публикациям.

## Студенческий уровень

Этот уровень предполагает научный подход пользователя к проблеме, использование релевантных термодинамических и кинетических теорий для принятия решений по различным вариантам обработки.

Например, пользователю нужно будет решить, какая комбинация скорости разливки и вторичного охлаждения обеспечит наилучшее качество непрерывной заготовки.

На этом уровне не потребуется преодолевать операционные проблемы, и разливка будет относительно простой.

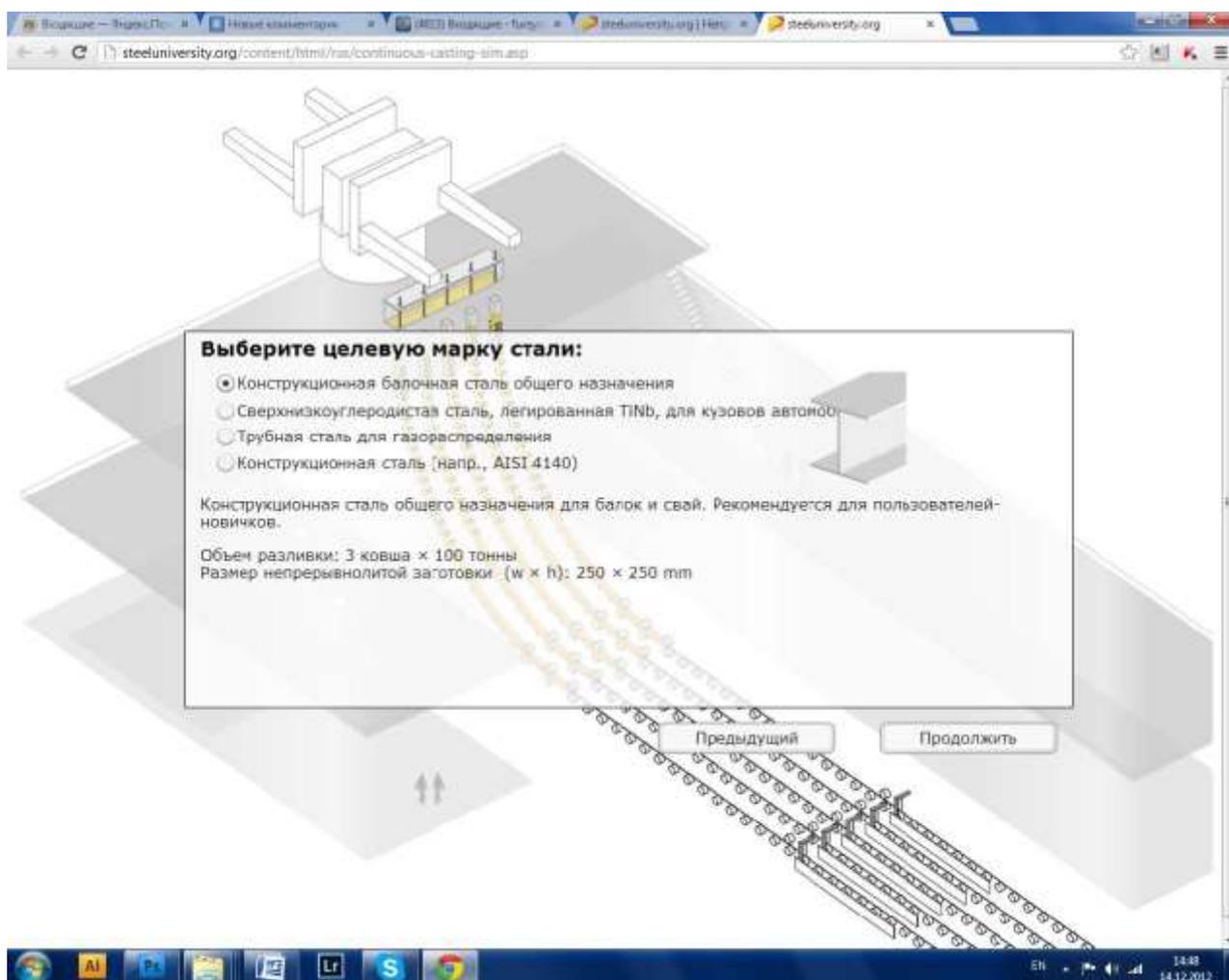


## Марки стали

В данной модели предусмотрено несколько разных марок стали. Это позволяет проиллюстрировать разные варианты обработки.

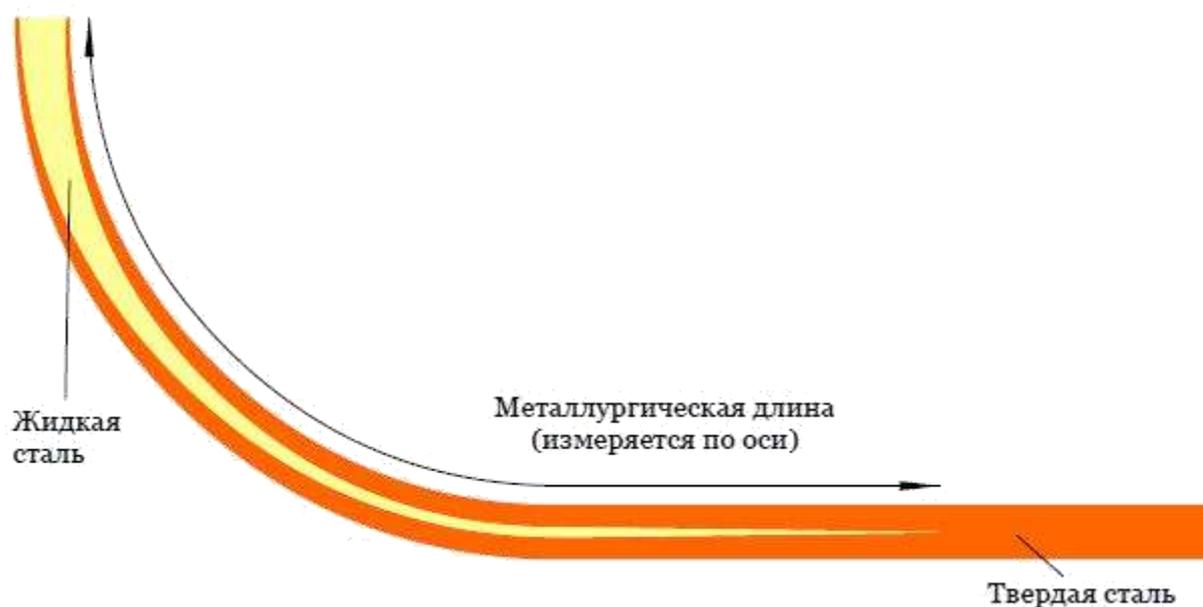
Конструкционная сталь общего назначения— это относительно нетребовательная, склонная к образованию трещин марка, рекомендуемая пользователю-новичку. Конструкционную сталь разливают на установках раз-

ливки блюмов с сечением 250 x 250 мм. Уровень содержания включений может быть умеренным, не вызывая проблем с качеством.



## Скорость разливки и вторичного охлаждения

Правильный выбор сочетания скорости разливки и скорости вторичного охлаждения имеет крайнюю важность. Этот выбор будет влиять на множество параметров во время разливки и является ключевым для получения качественного продукта. Один из параметров, непосредственно зависящих от такого выбора – это металлургическая длина – расстояние от кристаллизатора, на котором непрерывная заготовка полностью затвердевает.



Металлургическая длина – это комплексная функция химического состава стали, скорости разливки, скорости охлаждения и размеров непрерывной заготовки, расчет которой не предусмотрен в данной модели. Для принятия разумных решений в отношении выбираемых параметров разливки пользуйтесь таблицами ниже.

У разных типов разливочных машин разные скорости разливки и охлаждения. Таблицы ниже иллюстрируют зависимость металлургической длины от этих параметров.

Таблица 6-2 Metallургическая длина для конструкционной стали на машине разлики блюмов сечением 250 × 250 мм.

| Скорость<br>охлаждения /<br>кг воды на кг стали | Скорость разлики / м мин <sup>-1</sup> |       |       |       |
|---|--|-------|-------|-------|
|   | 1,2                                    | 1,4   | 1,6   | 1,8   |
| 0,3   | 22,48                                  | 26,55 | 30,43 | 34,65 |
| 0,4   | 21,78                                  | 25,57 | 29,10 | 33,12 |
| 0,5   | 20,96                                  | 24,43 | 27,55 | 31,26 |
| 0,6   | 20,04                                  | 23,17 | 25,57 | 29,22 |

Таблица 6-3 Metallургическая длина для сверхнизкоуглеродистой стали на машине разлики слябов сечением 1200 × 230 мм.

| Скорость<br>охлаждения /<br>кг воды на кг стали | Скорость разлики / м мин <sup>-1</sup> |       |       |       |       |       |
|---|--|-------|-------|-------|-------|-------|
|   | 1,0                                    | 1,2   | 1,4   | 1,6   | 1,8   | 2,0   |
| 0,4   | 19,03                                  | 23,06 | 27,23 | 31,55 | 36,06 | 40,73 |
| 0,5   | 18,30                                  | 22,16 | 26,16 | 30,30 | 34,62 | 39,10 |
| 0,6   | 17,67                                  | 21,38 | 25,23 | 29,22 | 33,36 | 37,70 |
| 0,7   | 17,11                                  | 20,70 | 24,43 | 28,30 | 32,28 | 36,47 |
| 0,8   | 16,63                                  | 20,10 | 23,70 | 27,46 | 31,35 | 35,40 |

Таблица 6-4 Metallургическая длина для трубной стали на машине разлики слябов сечением 1200 × 230 мм.

| Скорость<br>охлаждения /<br>кг воды на кг стали | Скорость разлики / м мин <sup>-1</sup> |       |       |       |       |       |
|---|--|-------|-------|-------|-------|-------|
|   | 1,0                                    | 1,2   | 1,4   | 1,6   | 1,8   | 2,0   |
| 0,4   | 20,17                                  | 24,50 | 28,98 | 33,65 | 38,55 | 43,56 |
| 0,5   | 19,40                                  | 23,56 | 27,86 | 32,35 | 37,02 | 41,87 |
| 0,6   | 18,75                                  | 22,74 | 26,88 | 31,20 | 35,70 | 40,37 |
| 0,7   | 18,17                                  | 22,02 | 26,04 | 30,21 | 34,56 | 39,10 |
| 0,8   | 17,65                                  | 21,40 | 25,30 | 29,33 | 33,57 | 37,97 |

Таблица 6-5 Metallургическая длина для машиностроительной стали на машине разлики заготовок сечением 130 × 130 мм.

| Скорость<br>охлаждения /<br>кг воды на кг стали | Скорость разлики /<br>м мин <sup>-1</sup> |       |       |
|---|---|-------|-------|
|   | 3,0                                       | 4,0   | 5,0   |
| 0,8   | 17,20                                     | 22,40 | 28,00 |
| 0,9   | 16,70                                     | 21,53 | 26,83 |
| 1,0   | 16,20                                     | 20,73 | 25,66 |
| 1,1   | 15,70                                     | 19,86 | 24,42 |
| 1,2   | 15,20                                     | 19,06 | 23,33 |

Пожалуйста, выберите целевую скорость разливки и скорость вторичного охлаждения :

Целевая скорость разливки:  m / min  
 Расход охлаждающей воды:  кг воды на кг стали

Металлургическая длина 21.78 м

Пожалуйста, выберите Ваши параметры для механизма качения кристаллизатора, включая порошок для кристаллизатора:

|                             |                                   |                   |   |      |                    |
|-----------------------------|-----------------------------------|-------------------|---|------|--------------------|
| Ход, S                      | <input type="text" value="4"/>    | mm                | Время отставания заготовки по отношению к кристаллизатору | 0.10 | s                  |
| Частота, f                  | <input type="text" value="210"/>  | min <sup>-1</sup> | Расход для кристаллизатора                                | 0.41 | kg m <sup>-1</sup> |
| Порошок для кристаллизатора | <input type="text" value="A"/>    |                   | Глубина отметки от качения кристаллизатора                | 0.18 | mm                 |
| Вязкость порошка, $\eta$    | <input type="text" value="0.12"/> | Pa·s              | Ускоряющая кристаллизатора                                | 0.97 | m s <sup>-2</sup>  |

Пожалуйста, подайте заказ на ковши, выбрав температуру и время прибытия на станцию разливки:

|         | время прибытия / минуты         | температура / °C                  |
|---------|---------------------------------|-----------------------------------|
| Ковш 1: | <input type="text" value="0"/>  | <input type="text" value="1660"/> |
| Ковш 2: | <input type="text" value="33"/> | <input type="text" value="1660"/> |
| Ковш 3: | <input type="text" value="53"/> | <input type="text" value="1660"/> |

## Установки качания кристаллизатора

Качание кристаллизатора в первую очередь применяется для уменьшения трения между плитами кристаллизатора и корочкой непрерывной заготовки. Этому способствует индуцированный поток разливочного порошка (ШОС) от мениска по зазору между корочкой непрерывной заготовки и плитами кристаллизатора.

**Шаг,  $S$  [мм]:** Обычно шаг варьируется от 3 до 10 мм. С увеличением шага пропорционально увеличивается время отставания непрерывной заготовки (см. ниже). Следовательно, увеличивается глубина меток от качания и расход ШОС.

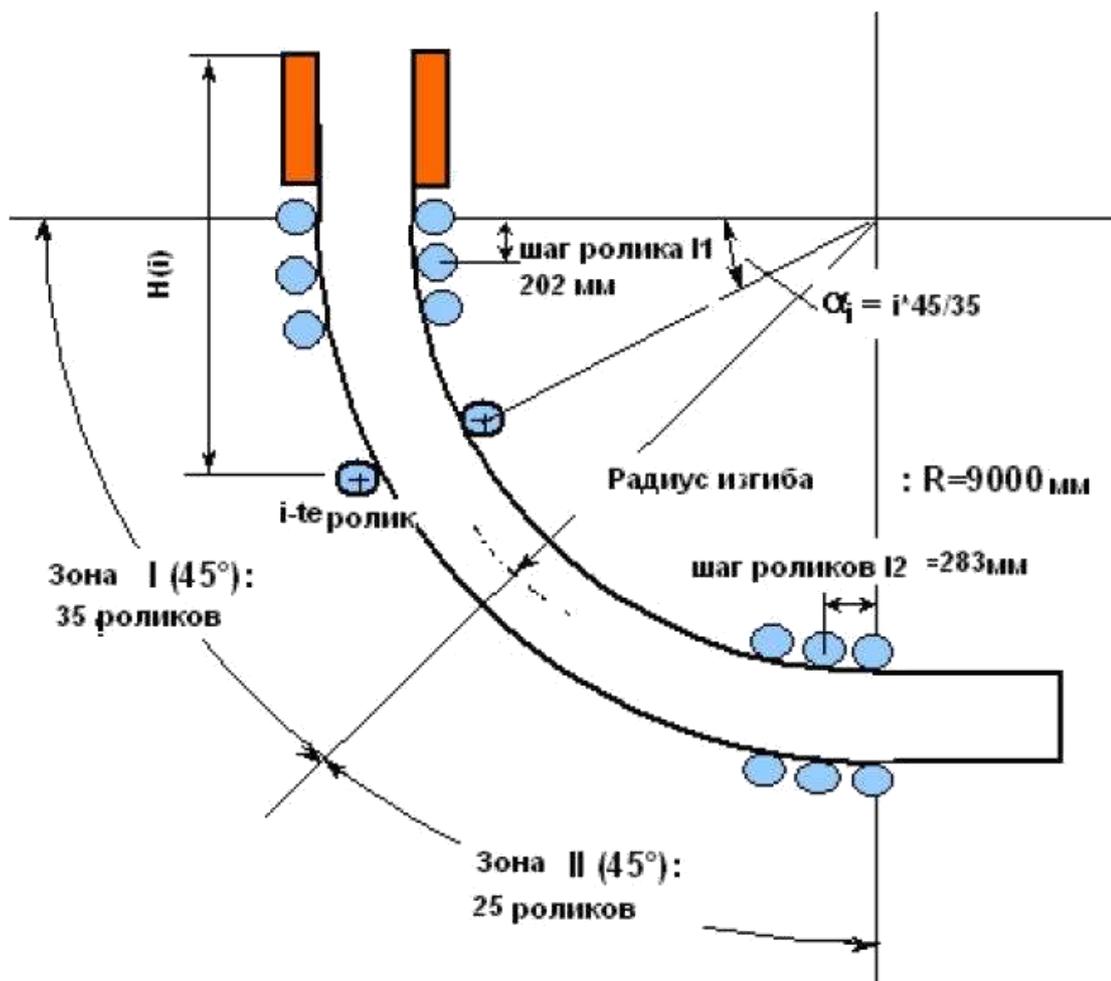
**Частота,  $f$  [мин-1]:** Традиционные гидравлические механизмы качания кристаллизатора работают с частотой от 100 до 250 циклов в минуту. С увеличением частоты возрастает время отставания заготовки, следовательно, уменьшается глубина меток от качания и расход ШОС.

**Глубина метки от качания,  $d$  [мм]:** Притом, что качание кристаллизатора необходимо при непрерывной разливке, оно вызывает ухудшение качества поверхности из-за так называемых меток от качания. Для поверхности непрерывно литой заготовки характерно присутствие меток, которые периодически образуются на мениске из-за возвратно-поступательного движения кристаллизатора. Они играют важную роль для качества поверхности, так как часто становятся причиной поперечных трещин.

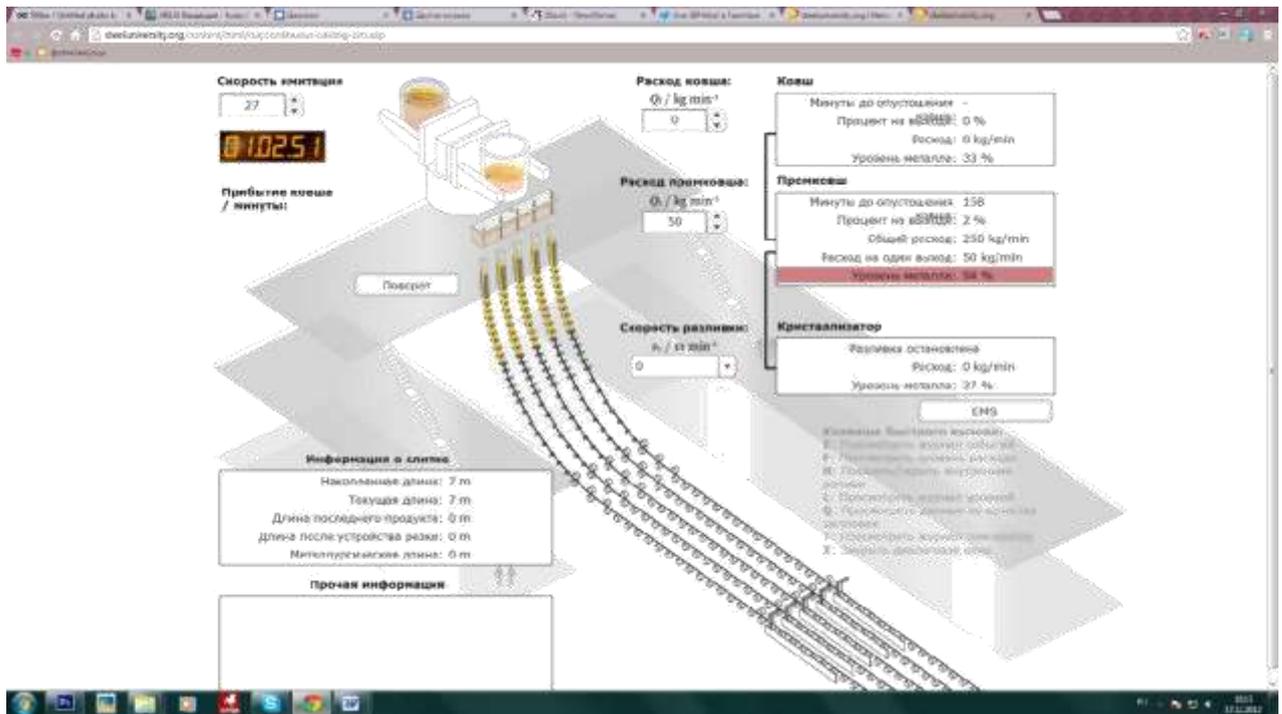
Чтобы у стали была оптимальная температура в кристаллизаторе, важно заказывать ковши с правильной температурой.

Температура ликвидуса

$T_{liq} = 1537 - 78\%C - 7.6\%Si - 4.9\%Mn - 34.4\%P - 38\%S$



Схематическое изображение разливочной машины



## Информация о разливке

Имеется возможность просматривать детальную информацию о разливке во время и после работы с моделью. Нажатием на соответствующую клавишу предлагаются следующие виды.

### ПРОСМОТРЕТЬ ЖУРНАЛ СОБЫТИЙ (КЛАВИША E)

Журнал событий фиксирует в хронологической последовательности все основные события, включая некоторые установки модели. Это полезно для прослеживания всех ваших действий и всего, что произошло до настоящего момента моделирования. Кроме того, это также поможет вам проанализировать ваши результаты в конце моделирования, так как в журнале часто даются пояснения причин, по которым вам что-то удалось или не удалось.

### ПРОСМОТРЕТЬ СТРУИ (КЛАВИША F)

При нажатии 'F' открывается диаграмма струй жидкой стали, текущих из стальковша в промковш и из промковша в кристаллизатор.

### ПОКАЗАТЬ/СКРЫТЬ ВНУТРЕННИЕ РОЛИКИ (КЛАВИША H)

Нажатием 'H' происходит переключение отображаемыми и скрываемыми внутренними роликами ручья. Это дает вам очень полезную возможность просматривать весь ручей при разливке сверхнизкоуглеродистой или трубной стали на слябовой разливочной машине.

#### ПРОСМОТРЕТЬ ЖУРНАЛ УРОВНЕЙ (КЛАВИША L)

Если нажать 'L', то можно просмотреть, как изменился уровень жидкой стали в стальковше и в промковше.

#### ПРОСМОТРЕТЬ КАЧЕСТВО (КЛАВИША Q)

При нажатии 'Q' открывается графическая презентация непрерывной заготовки в состоянии после. Будут отмечены хорошие и плохие участки, а также будут показаны: Непрерывная разливка – Руководство пользователя основные параметры непрерывной заготовки. Эта опция доступна только после завершения моделирования.

#### ПРОСМОТРЕТЬ ТЕМПЕРАТУРУ (КЛАВИША T)

Нажатием 'T' можно вызвать показ изменения температуры в динамике по времени в стальковше и в промковше. Эта опция доступна только после завершения моделирования.

#### ЗАКРЫТЬ ДИАЛОГОВОЕ ОКНО ИНФОРМАЦИИ ПО РАЗЛИВКЕ (КЛАВИША X)

При нажатии 'X' закрывается диалоговое окно с информацией о разливке.

### **Результаты моделирования**

После окончания разливки всей стали и получения непрерывной заготовки работа с моделью будет завершена, и на экран будут выведены результаты операции разливки. Сразу будут показаны четыре ключевых параметра, а затем вы сможете детально рассмотреть успехи и недостатки выполненной разливки, подробно рассмотрев один из пяти видов. Ключевые параметры включают:

stcl.university.org/content/html/s/continuous-casting-simapp

## ПОЗДРАВЛЯЕМ!

Вы успешно завершили имитацию непрерывной разливки.

### Установки модели:

|                           |                         |
|---------------------------|-------------------------|
| Уровень Пользователя :    | Студент университета    |
| Марка Стали :             | Конструкционная сталь   |
| Установка разлива :       | Блок                    |
| Скорость разлива :        | 1.2 m / min             |
| Расход охлаждающей воды : | 0.4 kg воды на кг стали |



### Основные результаты:

Общая длина слитка: 58.7 m.  
 Длина, соответствующая критерию качества: 58.7 m (100 %)  
 Общие операционные затраты: \$96058  
 Затраты на метр: \$162.53  
 Затраты на метрическую тонну: \$360.68

### Подробная информация по модели

Нажмите на следующие клавиши, чтобы просмотреть следующие сведения по имитации.:

- E** - Журнал событий
- E** - Расходы коша и промкоша
- I** - Ускорен металл в кошке и промкоше
- T** - Температура металла в кошке и промкоше
- Q** - Регистрация параметров качества
- X** - Закройте диалогное окно

168 14.12.2012



## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №6

Тема: LVMflow – компьютерное моделирование литейной технологии

Работа демонстрирует основные приемы компьютерного моделирования литейных технологий в интерфейсе программы CAE LVMFlow, версия 6.3 релиз 2. Анализируется затвердевание стальной отливки в песчано-глинистой форме. Время выполнения работы 2 часа.

### Введение

Современные литейные технологии уже сейчас позволяют изготавливать отливки высокого качества весьма сложной конфигурации, практически не требующие дополнительной обработки. Однако затраты на их изготовление остаются еще высокими. Применение наукоемких технологий, в частности, систем компьютерного моделирования физико-химических процессов, происходящих во время формирования отливки, позволяет, с одной стороны, переходить к отливкам все более и более сложной формы, используя все большую номенклатуру сплавов, с другой стороны, сокращать затраты на отладку технологии, заменяя натуральный эксперимент вычислительным.

Компьютерное моделирование и оптимизация технологий, в том числе, и 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 формы и в дальнейшем, – при охлаждении и затвердевании металла. Технологу, пользуясь CAE-программой, выявляет дефекты различной природы в отливке на стадии проектирования, предлагает различные модификации в конструкции и технологии, сравнивает прогнозируемое качество отливки для предложенных модификаций и выбирает в итоге наиболее оптимальный вариант технологии и литниково-питающей системы.

### Аннотация программного обеспечения

*LVMFlow* – российская программа CAE для анализа различных литейных технологий. Программа создана группой специалистов компании ЗАО НПО МКМ (г.Ижевск), где на протяжении 25 лет постоянно совершенствуются модели и алгоритмы их реализации, 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, Норве-

гии, Австралии, Турции. Программа *LVMFlow* неоднократно экспонировалась на международных выставках и конгрессах литейщиков. На зарубежном рынке *LVMFlow* под торговыми марками *NovaSolid* и *NovaFlow* распространяет шведская фирма *NovaCast Systems AB*, имеющая представительство в 16 странах.

### Целевая группа

Работа рассчитана на магистров направления 22.04.02 специальностей, изучающих сквозные технологии подготовки производства CAD/CAE/CAM. В методических указаниях к выполнению практической работы приведены необходимые сведения технологии литья в песчано-глинистые формы и подробно изложена последовательность компьютерного моделирования соответствующих литейных процессов в интерфейсах программных модулей *LVMFlow*. В качестве сопряженной системы CAD/CAM при организации сквозных технологий проектирования и подготовки литейного производства рекомендуется использовать российскую программу CAD/CAM ADEM, которая наилучшим образом позволяет спроектировать оснастку от готовой 3D-модели отливки и подготовить изготовление оснастки на оборудовании с ЧПУ.

### Источники информации

Основную информацию о программе *LVMFlow* можно найти на сайте разработчика: [http://www.wp\\_lvm.mkmssoft.ru](http://www.wp_lvm.mkmssoft.ru)

### Основные приемы и этапы работы

|   |    |
|---|----|
| 1 Препроцессор.....   | 6  |
| <i>Шаг 1.</i> Импортировать отливку и литниково-питающую систему на расчет..... | 6  |
| <i>Шаг 2.</i> Создать расчетную сетку.....                                      | 15 |
| <i>Шаг 3.</i> Задать свойства материалов .....                                  | 23 |
| <i>Шаг 4.</i> Задать граничные условия .....                                    | 26 |
| 2 Процессор.....  | 29 |
| <i>Шаг 5.</i> Провести расчет температурных полей.....                          | 29 |
| <i>Шаг 6.</i> Контролировать изменение расчетных параметров .....               | 30 |
| 3 Постпроцессор.....  | 32 |
| Индивидуальное задание .....  | 34 |

### Методическая разметка текста

#### 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

#### Объект моделирования

Стальная деталь «букса», литье в песчано-глинистую форму.

## **CAD → CAE → CAM → CAPP**

Более полная сквозная технология компьютерного проектирования и подготовки производства деталей включает также оптимизацию технологии их изготовления способом литья или штамповки с использованием программы CAE. Последовательность выполнения работы в этом случае: CAD → CAE → CAD → CAM → CAPP

### **CAD**

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**

CAE – *Computer Aided Engineering* – инженерные расчеты с использованием компьютерных программ. Средства CAE выполняют самую разнообразную работу по расчету напряжений, деформаций, теплообмена, распределения магнитного поля, потока жидкостей и других параметров сплошных сред, а также технических систем в целом. Например, программы для кинематических расчетов способны определить траектории движения и скорости звеньев в механизмах; программы динамического анализа могут использоваться для определения нагрузок и перемещений в сложных составных устройствах, таких как автомобили. Различают CAE-программы конструкторского назначения, обеспечивающие расчетное обоснование конструкций, и CAE -программы технологического назначения, помогающие оптимизировать различные технологии изготовления деталей.

### **CAM**

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 различных 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, предварительно созданная в CAD-системе.

### **CAPP**

CAPP – *Computer Aided Process Planning* – планирование процессов с использованием компьютерных программ, автоматизированная технологическая подготовка. План процессов задает последовательность операций по изготовлению изделия или детали от начала и до конца с использованием всего необходимого оборудования. В России традиционно технологическая документация оформляется в виде операционных и маршрутных карт.

## Технологические данные решаемого примера

- Материал отливки: сталь 20Л.
- Температура заливки: 1550-1580 °С.
- Время заливки: 20-25 сек.
- Формовка в двух опоках по сырому.
- Плотность формы 85-90 ед.
- Опоки: 910\*610\*400 (низ)/250 (верх) [мм].
- Формовочная смесь песчано-глинистая состава:
  - отработанная горелая земля: 94.0-97.0 %;
  - песок кварцевый ГОСТ 2138-91 3-5 К1-2 О3-4 02(025): 3.0-6.0 %;

К формовочной смеси добавляется суспензия бентонитовая (сверх 100%) 3.2%; плотностью 1.10-1.30 г/см, РН= 10,5 – 12,5; активация бентонита производится при приготовлении суспензии отработанным щелочным раствором, с РН = 11,0 – 12,5. Свойства формовочной смеси:

1. газопроницаемость  $\geq 100$  ед.;
2. прочность на сжатие 0,6 – 0,9 МПа;
3. влажность 38 – 4,4%.

В Стержень изготавливается по нагреваемой оснастке.

В Состав стержневой смеси:

1. формовочный песок – 100%;

К стержневой смеси добавляются

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

Состав композиции фенол-формальдегидной смолы:

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

Свойства стержневой смеси:

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

### Отливка и песчано-глинистые формы

1. литейном производстве изготавливают отливки – заготовки или фасонные детали, заливая расплавленный металл заданного химического состава в литейную форму. Затвердевая при охлаждении, залитый металл сохраняет конфигурацию полости формы. Отливки могут быть готовыми деталями или заготовками, которые в дальнейшем подвергаются механообработке.

2. данной работе расплавленный металл заливается в разовую форму, сделанную из плотно утрамбованного песка. Для того чтобы песчинки были крепко связаны между собой, песок смешивают с глиной, водой и другими связующими веществами. Песчано-глинистая форма состоит из двух полуформ.

## Литье в песчано-глинистую форму

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

Способ литья в песчаные формы заключается в изготовлении отливок свободной заливкой расплавленного металла в разовую разъемную и толстостенную литейную форму, изготовленную из формовочной смеси по многократно используемым модельным комплектам (деревянным, пластмассовым или металлическим), с последующим затвердеванием залитого металла, охлаждением отливки в форме, извлечением ее из формы и заключительной отделкой.

Отличительными особенностями способа являются малые теплопроводность, теплоемкость и плотность песчаной формы, что позволяет получить отливки с малой толщиной стенки (2,5...5мм). Невысокая интенсивность охлаждения расплава в форме приводит к снижению скорости затвердевания отливки, укрупнению поликристаллической структуры металла и к появлению в массивных узлах усадочных раковин и пористости. Сравнительно низкая огнеупорность материала способствует развитию на поверхности контакта «форма – отливка» специфических физико-химических процессов, которые могут приводить к появлению пригара в поверхностном слое отливки.

*Прибыли.* Прибылью называется специальный технологический прилив к поверхности отливки, затвердевающий позднее самой отливки. В прибыли формируется усадочная раковина. Применение прибылей позволяет получать отливки без усадочных дефектов.

*Направленная кристаллизация.* Если кристаллизация отливки направлена к прибыли, то это наилучший вариант. При этом образующиеся в процессе кристаллизации металла пустоты заполняются расплавом из прибыли.

## Литейная форма

Литейная форма состоит из верхней и нижней полуформ, которые изготавливаются в *опоках* (приспособлениях для удержания формовочной смеси). Полуформы ориентируют с помощью *штырей*, которые вставляют в отверстия ручек опок.

Для образования полостей отверстий или иных сложных контуров в формы устанавливают литейные *стержни*, которые фиксируют посредством выступов, входящих в соответствующие впадины формы (*знаки*).

Литейную форму заливают расплавленным металлом через литниковую систему. Литниковая система – совокупность каналов и резервуаров, по которым расплав поступает из разливочного ковша в полость формы. Основными элементами литниковой системы являются: *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.

## 1. Препроцессор

### 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 гравитации.

#### Шаг 1. Импортировать отливку и литниково-питающую систему на расчет

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



Рис. 1. Стартовое окно программы LVMFlow

➤ Импортируйте геометрическую модель отливки в формате \*.STL.

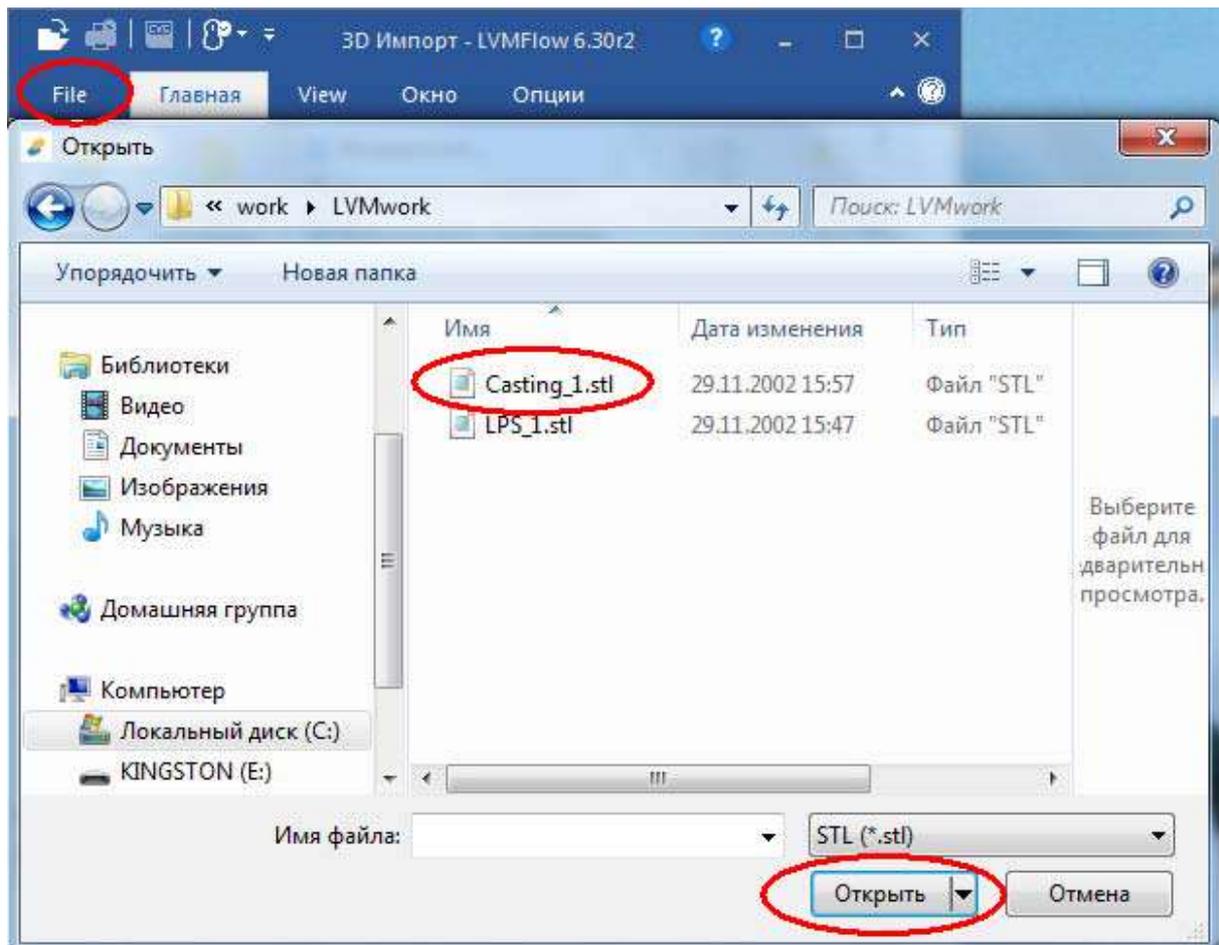


Рис. 2. Импортирование отливки

### Модульная структура САЕ-программ

Отличительной особенностью САЕ-программ является большой объем вычислений, выполняемый ядром программы. Эту часть системы выносят в отдельный вычислительный модуль, который называется вычислителем или процессором. Соответственно, все операции подготовки расчетной модели концентрируют в препроцессоре, а представление расчетных результатов в графическом виде поручают постпроцессору.

Говоря о создании пространственных моделей в препроцессорах САЕ-систем, следует различать исходную геометрическую модель, обработка которой ведется на начальном этапе, и сеточную модель, которая собственно является итогом работы препроцессора. В САЕ-программах исходная геометрическая модель ограничивает область пространства, в которой решается расчетная задача. Геометрическая модель используется препроцессором для генерации расчетной сетки.

Основная задача препроцессора заключается в создании расчетной модели. Расчетная модель включает расчетную сетку, а также граничные и начальные условия. Функции препроцессора и процессора сложны и настолько различны, что обычно они выделяются в автономные модули, которые могут работать одновременно или последовательно.

## Компьютерное моделирование литейных технологий

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

При моделировании процессов заполнения формы расплавом в модуле «Полная задача» совместно решаются гидродинамическая и тепловая задачи. Моделирование заполнения позволяет определить, насколько правильно выбраны технологические параметры, вычислить поля скоростей потока и температур в движущемся расплаве. К регулируемым параметрам относятся: конфигурация литниковой системы, температура заливки, начальное распределение температур в форме. Моделирование заполнения помогает на этапе проектирования проверить эффективность работы литниковой системы, предотвратить разрушение формы и стержней потоком.

Большинство литейных дефектов формируется в процессе затвердевания отливки после полного заполнения. Расчет процессов образования усадочных дефектов в модуле «Затвердевание» связан с совмещенным решением тепловой задачи и задачи образования дефекта.

## 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, соответствующее конкретному физическому процессу.

## Геометрическая модель отливки

Разработку технологического процесса изготовления отливки начинают с анализа технологичности конструкции детали. Технологичной называют такую конструкцию, которая соответствует эксплуатационным требованиям и позволяет при данной серийности изготавливать деталь с наименьшими затратами. Технологичная конструкция характеризуется простой компоновкой и совершенством форм.

Геометрия отливки отличается от геометрии литой детали. Конструкция отливки должна обеспечить удобство извлечения модели из формы, что достигается наименьшим количеством разъемов модели, отъемных частей и стержней. Если это условие не выполняется, следует подумать о внесении в конструкцию детали необходимых изменений.

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 устанавливают в зависимости от допусков размеров. Для верхних частей отливки предусматривают больший припуск на механическую обработку, поскольку там могут локализоваться неметаллические включения.

В рабочем окне появится отливка, справа в списке появится название импортированно-го файла.

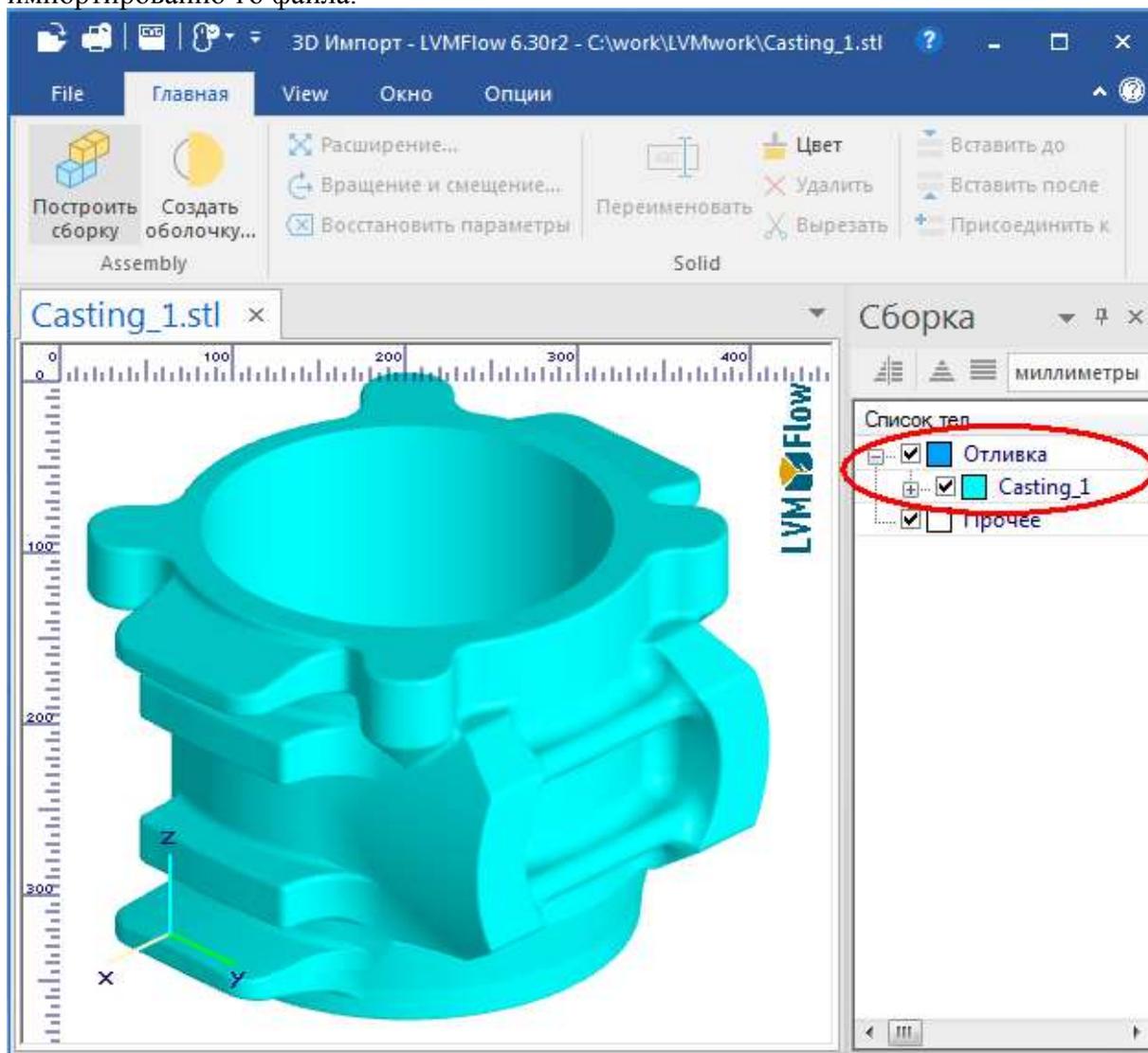


Рис. 3. Импортированная отливка

### Обозначение различных материалов 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 произвести переназначение цвета любому используемому элементу конструкции и материалу по своему усмотрению. Назначение конкретного материала, который будет соответствовать выбранному цвету, будет произведено на следующем шаге в препроцессорном модуле «НАЧАЛЬНЫЕ УСЛОВИЯ».

➤ Импортируйте геометрическую модель литниково-питающей системы в формате \*.STL. Для этого откройте раздел меню «Файл» и последовательно выберите строчки в падающем меню: «Добавить элементы оснастки > Отливка».

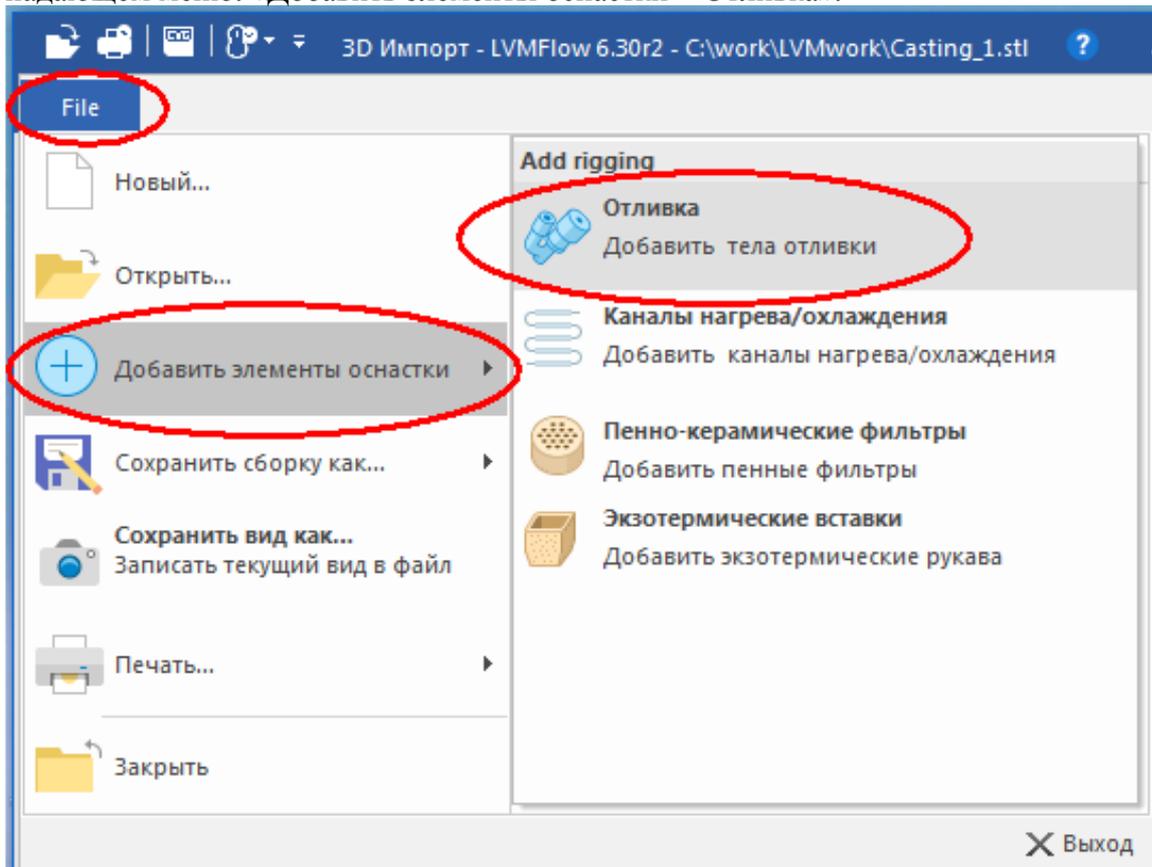


Рис. 4. Импортирование литниково-питающей системы

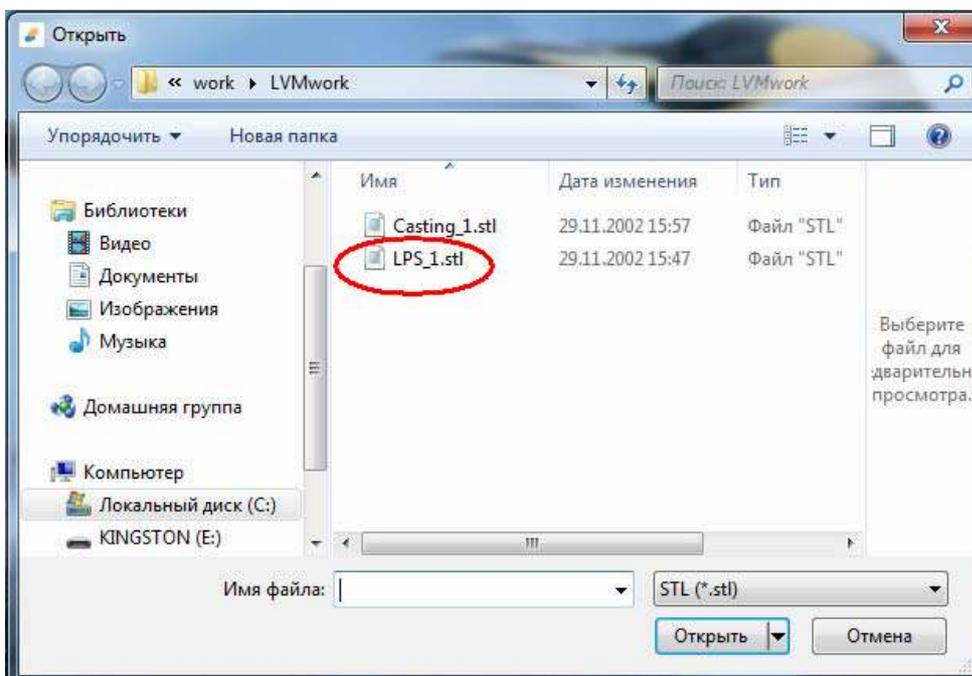


Рис. 5. Выбор файла с геометрией литниково-питающей системы

## STL

STL (*StereoLithography*) – *Standard Triangulation Language* – дословно переводится как «язык стандартной триангуляции», это не редактируемый формат представления геометрических моделей; в основе представления лежит аппроксимация поверхностей тел с помощью треугольников. Файлы STL могут быть как текстовыми (ASCII), так и двоичными, причем двоичные меньше текстовых по размеру.

На экране к отливке добавится литниково-питающая система, которой автоматически присвоится желтый цвет. В списке добавится название соответствующего импортированного файла.

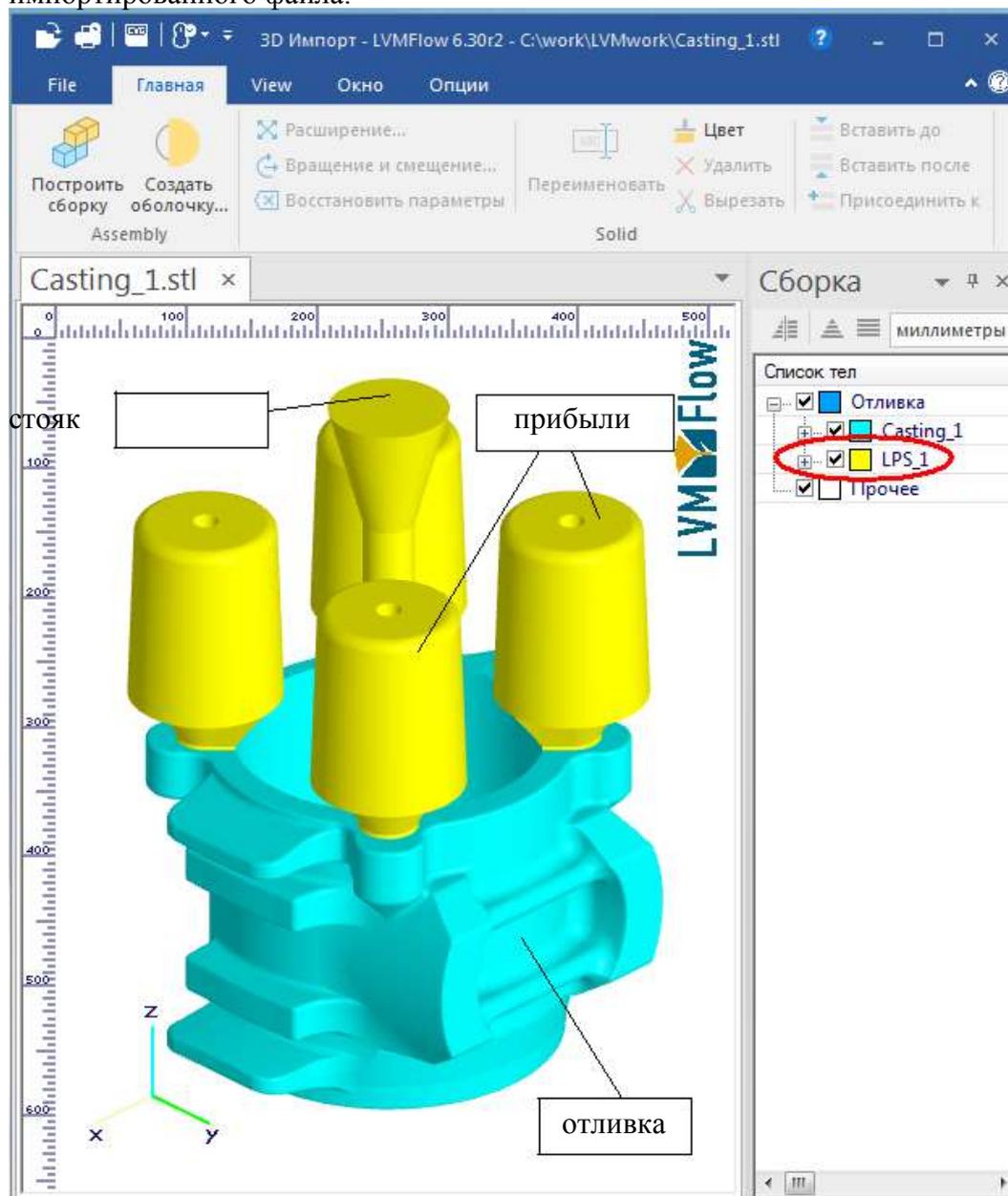


Рис. 6. Результат загрузки файлов геометрии – полная геометрическая модель

## Конструирование литейной формы

Конструирование литейной формы начинается с выбора положения отливки в форме при заливке. В первую очередь, выбранное положение отливки в форме должно обеспечивать направленное затвердевание и питание всех конструктивных элементов отливки из прибылей. Для этого необходимо определить схему питания отливки и разместить наиболее массивные узлы отливки в верхних или боковых частях формы. При этом на указанных узлах должны быть в наличии площадки или поверхности для размещения верхних или боковых прибылей.

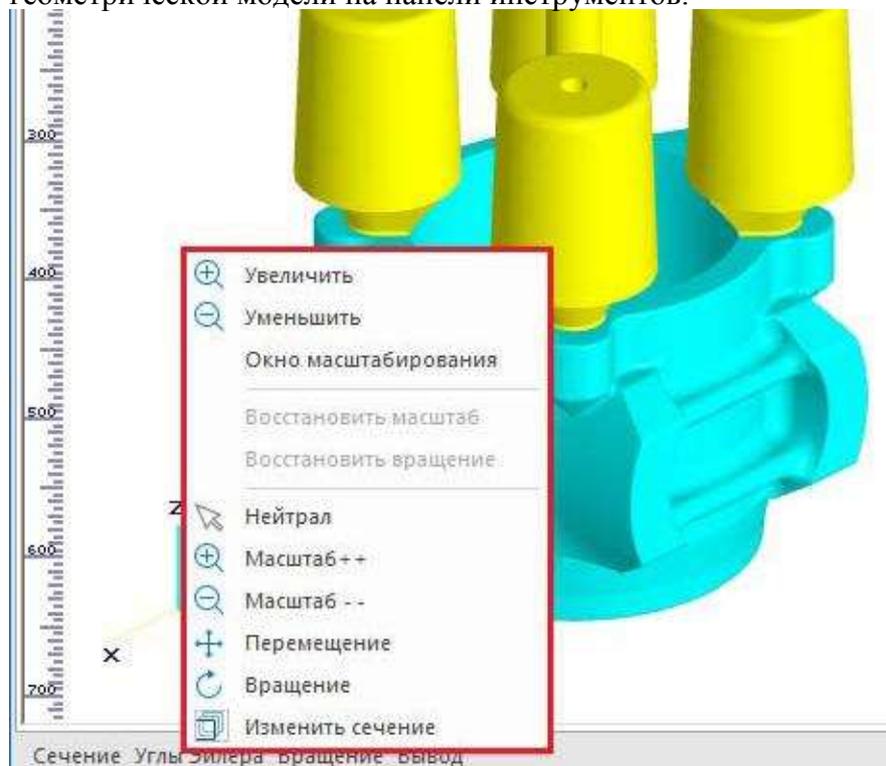
Выбранное положение отливки в форме должно обеспечить наиболее простое оформление литниковой системы. Литниковая система должна подводить расплав к полости формы по кратчайшему пути. Расплав должен поступать в полость формы спокойно, не фонтанируя и не размывая стержни и выступающие части формы.

Для исключения возможного образования газовых раковин положение отливки в форме должно обеспечить преимущественный верхний отвод газов из стержней через верхние знаковые части.

Выбранное положение отливки в форме должно обеспечить минимальное количество стержней, что снижает трудозатраты на изготовление.

Для визуального контроля за геометрической моделью в рабочем окне можно воспользоваться всплывающим меню, нажав правую клавишу мыши.

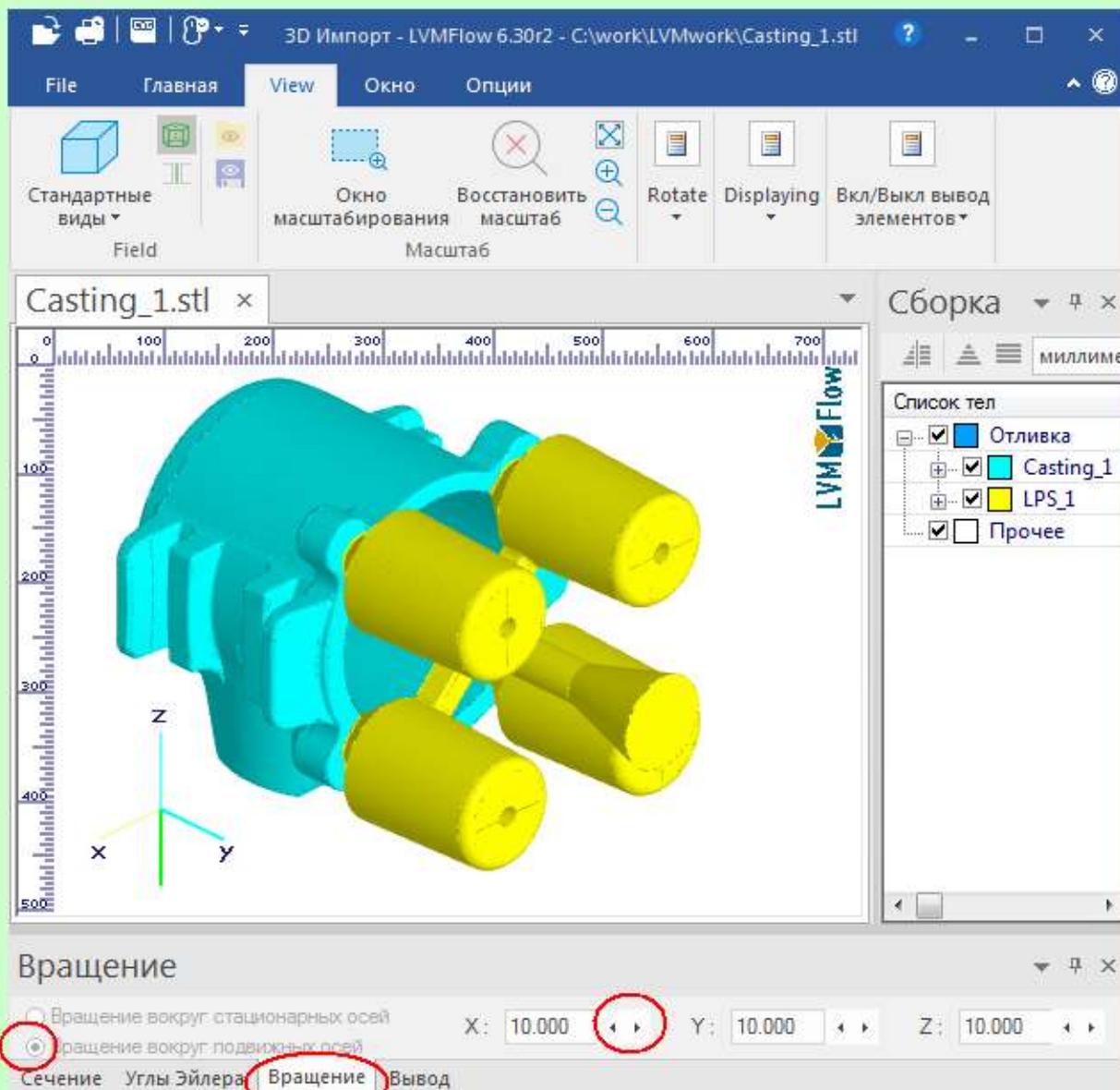
➤ Используйте также стандартные инструменты перемещения и поворота геометрической модели на панели инструментов.



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

## Поворот геометрической модели в рабочем окне

При загрузке файла геометрическая модель появляется в рабочем окне в таком виде, как она была сохранена в CAD системе. Конструктор не всегда ориентирует ее правильно относительно направления гравитации. В LVMFlow по умолчанию с направлением гравитации совпадает ось Z. Процессы течения и кристаллизации расплава зависят от направления гравитации, поэтому важно повернуть геометрию так, чтобы вертикальная ось совпала с осью Z. В LVMFlow предусмотрена возможность вращения отливки с целью просмотра или изменения ее пространственной ориентации перед конвертированием файла во внутренний формат \*.cvg.



Кнопка «Восстановить» восстанавливает первоначальную ориентацию отливки. Когда вы считаете, что в целом расположили отливку правильно, вы можете точно установить ее по вертикали, нажимая на кнопки «ЗахватZ»-«ЗахватY»-«ЗахватX», которые подгоняют текущие углы к осям неподвижной системы координат. Нажмите кнопку «Фиксировать». Теперь геометрическая модель готова к трансляции на расчет.

➤ Сохраните геометрическую модель, при этом она будет во внутренний формат программы LVMFlow.

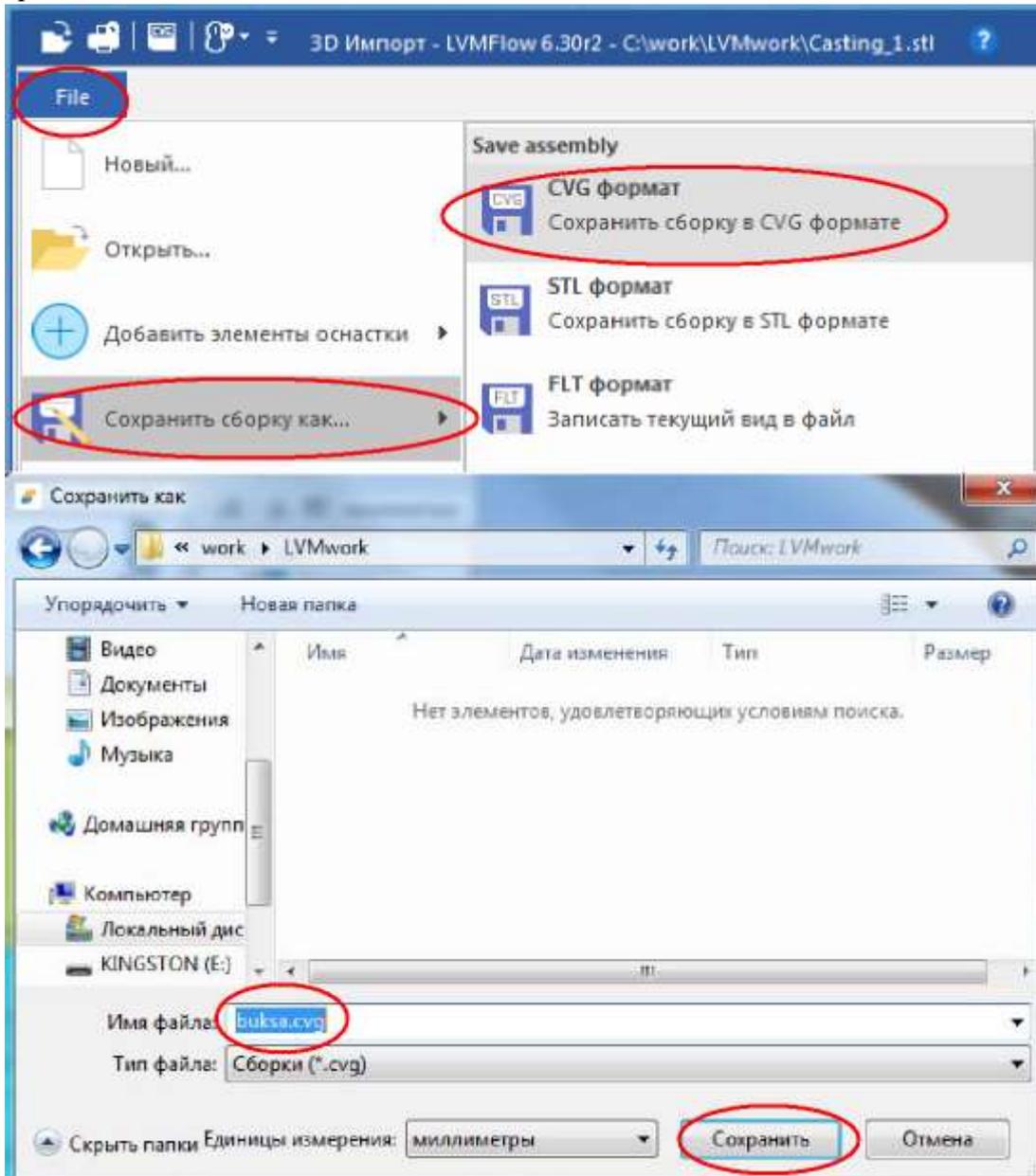


Рис. 8. Сохранение геометрической модели во внутреннем формате

### Модельный комплект

*Модельный комплект* – набор приспособлений, включающий литейную модель, модели литниковой системы, стержневые ящики, модельные плиты, контрольные и сборочные шаблоны.

*Литейная модель* – приспособление, с помощью которого в литейной форме получают объемный отпечаток, соответствующий конфигурации и размерам отливки. Применяют модели разъемные и неразъемные; деревянные, металлические и пластмассовые. Размеры модели больше размеров отливки на величину линейной усадки.

## Шаг 2. Создать расчетную сетку

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

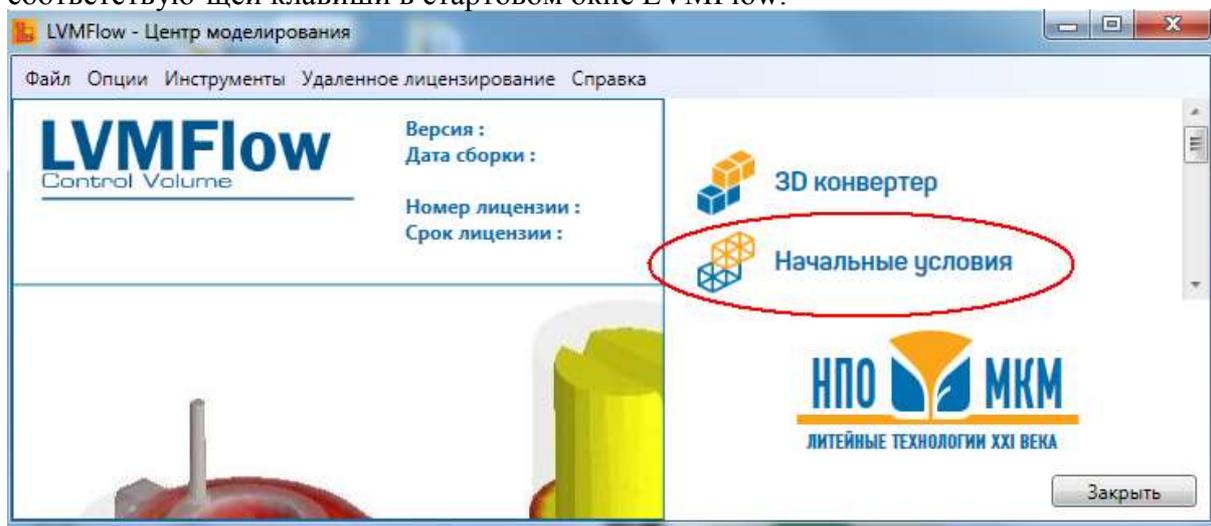


Рис. 9. Переход в модуль «Начальные условия»

### Препроцессор LVMFlow

Программа LVMFlowCV 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 препроцессора 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 свои материалы.

Используя геометрическую модель, препроцессор генерирует разностную 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. Внутри каждой 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. Ячейки образуют регулярную прямоугольную сетку. Для автоматической генерации сетки достаточно ввести один параметр – размер ячейки (шаг сетки) либо задать общее количество узлов сетки.

**ВАЖНОЕ ЗАМЕЧАНИЕ:** чем меньше шаг сетки, тем точнее решение, которое получится в процессе компьютерного моделирования.

➤Импортируйте геометрию отливки с литниково-питающей системой во внутреннем формате LVMFlow \*.cvg (Файл > Открыть), нужный файл был создан на шаге 1 в модуле «3D конвертер».



Рис. 10. Открытие файла геометрической модели в препроцессоре

### 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 выполняема 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.

➤Создайте сеточный куб. Для этого откройте раздел меню «Главная» и выберите пик-тограмму «Создать модель»

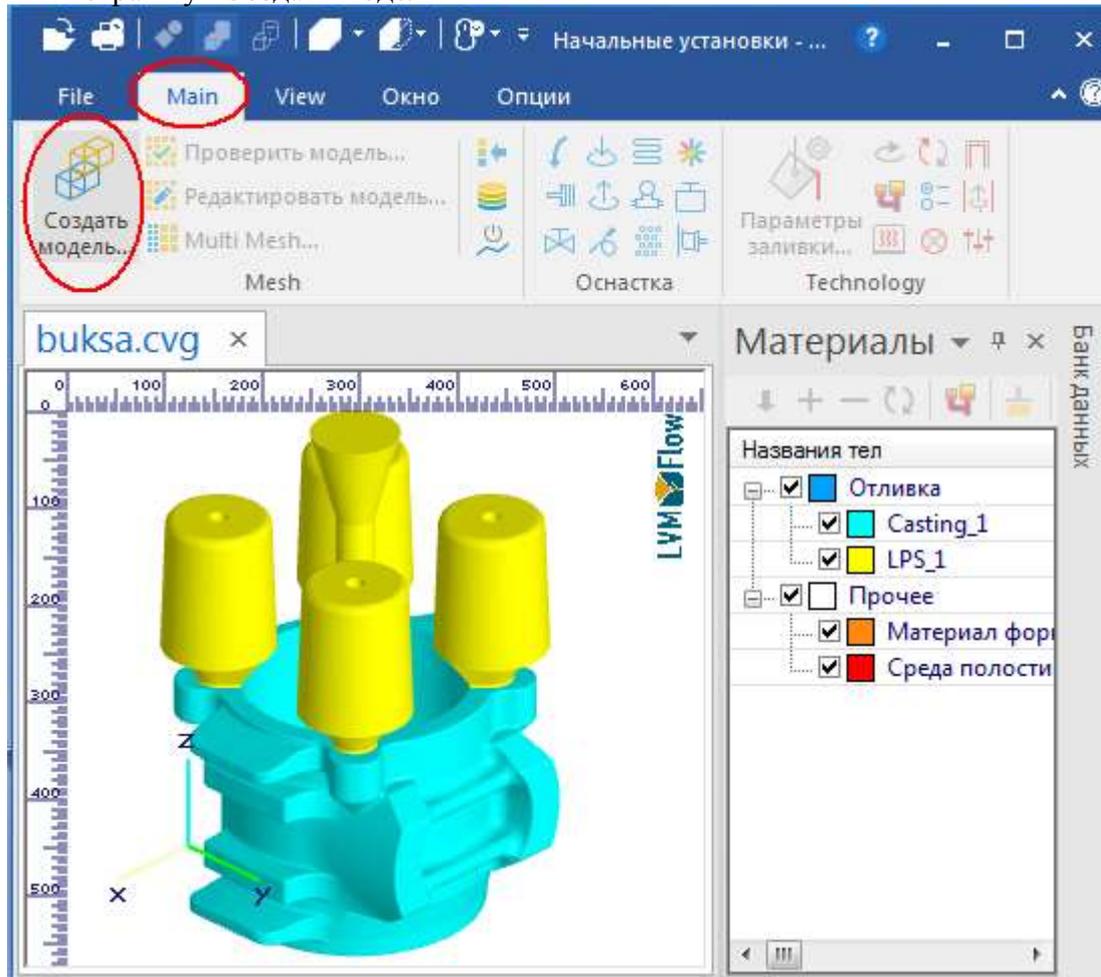


Рис. 10. Переход к диалогу о создании расчетной сетки

### Сеточная модель

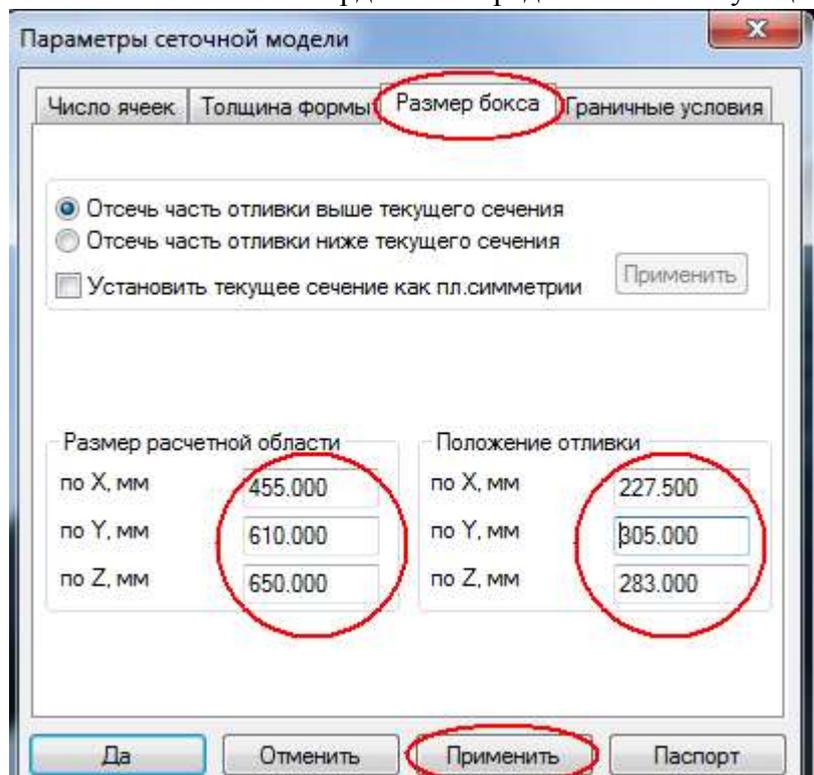
Теплопередача от затвердевающей отливки через форму в окружающую среду описывается дифференциальным уравнением теплопроводности. Приближенное решение этого уравнения компьютерной программой требует замены исходной дифференциальной задачи некоторой дискретной моделью.

Дискретизация начинается с того, что в расчетной области задается дискретное множество точек – расчетных узлов, образующих расчетную сетку. Затем в каждом расчетном узле производные, входящие в исходное дифференциальное уравнение, заменяются отношениями конечных разностей. При этом дифференциал непрерывной функции в точке, совпадающей с расчетным узлом, заменяется разностью искомых значений температуры в двух соседних узлах, а дифференциал аргумента заменяется расстоянием между расчетными узлами.

Замена дифференциального уравнения разностным уравнением в узле называется аппроксимацией на сетке или разностной аппроксимацией. При этом точные значения исходной непрерывной функции заменяются значениями сеточной функции в узлах. Таким образом, формируется система линейных алгебраических уравнений, эквивалентная исходному дифференциальному уравнению. Решая эту систему уравнений, можно найти в узлах сетки значения сеточной функции – искомые температуры.

➤ Задайте размеры расчетной области.

Появится окно диалога, в котором следует назначить размеры опок, нижней и верхней, которые вместе определяют собственно расчетную область. В нашем случае с учетом того, что в одну опоку формируется 2 буквы, следует назначить расчетную область **455\*610\*650** 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. 11. Задание размеров опок как расчетной области**

### **Положение отливки в форме**

При разработке технологического процесса изготовления отливки технолог сталкивается с необходимостью рассмотреть несколько альтернативных вариантов положения отливки в форме при заливке. Выбирая положение отливки в форме, следует учесть следующие рекомендации. Для предотвращения недоливов и спаев при подводе металла по разъему формы тонкие стенки отливки лучше располагать в нижней части формы вертикально или наклонно.

Отливки, имеющие конфигурацию тела вращения с обрабатываемыми наружными и внутренними поверхностями, лучше располагать в вертикальном положении. Протяженные плоские поверхности не следует располагать сверху, а если это неизбежно, рекомендуется делить их ребрами на сектора, что снижает вероятность образования на поверхности дефектов типа ужимин.

Для отливок, имеющих полости, оформляемые стержнями, необходимо обеспечить надежную установку и фиксацию стержней на знаках в нижней полуформе. Крепление стержней в верхней полуформе трудоемко и менее надежно. Ответственные и подверженные обработке поверхности, особенно поверхности трения, располагают внизу или,

в крайнем случае, вертикально или наклонно, что уменьшает число пороков по неметаллическим включениям и газовым раковинам.

➤ Задайте размеры ячеек 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. В нижней части окна дается информация о количестве узлов сетки и требуемом количестве памяти компьютера для расчета с таким 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.

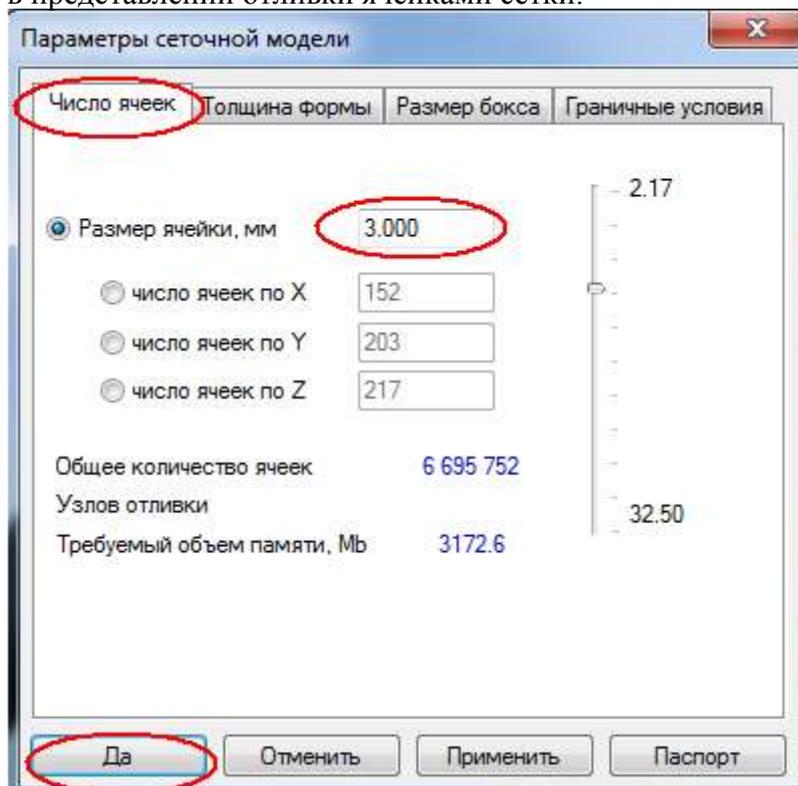


Рис. 12. Задание расстояния между расчетными узлами в сетке

### Компьютерное моделирование

Компьютерное моделирование является эффективным методом изучения инженерных объектов. Компьютерные модели позволяют проводить вычислительные эксперименты с объектом, изменять начальные и граничные условия, выявлять основные факторы, определяющие эксплуатационные характеристики и свойства изучаемых объектов.

К основным этапам компьютерного моделирования относятся: постановка задачи, определение объекта моделирования; разработка концептуальной модели; формализация; планирование и проведение компьютерных экспериментов; анализ и интерпретация ре-. Различают аналитическое и имитационное моделирование. Аналитическими называются модели реального объекта, использующие алгебраические, дифференциальные и другие уравнения, а также предусматривающие осуществление однозначной вычислительной процедуры, приводящей к их точному решению. Имитационными называются математические модели, воспроизводящие алгоритм функционирования исследуемой системы путем последовательного выполнения большого количества элементарных вычислительных операций, образующих дискретную последовательность.

➤ Измените положение отливки по вертикали.

В рабочем окне появится оранжевый параллелепипед, который ограничивает расчетную область. 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 стоек выходил на поверхность, следует изменить положение отливки по оси Z, задав в соответствующем поле ввода значение **378 мм**.

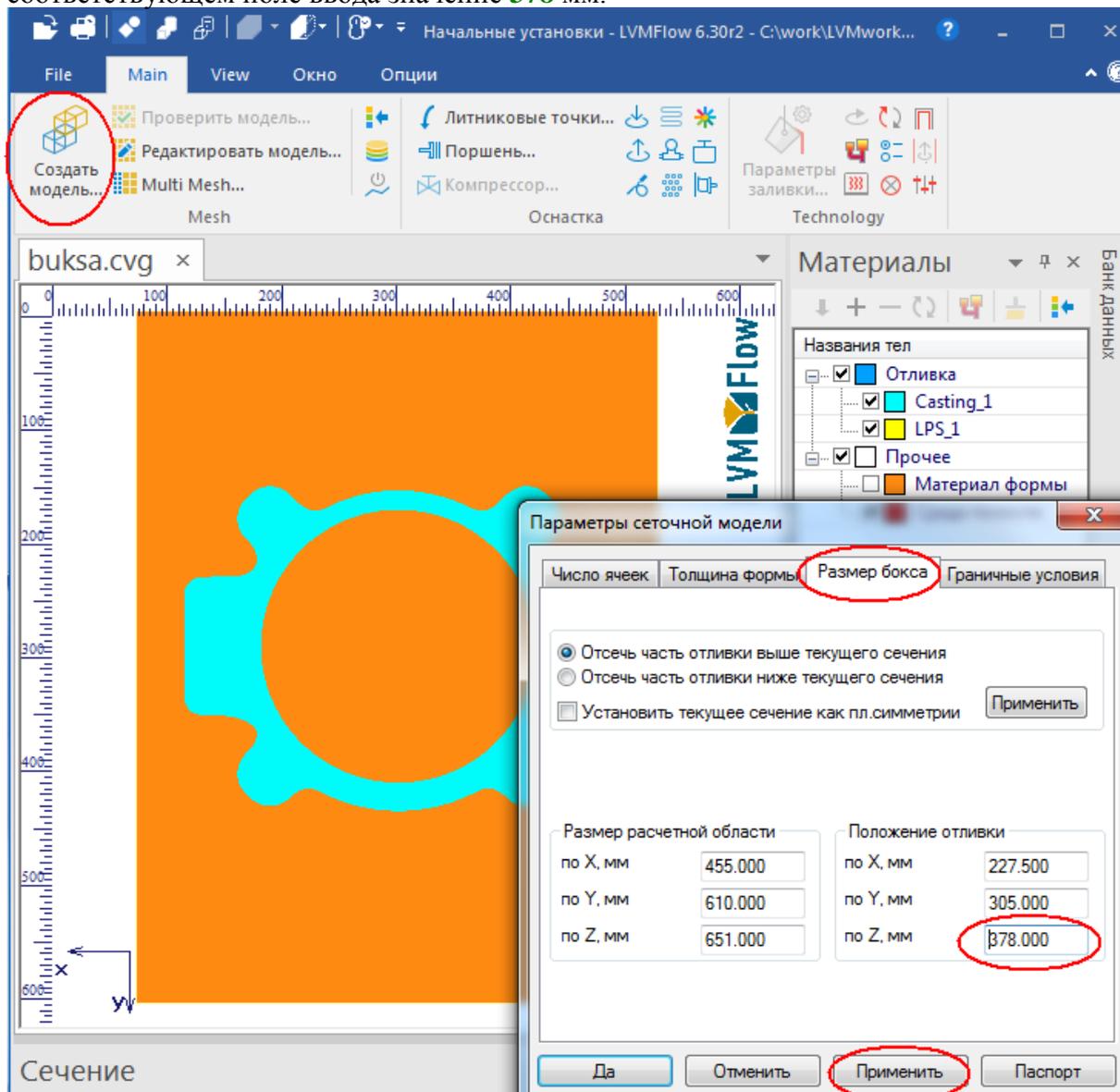


Рис. 13. Изменение положения отливки по вертикали

### Представление геометрии в рабочем окне

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

➤ 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. Далее в открывшемся окне диалога нужно нажать кнопки «Проверить сетку», «Закрыть зазор», «Да».

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

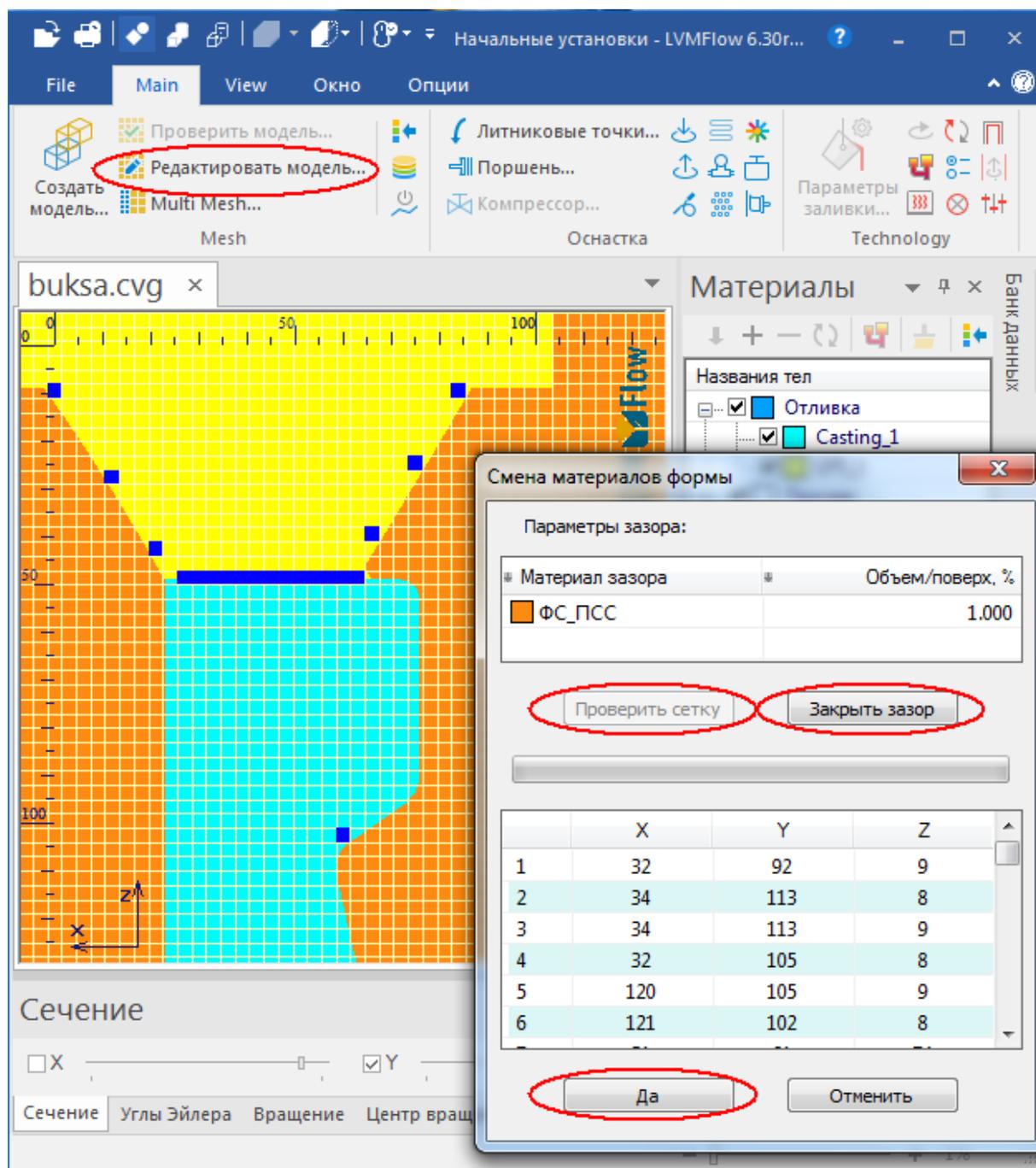


Рис. 14. Редактирование расчетной сетки

Чтобы просмотреть сетку, увеличьте масштаб изображения.

## 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.

Голубым цветом в сечении расчетной модели отображены ячейки сетки, принадлежащие отливке, желтым – литниково-питающей системе, оранжевым цветом – материалу формы.

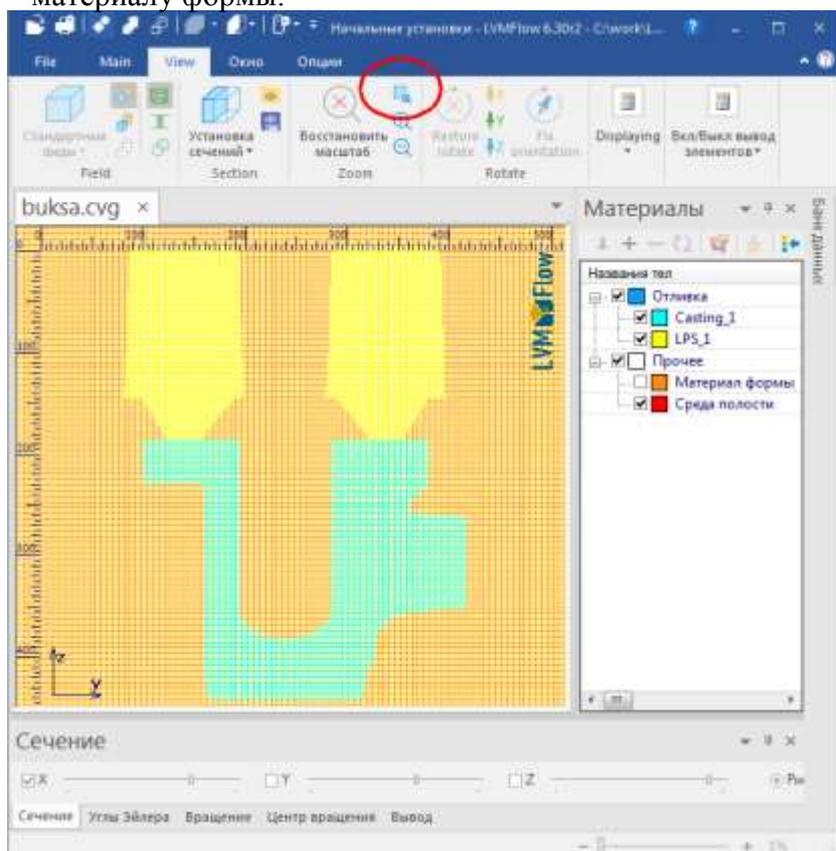


Рис. 15. Масштабирование изображения в рабочем окне

### Шаг 3. Задать свойства материалов

Выберем литейную сталь и материалы формы из базы данных. По техническому заданию мы заливаем сталь 20Л в песчано-глинистую форму. Некоторый выбор материалов сделан по умолчанию. Изменим данные в окне материалов справа от рабочего окна.

➤ Выбрать и назначить литейную сталь из базы данных.

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

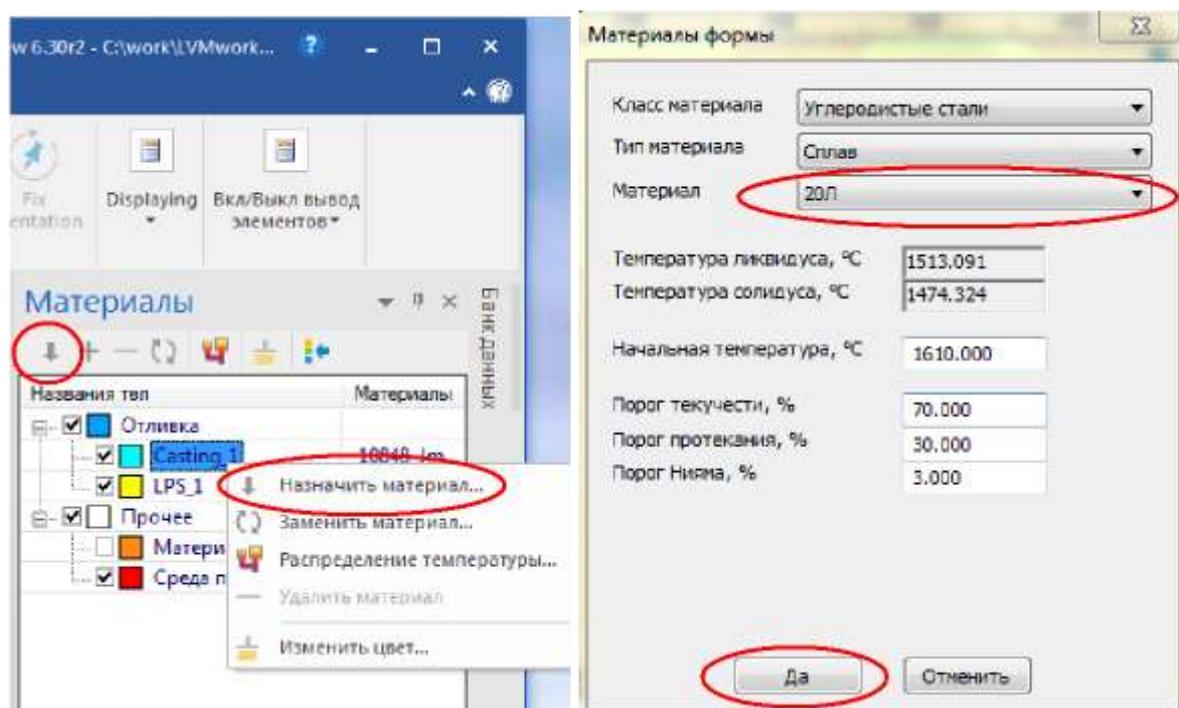


Рис. 16. Выбор литейной стали из списка

### База данных материалов LVMFlow

Данные по материалам LVMFlow хранятся в формате MS ACCESS. База содержит данные по различным литейным сталям, сплавам, а также по материалам формы и другим материалам, задействованным в технологическом процессе.

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

В отдельный класс вынесены материалы формы и вспомогательные материалы.

Согласно техническому заданию, при заливке температура стали составляет  $1580^{\circ}\text{C}$ . По умолчанию в базе данных указана начальная температура  $1610^{\circ}\text{C}$ . Измените величину температуры в позиции «Начальная температура» и нажмите кнопку «Да».

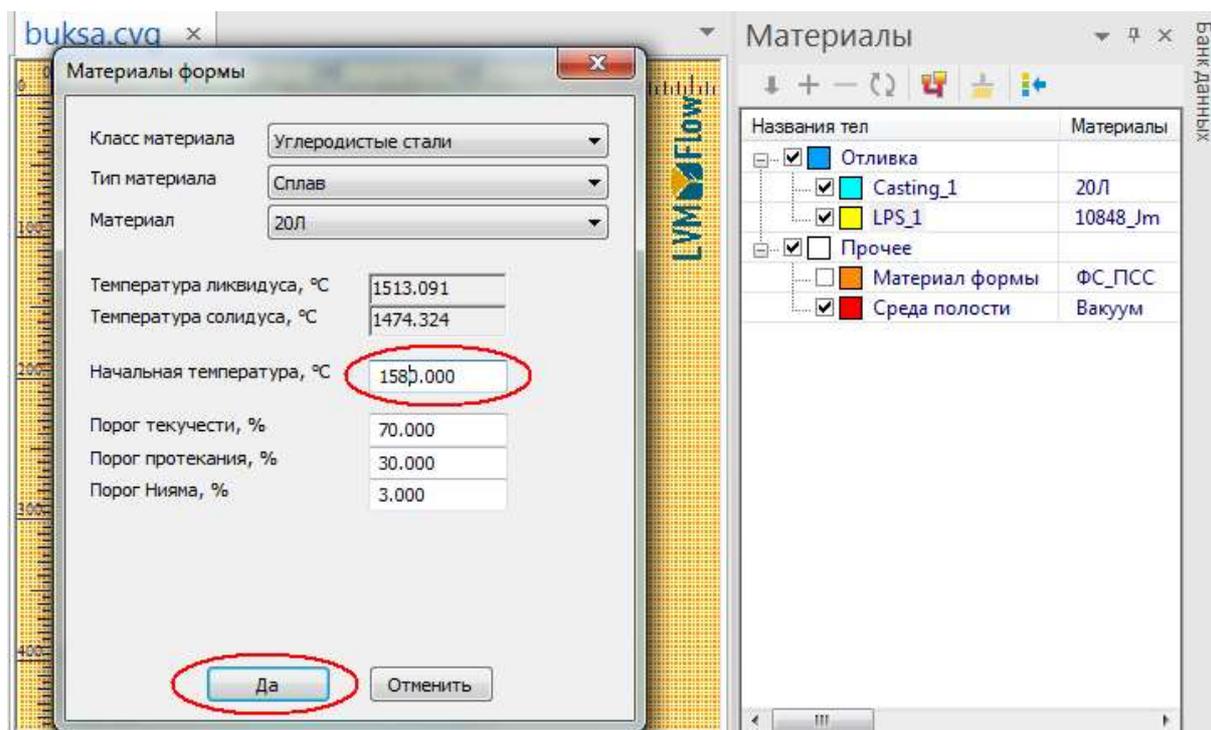


Рис. 17. Назначение температуры стали при заливке

### Заливка литейной формы

Температура расплава, поступающего в форму, оказывает влияние на скорость затвердевания отливки, ликвацию элементов, образование газоусадочных раковин и горячих трещин, на появление пригара.

При заливке углеродистых и низколегированных сталей температура расплава, поступающего в форму, должна превышать температуру ликвидуса на 40-100 градусов. Чем массивнее отливка и сложнее путь, преодолеваемый расплавленным металлом, тем в большей степени падает его температура при заливке формы. Понижение температуры расплава при прохождении литниковой системы обычно составляет 5-15 градусов.

Важной характеристикой является также скорость течения расплава. Повышенная скорость может вызывать эрозию стенок формы, что приводит к появлению в теле отливки песчаных засоров. Технология заливки литейной формы и конструкция литниковой системы оказывают большое влияние на качество отливок. При разработке технологии заливки литейной формы решаются задачи расчета оптимальной массовой скорости заливки и выбора типа ковша, выбора рациональной конструкции литниковой системы и мест подвода питателей в полость формы.

➤ Выбрать и назначить материал литейной формы из базы данных. Выберите строчку «Материал формы» в окне материалов справа и вызовите правой клавишей мыши или пиктограммой окно диалога для назначения материалов. По умолчанию в качестве материала формы сделан некоторый выбор. Следует выбрать из базы данных песчано-глинистую смесь. Откройте список «Материал» в окне диалога и выберите позицию «Песок», нажмите кнопку «Да».

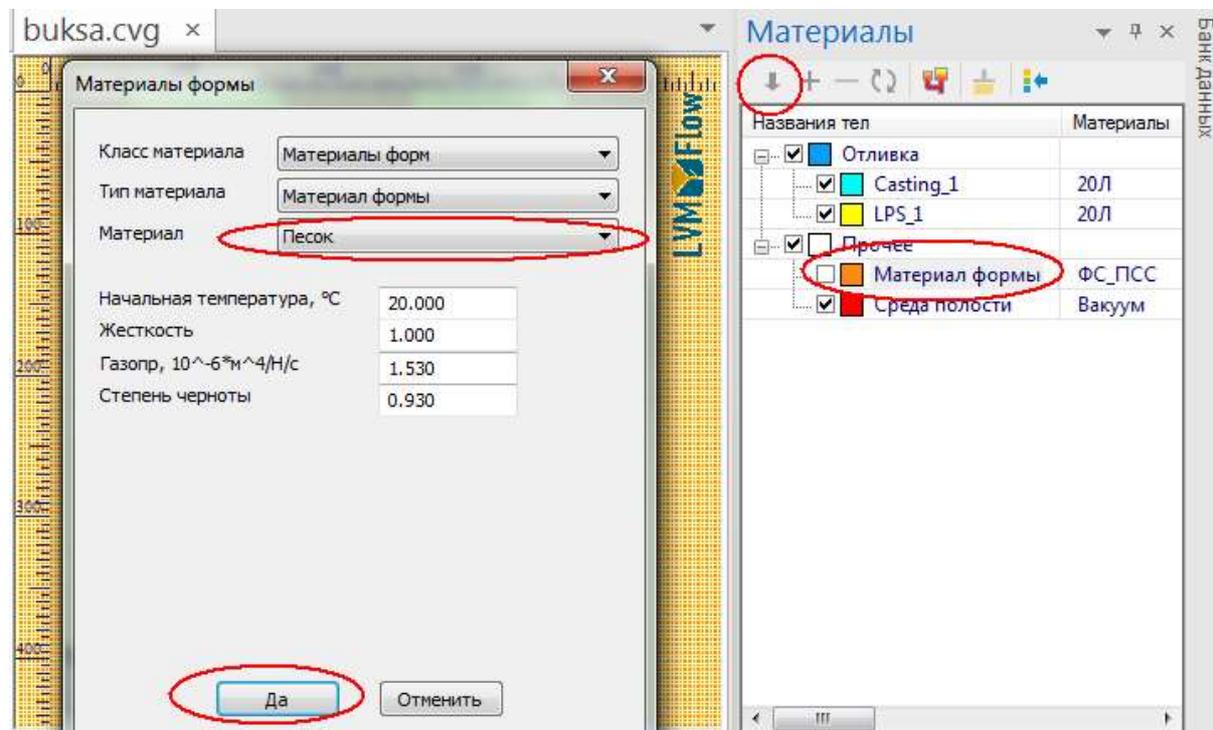


Рис. 18. Выбор материала формы из списка

### Формовочные и стержневые смеси

Формы и стержни изготавливаются из специальных смесей. Для приготовления смесей используются природные и искусственные материалы.

*Песок* – основной компонент формовочных и стержневых смесей. Обычно используется кварцевый или цирконовый песок. *Глина* является связующим веществом, обеспечивающим прочность и пластичность, обладает термической устойчивостью. Широко применяют бентонитовые или каолиновые глины.

Для предотвращения пригара и улучшения чистоты поверхности отливок используют противопригарные материалы: для сырых форм – *припылы*; для сухих форм – краски. В качестве припылов используют: для чугуновых 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 связующих.

#### Шаг 4. Задать граничные условия

К важным граничным условиям в нашей задаче относится место подвода расплава во время заливки, так называемой литниковой точки. Указываемое сечение должно находиться на границе расчетной области.

- Перейдите в режим визуализации горизонтальных плоскостей **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. Нажмите кнопку «Да».

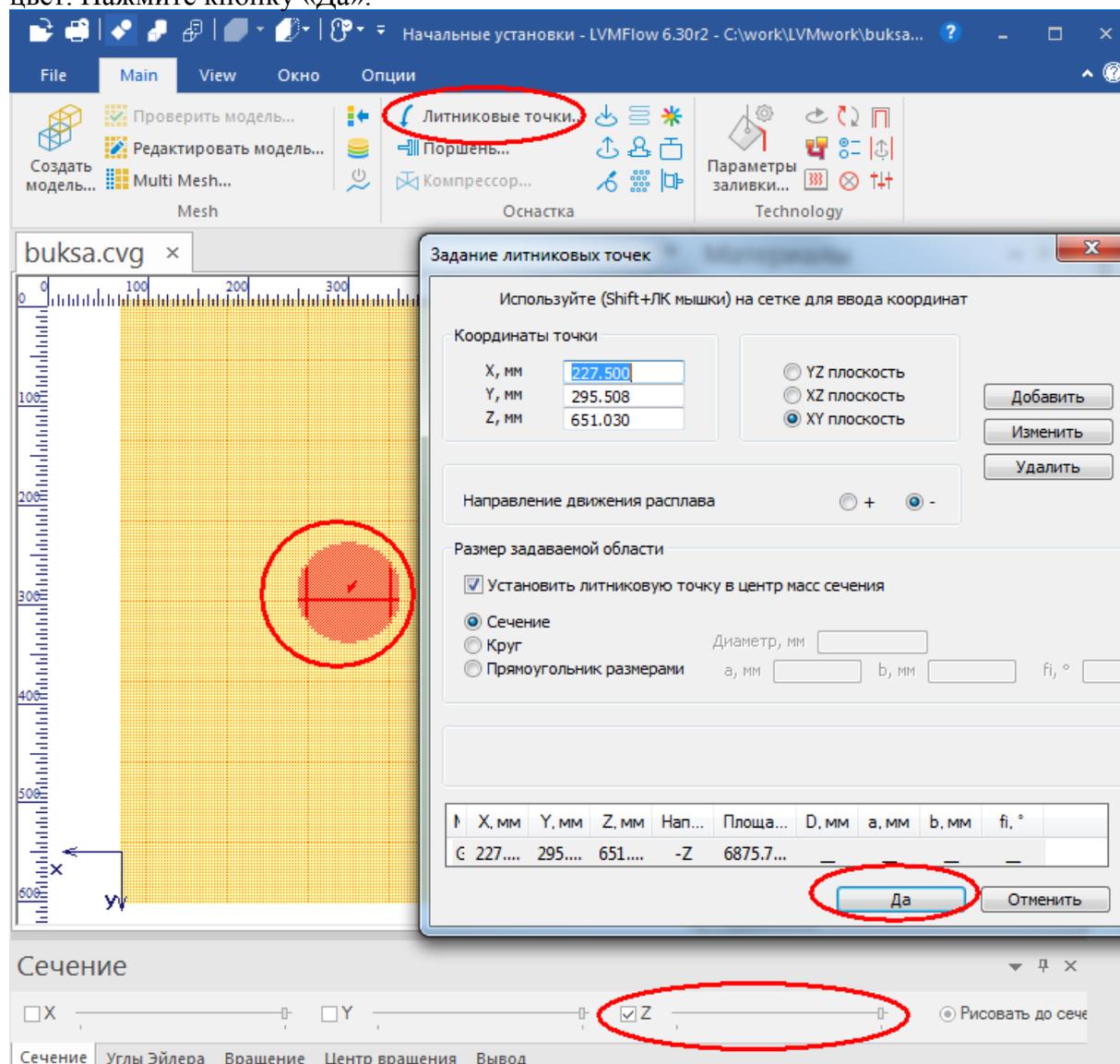


Рис. 19. Задание литниковой точки

Можно скрыть форму и посмотреть заполняемую полость формы. Для этого нажмите кнопку «Вывод изометрии» на панели инструментов сверху. Двигая бегунок влево или вправо, можно перемещать плоскость сечения.

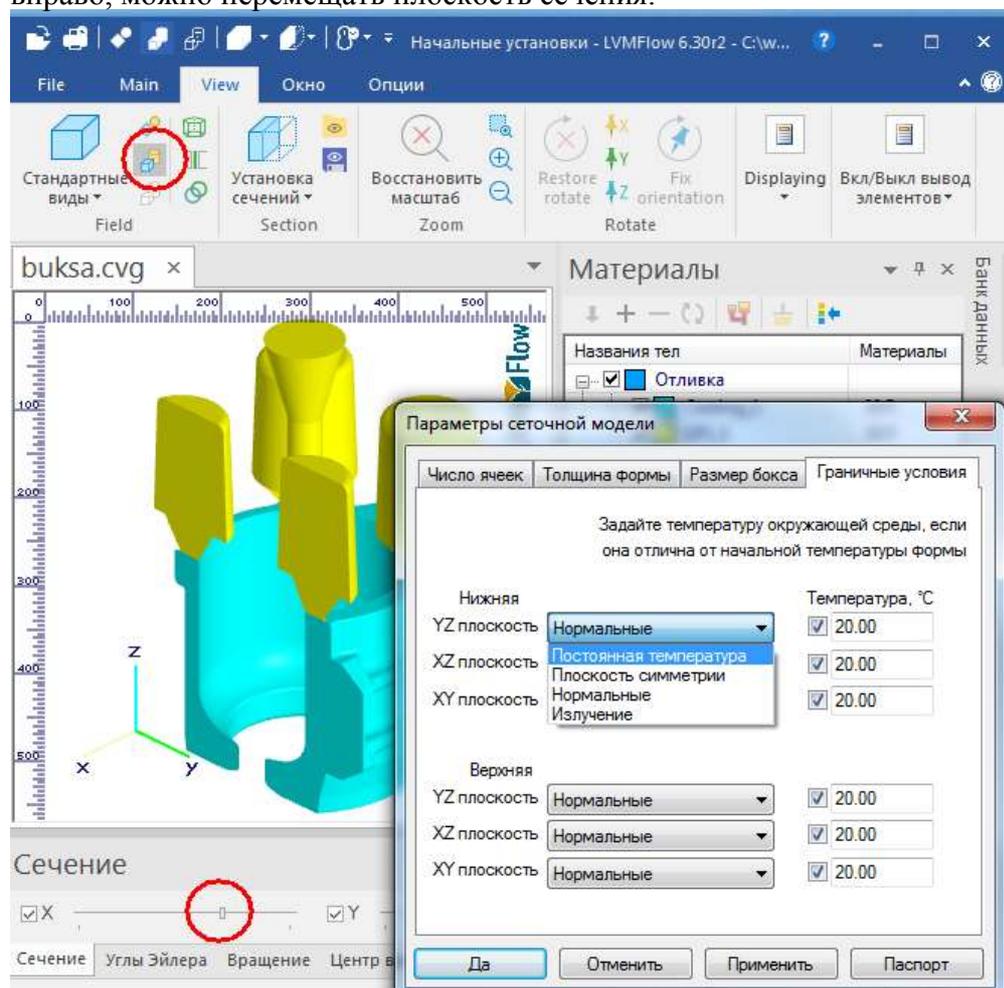


Рис. 20. Геометрия полости внутри формы

### Возможные граничные условия в LVMflow

Граничные условия задаются или принимаются по умолчанию при выборе параметров сетки. 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.

Сохраните сеточную модель для расчета, предварительно создав папку проекта.

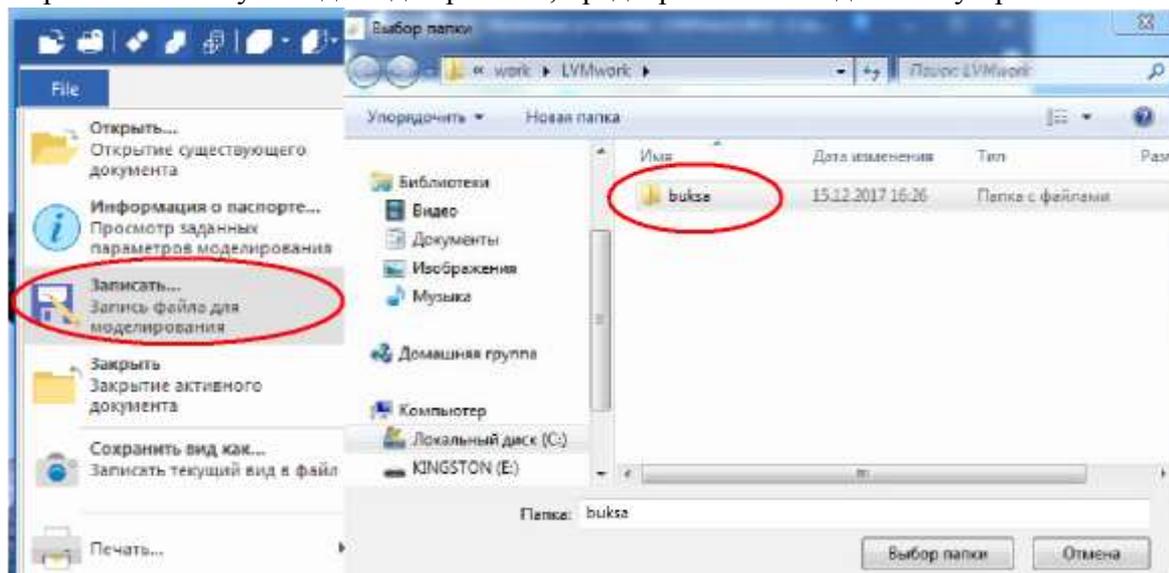


Рис. 21. Сохранение подготовленной сеточной модели

### Основные понятия теплового анализа

При моделировании литейных технологий в первую очередь вычисляется распределение температуры в отливке и 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 тела в трехмерном пространстве выражается непрерывной и дифференцируемой функцией

четырёх переменных – времени и пространственных координат  $T(x, y, z, t)$ .

Распространение теплоты происходит в результате развития трех различных по физи-ческой природе явлений: теплопроводности, конвекции и теплового излучения.

*Теплопроводность* сопровождается передачей энергии в пределах объема однородного тела или между контактирующими без зазоров телами. Различают теплоотдачу и теплопередачу. Теплообмен между граничной поверхностью тела и окружающей средой называется процессом теплоотдачи, а теплообмен между различными средами, разделенными телом или системой тел, – процессом теплопередачи.

*Конвекция* – это передача энергии от поверхности тела в окружающую среду, жидкую или газообразную, за счет движения молекул газа или жидкости. При конвективном теплообмене теплота с поверхности тела уносится жидкостью (или газом), которая перемещается относительно этой поверхности.

*Излучение* – это обмен энергией между объектами, а также объектами и окружающей средой посредством электромагнитных волн. При этом не требуется промежуточной среды (теплоносителя), и передача энергии может осуществляться в вакууме.

*Затвердевание* расплавов является фазовым превращением и моделируется в нестационарном тепловом анализе. При моделировании фазового превращения требуется учитывать скрытую теплоту, которая выделяется в процессе перехода металла из одного состояния в другое.

## 2 Процессор

### Расчетные модули LVMFlow

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

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

➤ Запустите модуль «ЗАТВЕРДЕВАНИЕ», выбрав соответствующую кнопку в стартовом окне программы.

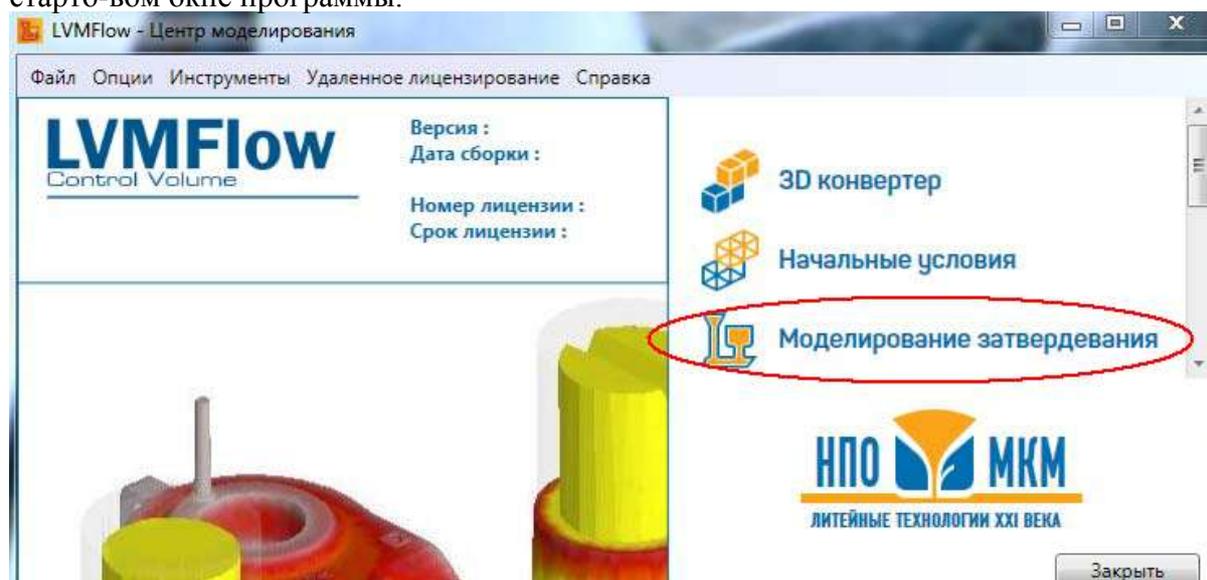


Рис. 22. Включение расчетного модуля «Моделирование затвердевания»

### Шаг 5. Провести расчет температурных полей

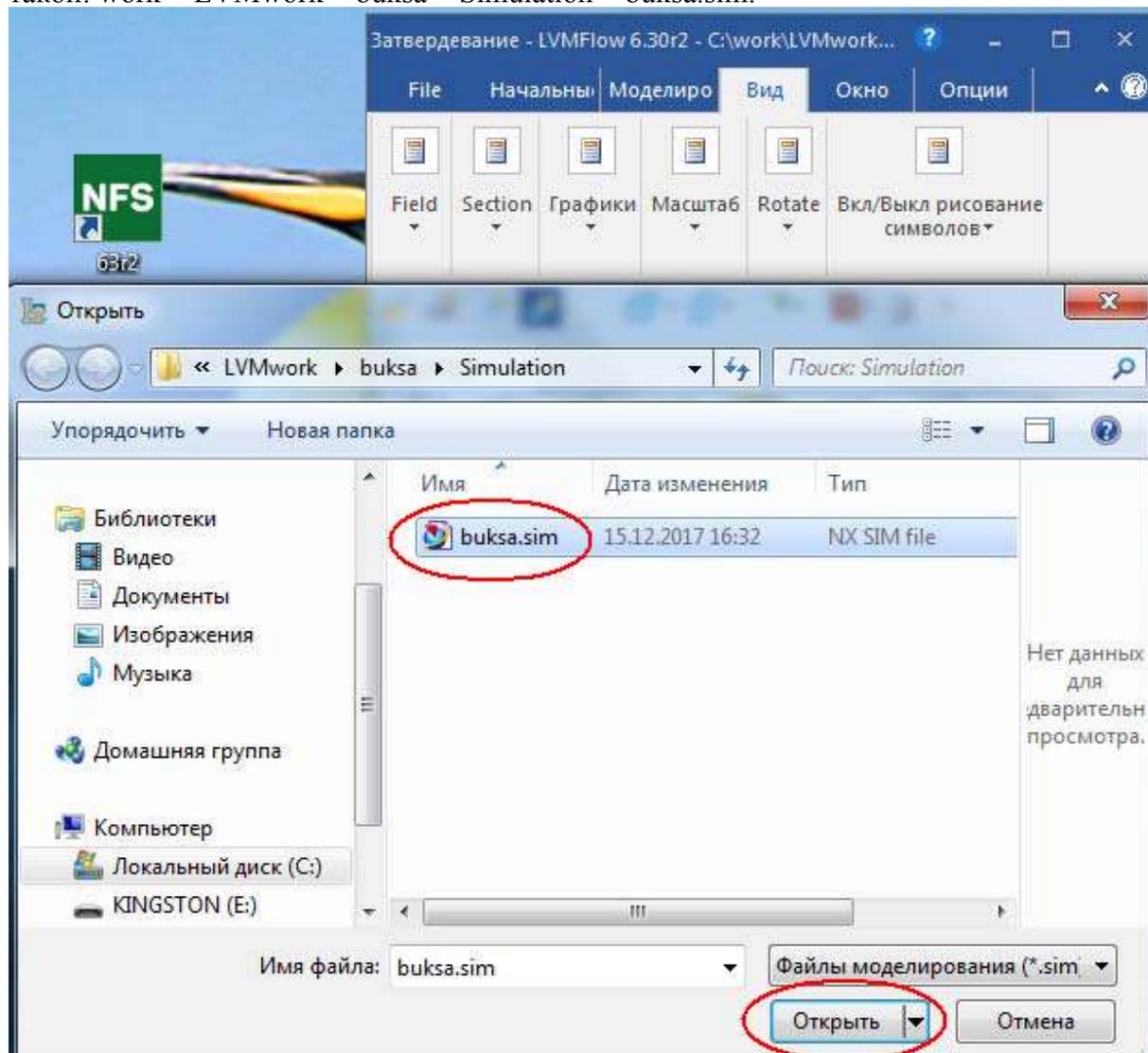
Проведем расчет температурных полей в процессе затвердевания металла в процессорном модуле «Затвердевание».

### Расчетный модуль «Затвердевание»

При моделировании в процессорном модуле «Затвердевание» учитываются фазовые переходы и гравитация. Следует проверить, что отливка правильно ориентирована в гравитационном направлении. Заполнение формы жидким металлом считается мгновенным.

Затвердевание анализируется на основе теории теплопроводности с учетом только особенностей теплообмена затвердевающего расплава и формы. При анализе затвердевания можно выявить кинетику нарастания объема твердой фазы в затвердевающем расплаве и продвижения фронта твердого металла в зависимости от способности формы отводить теплоту, от теплофизических свойств расплава, от конструкции литейной формы и от других характеристик, влияющих на теплообмен. При решении задач затвердевания игнорируются особенности кристаллического строения твердого металла. Металл представляется сплошной средой.

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



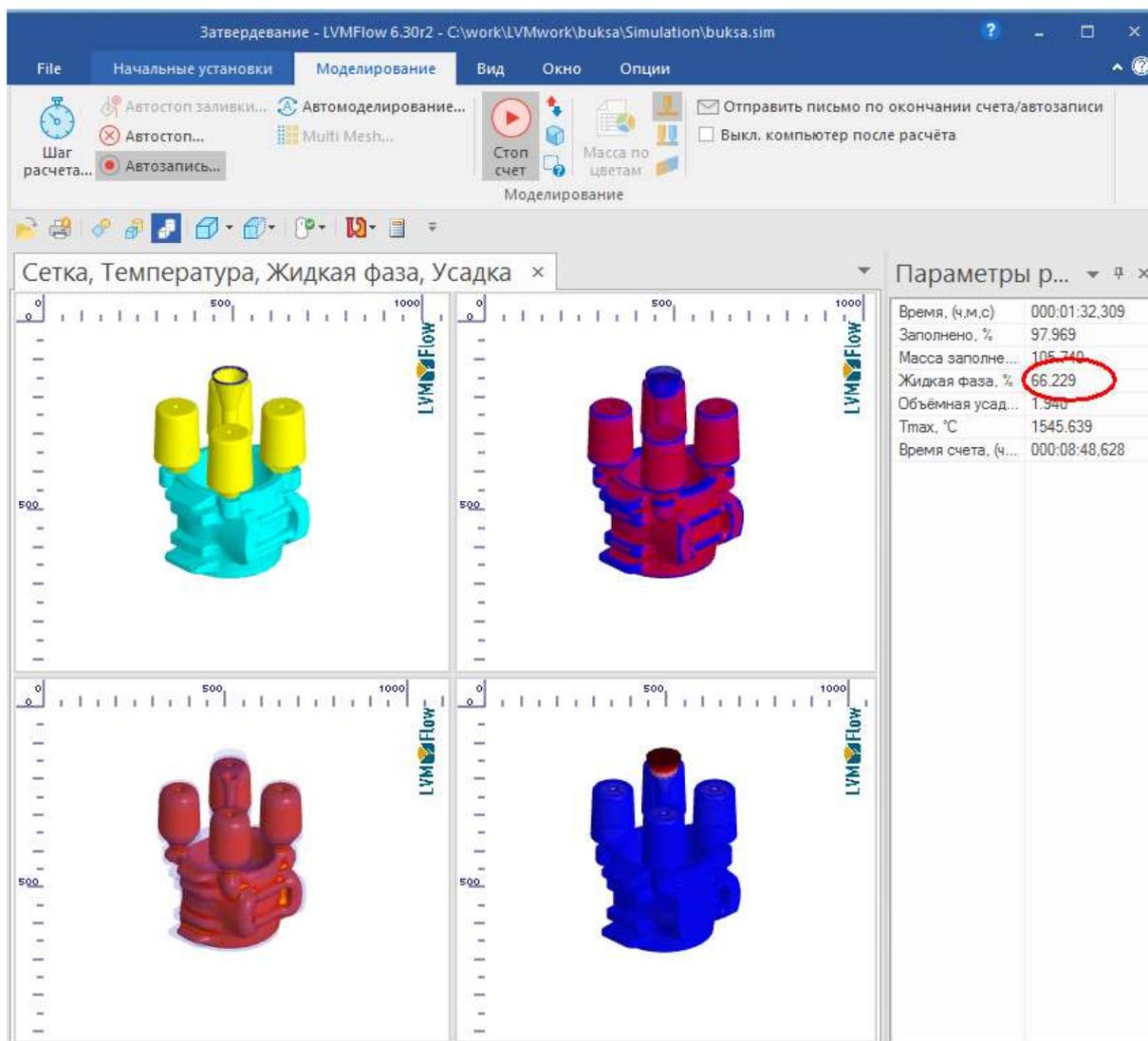
**Рис. 23. Открытие файла с расчетной сеткой**

➤ Сделайте настройки (например, во вкладке «Вид» нажмите пиктограмму «Полупро-зрачная модель» и выберите в списке «Установить поле» позицию «4 вида») и запус-

те расчет нажатием кнопки  «Включить моделирование» во вкладке «Моделирова-ние».

### **Шаг 6. Контролировать изменение расчетных параметров**

Удобно по ходу расчета наблюдать сразу за несколькими полями, выбрав в списке «Установить поле» позицию «4 вида». Высвечиваются поля сетки, температуры, жидкой фазы и усадки. Пользователь может самостоятельно открыть несколько окон с интересующими его полями и автоматически расположить их все на экране, обратившись в меню: Окно > Упорядочить. Если поместить курсор в центр пересечения разделяющих окна линий, нажать левую кнопку мыши и потянуть в сторону, размер окон изменится. Если утянуть указатель в один из углов экрана, останется только одно окно.



**Рис. 24. Визуализация расчета в четырех окнах**

Не останавливая расчет, можно наблюдать за изменением различных расчетных параметров. Если присутствует несколько материалов формы, то можно высвечивать поля отдельно для каждого материала и совместно для нескольких материалов. Достаточно в окне со списком материалов поставить галочку напротив интересующего материала и поле для него будет отображаться.

Справа в окне можно вывести справочную информацию о выбранных материалах (сплав, форма) и их начальных температурах, а также приводится информация о текущем состоянии расчета: реальное время физического процесса, % заполнения формы, % жидкой фазы в текущий момент и максимальная температура в отливке.

В процессе расчета доступен просмотр всех перечисленных в списке рассчитываемых параметров: температура, объем жидкой фазы, локализация усадочных дефектов, микропористость по критерию Нияма, информация с датчиков, время затвердевания. Когда объем жидкой фазы снижается до 0%, расчет по умолчанию завершается.

### 3 Постпроцессор

Все расчетные результаты сохраняются и в дальнейшем доступны для просмотра в постпроцессорном модуле «БАНК ПАСПОРТОВ».

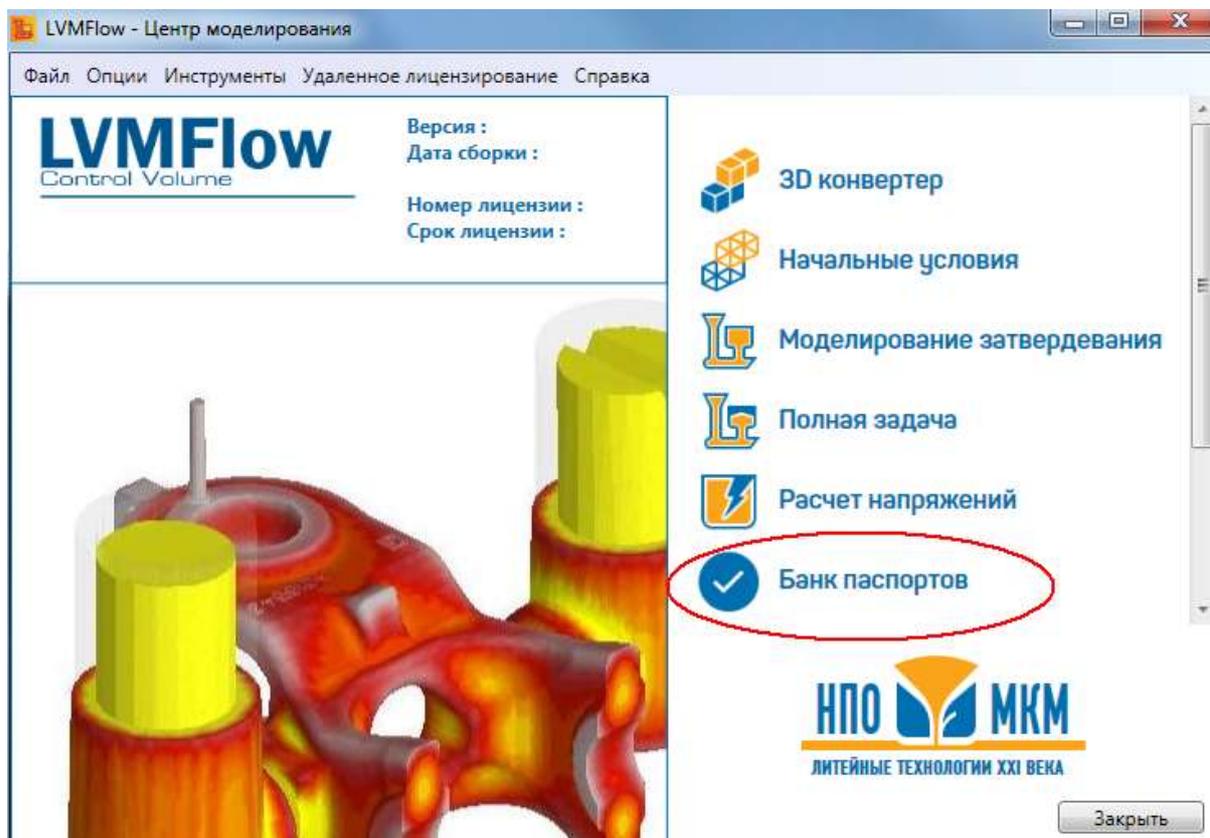


Рис. 25. Включение модуля «Банк паспортов»

#### Природа усадочных дефектов

По механизму образования выделяют два типа усадочных дефектов: 1) раковины (макропористость) и 2) микропористость.

*Макропористость* образуется при недостатке питания выше зеркала расплава, когда отсутствует необходимый его объем для компенсации усадки. Для прогнозирования макропористости моделируется возникновение и движение зеркала расплава. Перемещение зеркала обусловлено объемной усадкой, а его возникновение происходит из-за формирования при затвердевании изолированных друг от друга объемов расплава.

*Микропористость* образуется при недостатке давления ниже зеркала в области теоретически достаточного питания. Падение давления в глубине зоны с формально хорошими условиями питания происходит по следующим причинам: большая объемная усадка, затрудненное движение жидкого металла в твердо-жидкой зоне, изоляция от внешнего давления при формировании твердой фазы на границах приложения давления. Для прогнозирования микропористости решается дифференциальное уравнение фильтрационного течения.

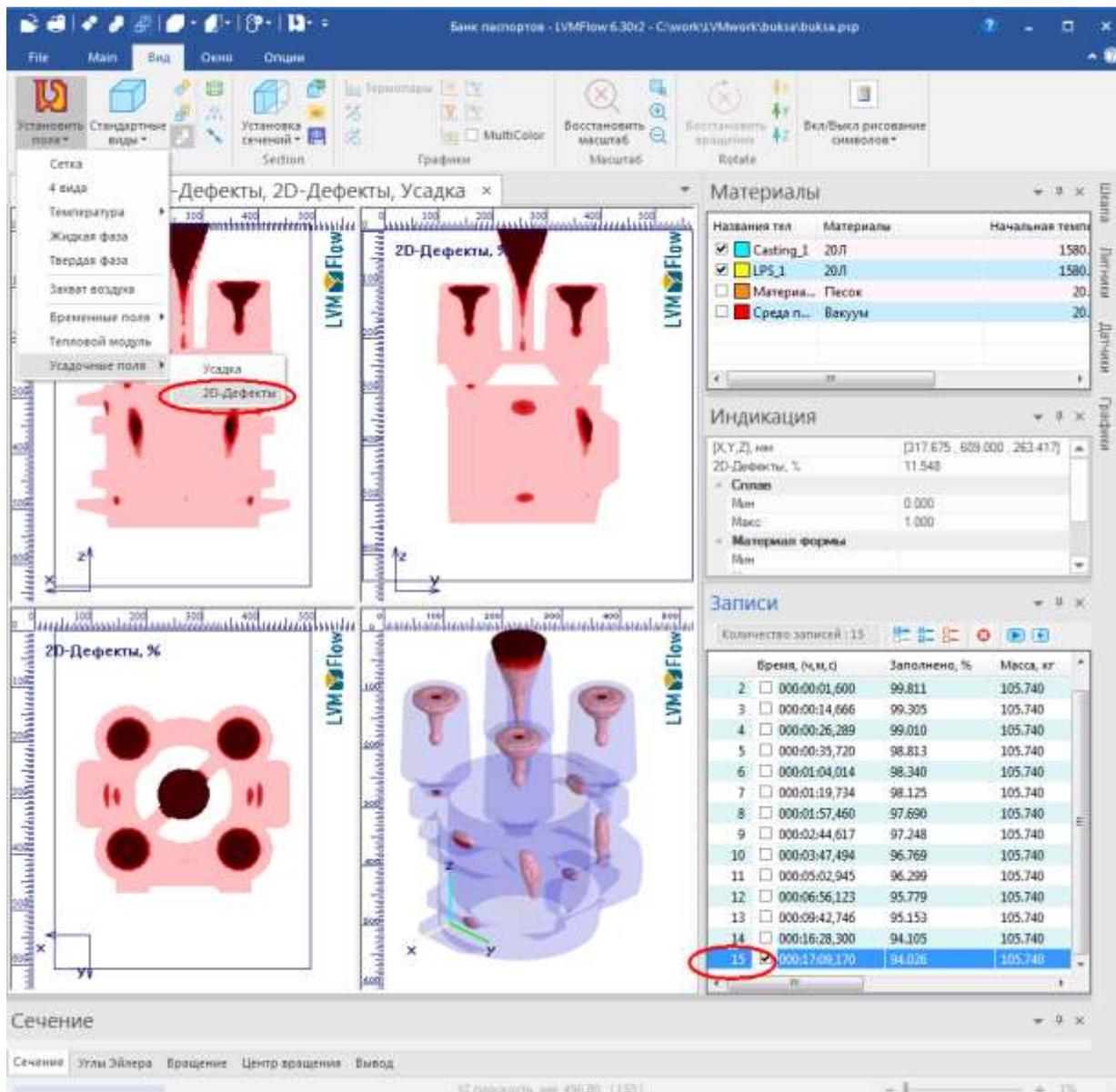


Рис. 26. Результат расчета усадочных дефектов

### 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. Но при этом ничего нельзя сказать о том, в каком виде здесь присутствуют усадочные дефекты – в виде одной большой поры или в виде множества маленьких пор. Параметр усадки ничего не сообщает о локальных размерах усадочных дефектов. Приблизительно локальную усадку можно ассоциировать с плотностью металла в расчетном узле.

Если  $\rho_0$  – идеальная плотность металла, а  $\rho$  – фактическая локальная плотность в выбранном расчетном узле, то «усадка» =  $(1 - \frac{\rho}{\rho_0}) * 100\%$ .

### **В качестве заключения**

Следует особо отметить обучающую роль компьютерных систем, предоставляющих возможность в сжатые сроки просмотреть несколько вариантов ошибочных технологий и понять причины появления брака. Наблюдение за развитием процессов и четкое хро-нометрирование образования дефектов дает возможность понять, когда и в какой области дефекты могут возникнуть, открывает простор для быстрого реагирования и внесения изменений в конструкцию. Моделирующая программа – не более чем инструмент, но такой инструмент, который позволяет в относительно короткие сроки повысить квалификацию начинающего технолога и эффективность проектирования технологий.

### ***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.

