**Оглавление**

[Введение 3](#_Toc201996109)

[1. Теоретическая глава 4](#_Toc201996110)

[1.1 Индукционная плавка в холодном тигле (ИПХТ) 4](#_Toc201996111)

[1.1.1 Преимущества индукционной плавки 4](#_Toc201996112)

[1.2 Коммерческий пакет программ ANSYS 4](#_Toc201996113)

[1.2.1 Описание пакета «ANSYS» 4](#_Toc201996114)

[1.2.2 Задание свойств материалов (среды) 4](#_Toc201996115)

[1.2.3 Задание свойств жидкостей при решении задач гидродинамики 4](#_Toc201996116)

[1.2.4 Создание геометрической модели 4](#_Toc201996117)

[2. Практическая глава 4](#_Toc201996118)

[2.1 Постановка задачи 4](#_Toc201996119)

[2.2 Опыт проведенный на кафедре ЭТПТ 4](#_Toc201996120)

[2.2.1 Температурные измерения 4](#_Toc201996121)

[2.2.2 Результаты эксперимента 4](#_Toc201996122)

[2.3 Создание модели 4](#_Toc201996123)

[2.4 Верификация модели 4](#_Toc201996124)

[Заключение 4](#_Toc201996125)

[Список литературы 4](#_Toc201996126)

Введение

Практические задачи, возникшие в связи с развити­ем ряда областей науки и техники (таких как квантовая радиотехника, полупроводниковая электро­ника, ядерная физика и др.) потребовали производства новых материалов, отличающихся высокой химической активностью в расплавленном состоянии. Среди высокотемпературных материалов оксиды занимают особое место вследствие благоприятного сочетания химико-физических и теплофизических свойств и уникальной стойкости в кислородосодержащих средах. В то же время оксиды и оксидные соединения образуют целые классы важнейших технических материалов: флюсы и шлаки, стекла и цементы, огнеупорные и абразивные материалы, оксидные диэлектрики и полупроводники, лазерные и композиционные материалы, люминофоры и материалы для защитных покрытий, от которых зависит уровень развития энергетики, машиностроения, связи и других отраслей народного хозяйства. Выплавка этих материалов традиционными способами оказалась невозможной, и разрабатываются раз­личные методы, позволяющие плавить химически ак­тивные тугоплавкие материалы без загрязнения. В плавильных устройствах стали использовать так называемые холодные тигли, т.е. контейнеры, рабочая температура которых ниже температуры плавления пе­реплавляемого материала. Тем или иным способом вы­деляя тепло в садке, удалось создать устойчивую ван­ну расплава, непосредственно соприкасающуюся с хо­лодным тиглем, или отделенную от него слоем нерасплавившегося материала. Из-за высоких температур проведение практических опытов связано с высокими затратами энергии и ресурсов, а так же высоких требований к надежности оборудования. Поэтому в настоящее время наравне с физическим моделированием, также, в связи с развитием вычислительной техники, стали широко применять математическое моделирование.

Следует отметить преимущества компьютерного математического моделирования, которое позволяет получить, например, картину всего течения и графически визуализировать поля скоростей, давлений или температур во всей области течения, а не только в нескольких точках, где расположены соответствующие датчики при экспериментальных исследованиях. При компьютерном моделировании отсутствуют проблемы, связанные с возмущениями исследуемых процессов датчиками, применяемыми в экспериментах; отсутствуют трудности, связанные с очень малыми или большими размерами исследуемых объектов, очень высокими или низкими температурами, огнеопасными или токсичными веществами, невесомостью или агрессивными средами и т. п.; численное решение можно получить для реальных условий исследуемого процесса, что далеко не всегда возможно при экспериментальных исследованиях. Но компьютерное моделирование имеет и ряд недостатков, таких как неточность модели из-за сложности ввода свойств материалов, следовательно неточности при задании модели будут давать не идеально точные зависимости от температуры. На данном этапе развития компьютерных мощностей очень проблематично описывать трёхмерные модели, поэтому задачи вводятся в 2-D постановке, что также пагубно отражается на точности. Определенные сложности возникают и при построение физической установки и проведении опыта соответствующего модели и из-за наличия различных возмущающих воздействий при проведении опыта, таких как износ оборудования, циркуляция воздуха. Несмотря на все вышеперечисленные недостатки, которые могут очень сильно сказаться на точности модели, главная цель, ради которой и создавалась модель, остается неизменной. А именно анализ процессов происходящих в слитке. Понимание процессов и закономерностей в заготовке поможет определить недостатки в имеющейся модели и установке и их устранить, то есть усовершенствовать установку.

В настоящее время признано, что математическое моделирование с помощью компьютеров сложных задач тепломассообмена и динамики жидкости часто оказывается более дешевым и точным, чем экспериментальные исследования. Численные методы, воплощенные в универсальные программные комплексы, становятся инструментом исследователей и инженеров и часто являются одной из составных частей систем.

Многие задачи гидродинамики, теплообмена не поддаются аналитическому решению, поэтому единственной возможностью их теоретического анализа является компьютерное математическое моделирование. Прогресс в разработке численных методов позволил существенно расширить круг задач, доступных анализу. Полученные на основе этих методов результаты используются практически во всех областях науки и техники.

Очевидно, оптимальной стратегией научных исследований является сочетание экспериментальных исследований с математическим (компьютерным) моделированием.

Указанные преимущества, а также бурное развитие вычислительной техники и численных методов в последние годы, позволяют успешно использовать универсальные программные комплексы для математического моделирования тепломассообмена и гидрогазодинамики в областях науки и техники.

Целью данной работы является моделирование процессов в расплаве стекла при индукционной плавке в холодном тигле (в дальнейшем ИПХТ). Следовательно на основании моделирования можно провести доработку и улучшение установки, в зависимости от поставленных задач. Опыт, проводившийся на кафедре ЭТПТ, целью которого было измерение профилей температур в расплаве стекла для трех режимов генератора с помощью высокотемпературных термопар, взят за основу работы для сравнения результатов моделирования с реально полученными результатами и проверки точности модели.

Для исследования задач ИПХТ, не поддающихся аналитическому решению, используется компьютерное математическое моделирование в коммерческом программном пакете «ANSYS». Для этого производится создание электротепловых и гидродинамических моделей.

Теоретическая глава

Индукционная плавка в холодном тигле (ИПХТ)

Индукционный нагрев основан на способности элек­тромагнитного поля проникать в толщу материала. Ес­ли электромагнитное поле будет переменным по вели­чине или направлению, то под действием магнитной со­ставляющей поля в материале будет индуктироваться электродвижущая сила (э.д.с). В электропроводных материалах индуктированная э.д.с. вызывает протека­ние тока. В диэлектриках ток не возникает. Как вся­кий электрический ток, индуктированный ток *I* выделя­ет тепловую энергию на активном сопротивлении *r*, ко­торым характеризуется контур тока в материале. Количество тепла, выделяющегося за время τ, подчиня­ется закону Джоуля-Ленца:

*Q=I2r* τ , (1)

где *Q* количество теплоты в Дж.

Индуктированный ток, так же как и магнитное по­ле, вызвавшее его, изменяется во времени по величине и направлению. Величину магнитного поля принято ха­рактеризовать напряженностью. Чем больше напряжен­ность переменного магнитного поля, тем больше индук­тированный ток и, следовательно, интенсивнее нагрев.

Источником поля является катушка-индуктор (изго­товляемый обычно из медной трубки, охлаждаемой во­дой), к которой подводят ток от специального генератора. Нагреваемый материал размещают таким обра­зом, чтобы поле индуктора пронизывало его.

Напряженность магнитного поля прямо пропорцио­нальна току индуктора. Однако увеличивать ее, изме­няя ток индуктора, можно лишь до определенного зна­чения тока, при котором медь расплавляется несмотря на интенсивное охлаждение водой.

### Преимущества индукционной плавки

Индукционная плавка в холодных тиглях отличает­ся от дуговой и плавки электронным пучком следую­щими преимуществами:

1. При индукционной плавке возможно интенсивное перемешивание расплава без использования специальных устройств. При индукционном нагреве тепло выде­ляется в значительном объеме расплава или в поверх­ностном слое, объема. Это создает благоприятные усло­вия для конвективного перемешивания и получения рав­номерной температуры по объему. Но особенно важно, что при индукционном нагреве создастся сильное при­нудительное перемешивание расплава вследствие элек­тродинамического взаимодействия токов, индуктирован­ных в расплаве, с током индуктора.

2. Используя перемешивание, расплав можно пере­греть во всем объеме тигля. Предел перегрева опреде­ляется только мощностью источника тока и устойчивостью расплава при высоких температурах.

3. Индукционную плавку в холодных тиглях можно проводить в любой среде, начиная от глубокого ваку­ума, необходимого для рафинирования расплава от ле­тучих примесей, кончая атмосферой повышенного дав­ления, необходимой дли предотвращения термической диссоциации соединений с летучей компонентой.

4. Поверхность расплава при индукционной плавке не закрыта электродом, как в дуговой печи, поэтому возможна лучшая очистка расплава от летучих приме сей и газов. В сочетании с регулируемым нагревом и интенсивным перемешиванием наличие свободной по­верхности обеспечивает условия рафинирования при нормальном давлении, аналогичные электроннолучевой плавке, но без перегревов и испарения расплава.

5. Процесс индукционного нагрева надежен и устой­чив, подаваемую мощность можно легко регулировать в широких пределах. В установках для индукционного нагрева отсутствуют такие недолговечные элементы, как катод в установках электроннолучевого нагрева.

6. Вследствие того, что токи, наведенные в распла­ве при наличии гарнисажа, и токи, наведенные в ме­таллическом тигле, не являются продолжением друг друга, как это происходит в дуговых печах, дуги меж­ду расплавом и тиглем не возникает, и нет опасности на­рушения стенки тигля.

Схема с цилиндрическим индуктором также имеет ряд достоинств:

* всесторонний нагрев с перемешиванием расплава позволяет получить глубокую ванну с равномерным распределением температуры по высоте и радиусу
* индуктор имеющий высокое напряжение вынесен из зоны термоионизированных газов над расплавом, что снижает вероятность электрических пробоев и повышает надежность работы печи

Особенностью плавки в холодных тиглях является наличие гарнисажа. В металлургии гарнисажем называется особый слой на границе расплава и тигля, предохраняющий тигель от разъедания. Плавка с гарнисажем гарантирует абсолютную чистоту расплава, так как он отделен от возможного источника загрязнения, то есть стенки тигля, кристаллическим слоем. Именно эта особенность привлекает к ней повышенный интерес в металлургии тугоплавких материалов.

Именно за счет схемы с цилиндрическим индуктором и соответственно наличия естественного перемешивания, ванна расплава является не стационарной. Для учета конвекционных потоков в модели решается гидродинамическая задача. Наличие гарнисажа также отразится на графике распределения тепловых полей.

Коммерческий пакет программ ANSYS

### Описание пакета «ANSYS»

Универсальная программа ANSYS позволяет выполнять практически любой вид анализа (расчета) с помощью метода конечных элементов. МКЭ означает, что задача может решаться в любой геометрически сложной области. Универсальность программы заключается в том, что она может быть использована для решения задач, связанных со многими разделами науки и техники, такими, как динамика и прочность машин, электротехника, электромагнетизм, электроника, теплофизика, гидродинамика, газовая динамика, аэродинамика, биомеханика и т. д.

Программа «ANSYS» предназначена для численного решения уравнений (систем уравнений) с частными производными.

Следовательно, численные решением является таблица чисел или множество таких таблиц, соответствующих дискретным моментам времени.

Основой этой математической модели в общей случае является система дифференциальных уравнений с частными производными. Но эта система уравнений не есть полная модель. Для получения единственного решения задачи система уравнений должна быть дополнена условиями однозначности, которые в общем случае включают в себя:

- геометрию расчетной области,

- значения коэффициентов уравнений или теплофизические свойства среды, которая находится в расчетной области,

- начальные условия,

- граничные условия.

### Задание свойств материалов (среды)

Для большинства элементов необходимо задавать свойства материалов (среды). Свойства материалов могут быть:

- линейными или нелинейными,

- изотропными или анизотропными,

- зависимыми или независимыми от температуры.

Естественно, в модели определяются только те свойства, которые необходимы для решения задачи.

Часто теплофизические свойства материалов зависят от температуры. Эту зависимость можно задавать в виде полинома или таблично.

Полиномы могут быть линейными, квадратичными, кубическими или четвертой степени:

*Свойство = С0 + С1Т + С1Т2 + С1Т3 + С1Т4.* (2)

Если определено только *С0*, свойство постоянно, если определены *С0*и *С2*, свойство линейно зависит от температуры и т.д.

### Задание свойств жидкостей при решении задач гидродинамики

При решении задач гидродинамики в основном задают значения следующих теплофизических свойств:

- плотность,

- динамическая вязкость,

- теплопроводность,

- удельная теплоемкость.

При этом при задании свойств могут быть определены многие дополнительные параметры жидкостей.

Свойства жидкостей также могут задаваться как полиномом, так и табличным методом. При этом задание свойств табличным методом дает меньшую относительную погрешность, чем при расчете полинома.

Кроме выбора расчета плотности, вязкости, теплопроводности и удельной теплоемкости имеется возможность пересчитывать их от одной глобальной итерации к другой при поиске решения, тем самым улучшая сходимость решения.

### Создание геометрической модели

Основной целью конечно-элементного анализа является матема­тическое воссоздание поведения реальной технической системы. Дру­гими словами, анализ должен быть точной математической моделью физического прототипа. В широком смысле модель включает в себя все узлы, элементы, свойства материалов,, константы, граничные ус­ловия и другие особенности, которые используются для представле­ния физической системы.

В принятой для программы ANSYS терминологии понятие генера­ция модели подразумевает создание узлов и элементов, которые ото­бражают пространственную конфигурацию и связи реальной системы. То есть генерация (создание) модели означает задание геометриче­ской конфигурации узлов и элементов модели. Программа ANSYS пред­лагает пользователю несколько различных методов построения моде­ли, допуская при ее создании использование комбинации способов.

На практике задают не только геометрию модели, то есть не только разбивают пространство на области с разными свойствами, но еще и вводят более мелкое разбиение – сетку. Сетка вводится для того, чтобы можно было использовать метод конечных элементов. Данный метод позволяет даже самые сложные процессы приближенно представить, как совокупность множества простых, развивающихся по линейному закону. Пример разбиения на такую сетку представлен ниже на рисунке 1.



Рис 1. Пример разбиения области на сетку

Практическая глава

## Постановка задачи

Пакет «ANSYS» представляет собой программу предназначенную для моделирования различных типов задач от механических до тепловых с последующей их визуализацией и возможной обработкой результатов. В данном пакете можно решать одно-, двух- и трехмерные задачи.

На данном этапе моделирования решалась двухмерная электротепловая задача. Была создана модель, включающая в себя цилиндрический холодный тигель с расплавом высотой 200 мм, дно и двухвитковый индуктор высотой 200 мм. Так как система является цилиндрической и имеет ось симметрии, то рассматривается только половина данной системы. Созданная модель служит для расчета и визуализации температурного распределения, распределения источников теплоты в расплаве. До начала моделирования возможно задание различного времени нагрева, подаваемого напряжения, тока индуктора или плотности тока на индукторе, и изменение параметров расплава. Также созданная модель имеет возможность перерасчитывать в процессе моделирования распределение источников теплоты через заданный промежуток времени для получения более точного результата. В модели отсутствует стартовый элемент, помещаемый в расплав, поэтому время нагрева расплава до необходимой температуры существенно больше реального.

Следующим шагом по модернизации существующей модели будет включение в нее гидравлического расчета. Без этого расплав представляет собой твердое тело. В тугоплавких стеклах движение расплава составляет 2-5 мм/с, поэтому, при учете гидродинамики, температура, самой горячей области расплава, понизится, а в других областях возрастет.

Далее представлены результаты тестового расчета модели. При этом использовались следующие основные исходные данные:

- время нагрева: 10000 сек. Это примерное время достижения установившегося состояния температуры самой горячей зоны расплава;

- напряжение на индукторе: 1535 В;

- время перерасчета источников теплоты: 100 сек. Источники теплоты перерасчитываются каждые 100 секунд;

- начальная температура: 20 ˚С;

- максимальный шаг по времени: 10 сек. Данный шаг по времени обеспечивает максимальную сходимость результатов расчетов

- частота: 1,76·106 Гц;

- плотность: 2700 кг/м3;

- электропроводность: 5,9·10-2 Ом∙м;

- теплоемкость: 1700 Дж/(кг∙К);

- теплопроводность: 1,2 Вт/(м∙К);

Также заданы:

- величина тепловых потерь в боковую стенку: 20 Вт/см2;

- величина тепловых потерь в дно: 5 Вт/см2;

- величина тепловых потерь с зеркала расплава: 10 Вт/см2;

При этом также возможно:

- изменять значения потерь в бок и дно тигля;

- изменять плотность, электропроводность, теплоемкость и теплопроводность расплава;

- выбирать между решением электрической задачи по току индуктора, по напряжению на индукторе и по плотности тока на индукторе;

- выбирать начальное время.

В разработке электрогидродинамической модели не учитывается холодный тигель (ХТ). Для учета влияния ХТ в модели используется так называемый метод приближения, который заключается в том, что берется площадь занимаемая трубками ХТ и данное кольцо полученное из трубок тигля вычитается из площади сечения индуктора. В модели индуктор приближен к расплаву на ту площадь, которую занимали трубки ХТ. Это позволяет провести расчеты, сымитировать ХТ.

## Опыт проведенный на кафедре ЭТПТ

### Температурные измерения

Проведение теста заключалось в измерении профиля температур с помощью 8 термопар. Измерение производилось при 3х различных режимах работы генератора. Опускание блока термопар вглубь расплава производилось не плавно, а ступенчато с шагом 10мм при заглублении 0 – 150 мм и с шагом 5 мм при опускании на глубину 150 – 180 мм в первом режиме. Так как термопары имели кварцевые чехлы, то после второго режима некоторые из них вышли из строя. В результате высоких температурных перепадов произошло растрескивание кварцевых чехлов и для получения результатов было решено увеличить шаг: во втором режиме шаг равен 10 мм при 0 – 180 мм и 10 - 20 мм при третьем режиме работы генератора . Измерения производились только при опускании термопар, из-за высоких температур нахождение долгое время в расплаве термопар было невозможно.

Как уже упоминалось ранее, для проверки правильности и точности модели модель разрабатывалась под уже существующую установку, и процессы смоделированы по опыту, который проводился на кафедре ЭТПТ. Целью опыта было по измерение профилей температур в расплаве стекла для трех режимов генератора с помощью высокотемпературных термопар.

Измерение температуры расплава и получение картины теплового поля в расплаве производилось с помощью 8 термопар. Система крепления и схема самой термопары рассмотрены ниже.

Схема термопары и ее геометрические размеры:

Кварцевый чехол

Transition

Splice

Соединительный переходник

Компенсирующий медный провод

Расположение спая термопары

Рис 2. Схема термопары и ее геометрические размеры

Расположение термопар:

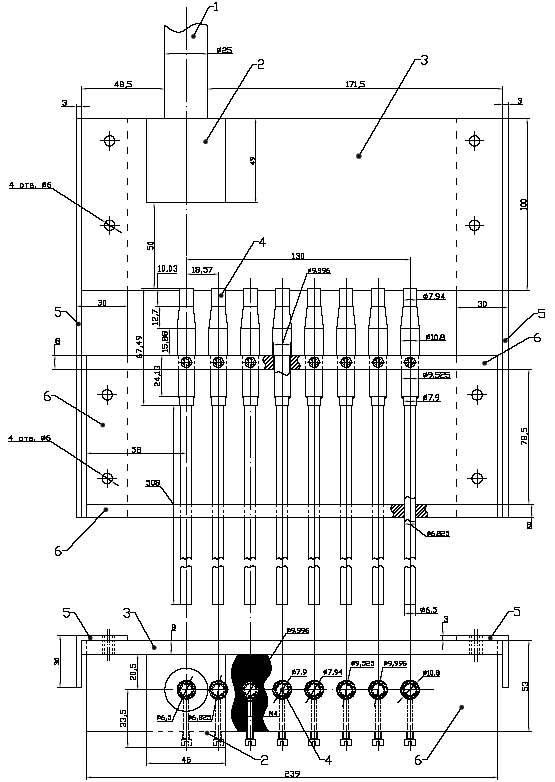


Рис.3 Рисунок термопар с кварцевым покрытием (чехлом)

1 – подвижная трубка; 2 – соединение трубки с крепление блока термопар; 3 – крепёжный пластина;

4 – термопары; 5 – скобы крепления; 6 – вертикальный алюминиевый крепеж.

На рис № 4 представлено расположения блока термопар. Так как представленная индукционная система является осесимметричной, то отпадает необходимость установки термопар по всему поперечному сечению холодного тигля.



Рис 4. Вид смонтированной системы крепления и перемещения Pt-Pt/Rd термопар

### Результаты эксперимента

В результате проведенного эксперимента были получены данные температурных полей, которые представлены в виде сводных таблиц результатов измерений, которые показывают значение температуры каждой термопары на определенной глубине в расплаве при различных режимах плавки.

Показания действующих термопар в первом режиме представлены в таблице 1.

Таблица 1. Показания действующих термопар в первом режиме

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Погружение в расплав –h, мм | Температура, °C | | | | | | | |
| Номера термопар | | | | | | | |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| 0 | **878,8** | **906,6** | **938,2** | **928,29** | **921,1** | **850,6** | **926,5** | **1 000,6** |
| 10 | 1 042,8 | 1 165,7 | 1 260,4 | 1 135,6 | 1 139,2 | 1 178,0 | *1 263,5* | *1 313,2* |
| 20 | 1 188,5 | *1 328,8* | *1 318,2* | *1 311,4* | *1 264,3* | *1 340,5* | *1 362,1* | *1 440,9* |
| 30 | *1 253,4* | *1 261,6* | *1 383,9* | *1 314,9* | *1 387,4* | *1 360,0* | *1 389,8* | *1 451,5* |
| 40 | *1 280,0* | *1 322,5* | *1 367,3* | *1 335,6* | *1 381,6* | *1 390,2* | *1 421,0* | *1 426,6* |
| 50 | *1 326,7* | *1 347,4* | *1 355,0* | *1 346,8* | *1 393,0* | *1 400,0* | *1 414,6* | *1 386,6* |
| 60 | *1 337,2* | *1 312,8* | *1 343,3* | *1 365,9* | *1 353,6* | *1 401,8* | *1 409,9* | *1 386,4* |
| 70 | *1 324,7* | *1 335,0* | *1 329,8* | *1 331,9* | *1 356,8* | *1 379,7* | *1 372,7* | *1 357,0* |
| 80 | *1 322,0* | *1 325,6* | *1 322,2* | *1 331,3* | *1 335,7* | *1 348,9* | *1 349,1* | *1 321,7* |
| 90 | *1 275,0* | *1 299,1* | *1 281,1* | *1 298,9* | *1 293,5* | *1 288,9* | *1 309,3* | *1 282,7* |
| 100 | *1 237,0* | *1 240,6* | *1 237,4* | *1 241,4* | *1 234,0* | *1 235,1* | *1 239,9* | *1 248,2* |
| 110 | 1 177,1 | 1 176,9 | 1 165,6 | 1 176,7 | 1 172,4 | 1 174,3 | 1 180,2 | 1 186,5 |
| 120 | 1 097,0 | 1 108,8 | 1 098,0 | 1 105,2 | 1 106,5 | 1 106,0 | 1 118,1 | 1 107,5 |
| 130 | 1 040,6 | 1 052,8 | 1 042,2 | 1 045,6 | 1 045,1 | 1 043,3 | 1 046,5 | 1 011,7 |
| 140 | 987,2 | 995,0 | 984,9 | 995,0 | 986,3 | 987,1 | 980,6 | 918,7 |
| 150 | 925,1 | 928,9 | 921,2 | 925,7 | 915,1 | 904,4 | 876,9 | 772,6 |
| 155 | 915,9 | 917,1 | 908,6 | 912,0 | 905,2 | 890,6 | 859,9 | 773,1 |
| 160 | 879,0 | 879,0 | 881,2 | 871,7 | 863,4 | 836,6 | 788,7 | 722,7 |
| 165 | 853,4 | 854,4 | 853,2 | 848,5 | 836,8 | 802,8 | 747,3 | 701,5 |
| 175 | 801,0 | 800,4 | 801,4 | 789,3 | 770,9 | 727,0 | 682,3 | 694,0 |
| 180 | 750,2 | 751,2 | 752,9 | 745,6 | 736,8 | 708,4 | 674,3 | 689,72 |

Показания действующих термопар во втором режиме представлены в таблице 2.

Таблица 2. Показания действующих термопар во втором режиме

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Погружение в расплав –h, мм | Температура, °C | | | | | | | |
| Номера термопар | | | | | | | |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| 0 | 1137,9 | **1291,1** | **1270,6** | **1240,6** | **1286,1** | **1385,7** | **1447,6** | - |
| 10 | 1098,3 | **1233,6** | **1266,4** | **1306,4** | **1297,8** | **1386,9** | **1413,7** | - |
| 20 | 1065,4 | *1170,2* | *1092,3* | *1209,4* | *1295,4* | *1346,6* | *1428,3* | - |
| 30 | *1262,9* | *1286,6* | *1299,2* | *1330,3* | *1318,1* | *1363,3* | *1365,9* | - |
| 40 | *1344,3* | *1293,2* | *1265,6* | *1319,5* | *1318,4* | *1335,1* | *1343,9* | - |
| 50 | *1214,6* | *1296,4* | *1183,3* | *1283,4* | *1303,8* | *1299,0* | *1309,3* | - |
| 60 | *1226,4* | *1274,0* | *1200,1* | *1264,1* | *1278,3* | *1281,8* | *1301,4* | - |
| 70 | 1173,6 | *1202,6* | *1196,7* | *1237,7* | *1229,4* | *1258,1* | *1252,7* | *1271,3* |
| 80 | 1162,4 | 1166,3 | 1150,5 | 1161,4 | 1166,0 | 1134,9 | 1171,0 | 1141,6 |
| 90 | 1123,4 | 1123,0 | 1110,0 | 1126,2 | 1141,3 | 1080,4 | 1129,9 | 1073,6 |
| 100 | 1121,8 | 1127,0 | 1109,1 | 1128,3 | 1138,0 | 1085,9 | 1154,0 | 1058,4 |
| 110 | 1116,9 | 1123,2 | 1104,8 | 1122,1 | 1124,0 | 1098,8 | 1155,4 | 1058,5 |
| 120 | 1099,4 | 1108,0 | 1088,2 | 1105,0 | 1108,3 | 1085,7 | 1148,8 | 1015,0 |
| 130 | 1050,7 | 1064,9 | 1050,3 | 1064,8 | 1073,0 | 1045,6 | 1087,5 | 951,9 |
| 140 | 1023,3 | 1038,4 | 1024,1 | 1034,4 | 1045,1 | 1019,1 | 1023,5 | 921,5 |
| 150 | 971,8 | 959,7 | 965,9 | 978,5 | 987,6 | 968,1 | 1021,0 | 790,4 |
| 160 | 941,0 | 879,9 | 924,3 | 940,8 | 944,6 | 928,7 | 967,2 | 708,0 |
| 170 | 888,3 | 879,8 | 874,6 | 902,9 | 904,1 | 902,3 | 881,1 | 644,3 |
| 180 | 800,7 | 801,2 | 792,0 | 787,7 | 776,1 | 745,3 | 693,7 | - |

Показания действующих термопар в третьем режиме представлены на таблице 3. В таблице отсутствие термопар с номерами 1 и 2 связано с их выходом из строя, следовательно, данные с них в 3 режиме не были получены.

Таблица 3. Показания действующих термопар в третьем режиме

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Погружение в расплав –h, мм | Температура, °C | | | | | |
| Номера термопар | | | | | |
| 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| 20 | *1251,4* | **1043,5** | *1277,5* | *1312,4* | *1319,5* | *1391,3* |
| 40 | *1254,0* | **1116,7** | *1274,7* | *1356,3* | *1372,8* | *1392,2* |
| 60 | *1267,2* | **1170,7** | *1239,8* | *1303,8* | *1306,7* | *1313,7* |
| 80 | *1244,8* | **1175,1** | *1218,9* | *1242,1* | *1295,8* | *1295,2* |
| 100 | 1158,5 | **1186,0** | 1138,8 | 1178,16 | 1174,34 | 1184,92 |
| 120 | 1057,94 | **1041,72** | 1060,96 | 1046,4 | 1090,4 | 1036,6 |
| 140 | 939,9 | **1016,73** | 948,47 | 978,94 | 1005,17 | 943,45 |
| 150 | 921,28 | **971,4** | 896,3 | 877,7 | 746,9 | 671,6 |
| 170 | 901,6 | **956,2** | 902,2 | 834,2 | 734,7 | 657,4 |
| 180 | 845,5 | **879,0** | 843,2 | 799,6 | 737,4 | 657,4 |

В таблицах 1-3 помечены курсивом значения выпадающие из допустимого диапазона температур это может быть связано с электромагнитными наводками на спае термопар при соприкосновении с расплавом; отсосом тепла в спае термопар и кварцевый чехол с зеркала расплава. Жирным показаны оптимальные значения температур. Прочерки в таблицах это отсутствие данных с термопары на данном этапе.

В ходе эксперимента показания термопар записывались в реальном времени через цифровую система сбора данных.

На рисунках ниже представлены графики измерения термопарами полей температур в холодном тигле в реальном времени. Каждая «полка» (горизонт. фронт) представляет собой один шаг.

Температура, °C

τ



Рис 5. Показания измерений термопар в реальном времени при первом режиме

Температура, °C

τ



Рис 6. Показания измерений термопар в реальном времени при втором режиме

τ

Температура, °C



Рис 7. Показания измерений термопар в реальном времени при третьем режиме

На рисунке 6 и 7 всплески (резкие пики) связаны с выходом из стороя термопар и отсутствием получаемого с них сигнала.

## Создание модели

Основой математической модели в общей случае является система дифференциальных уравнений с частными производными. Но эта система уравнений не есть полная модель. Для получения единственного решения задачи система уравнений должна быть дополнена условиями однозначности, которые в общем случае включают в себя:

- геометрию расчетной области,

- значения коэффициентов уравнений или теплофизические свойства среды, которая находится в расчетной области,

- начальные условия,

- граничные условия.

При решении задач гидродинамики в основном задают значения следующих теплофизических свойств:

- плотность,

- динамическая вязкость,

- теплопроводность,

- удельная теплоемкость.

При этом при задании свойств могут быть определены многие дополнительные параметры жидкостей.

Была создана электрогидродинамическая модель с использованием исходных данных, представленных выше. Принципиальная геометрия модели представлена на рис 8. На данном рисунке представлены области. Каждая область определяет один из элементов моделируемого объекта. Область А1 - область расплава; А2-область двухвиткового индуктора; А3-область окружающего пространства (воздух). Далее на рисунке 9 представлено сеточное разбиение расчетной области для использования метода конечных элементов.

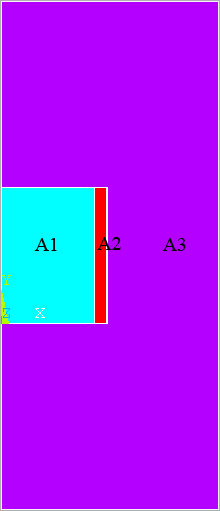


Рис 8. Разбиение на области

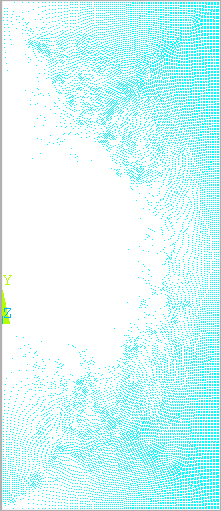


Рис 9. Сеточное разбиение модели

Итогом расчетов стало получение распределения температурных полей в расплаве. Полученные температурные поля представлены на рис 10.

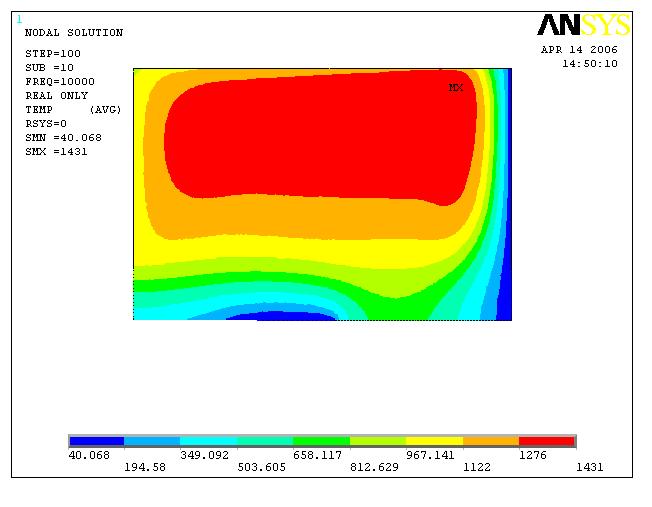


Рис 10. Распределение тепловых полей в расплаве

Расчет модели был проведен успешно. Были получены все данные необходимы по условию задачи. Имеющиеся данные достаточны для проведения их верификации с результатами полученными в результате физического эксперимента.

## Верификация модели

Верификация математической модели проводилась путем сравнения температурного распределения в ванне расплава стекла, полученного путем математического моделирования, с данными измерений термопарами

На Рис. 11 - 15 представлены графики температур, полученные в результате измерений термопарами и математического моделирования. На вертикальной оси указано расстояние от поверхности вглубь расплава, то есть заглубление в расплав. На горизонтальной оси указана температура в градусах Цельсия.

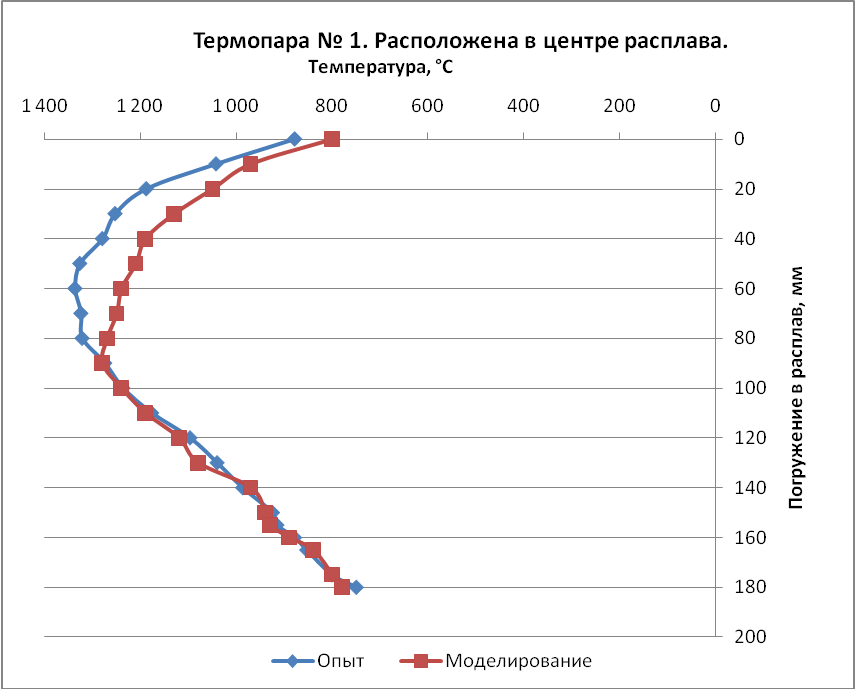


Рис 11. Распределение температур для термопары № 1

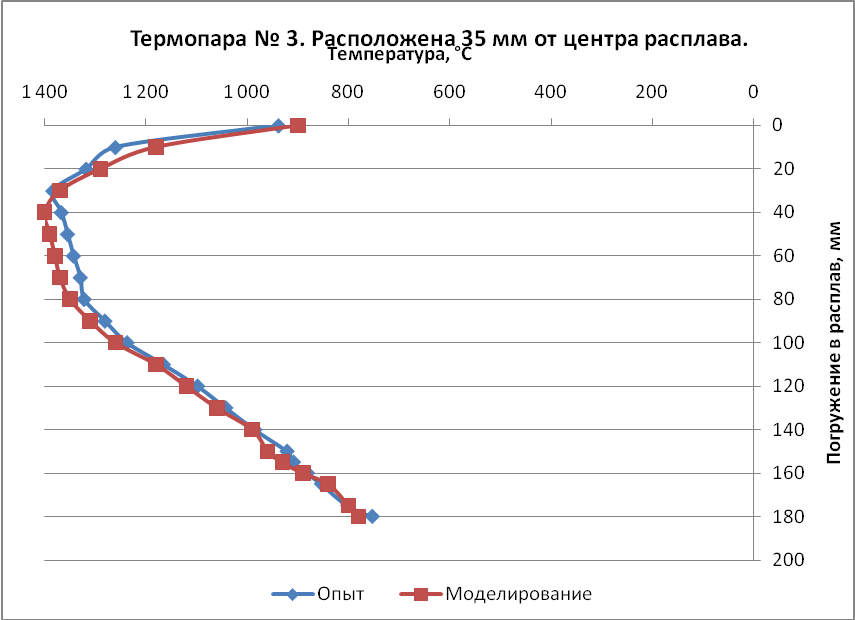


Рис 12. Распределение температур для термопары № 3

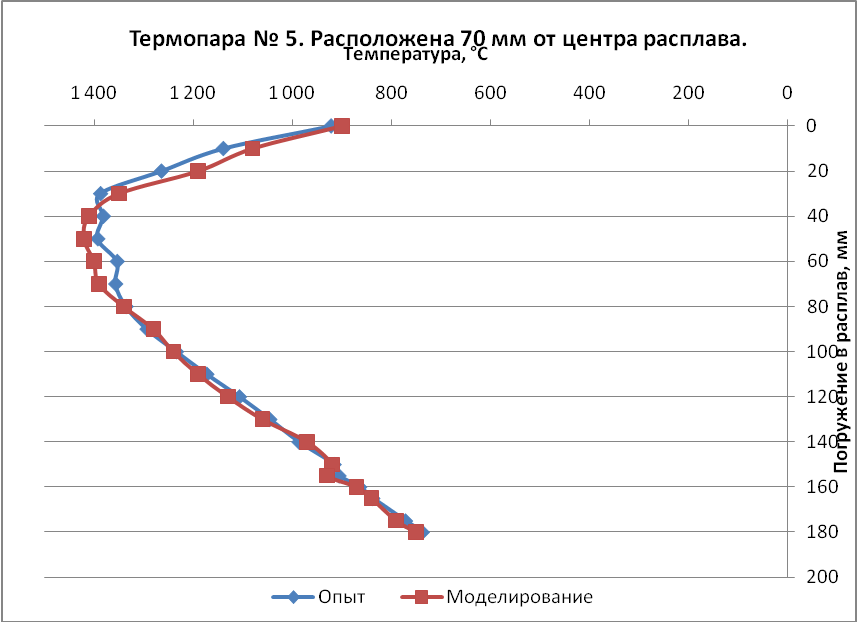


Рис 13. Распределение температур для термопары № 5

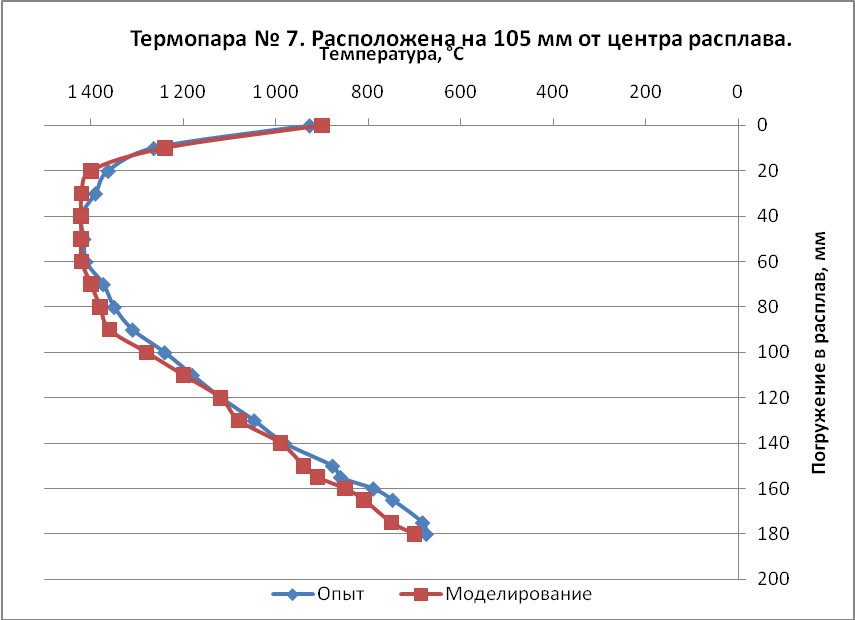


Рис 14. Распределение температур для термопары № 7

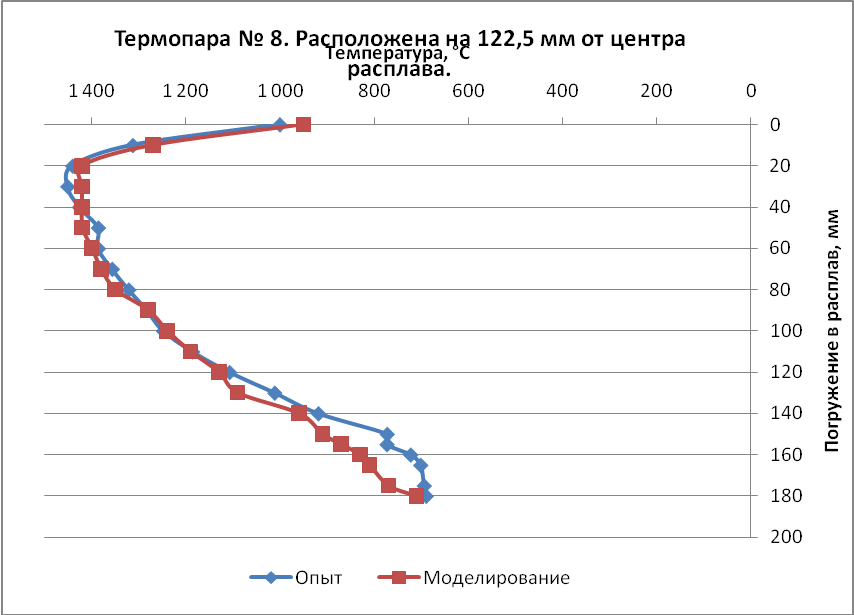


Рис 15. Распределение температур для термопары № 8

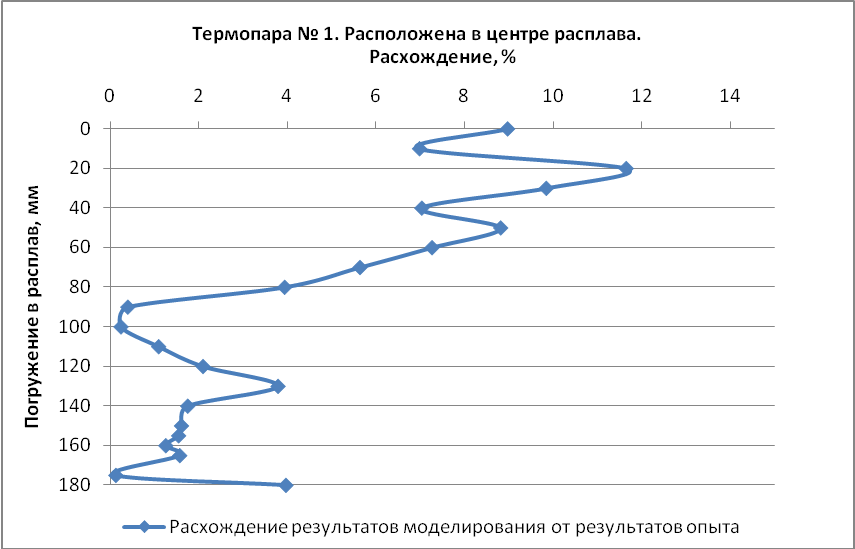


Рис 16. Расхождение модели и опыта для термопары № 1

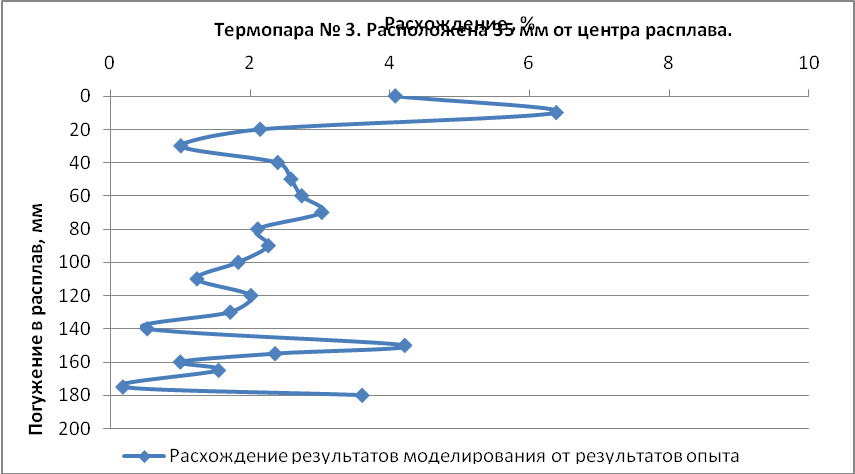


Рис 17. Расхождение модели и опыта для термопары № 3

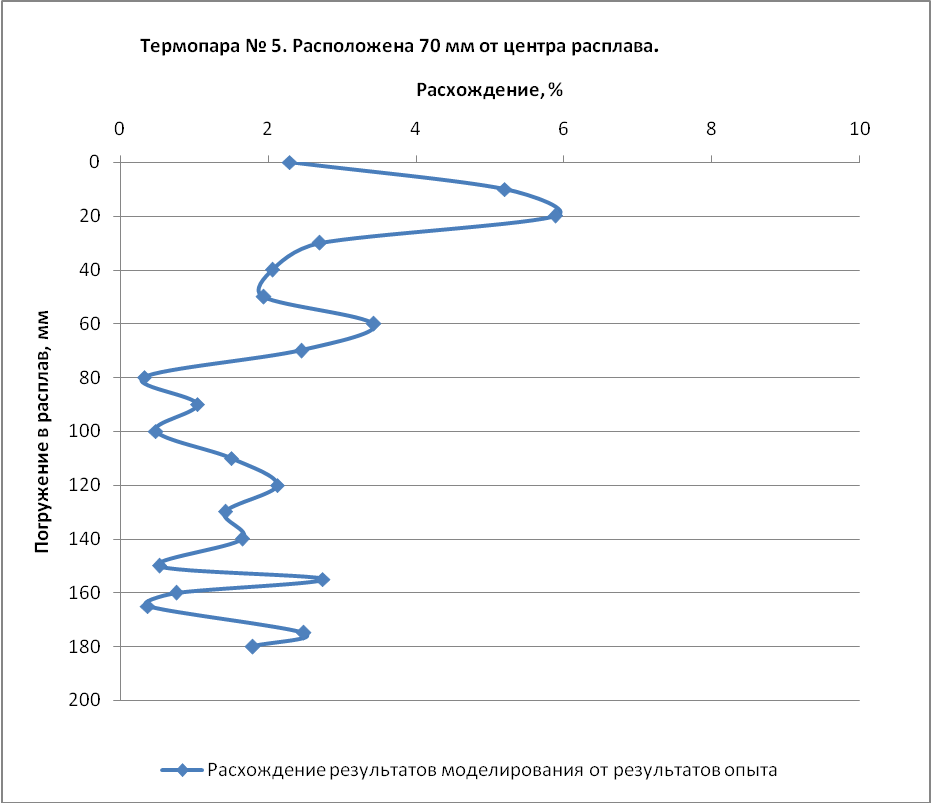


Рис 18. Расхождение модели и опыта для термопары № 5



Рис 19. Расхождение модели и опыта для термопары № 7

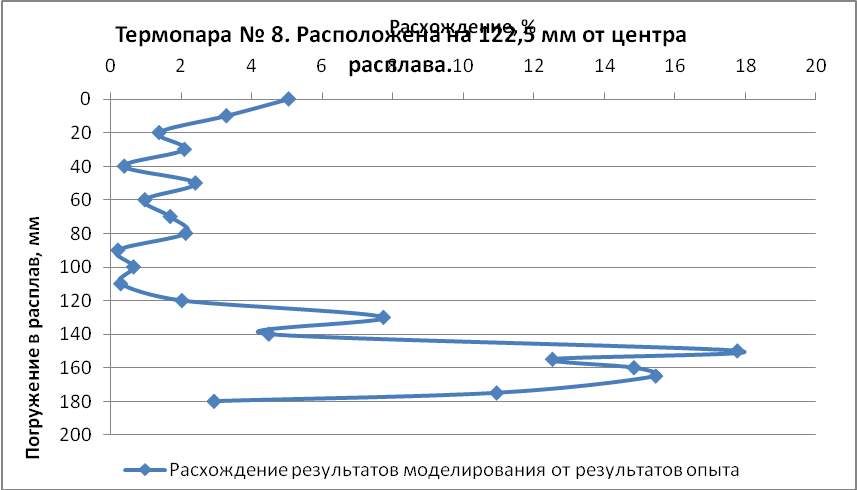


Рис 20. Расхождение модели и опыта для термопары № 8

Из рис. 11 - 15 и рис. 16 – 20 следует, что математическая модель адекватно отражает температурное поле. Имеется хорошее совпадение с экспериментом. Наибольшее отличие наблюдается у оси ванны расплава и в придонной области ванны у боковой стенки, то есть при низких температурах стекла.

В области оси ванны экспериментальная температура выше. Это может объясняться тем, что во время теста в расплаве имеются 3D флуктуации расплава, которые приводят к выравниванию температуры в центральной области.

В области дна экспериментальная температура ниже. Это может объясняться рядом причин. Например, погрешностью измерений термопарами в этой области или неточностью задания свойств стекла.

Заключение

Моделирование как видно из работы дает достаточно точные результаты. Несмотря на все отклонения от реальных экспериментов моделирование порой незаменимо для прогнозирования результатов сложно реализуемых задач. Моделирование на данный момент широко применяется для разработки и сборки установок для промышленного использования, а не для научной деятельности. Коммерчески выгоднее собирать самую эффективную и малозатратную установку. Так как в современном обществе финансовая сторона является почти всегда определяющей, развитие моделирования направлено на разработку более точных моделей, попыток смоделировать модели в 3-D постановке, более точно и полно задавать свойства материала и учитывать различные внешние факторы воздействия. К сожалению данные тенденции, хоть и ведут к разработке новых численных методов и улучшению качества моделей, а также наращиванию вычислительных мощностей, пагубно сказываются на научно-исследовательской деятельности. Потому что полная замена экспериментальных опытов не позволяет увидеть новые закономерности. Но только экспериментальные исследования также невозможны в наше время, так проведение одного опыта связано с большими затратами энергии и ресурсов. Очевидно, оптимальной стратегией научных исследований является сочетание экспериментальных исследований с математическим (компьютерным) моделированием. Данный синтез теоретических расчетов и практических опытов это пожалуй тот путь который сможет сохранить и исследовательскую деятельность и принести выгоду от экспериментов.

Список литературы

1. Петров Ю.Б., Ратников Д.Г. Холодные тигли. – М.: Металлургия. – 1972. – 103 с.
2. Петров Ю.Б. Индукционная плавка окислов. – Л.: Энергоатомиздат, 1983. – 104 с.
3. Использование индукционного нагрева для варки стекла / В.В.Неженцев, Ю.Б.Петров, В.С.Шишкин // Электротехнологические процессы, установки и источники питания. – Л. – 1980. – С. 51-57. – Изв. Ленингр. электротехн. ин-та; Вып. 273.
4. Индукционная варка тугоплавких стекол в холодных тиглях / Д.Б.Лопух, В.В.Неженцев, Ю.Б.Петров и др. // Тез. 9-й Всесоюзн. НТ конференции по применению токов высокой частоты в электротермии. – Л. – 25-27 марта 1981. – С. 75-76
5. Варка стекла в индукционной печи с холодным тиглем / В.В.Неженцев, Ю.Б.Петров, Д.Б.Лопух, А.А.Жилин // Электромеханика. – 1984. - № 9. –С. 64-69.
6. Петров Ю.Б. Индукционная плавка оксидов в холодных тиглях: Дис. - докт. техн. наук: 05.09.10. – Защищена 04.12.86 г. – 489 с.
7. Справочник по производству стекла // Под ред. Китайгородского И.И. – М. – 1963. – (ГНИИС).
8. Физико-химические свойства окислов // Справочник под ред. Самсонова Г.В. – М.: Металлургия. – 1978. – С. 46-54.
9. Установки индукционного нагрева / Под ред. А.Е.Слухоцкого. – Л.: Энергоиздат. – 1981. – 326 с.