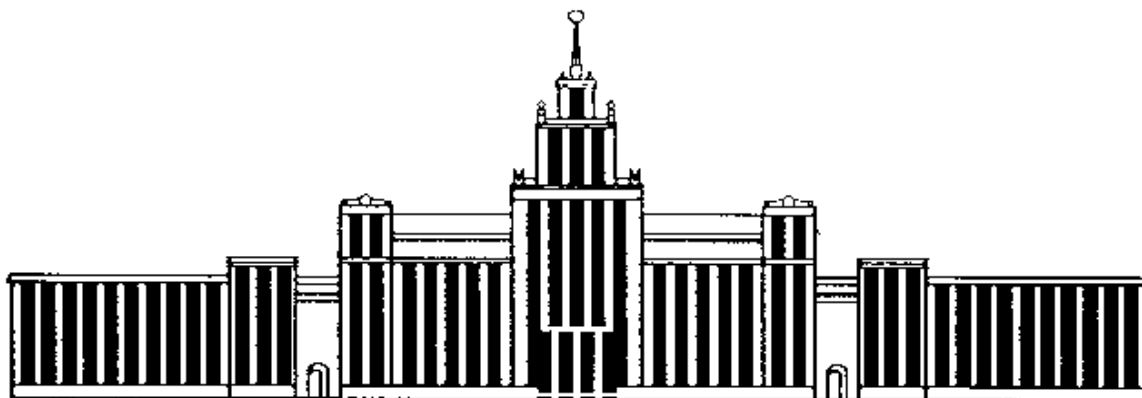


**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**



**ЮЖНО-УРАЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ**

**Карпинский А.В.**

**Моделирование металлургических процессов  
Методические указания к освоению дисциплины**

---

**Челябинск  
2021**

---

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ЮЖНО-УРАЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
КАФЕДРА «ПИРОМЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЕ И ЛИТЕЙНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ»

А.В. Карпинский

**Моделирование металлургических процессов**  
Методические указания к освоению дисциплины

Челябинск  
Издательский центр ЮУрГУ  
2021

Одобрено  
учебно-методической комиссией

Моделирование металлургических процессов: методические указания к освоению дисциплины / А.В. Карпинский. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2021. – 28 с.

Методические указания являются руководством к освоению студентами дисциплины «Моделирование металлургических процессов». Содержит материалы по практическим занятиям, а также выполнению самостоятельной работы студентами.

Методические рекомендации предназначены для студентов заочной формы обучения при подготовке магистров по направлению «Металлургия» (22.04.02).

## 1. Цели и задачи дисциплины

– дать студентам знания о современных методах моделирования технологических процессов в металлургии; – дать студентам знания об использовании современных CAD/CAM/CAE-пакетов в металлургии; – привить умение и навыки использования систем компьютерного моделирования технологических процессов в металлургии.

## Краткое содержание дисциплины

В ходе изучения дисциплины студенты рассматривают особенности моделирования металлургических процессов и вычислительные алгоритмы, изучают структуру современного технологического комплекса и CAD/CAM/CAE-системы. Учатся работать в современных программах 3D-конструирования и компьютерных пакетах моделирования технологических процессов в металлургии.

## 2. Компетенции обучающегося, формируемые в результате освоения дисциплины

Планируемые результаты освоения ОП ВО (компетенции)	Планируемые результаты обучения по дисциплине
ПК-2 Способен проводить анализ технологических и физических процессов при непрерывной разливки стали для выбора путей, мер и средств управления качеством продукции с разработкой предложений по совершенствованию технологических процессов	Знает: как проводить анализ технологических и физических процессов при непрерывной разливки стали Умеет: выбирать пути, меры и средства управления качеством продукции с учетом теоретических и практических достижений Имеет практический опыт: разрабатывать предложения по совершенствованию технологических процессов с учетом практических достижений
ПК-4 Способен проводить анализ технологических процессов для выработки предложений по управлению качеством продукции	Умеет: проводить анализ технологических процессов для выработки предложений по управлению качеством продукции, используя моделирование металлургических процессов

## 3. Место дисциплины в структуре ОП ВО

Перечень предшествующих дисциплин, видов работ учебного плана	Перечень последующих дисциплин, видов работ
Нет	Экспертиза металлов и металлоизделий, Автоматизация прокатного производства, Теория и технологии непрерывной разливки стали, Литейно-прокатные агрегаты, Модифицирование поверхностей, Цифровизация процесса непрерывной разливки стали, Специальные чугуны и стали, Цифровые двойники в прокатном производстве, Современные конструкционные и

Перечень предшествующих дисциплин, видов работ учебного плана	Перечень последующих дисциплин, видов работ
	инструментальные материалы, Производственная практика, научно-исследовательская работа (4 семестр), Производственная практика, преддипломная практика (4 семестр)

Требования к «входным» знаниям, умениям, навыкам студента, необходимым при освоении данной дисциплины и приобретенным в результате освоения предшествующих дисциплин:

Нет

#### 4. Объём и виды учебной работы

Общая трудоемкость дисциплины составляет 3 з.е., 108 ч., 38,25 ч. контактной работы

Вид учебной работы	Всего часов	Распределение по семестрам в часах
		Номер семестра
		1
Общая трудоёмкость дисциплины	108	108
<i>Аудиторные занятия:</i>	32	32
Лекции (Л)	0	0
Практические занятия, семинары и (или) другие виды аудиторных занятий (ПЗ)	16	16
Лабораторные работы (ЛР)	16	16
<i>Самостоятельная работа (СРС)</i>	69,75	69,75
с применением дистанционных образовательных технологий	0	
Выбрать и разработать технологический процесс, рассчитать его параметры, с учетом которых построить 3D-модель для компьютерного моделирования металлургических процессов	69,75	69.75
Консультации и промежуточная аттестация	6,25	6,25
Вид контроля (зачет, диф.зачет, экзамен)	-	зачет

#### 5. Содержание дисциплины

№ раздела	Наименование разделов дисциплины	Объем аудиторных занятий по видам в часах			
		Всего	Л	ПЗ	ЛР
1	Современный технологический комплекс. Система управления данными об изделии (PDM).	2	0	2	0
2	Современный комплекс CAD/CAM/CAE-систем и его использования в металлургии	4	0	4	0
3	Специализированные графические пакеты	4	0	4	0
4	Специализированные пакеты 3D-конструирования	4	0	4	0

5	Компьютерное моделирование процессов в металлургии	18	0	2	16
---	--	----	---	---	----

### 5.1. Лекции

Не предусмотрены

### 5.2. Практические занятия, семинары

№ занятия	№ раздела	Наименование или краткое содержание практического занятия, семинара	Кол-во часов
1	1	Современный технологический комплекс. Product Data Management - система управления данными об изделии	2
2	2	CAD/CAM/CAE-системы и их использовании в металлургии	4
3	3	Специализированные компьютерные графические пакеты и их использование в металлургии	4
4	4	Специализированные пакеты 3D-конструирования и их использование в металлургии	4
5	5	Основные системы компьютерного моделирования технологических процессов в металлургии	2

### 5.3. Лабораторные работы

№ занятия	№ раздела	Наименование или краткое содержание лабораторной работы	Кол-во часов
1	5	Разработка компьютерной 3D-модели для использования в компьютерном моделировании технологических процессов	6
2	5	Компьютерное моделирование процессов с использованием разработанной 3D-модели	4
3	5	Оценка результатов компьютерного моделирования. Корректировка 3D-модели.	4
4	5	Оформления отчета о результатах моделирования и защита принятых технологических решений.	2

### 5.4. Самостоятельная работа студента

Выполнение СРС			
Подвид СРС	Список литературы (с указанием разделов, глав, страниц) / ссылка на ресурс	Семестр	Кол-во часов
Выбрать и разработать технологический процесс, рассчитать его параметры, с учетом которых построить 3D-модель для компьютерного моделирования металлургических процессов	1. Поршнев, С.В. Компьютерное моделирование физических процессов в пакете MATLAB. + CD. [Электронный ресурс] — Электрон. дан. — СПб. : Лань, 2011. — 736 с. — Режим доступа: <a href="http://e.lanbook.com/book/650">http://e.lanbook.com/book/650</a> — Загл. с экрана 2. Павлов, В.П. Дорожностроительные машины. Системное проектирование,	1	69,75

Выполнение СРС			
Подвид СРС	Список литературы (с указанием разделов, глав, страниц) / ссылка на ресурс	Семестр	Кол-во часов
	моделирование, оптимизация: учебное пособие. 64 [Электронный ресурс] / В.П. Павлов, Г.Н. Карасев. — Электрон. дан. — Красноярск : СФУ, 2011. — 240 с. — Режим доступа: <a href="http://e.lanbook.com/book/6027">http://e.lanbook.com/book/6027</a> — Загл. с экрана.; Руководства пользователя T-FLEX, КОМПАС, SolidWorks, Creo, LVMFlow и ProCAST (устанавливаются на ЭВМ вместе с программным пакетом).		

## 6. Текущий контроль успеваемости, промежуточная аттестация

Контроль качества освоения образовательной программы осуществляется в соответствии с Положением о балльно-рейтинговой системе оценивания результатов учебной деятельности обучающихся.

### 6.1. Контрольные мероприятия (КМ)

№ КМ	Се-местр	Вид контроля	Название контрольного мероприятия	Вес	Макс. балл	Порядок начисления баллов	Учитывается в ПА
1	1	Текущий контроль	Реферат	1	1	Реферат проверяется преподавателем. По результатам проверки студенту выставляется за реферат либо зачет, либо незачет. По решению преподавателя реферат может быть возвращен студенту на доработку. Зачет - 1 балл. Незачет - 0 баллов.	зачет
2	1	Бонус	Защита реферата	1	1	При условии получения зачета за реферат, студенту представляется возможность публичной его защиты на практическом занятии по соответствующей реферату. При условии успешной защиты студент получает бонусные баллы.	зачет
3	1	Текущий контроль	Расчетно-графическая работа	1	3	3 балла: полное соответствие выбранной теме, логическое и последовательное изложение материала с соответствующими выводами и обоснованными положениями. 2 балла: полное соответствие выбранной теме, логическое и последовательное изложение материала с достаточно подробным анализом, с соответствующими выводами, но не вполне обоснованными положениями. 1 балл: полное соответствие выбранной теме, логическое и последовательное изложение материала с достаточно подробным анализом, не совсем соответствующими выводами и не	зачет

№ КМ	Се-местр	Вид контроля	Название контрольного мероприятия	Вес	Макс. балл	Порядок начисления баллов	Учитывается в ПА
						вполне обоснованными положениями. 0 баллов: не соответствие выбранной теме, не логическое и не последовательное изложение материала, не соответствующими выводами и не обоснованными положениями.	
5	1	Промежуточная аттестация	Зачет	1	10	<p>Проходной балл для получения зачета равен 10</p> <p>Критерии оценивания следующие. Зачтено (10 баллов): полное освоение всех тем вынесенные на зачет и за полные и развернутые ответы на вопросы, выражение своего мнения, использование примеров в подтверждение своего мнения, правильное употребление профессиональной и научной лексики; допускается наличие ошибок, не нарушающих общей структуры ответа.</p> <p>Дополнительным условием получения оценки «зачтено» могут быть успехи студента при выполнении самостоятельной работы, выполнение лабораторных работ и написание рефератов) и систематическая активная работа на практических занятиях. Не зачтено (менее 10 баллов): неполное освоение тем, вынесенных на зачет, и некачественный ответ (вопросы раскрыты менее чем на 50%) на вопросы зачета.</p>	зачет

## 6.2. Процедура проведения, критерии оценивания

Вид промежуточной аттестации	Процедура проведения	Критерии оценивания
зачет	<p>Зачёт проводится в устной форме. В аудитории, где проводится зачёт, должно одновременно присутствовать не более 6-8 студентов. Каждому студенту задаётся по одному заданию или вопросу из каждой темы, выносимой на зачёт.</p> <p>При не правильном ответе студенту могут быть заданы уточняющие или новые вопросы из этой темы. Тема считается освоенной, если студент смог ответить на 65% вопросов, заданных по этой теме. Зачтено: освоение всех тем, вынесенных на зачёт. Дополнительным условием получения оценки "Зачтено" могут стать успехи при выполнении текущей и самостоятельной работы в течение семестра. Не зачтено: не освоение хотя бы одной темы. Список вопросов выносимых на зачет приведен выше, под блоком установочной информации.</p>	В соответствии с пп. 2.5, 2.6 Положения

## 6.3. Оценочные материалы

Компетенции	Результаты обучения	№ КМ
-------------	---------------------	------



Компетенции	Результаты обучения	№ КМ			
		1	2	3	5
ПК-2	Знает: как проводить анализ технологических и физических процессов при непрерывной разливки стали				+
ПК-2	Умеет: выбирать пути, меры и средства управления качеством продукции с учетом теоретических и практических достижений			+	+
ПК-2	Имеет практический опыт: разрабатывать предложения по совершенствованию технологических процессов с учетом практических достижений		+	+	+
ПК-4	Умеет: проводить анализ технологических процессов для выработки предложений по управлению качеством продукции, используя моделирование металлургических процессов	+		+	+

Фонды оценочных средств по каждому контрольному мероприятию находятся в приложениях.

## 7. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины

### Печатная учебно-методическая документация

#### а) основная литература:

1. Знаменский, Л. Г. Теория литейных процессов [Текст] учеб. пособие для вузов по специальности 150104 "Литейное пр-во черных и цв. металлов" Л. Г. Знаменский, О. В. Ивочкина ; Юж.-Урал. гос. ун-т ; Каф. Литейное пр-во ; ЮУрГУ. - Челябинск: Издательский Центр ЮУрГУ, 2011. - 146, [1] с. ил. электрон. версия
2. Линчевский, Б. В. Теория металлургических процессов Учебник для студ. высш. учеб. заведений, обучающихся по направлению "Металлургия" и спец."Физико-химические методы исследования процессов и материалов" Б. В. Линчевский. - М.: Металлургия, 1995. - 352 с. ил.
3. Цымбал, В. П. Математическое моделирование металлургических процессов Учеб. пособие для вузов по спец."Автоматизация металлург. пр-ва". - М.: Металлургия, 1986. - 239 с. ил.

#### б) дополнительная литература:

1. Красильникова, Г. А. Автоматизация инженерно-графических работ: AutoCAD 2000, Компас-график 5.5, MiniCAD 5.1 [Текст] учеб. Г. А. Красильникова, В. Самсонов, С. Тарелкин. - СПб.: Питер, 2000. - 255 с. ил.
2. Кудрявцев, Е. М. Компас-3D. Проектирование в машиностроении [Текст] Е. М. Кудрявцев. - М.: ДМК-Пресс, 2009. - 435 с. ил.
3. Щурова, А. В. Разработка конструкторских чертежей с использованием программы "КОМПАС" Учеб. пособие А. В. Щурова; Юж.-Урал. гос. ун-т, Каф. Оборудование и инструмент компьютеризир. пр-ва; ЮУрГУ. - Челябинск: Издательство ЮУрГУ, 2003. - 24,[2] с. ил.

#### в) отечественные и зарубежные журналы по дисциплине, имеющиеся в библиотеке:

1. «САПР и графика»
2. «CAD/CAM/CAE Observer»
3. «Все о С@ПР»
4. Черная металлургия
5. Цветная металлургия

6. Литейщик России
7. Литейное производство

г) методические указания для студентов по освоению дисциплины:

Не предусмотрены

### Электронная учебно-методическая документация

Нет

Перечень используемого программного обеспечения:

1. Dassault Systèmes-SolidWorks Education Edition 500 CAMPUS(бессрочно)
2. -ProCAST(бессрочно)
3. ASCON-Компас 3D(бессрочно)
4. -LVMFlow(бессрочно)

Перечень используемых профессиональных баз данных и информационных справочных систем:

1. -Информационные ресурсы ФИПС(бессрочно)

### 8. Материально-техническое обеспечение дисциплины

Вид занятий	№ ауд.	Основное оборудование, стенды, макеты, компьютерная техника, предустановленное программное обеспечение, используемое для различных видов занятий
Лабораторные занятия	123 (1)	Персональные ПК с установленным специализированным ПО.
Практические занятия и семинары	123 (1)	Персональные ПК с установленным специализированным ПО.
Практические занятия и семинары	124a (1)	Проектор, персональный ПК.
Лабораторные занятия	324 (1)	Персональные ПК с установленным специализированным ПО.

**Пример выполнения самостоятельной работы студентов**

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РФ**

**Южно-Уральский государственный университет**

**Кафедра пиromеталлургических и литейных технологий**

**Расчётно-графическая работа по дисциплине  
«Моделирование металлургических процессов»**

**Тема:**

**«АНАЛИЗ ПРОЦЕССА ЗАТВЕРДЕВАНИЯ ОТЛИВКИ «БРОНЯ НИЖНЯЯ»  
В СКМ «ПОЛИГОН»**

**Выполнил: ст. гр. П-537  
Иванов И.И.**

**Проверил: доц., к.т.н.  
Карпинский А.В.**

## ВВЕДЕНИЕ

Современный технологический комплекс, в том числе и комплекс литейного производства, можно представить схемой, рис.1. В центре этой схемы необходимо расположить системы компьютерной поддержки конструирования (Computer Aided Design – CAD-системы). Ключевое место указанных систем связано с тем, что именно в них строятся трехмерные (3D) модели деталей и именно 3D модели являются объектом, с которым в последствии работают на всем этапе проектирования изделия (отливки).

Проектирование можно начать с создания в CAD-системе трехмерной компьютерной копии отливки на основании ее чертежа.

Далее 3D-модель подвергают различным проверкам в компьютерных системах инженерного анализа (Computer Aided Engineering – CAE-системы). В CAE-системах конструктор может выявить прочностные ошибки разрабатываемой детали, и совместно с технологом-литейщиком, добиться наилучшего варианта ее конструкции. В свою очередь, технолог-литейщик в CAE-системах имеет возможность варьировать геометрией отливки, параметрами и режимами технологического процесса, что позволяет исключить принципиальные ошибки осваиваемой отливки еще до того, когда она будет пущена в производство.

Для изготовления деталей механической обработкой (различными фрезами) используются станки с ЧПУ. Программу можно написать целиком вручную, а можно ее создать быстро в автоматизированной системе по 3D модели. Такие САПР называются системами компьютерной поддержки изготовления (Computer Aided Manufacturing – CAM-системы). В литейном производстве САМ-системы применяют для изготовления модельной оснастки: моделей отливок, моделей литниковых систем, моделей прибылей и т.д., а также для создания металлических пресс-форм и кокилей.

При помощи контрольно-измерительных машин определяются размеры детали и сравниваются с размерами ее 3<sup>х</sup>-мерного аналога. При необходимости размеры

модели корректируются. Здесь же можно измерить любую деталь-аналог, оцифровать, представить в виде сеточной модели и импортировать в CAD-систему, что существенно упростит 3D построение.

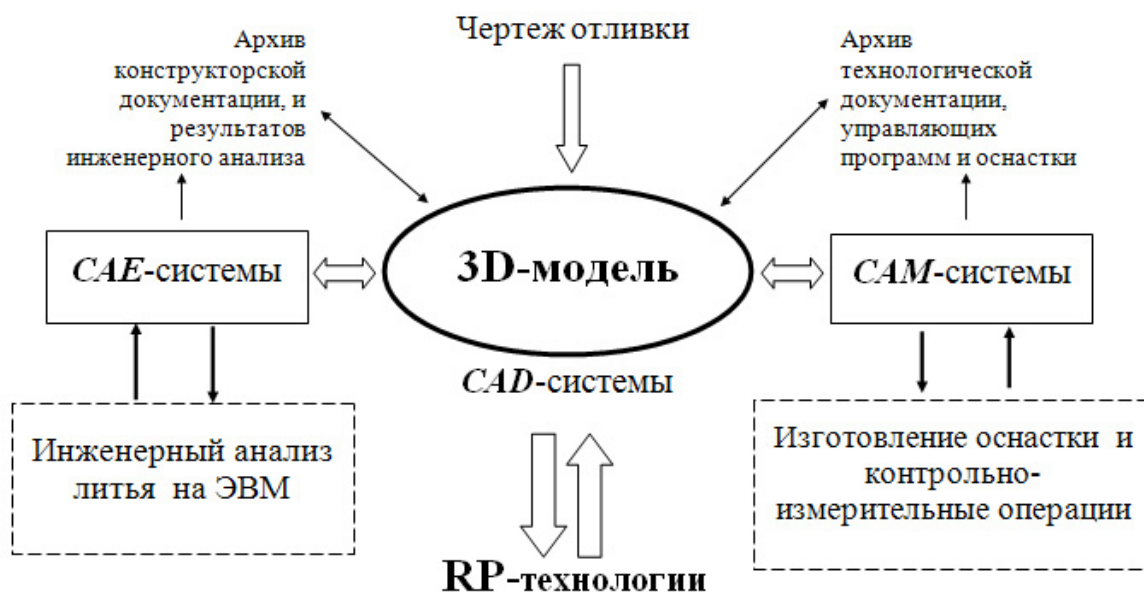


Рисунок 1 – Схема современного технологического комплекса

Результатом активного развития информационных систем в конце прошлого века стало появление методов быстрого прототипирования (Rapid Prototyping – RP). Впервые технология RP была реализована в конце 80<sup>х</sup> годов американской компанией 3D Systems. Компания вывела на рынок свою первую установку послойного отвердевания фотополимера воздействием луча лазера. Эта технология получила название «стереолитография», а установка – SLA (Stereo Lithography Apparatus).

Быстрое прототипирование (RP) представляет собой процесс послойного построения физической модели (прототипа) в соответствии с геометрией CAD-модели. Основное отличие этой технологии от традиционных методов изготовления моделей заключается в том, что модель создается не отделением «лишнего» материала от заготовки, а послойным наращиванием материала, составляющего модель, включая входящие в нее внутренние и даже подвижные части. Модели, выполненные по технологиям RP, могут изготавливаться из различных материалов (бумаги, алюминия и др.). Процессы построения в значительной степени автоматизированы и позволяют получать качественные и сравнительно недорогие

модели, затрачивая на их изготовление часы, а не дни и недели, как это было при использовании традиционных методов.

Обычно указанные выше системы автоматизированного проектирования (САПР) работают в связке – CAD/CAM/CAE. В процессе их работы накапливается соответствующая расчетно-технологическая документация, которая составляет архив или базу данных об изделии, что упрощает и ускоряет создание похожих технологий.

## 2 Компьютерное моделирование литейных процессов

Бурное развитие компьютерной техники и применение математического моделирования в литейной промышленности привели к появлению большого числа программ, посредством которых более или менее успешно решаются задачи, с которыми литейщики сталкиваются в повседневной практике.

Сегодня в мире насчитывается более десяти систем компьютерного моделирования литейных процессов (СКМ ЛП). Специалистам хорошо известны немецкая программа Magma и американская Procast, в этом же ряду нужно упомянуть американскую SolidCast, финскую CastCAE и немецкую WinCast. Две разработки – «Полигон» и LVMFlow – имеют российское происхождение.

Опыт практического применения САМ ЛП показал, что программные продукты зарубежных производителей не получили серьезного распространения на российском рынке. Причиной тому — высокая цена программ, отсутствие в большинстве случаев русскоязычного интерфейса и отечественной базы данных по материалам и сплавам, а также сложность обучения.

Программы для моделирования литейных процессов, используемые сегодня в России, в основном различаются степенью полноты факторов, учитываемых при моделировании, и, соответственно, стоимостью. Второе существенное различие связано с методами получения и решения разностных уравнений: уравнения тепломассопереноса могут быть записаны в дифференциальном или интегральном виде.

Метод конечных разностей (МКР) базируется на уравнениях в дифференциальной форме, при этом дифференциальные операторы заменяются конечно-разностными соотношениями различной степени точности. Как правило, они строятся на ортогональных сетках (прямоугольной, цилиндрической и т.д.). Это

позволяет факторизовать операторы и свести решение многомерной задачи к последовательности одномерных задач, а значит, существенно упростить и ускорить решение общей системы уравнений. К недостаткам метода следует отнести плохую аппроксимацию границ сложных областей, что не слишком принципиально для уравнений теплопроводности, но весьма существенно для уравнений гидродинамики. Кроме того, метод плохо работает в случае тонкостенных отливок, когда толщина стенок становится сравнимой с шагом сетки.

Методы конечных элементов (МКЭ) и конечных объемов (МКО) базируются на уравнениях тепломассопереноса в интегральном виде. Область, в которой решаются уравнения, разбивается на элементы, внутри которых строятся аппроксиманты функций на основе системы базисных функций, определенных на элементе. «Проецируя» интегральные уравнения на эти базисы, получают систему разностных уравнений. Система значительно сложнее принятой в МКР, ее решение требует больших ресурсов памяти и немалого времени. Одно из главных достоинств метода конечных элементов — хорошая аппроксимация границы, а основные недостатки — необходимость в добротном генераторе конечных элементов.

Как уже сказано, отечественные разработки в области систем автоматизированного моделирования литейных процессов представлены двумя программными продуктами: «Полигон» (разработчик — ООО «Фокад», Санкт-Петербург) и LVMFlow (разработчик — ЗАО «НПО МКМ», Ижевск), которые применяют различные математические методы: МКЭ и МКР соответственно.

Для расчета нашей отливки будем использовать СКМ «Полигон». Для моделирования сетки воспользуемся программой Hyper Mesh.

### 3. Solidworks

Система твердотельного параметрического моделирования Solidworks разработана американской компанией Solidworks Corporation. Это новая система конструирования среднего класса, создана специально для использования на персональных компьютерах под управлением операционных систем Windows. Solidworks дает каждому конструктору возможность использовать на своем рабочем месте последние достижения CAD/CAM - технологий для разработки сложных деталей и сборок изделий машиностроения. При этом проектирование с помощью

Solidworks является для конструктора интуитивно простым и удобным, полностью соответствуя его привычным навыкам и методам работы.

Создание эскиза.

Процесс создания модели в Solidworks начинается с построения опорного тела и последующего добавления или вычитания материала. Для построения

тела первоначально строится эскиз конструктивного элемента на плоскости, впоследствии преобразуемый тем или иным способом в твердое тело.

Solidworks предоставляет пользователю полный набор функций геометрических построений и операций редактирования. Основное требование,

предъявляемое системой к эскизу при работе с твердыми телами - это замкнутость и отсутствие самопересечений у контура.

При создании контура нет необходимости точно выдерживать требуемые размеры, самое главное на этом этапе - задать положение его элементов. Затем, благодаря тому, что создаваемый эскиз полностью параметризован, можно установить для каждого элемента требуемый размер. Кроме того, для элементов, входящих в контур, могут быть заданы ограничения на расположение и связи с другими элементами.

Создание твердотельной параметрической модели.

Solidworks содержит высокоэффективные средства твердотельного моделирования, основывающиеся на постепенном добавлении или вычитании

базовых конструктивных тел. Эскиз для получения базового тела может быть построен на произвольной рабочей плоскости.

Типовые инструменты для получения базовых тел позволяют выполнить:

- выдавливание заданного контура с возможностью указания угла наклона образующей;
- вращение контура вокруг оси;
- создание твердого тела, ограничиваемого поверхностью перехода между заданными контурами;
- выдавливание контура вдоль заданной кривой;
- построение фасок и скруглений различного вида;
- построение уклонов;
- создание различного типа отверстий;



- получение развертки тел равномерной толщины.

Основные методы создания твердого тела сочетают в себе также возможность комбинации всех перечисленных способов как при добавлении

материала, так и при его снятии. Естественный порядок работы конструктора без труда позволяет создавать сложные твердотельные модели, состоящие из

сотен конструктивных элементов. При необходимости во время работы возможно введение вспомогательных плоскостей и осей для использования в дальнейших построениях.

Параметры всех созданных конструктивных элементов доступны для изменения, так что в любой момент работы можно изменить произвольный параметр эскиза или базового тела и выполнить затем полную перестройку модели.

Кроме создания твердых тел, в Solidworks существует возможность построения различных поверхностей, которые могут быть использованы как для вспомогательных построений, так и самостоятельно. Поверхности могут быть импортированы из любой внешней системы или построены теми же способами, что и твердые тела (выдавливание, вращение, переход между контурами и т. п.). Допускается получение слепка любой из поверхностей уже построенного твердого тела.

В рамках данной специальной части все модели были построены в SolidWorks и в качестве примера модель отливки с литниково-питающей системой представлены на рисунке 2.

Режимы визуализации полученной модели позволяют просматривать ее каркасное или реалистичное изображение. Для повышения качества тонированных изображений могут быть изменены физические характеристики поверхности детали (текстуры) и назначены дополнительные источники света.

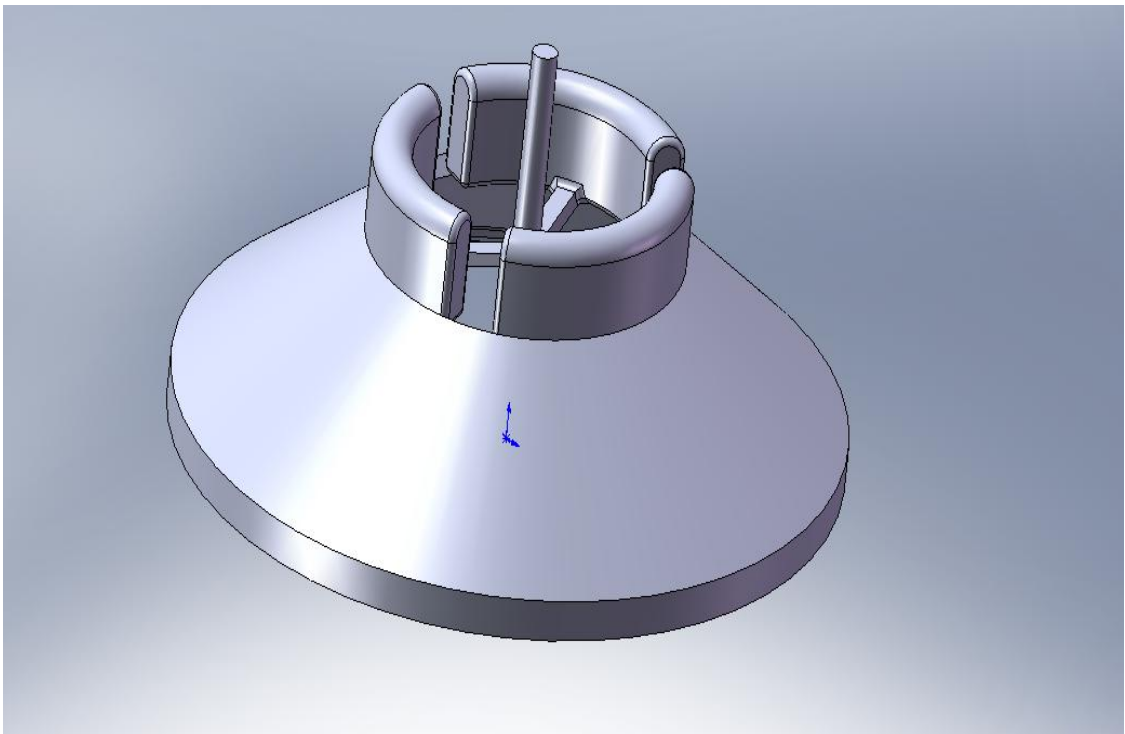


Рисунок 2 – Модель отливки «Броня нижняя»

#### 4. Hyper Mesh

Программа Hyper Mesh входит в пакет Hyper Works. Это система программ для создания сеток конечных элементов, использования в качестве конечно-элементных решателей, так и для совместного использования с другими конечно-элементными пакетами. В нашем случае мы воспользуемся данной программой для создания конечной элементной сетки.

В ходе работы была импортирована твердотельная модель отливки «Броня нижняя», ее поверхности были разбиты на поверхностные сетки треугольников. На базе поверхностных сеток были построены объемные тетраэдральные сетки. В процессе разбиения были получены три сетки : сетка отливки, сетка формы и сетка опорной плиты, которая в ходе моделирования процесса затвердевания отливки будет выполнять роль холодильника. Полученная сетка сохраняется для импорта в СКМ «Полигон».

#### 5. СКМ «Полигон»

Программные модули системы разделены на три блока:

##### *Процессоры*

"Полигон" позволяет моделировать следующие процессы. Тепловые процессы при затвердевании, образование усадочных раковин и макропористости,

образование микропористости, гидродинамические процессы при заливке. Кроме того, формирование и расчет любых "критериев качества" для прогноза структуры, пригара, размыва формы, механических свойств, напряжений, трещин и др. Базовые модели (затвердевание, усадка и др.), опираясь на реальную физику процессов, максимально универсальны по сплавам и способам литья. Сплавы: алюминиевые, магниевые, медные, чугуны, стали, никелевые и др. Способы: в землю, в кокиль (в т.ч. водоохлаждаемый), ЛВМ, ВПФ, ЛПД, ЛНД, жидкая штамповка, направленное затвердевание и др. В то же время имеется ряд специализированных моделей и функций: моделирование циклических процессов, моделирование усадочных процессов при подводе металла под давлением при ЛНД и ЛПД, затвердевание в вакуумных печах при лучистом теплообмене, учет скользящих сопряженных поверхностей, затвердевание с учетом подвода электрического тока и др. Моделирование ведется на базе метода конечных элементов (МКЭ), который позволяет использовать наиболее адекватные физические и геометрические модели (ГМ). Все модели и функции реализованы для трехмерных (3D) ГМ. В решателях можно использовать не только прямой, но и итерационный метод расчета. Это позволяет в 10-15 раз уменьшить время расчета и требуемую оперативную память, что в сочетании с МКЭ делает доступным на персональном компьютере расчет отливок любой сложности.

### *Препроцессор*

3D-геометрический препроцессор "Полигона" при подготовке расчетных ГМ позволяет импортировать сетки практически всех известных генераторов: FEMAP, HyperMesh, ANSYS 4.4-5.3, ProCAST, Nastran, GiD, Pro/Mesh, StressLab, генератор Unigraphics и др. Для генерации 3D конечно-элементных сеток совместно с "Полигоном" могут поставляться автоматические генераторы сеток FEMAP или GiD, которые используют исходные ГМ в форматах IGES, PARASOLID, VDA FS, STL и др. Это позволяет совместно с "Полигоном" использовать все наиболее популярные 3D CAD-системы: SolidWorks, Unigraphics, ProEngineer, Компас-3D, EUCLID, CATIA, Cimatron, CADDs и др. Ввод свойств осуществляется из прилагаемой базы данных по сплавам и материалам, которую технолог может легко дополнять и редактировать. Подключен обширный справочник по свойствам литейных сплавов и материалов. Имеются средства автоматической генерации

свойств сплавов (алюминиевые, серые чугуны, стали и др.) по химическому составу. Подготовка отливки к расчетам представлена на рисунке 3.

### *Постпроцессор*

Постпроцессоры "Полигона" позволяют представлять результаты расчетов в самом различном виде: трехмерном, двумерном, цветовым окрашиванием с одновременным учетом температуры и освещенности, в виде изоповерхностей, векторных полей, изолиний, оцифрованных точек, графиков и т.д. В 3D-постпроцессоре используются современные графические библиотеки. Это позволяет проводить все визуальные операции на 3D-объектах с высокой скоростью и наглядностью. Кроме того, возможна обработка расчетных тепловых полей по любым задаваемым пользователем математическим критериям.

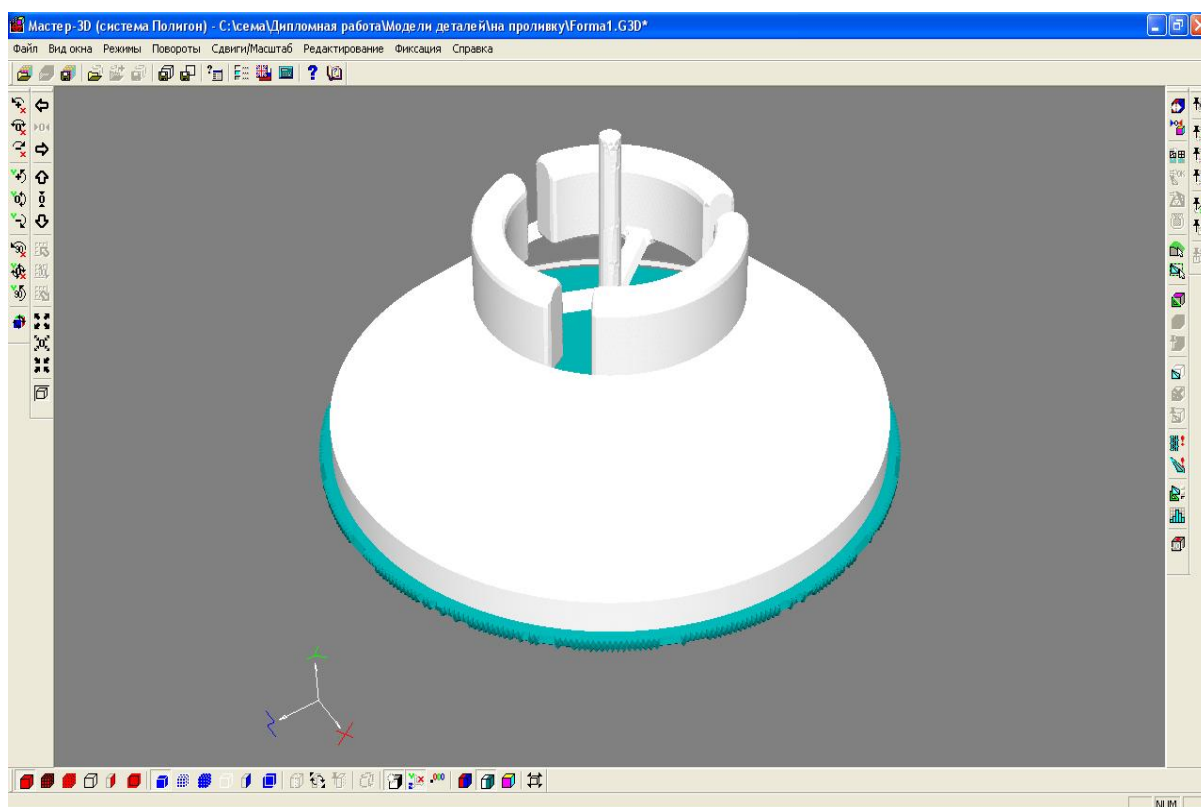


Рисунок 3 – подготовка отливки «Броня нижняя» к моделированию

На базе численного моделирования указанных выше процессов в трехмерной постановке методом конечных элементов (МКЭ), Полигон в настоящее время решает следующие задачи.

Задачи затвердевания и образования усадочных дефектов (раковины, макропористость, микропористость): в отливках любой неизменной конфигурации задаваемой пользователем (отдельные тела могут перемещаться друг относительно

друга, но сами тела не должны менять свою конфигурацию) с возможностью учета следующего:

- тепловых процессов в затвердевающей отливке (учет скрытой теплоты затвердевания, сложного спектра тепловыделения в интервале затвердевания и т.д.);

- тепловых процессов в форме, которая может одновременно включать в себя объекты из любых различных материалов (полный расчет всех тепловых процессов в форме с учетом зависимости характеристик материалов от температуры, охлаждающих вставок, охлаждающих водяных каналов с заданным температурным режимом, утеплителей, подогревателей и т.д.);

- сложных условий теплового взаимодействия на границах сопряжения отливки и формы в т.ч. и с учетом заданных перемещений объектов и «скольжения» сопряженных поверхностей относительно друг друга. Для сопряженных поверхностей ведется учет межконтактных прослоек заданной теплопроводности и толщины, пятен плотного контакта, пятен зазора, теплопередачи теплопроводностью, конвекцией, лучеиспусканием и зависимости всех этих параметров от температуры сопрягаемых поверхностей). В частности это позволяет задавать переменный зазор между отливкой и формой в зависимости от термического сжатия отливки, если оно определяется температурой на сопряженной поверхности, что характерно для тел относительно простой конфигурации типа тел вращения;

- лучистой теплопередачи (актуально для способов литья в вакуумных печах) между всеми несопряженными поверхностями с расчетом экранирования, взаимных углов наклона и т.д. в т.ч. и при заданных перемещениях отдельных объектов (полная трассировка всех элементов поверхностей всех объектов по принципу «каждый с каждым»);

- теплопередачи в т.н. «среду» с разными зонами, заданным температурным режимом каждой зоны и режимом перемещения каждой зоны. От «формы-отливки» «среда» отличается тем, что ее температурный режим задается, а не рассчитывается. Применение движущихся многослойных «сред» позволяет решать класс задач, связанных с перемещающимися зонами нагрева, охлаждения и т.п.;

- сложных начальных температурных полей, которые могут быть результатами предыдущего расчета, например результатами решения задачи заполнения полости формы жидким расплавом;
- подвода любых задаваемых внешних тепловых потоков (например при наличии дуги известной мощности);
- тепловых эффектов в отливке при подводе электрического тока (разогрев из-за сопротивления и формирование соответствующего самоподдерживающегося направленного характера затвердевания из-за зависимости сопротивления от температуры);
- внешнего давления (всестороннего «атмосферного» или по заданным границам) с учетом «отсечки» давления при затвердевании поверхности;
- формирования изолированных областей жидкого и твердо-жидкого при затвердевании, образования и перемещения зеркал на поверхности расплава и в раковинах, изменения металлостатического давления при перемещении зеркал;
- сложного характера структурированности твердо-жидкой зоны в зависимости от доли жидкой фазы (учет изменения процессов образования усадочных дефектов и кинетики движения зеркал в зависимости от структурированности твердо-жидкой зоны).

Задачи заполнения: при заливке жидкого металла в полость формы любой неизменной конфигурации с учетом следующего:

- гидродинамических процессов в жидком металле с учетом совместного действия входных скоростей и силы тяжести (скорость поступающей струи на «пятне», соответствующему входному диаметру струи, может быть задана как функция от времени, если входные скорости не постоянны), формирования потоков металла, формирования свободных поверхностей в процессе заполнения и т.д.
- тепловых процессов в отливке с учетом массопереноса (учет полей скоростей при тепловом расчете), учетом тепловыделений при затвердевании и т.д.;
- тепловых процессов в форме, которая может одновременно включать в себя объекты из любых различных материалов и т.д.;
- сложных условий теплового взаимодействия на границах сопряжения отливки и формы и т.д.;

- замедления и остановки потоков жидкого металла при нарастании доли твердой фазы (возрастание эффективной вязкости);

- возможности задания не только границ «входа» металла, но и границ «выхода», когда втекающий металл может вытекать из полости формы.

Задачи критериального анализа: результатов численного моделирования. При этом в Полигоне можно формировать любые критерии качества (можно задать любые формулы и алгоритмы обработки расчетных полей) без внесения изменений в программное обеспечение. Результатами критериального анализа являются 3-D поля, которые полностью поддерживаются постпроцессорами Полигона, т.е. их можно визуализировать и работать с ними так же как и со всеми расчетными полями. Критериальный анализ использует не универсальные физические модели, характерные для численного моделирования, а упрощенные аналитические зависимости, которые почти всегда содержат в себе помимо физических параметров также и «интегральные» эффективные коэффициенты с неявным физическим смыслом, которые могут быть разными на разных производствах даже для одних и тех же сплавов и способов литья. Сам критерий будет одним и тем же, но некоторые числовые параметры в нем будут разными. С одной стороны критериальный анализ позволяет прогнозировать самые разнообразные параметры в отливке, с другой стороны чаще всего требует определенной настройки используемого критерия на конкретные условия производства, номенклатуру, применяемые технологические приемы и т.д. В связи с этим поставляемые вместе с Полигоном критерии, помимо собственно загружаемого файла с критерием, обеспечиваются документацией с подробным описанием этого критерия (исходных формул, зависимостей т.д.) и методикой экспериментальной «подгонки» данного критерия под конкретные условия. В исходном виде поставляемые критерии настроены либо на данные соответствующего ГОСТ, либо на некоторый «средний» вариант.

В любом случае применение критериальных обработок обязательно требует хотя бы минимальной настройки на конкретное производство, завод, цех и т.п. Поэтому трудно ожидать, что кто-то «выдаст» не требующие настройки универсальные критерии для конкретного производства. Однако, опираясь на опытные (заводские) данные, вполне реально формировать достаточно эффективные критерии на базе известных упрощенных формул. При этом даже не всегда требуются какие-то

дополнительные эксперименты – иногда достаточно данных и предложений, которые имеют специалисты, знающие заводскую практику, и представляющие себе общую физику формирования того или иного параметра.

Останавливаемся на этом так подробно, потому что многие параметры, якобы «моделируемые» в различных литейных системах по сути являются закрытой от пользователя критериальной обработкой тепловых или иных полей. Такие обработки обязательно должны настраиваться на конкретное производство, но в силу того, что эти системы не предоставляют такую возможность, то часто утверждается, что система и так считает все «правильно». Особенно часто этим «грешат» дилеры известных импортных систем, чаще всего кстати сами не знающие что и как считается в распространяемой ими системе.

#### Базы свойств сплавов и материалов форм

Базы свойств сплавов и материалов Полигона являются полностью открытыми, могут редактироваться пользователем, наращиваться, модифицироваться и т.д. В настоящее время в базовую поставку Полигона входят теплофизические свойства по 60 различным сплавам, в основном на основе железа и алюминия. Кроме того, к Полигону подключен справочник по свойствам различных сплавов.

### 6. Оптимизация технологического процесса

В рамках данной спец части оптимизация происходит по анализу затвердевания отливки с помощью модуля «Фурье-3D». Условия расчета представлены в таблице.

Таблица – Начальные условия расчета «Фурье-3D»

Сплав		Сталь 110Г13Л
Начальная температура, °С	верх	1450
	низ	1450
Материал формы		Смесь alfa-set
Начальная температура формы, °С		20
Шаг расчета, с		20

Анализ результатов проводится с помощью модуля «Мираж-3D».



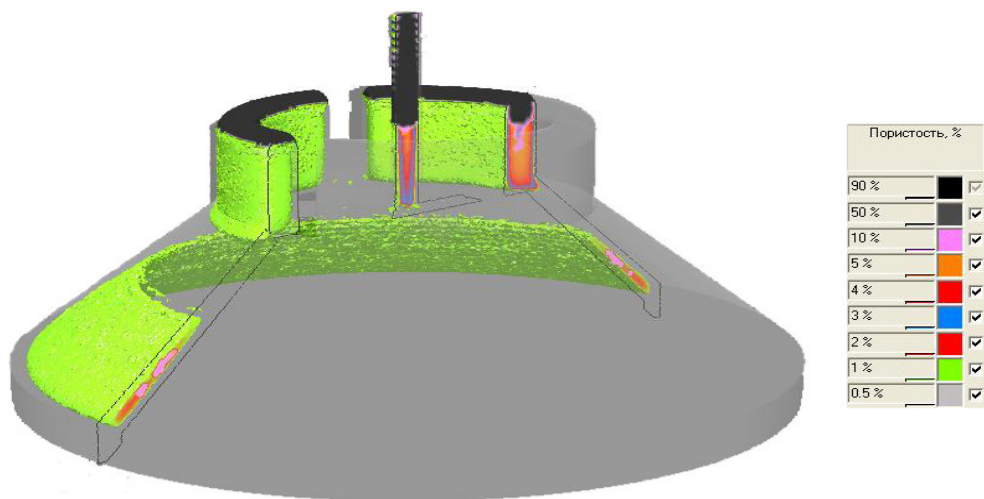


Рисунок 4 – Анализ процесса затвердевания отливки, базовый вариант.

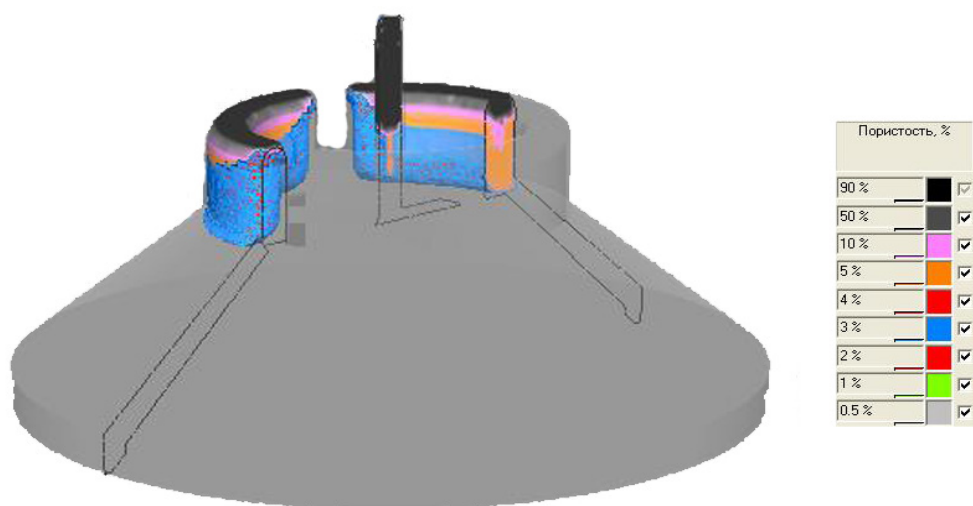


Рисунок 5 – Анализ процесса затвердевания отливки, проектный

Таким образом, проведены исследования распространения пористости в технологии изготовления отливки по базовому варианту (рисунок 4) и по проектному варианту (рисунок 5).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

После проведенных вычислительных исследований проектный вариант оказался намного лучше, чем базовый. Использование опорной плиты в роли холодильника обеспечило исключение пористости в середине тела отливки, а также уменьшило расход жидкого металла. Данное проектное решение обеспечивает:

- более качественное формирование отливки «Броня нижняя»;
- снижение брака при выпуске реальных отливок;
- снижение трудоемкости обрубной операции;
- повышение ТВГ (с 73% до 84%).