

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Самарский государственный технический университет»

На правах рукописи

Навасардян Ашот Александрович

**ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ КРИСТАЛЛИЗАТОР КРЕМНИЯ ДЛЯ
ПОЛУЧЕНИЯ СЛИТКОВ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ФОРМЫ**

Специальность 05.09.10 – Электротехнология

**Диссертация на соискание
ученой степени кандидата технических наук**

Научный руководитель:
доктор технических наук,
Базаров А.А.

Самара 2022

Оглавление

ВВЕДЕНИЕ	7
1 АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ ТЕХНОЛОГИЙ ВЫПЛАВКИ И КРИСТАЛЛИЗАЦИИ КРЕМНИЯ	22
1.1 Современные системы выплавки и кристаллизации кремния	22
1.1.1 Метод карботермического восстановления металлургического кремния	22
1.1.2 Метод направленной кристаллизации металлургического кремния	25
1.1.3 Процедура производства слитков мультикристаллического кремния методом направленной кристаллизации	26
1.1.4 Метод зонной плавки кремния	28
1.2 Анализ экспериментальных и математических методов моделирования процесса направленной кристаллизации	29
1.2.1 Индукционные печи для направленной кристаллизации кремния	31
1.2.2 Экспериментальное исследование повторно используемых тиглей для процесса направленной кристаллизации	32
1.2.3 Компьютерное моделирование процессов плавки и кристаллизации кремния	33
1.2.4 Численное моделирование термонапряжений при направленной кристаллизации	34
1.3 Выводы	35
2 РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ПРОЦЕССОВ В ЭЛЕКТРОМАГНИТНОМ КРИСТАЛЛИЗАТОРЕ КРЕМНИЯ	36
2.1 Математическая модель электромагнитных процессов в системе «индуктор - расплав кремния»	38

2.2	Математическая модель процессов охлаждения и кристаллизации расплава кремния	42
2.3	Задание физических свойств материалов	48
2.4	Математическая модель процессов упругой деформации	52
2.5	Связанные математические модели для задач кристаллизации кремния	54
2.5.1	Электротепловая задача в электромагнитном кристаллизаторе	56
2.5.2	Связанная задача теплового процесса и процесса упругой деформации	57
2.6	Моделирование программного управления электротепловыми процессами в системе «индуктор – загрузка»	59
2.7	Выводы по второй главе	61
3	ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ КРИСТАЛЛИЗАТОР КРЕМНИЯ ПЕРИОДИЧЕСКОГО ДЕЙСТВИЯ	62
3.1	Разработка индукционной системы электромагнитного кристаллизатора кремния периодического действия	62
3.1.1	Моделирование электромагнитных процессов при кристаллизации расплава кремния в условиях подогрева внутренними источниками	62
3.1.2	Определение требуемого гидростатического давления по высоте расплава для формирования цилиндрической формы	66
3.1.3	Расчет параметров индуктора конической формы с цилиндрической загрузкой	70
3.1.4	Исследование влияния параметров подложки на диаграмму распределения силы Лоренца по высоте на поверхности расплава	74

3.1.5	Определение формы расплава под воздействием электромагнитных сил	82
3.1.6	Определение вертикальной составляющей электромагнитной силы в расплаве	93
3.2	Моделирование электромагнитных процессов при кристаллизации расплава кремния в условиях подогрева внутренними источниками	95
3.2.1	Расчет мощности для моделирования процесса кристаллизации	99
3.2.2	Расчет тепловых процессов в загрузке при кристаллизации	100
3.3	Определение требуемого гидростатического давления по высоте расплава	104
3.3.1	Расчет термонапряжений при моделировании процесса кристаллизации расплава кремния с футеровкой без верхней крышки	104
3.3.2	Расчет термонапряжений при моделировании процесса кристаллизации расплава кремния с футеровкой с верхней крышкой	110
3.4	Определение параметров охладителя	114
3.5	Выводы по третьей главе	118
4	ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ КРИСТАЛЛИЗАТОР КРЕМНИЯ МЕТОДИЧЕСКОГО ДЕЙСТВИЯ	119
4.1	Моделирование тепловых процессов при кристаллизации расплава кремния в условиях подогрева внутренними источниками	119
4.1.1	Расчет параметров индуктора для загрузки диаметром 0,3 м высотой 0,15 м при заданном токе	119
4.2	Тепловые процессы в кристаллизаторе методического	126

действия	
4.2.1 Расчет процессов кристаллизации при коэффициенте теплопроводности футеровки 5 Вт/(м град) и времени цикла 300 с.	127
4.2.2 Расчет процессов кристаллизации при коэффициенте теплопроводности футеровки 10 Вт/(м град) и времени цикла цикл 300 с.	130
4.2.3 Расчет процессов кристаллизации при коэффициенте теплопроводности футеровки 15 Вт/(м град) и времени цикла цикл 300 с	133
4.3 Определение минимальной длительности интервала заливки-охлаждения	137
4.3.1 Расчет процессов кристаллизации при коэффициенте теплопроводности футеровки 15 Вт/(м·°C) и времени цикла 200 с.	137
4.3.2 Расчет процессов кристаллизации при коэффициенте теплопроводности футеровки 15 Вт/(м град) и времени цикла 100 с.	140
4.3.3 Расчет процессов кристаллизации при коэффициенте теплопроводности футеровки 15 Вт/(м·°C) и времени цикла цикл 50 с	142
4.4 Выводы по четвертой главе	144
5 РЕАЛИЗАЦИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО КРИСТАЛЛИЗАТОРА КРЕМНИЯ	146
5.1 Исследование энергетических параметров индукционной системы для электромагнитного кристаллизатора	146
5.1.1 Определение параметров индуктора на частоте 50 Гц в процессе кристаллизации слоев расплавленного кремния	146
5.1.2 Определение параметров индуктора на частоте 500 Гц в	147

процессе кристаллизации слоев расплавленного кремния	
5.1.3 Определение параметров индуктора при пуске и при завершении кристаллизации	160
5.1.4 Определение длительности включения индуктора и верхнего нагревателя	162
5.2 Определение параметров источника питания колебательного контура в режиме максимальной нагрузки	163
5.3 Система настройки параметров преобразователя частоты	165
5.4 Разработка методики расчета кристаллизатора кремния	168
5.5 Выводы по пятой главе	171
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	173
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ	176
ПРИЛОЖЕНИЕ П.1 РАСЧЕТ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ В РАСПЛАВЕ ПРИ РАЗНЫХ ПАРАМЕТРАХ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИИ	185
ПРИЛОЖЕНИЕ П.2 РАСЧЕТ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ИНДУКТОРОВ ДЛЯ КРИСТАЛЛИЗАТОРА МЕТОДИЧЕСКОГО ДЕЙСТВИЯ	212
ПРИЛОЖЕНИЕ П.3 Документы о внедрении результатов диссертационной работы	227

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность проблемы

Диссертация посвящена проблеме разработки электромагнитного кристаллизатора кремния, алгоритмов управления переходными режимами работы индуктора в условиях значительного изменения внутреннего сопротивления, обеспечения распределения электромагнитных усилий по высоте расплава и ограничения на мощность тепловыделения в загрузке.

Существующие технологии производства кремния (металлургического) включают процессы плавления, очистки от примесей в нагревательных печах и последующей кристаллизации различными способами. На предварительных этапах расплав заливается в форму, где и происходит затвердевание. При этом поверхностный слой практически становится единым целым с шероховатой поверхностью футеровки. Для извлечения приходится разрушать футеровку.

При производстве кремния для нужд электронной промышленности процесс выращивания кристалла является более сложным и длительным, но одновременно и более дорогим. Качество очистки в данном случае достигается высокое.

Фотоэлектрическая промышленность находится в стадии стремительного роста, и для поддержания этого роста необходимо обеспечить большой запас исходных материалов. Поскольку кремний является доминирующим материалом для изготовления солнечных элементов, то требуется недорогое сырье для производства кремния, соответствующего требованиям. Наиболее рентабельным и прямым подходом для производства «солнечного» кремния является очистка и модернизация металлургического кремния. Многие примеси в металлургическом кремнии могут быть эффективно удалены путем направленной кристаллизации расплавленного кремния. Подавляющее большинство производителей кремния для солнечной энергетики применяют металлургический метод направленной кристаллизации. Данный метод основан на плавке металлургического кремния чистотой 99,9% и медленной кристаллизацией снизу вверх и доведения

чистоты до 99,999%. Metallургический кремний производится путем карботермического восстановления оксида кремния (песка) до кремния чистотой от 97% до 99,9%. При производстве metallургического кремния в дуговых рудовосстановительных печах жидкий кремний льют в metallические изложницы, где имеет место прямой контакт с поверхностью изложницы, что приводит к попаданию примесей. В предусмотренной технологией последующем механическом разрушении слитка кремния на мелкие фракции происходит дополнительное попадание примесей. Общее количество примесей, которые попадают в кремний в процессе подготовки и упаковки составляет порядка 3% от общего количества кремния. Такое высокое содержание примесей неизбежно приводит к целому ряду технологических процессов по очистке кремния, как от внешних примесей, так и от примесей, которые попадают в кремний в процессе кристаллизации.

Увеличение объемов производства кремния для фотоэлектрических элементов требует снижения себестоимости. Одним из путей является применение технологии кристаллизации в электромагнитном поле индуктора, наводящего токи в расплаве, взаимодействие которых с полем создает отталкивающие силы. При достаточной величине усилий между расплавом и футеровкой образуется воздушный зазор, позволяющий избежать механического контакта кремния с теплоизолирующими поверхностями и предотвратить загрязнение. Такой способ кристаллизации делает ненужными процедуры дополнительной очистки от примесей и снижает общие затраты на производство.

В промышленности применение электромагнитных кристаллизаторов известно достаточно длительное время и используется в производстве сплавов из цветных металлов. Однако применительно к производству кремния в использовании индукционных систем имеются серьезные проблемы, обусловленные значительным снижением электропроводности кремния при переходе в твердое состояние. Необходимость создания достаточных для удержания расплава сил вступает в противоречие с дополнительным нагревом,

что затрудняет процесс кристаллизации. В целом, применение электромагнитных кристаллизаторов в производстве кремния способно решить задачу снижения затрат за счет сокращения числа операций и энергозатрат. Тем самым повышается экономическая эффективность производства кремния для солнечных панелей.

Степень разработанности проблемы

Электромагнитные кристаллизаторы используются в цветной металлургии и освещены в трудах отечественных и зарубежных ученых [27-33]. Начиная с 80-х годов двадцатого века, тема литья цветных металлов в электромагнитном поле нашла отражение в работах З.Н. Гецелева [28], Колядова Е.В. [27], Первухина М.В. [29], Авдулова А.А. [30,31].

В производстве кремния существуют технологии индукционного подогрева плоскими индукторами. В статье авторов Georgi Djambazov, Valdis Vojarevics, Koulis A Pericleou, Michele Forzan описана работа кристаллизатора, имеющего улучшенные характеристики за счет применения индукционного нагрева [24]. Роль индукционной установки сводится к нагреву графитового тигля, внутри которого находится кремний. Возникающие токи и электромагнитные силы в расплаве кремния в этом случае весьма незначительны из-за экранирования корпусом тигля.

В отличие от электромагнитных кристаллизаторов алюминия с непрерывным режимом водяного охлаждения кристаллизаторы кремния имеют ряд специфических особенностей, которые необходимо учитывать при их проектировании и эксплуатации. В настоящее время не разработано приемлемых по точности методов анализа электромагнитных процессов, происходящих в расплаве кремния и самом индукционном кристаллизаторе в процессе перехода расплава в твердое состояние. Поэтому разработка уточненных математических моделей системы «индуктор-расплав кремния» и алгоритмов программного управления технологическим процессом с целью повышения качества продукта и повышения энергоэффективности является

актуальной научно-практической задачей. Актуальность проблемы подтверждается грантом на фундаментальную НИР при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-08-00212А по заданию Министерства образования РФ.

В отличие от электромагнитных кристаллизаторов алюминия, работающих в непрерывном режиме, для кремния, в силу его высокой хрупкости, такой подход невозможен. Необходимо определение параметров установки, обеспечивающей сочетание высокой производительности и качества изделий. Получение необходимых параметров электромагнитного кристаллизатора с управлением мощностью в ходе процесса является актуальной задачей, что подтверждает выполнение в СамГТУ фундаментальной НИР при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-08-00212 А по заданию Министерства образования РФ.

Цель диссертационной работы - повышение производительности электромагнитного кристаллизатора и качества кремниевых слитков за счет применения усовершенствованных методик проектирования и использования нового алгоритма управления мощностью индуктора в процессе кристаллизации, позволяющего повысить энергоэффективность процесса.

Задачи диссертационного исследования:

– разработка численной математической модели теплового процесса в расплаве кремния в условиях индукционного подогрева и комбинированного охлаждения, ориентированной на решение задач исследования переходных режимов и определения параметров процесса кристаллизации расплава при программном управлении;

– разработка численной модели электромагнитных процессов в системе «индуктор – расплав кремния», ориентированной на определение распределения внутренних источников тепловыделения и расчет электромагнитных сил в поверхностном слое в условиях резкого изменения электропроводности при кристаллизации;

- исследование электромагнитных и тепловых полей в системе «индуктор–загрузка» в переходных режимах с учетом изменяющихся физических свойств в процессе кристаллизации расплава;

- определение геометрических и энергетических параметров устройства кристаллизации расплавленного кремния, обеспечивающих получение цилиндрической формы слитка с допустимыми отклонениями;

- минимизация времени кристаллизации и энергозатрат в индукционной системе кристаллизатора;

- разработка методики проектирования электромагнитного кристаллизатора кремния с заданными параметрами;

- разработка и техническая реализация системы программного управления режимами работы электромагнитного кристаллизатора.

Решение перечисленных выше проблем в совокупности составляет основное содержание диссертации, выполненной автором в Самарском государственном техническом университете (СамГТУ).

Объектом исследования является индукционная установка электромагнитного кристаллизатора кремния, обеспечивающая изготовление слитков цилиндрической формы.

Предмет исследования - электромагнитные и тепловые процессы при кристаллизации цилиндрического кремниевого слитка, сжимаемого магнитным полем индуктора.

Методы исследования

Для решения поставленных в диссертационной работе задач использовались методы математического моделирования и анализа, теории тепловых и электромагнитных процессов, численные методы решения электромагнитных и тепловых задач, методы проектирования и компьютерного моделирования.

Достоверность результатов работы оценивалась путем анализа результатов численных экспериментов и сравнения их с данными, полученными в работах других авторов.

Научная новизна

1. Разработана уточненная математическая модель нестационарного теплового процесса кристаллизации кремния, отличающаяся учетом значительного и неравномерного по объему изменения мощности внутренних источников тепла и физических свойств;

2. Впервые решена комплексная задача моделирования электромагнитных и тепловых процессов при поиске алгоритма изменения мощности тепловыделения и электромагнитных сил в электромагнитном кристаллизаторе для обеспечения качественной кристаллизации кремния.

3. Определена область параметров расплава и индуктора, в которой возможно функционирование электромагнитного кристаллизатора кремния в условиях взаимных ограничений на электромагнитные силы и мощность тепловыделения, выражающихся в необходимости увеличения сил и снижения мощности тепловыделения.

Практическая значимость результатов работы

Практическая польза проведенных исследований определяется следующими результатами:

1. Предложены алгоритм и система управления процессом кристаллизации расплава кремния, отличающиеся учетом изменения объемного распределения электропроводности и коррекцией мощности индуктора для обеспечения нестационарного желаемого распределения электромагнитных сил по высоте слитка;

2. Разработана методика проектирования электромагнитного кристаллизатора кремния, учитывающая изменение физических свойств и обеспечивающая формирование цилиндрической поверхности слитка в условиях изменения электромагнитных сил, действующих на загрузку;

3. Определены изменяющиеся в ходе процесса кристаллизации параметры индукционной системы, обеспечивающие получение цилиндрической формы слитка.

Достоверность результатов диссертационной работы подтверждаются корректным использованием математического аппарата и согласованием с данными, известными из литературы.

Реализация результатов работы

Результаты исследований электромагнитных и тепловых процессов в электромагнитном кристаллизаторе кремния в части методики проектирования, математических моделей, компьютерного моделирования внедрены в учебном процессе СамГТУ (г.Самара) при подготовке бакалавров по профилю «Электротехнологические установки и системы», магистров по направлению «Электроэнергетика и электротехника», в ООО «Вольтс» (г.Самара) в качестве методики расчета индукционных систем для технологического подогрева и ООО «ПриволжскНИПИнефть» в качестве методики расчета тепловых процессов в установках локального индукционного подогрева участков трубы во время сварки, используемых при ремонте трубопроводов.

Апробация работы

Материалы диссертационного исследования докладывались и обсуждались на:

Двадцать третьей Международной науч.-техн. конференции студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика» (2 – 3 марта 2017 г., Москва); XXV Международной научно-практической конференции «EurasiaScience» (15 ноября 2019., Пенза); 6-th International conference on industrial engineering (ICIE 2020) (Chelyabinsk, 18-22 мая 2020 г.); Proceedings of the 6th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2020); XLIV Международной научно-практической конференции «Фундаментальные и прикладные научные исследования: актуальные вопросы; достижения и инновации». (15 апреля, 2021, Пенза); XIX Международной научно-практической конференции «Современная наука: Актуальные вопросы, достижения и инновации» (25 февраля, 2021, Пенза).

Публикации

По результатам диссертационной работы опубликовано 9 печатных работ общим объемом 3 п.л., 3 из которых в изданиях из списка ВАК, 1 проиндексирована в базе Scopus.

Личный вклад автора. В работах, выполненных в соавторстве, соискателю принадлежит: в работах [73,75,80] – разработка математической и компьютерной моделей; [74,76] – моделирование и анализ процессов термической деформации нагреваемых материалов; [77,79] – постановка задачи, моделирование и анализ эффективности алгоритмов работы электромагнитного кристаллизатора; [78] – разработка и настройка компьютерной модели процессов нагрева и деформации корпуса; [81,82] – определение параметров схемы и моделирование нестационарных электромагнитных процессов в системе «индуктор – расплав».

На защиту выносятся:

1. Математическая электротепловая модель процесса электромагнитной кристаллизации расплава кремния, учитывающая изменение параметров при переходе через точку затвердевания;
2. Алгоритм управления процессом кристаллизации расплава кремния периодического действия, обеспечивающий достижение нестационарного желаемого распределения электромагнитной силы и распределения температуры в расплаве в условиях изменения импеданса индуктора и формирование цилиндрической формы слитка;
3. Алгоритм управления процессом кристаллизации расплава кремния методического действия, обеспечивающий поддержание заданного распределения электромагнитной силы в расплаве в условиях изменения высоты слитка;
4. Методика расчета индукционной системы электромагнитного кристаллизатора кремния, позволяющая определить параметры системы, обеспечивающей формирование цилиндрической формы слитка с минимальными термонапряжениями;

5. Электромагнитный кристаллизатор кремния периодического действия, обеспечивающий формирование слитка однородной ненапряженной структуры с малым искажением цилиндрической формы.
6. Электромагнитный кристаллизатор кремния методического действия с минимальным энергопотреблением, обеспечивающий формирование цилиндрического слитка

Соответствие паспорту специальности

Диссертация соответствует специальности 05.09.10 – Электротехнология по п.1. «Развитие общей теории передачи электромагнитной энергии в сложные среды, разработка методов физического и математического моделирования явлений, возникающих при взаимодействии электромагнитного поля с веществом и конструктивными материалами технологических установок», п.3. «Разработка, структурный и параметрический синтез электротехнологических комплексов и систем, их оптимизация, разработка алгоритмов эффективного управления» паспорта специальности.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, 5 глав и заключения, изложенных на 163 страницах машинописного текста; содержит 90 рисунков и 57 таблиц, список использованных источников, включающий 82 наименования, 3 приложения.

Краткое содержание работы

Во введении обосновывается актуальность темы, формулируется цель и основные задачи исследования, краткая информация об объекте исследования, характеризуется новизна и практическая значимость полученных результатов, приводятся основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе выполнен обзор современных технологий производства кремния для металлургической промышленности и солнечной энергетики. Рассмотрены методы очистки кремния. Описана индукционная система, используемая в установке направленной кристаллизации.

Проведен обзор работ по моделированию процессов кристаллизации кремния, сделан вывод о возможности улучшения кристаллической структуры слитков, снижения внутренних термонапряжений.

На основе проведенного анализа сформулированы основные задачи исследований, выполненных в диссертационной работе.

Во второй главе рассматриваются вопросы разработки математических моделей электромагнитных и тепловых процессов в осесимметричной системе «индуктор – кремний – теплоизоляция», приведен алгоритм расчета электромагнитных и тепловых полей в индукционном нагревателе с немагнитной загрузкой дискретно перемещающимся фронтом кристаллизации.

Моделирование взаимосвязанных электромагнитных и тепловых процессов для задач диссертации затруднено, так как резкие изменения свойств при переходе через температуру плавления (кристаллизации) приводят к неустойчивости вычислительного процесса. В связи с этим разработан комплекс моделей, ориентированных на решение частных задач.

Для расчета параметров индукционной системы, функционирующей в процессе кристаллизации массивного слитка с постепенным переходом из жидкого в твердое состояние создана модель, в которой предусмотрено разбиение загрузки на слои, в которых задается электропроводность, соответствующая различной температуре. Особенно сильное изменение происходит при переходе через температуру кристаллизации. Весь процесс кристаллизации разбивается на несколько этапов, число которых связано с числом слоев и состоянием кремния в этих слоях. В диссертации рассматривается два способа ведения процесса кристаллизации – периодический и методический. Для первого способа число слоев неизменно, но меняется агрегатное состояние. Во втором случае на этапах расчета поочередно увеличивается число слоев и их агрегатное состояние. Расчеты, осуществляемые с помощью моделей, реализованных в программах Elcut, Comsol, позволяют определить интегральные параметры индуктора и

распределение мощности тепловыделения в кремнии для каждого этапа в каждом слое.

Кроме мощности источников тепла в расплаве важным является распределение электромагнитных сил, воздействующих на боковую поверхность. От них зависит форма слитка. Поэтому при расчете индуктора и последующем моделировании процесса кристаллизации производится учет отклонений мощности и усилий по высоте, влияние на них изменяющихся краевых эффектов.

Тепловые процессы в системе характеризуются значительным изменением теплофизических свойств и распределения источников тепла. Для повышения точности расчетов в моделях предусмотрено задание аппроксимирующих выражений, построенных на основе табличных значений. Кроме этого, выражение для теплоемкости содержит функцию, отражающую учет теплоты плавления при кристаллизации. Мощность тепловыделения задается в виде распределенной по объему величины, зависящей от температуры в каждой точке области.

Теплообмен между различными элементами конструкции и расплавом, в основном, происходит с помощью потоков излучения. Исходя из этого, разработана модель расчета тепловых процессов в системе «теплоизоляция - загрузка». Теплообмен излучением между поверхностями учитывает распределение температуры по всей поверхности загрузки и футеровки.

Для совместного моделирования электромагнитных и тепловых процессов предусмотрены мультифизические (электротепловые) модели с учетом нелинейности задач. При решении такой задачи накладываются ограничения, обусловленные особенностями расчета теплообмена излучением между поверхностями: воздушная среда, необходимая в электромагнитной задаче, создает преграду для потока излучения в тепловой задаче. Поэтому вместо теплообмена излучением между поверхностями задается упрощенный теплообмен между поверхностью и пространством с процедурой подбора коэффициента лучистого теплообмена.

При кристаллизации кремния возникают термонапряжения, обусловленные наличием одного или нескольких фронтов кристаллизации, что сопровождается образованием напряжений и дефектов в слитке. Для контроля за величиной напряжений в ходе охлаждения и кристаллизации предложена связанная модель, объединяющая тепловую модель и модель упругих деформаций.

Управление процессом кристаллизации кремния требует одновременного учета нескольких факторов. Система должна совмещать функции программного управления и замкнутой системы регулирования. Для решения задач синтеза управления электротепловыми процессами в кристаллизаторе разработана модель, позволяющая корректировать изменяющиеся во времени значения мощности тепловыделения в слоях расплава. На основе результатов моделирования возможно построение алгоритма и программы изменения мощности индуктора по мере перехода слитка из жидкого в твердое состояние.

В третьей главе на основе предложенных в главе 2 моделей произведены расчеты электромагнитных и тепловых процессов для электромагнитного кристаллизатора периодического действия.

На первом этапе было исследовано влияние формы индуктора на распределение электромагнитного поля в столбе расплавленного кремния. На основании гидростатического расчета в расплаве определено распределение давления по высоте, создаваемого столбом жидкости. В соответствии с полученным распределением выполнен поиск параметров индуктора, обеспечивающих требуемые значения электромагнитной силы и давления на боковую стенку по всей высоте. Найдены длина и угол наклона индуктора, а также смещение относительно основания загрузки.

Выполнены расчеты индуктора при разных соотношениях жидкой и твердой фазы в слитке для определения мощности и напряжения, обеспечивающих требуемое распределение давления по высоте, которое изменяется в процессе кристаллизации кремния.

Проведено исследование влияния распределения электромагнитных сил на форму слитка, определены параметры индуктора, обеспечивающие минимизацию отклонения линии боковой поверхности от вертикали.

Для моделирования процессов кристаллизации кремния на основе только тепловой модели по результатам решения электромагнитной задачи подготовлены распределения мощности источников тепла для всех комбинаций агрегатного состояния слоев слитка.

При моделировании тепловых процессов задача заключается в поиске параметров системы, обеспечивающих движение фронта кристаллизации снизу вверх и от осевой линии к боковой поверхности. Только в этом случае достигается отсутствие значительных внутренних термонапряжений и дефектов кристаллической структуры. В результате поиска было найдено соотношение геометрических размеров слитка и параметров теплоизоляции, при которых достигается заданное движение фронта кристаллизации.

Для проверки качества процесса кристаллизации на базе связанной модели термоупругой деформации выполнен ряд расчетов, который показал, что обеспечиваются допустимые значения напряжений в ходе всего процесса.

По результатам исследования найдены параметры кристаллизатора и определены значения мощности индуктора, при которых процесс кристаллизации протекает с минимальными отклонениями.

Четвертая глава посвящена расчетам электромагнитных и тепловых процессов для электромагнитного кристаллизатора методического действия.

Показано, что использование электромагнитного кристаллизатора методического действия позволяет формировать слитки кремния большой длины. Сочетание небольшой толщины каждого слоя жидкого кремния и возможность опускания столба твердого кремния на величину толщины после затвердевания очередного слоя позволяет ограничить мощность тепловыделения и требуемое значение электромагнитной силы, действующей на боковую поверхность слитка. Каждый шаг цикла заканчивается при снижении температуры слитка до 300 – 400 градусов. Величина подбирается

исходя из условия предотвращения повторного расплавления нижних слоев и минимизации времени цикла. В начале и конце каждого цикла заливки мощность индуктора изменяется в некотором диапазоне. Кроме активной мощности изменяется реактивная мощность, что приводит к выходу колебательного контура из режима резонанса и увеличению тока, потребляемого контуром.

Параметры индукционной системы должны циклически изменяться, чтобы обеспечить цилиндрическую форму слитка. Из-за небольшой высоты жидкого слоя неравномерность распределения мощности по высоте значительна, что ухудшает возможности системы, работающей в методическом режиме, по сравнению с системой периодического действия.

Исследования показали возможность применения промышленной частоты и снижения стоимости оборудования за счет некоторого ухудшения формы слитка и большего диапазона колебания мощности и тока колебательного контура.

По результатам расчетов сделан вывод о целесообразности применения такого способа кристаллизации для более крупных слитков с целью увеличения напряжения на индукторе. Снижение термического сопротивления теплоизоляции основания позволит получить большую длину без снижения охлаждающего потока.

Пятая глава посвящена определению параметров электромагнитного кристаллизатора периодического действия, выбору оборудования и алгоритма управления процессом кристаллизации.

Для определения требований к индукционной системе выполнены исследования параметров индуктора в процессе кристаллизации. Сравнение расчетов для разных частот показало, что более выгодным решением является применение повышенной частоты, при которой достигается более высокий КПД.

Проведенные расчеты индуктора показали сложную зависимость параметров индуктора от соотношения жидкой и твердой фаз кремния в

поверхностном слое. Ввиду недоступности внутренней области кристаллизатора для средств измерения управление построено на использовании результатов численного эксперимента, построении функциональной зависимости между распределением температуры в слитке и желаемым распределением мощности тепловыделения, однозначно связанным с электромагнитными силами, действующими на расплав.

В качестве доступных для измерения величины используются ток и напряжение индуктора, на основании которых рассчитывается полное сопротивление. По построенному соотношению сопротивления индуктора и требуемой мощности индукторе вычисляется напряжение, которое должно быть подано на нагреватель.

Для реализации разработанного алгоритма управления кристаллизатором осуществлен выбор преобразователя частоты мощностью 80 кВт, обеспечивающего регулирование напряжения и подстройку частоты для поддержания заданного коэффициента мощности. В качестве системы управления предусмотрено использование логического контроллера.

1. АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ ТЕХНОЛОГИЙ ВЫПЛАВКИ И КРИСТАЛЛИЗАЦИИ КРЕМНИЯ

Металлургический кремний изначально производится карботермическим восстановлением из песка [1]. Полученный кремний называется кремнием металлургического качества. Данный кремний преимущественно применяется при производстве стали и сплавов цветных металлов. Для применения кремния в солнечной энергетике требуется дальнейшее увеличение чистоты и изменение структуры кристаллической решетки. Существуют химические и металлургические методы производства кристаллического кремния, пригодного для производства солнечных панелей [2]. В химических способах производство поликристаллического кремния высокой чистоты происходит путем пиролиза соединений кремния, а именно хлорсиланов, полученных из металлургического кремния. Традиционно высоко чистый кремний производится установившимся, хорошо известным способом Сименса [3-5]. Уникальность данного метода заключается в получении кремния высокой чистоты. Производство кремния проходит через газификацию металлургического кремния, перегонку и осаждение кремния [3-6]. Металлургические методы не требуют кислот и солей в процессе производства. Основной металлургический метод, получивший широкое распространение, - это направленная кристаллизация.

1.1. Современные технологии выплавки и кристаллизации кремния

Современные металлургические технологии производства кремния высокой степени чистоты для нужд электронной и солнечной промышленности позволяют достигать содержания примесей в конечном продукте до 99,9999999 % по массе. Исходным материалом для получения кремния является диоксид кремния (песок) [6]. В процессе переработки песок проходит стадию карботермического восстановления в дуговых рудовосстановительных печах при смешивании песка, угля и кокса. При

плавлении смеси происходит процесс восстановления кремния. В результате восстановления образуется кремний металлургической чистоты от 96% до 99,9% что соответствует маркам КР1, КР0, КР00. Чистота, необходимая для металлургического применения кремния, соответствует чистоте кремния после карботермического восстановления [7]. Дальнейшее увеличение чистоты кремния происходит для соответствия требованиям солнечной энергетики, до 99,999% чистоты. Наибольшее распространение получил метод направленной кристаллизации кремния в индукционных или резистивных вакуумных печах [5]. Направленная кристаллизация позволяет удалить промышленную пыль и перераспределить примеси вдоль фронта кристаллизации. Однократная кристаллизация при точном соблюдении технологических параметров обеспечивает требуемое качество кремния для нужд солнечной энергетики. Произведенный кремний называется кремнием солнечного качества. Основное применение заключается в производстве солнечных панелей. Кремний солнечного качества не пригоден для производства полупроводниковых компонентов, поэтому применяются дополнительные процессы для увеличения чистоты. Чистоту кремния можно улучшить с помощью процесса выщелачивания. На практике было бы более выгодным добавлять кальций к расплавленному металлургическому кремнию при затвердевании расплава, что вызывает осаждение силицида кальция на границах зерен в качестве основной фазы [1,8-10]. Для удаления примесей с коэффициентом сегрегации, близким к единице, применяется плазменная очистка. Плазменная очистка - это метод, который был использован для удаления бора из кремния. Удаление бора из кремния металлургического качества было исследовано Suzuki [11] с применением обработки аргоновой-водородной плазмой. Исследователи сообщали об изменениях концентрации бора в металлургическом кремнии от 35,7 до 0,4 в течение 25 минут после начала очистки [12-14]. Дальнейшее увеличения чистоты до 99,9999999 % происходит методом зонной очистки или методом Чохральского [15].

1.1.1 Метод карботермического восстановления металлургического кремния

Метод карботермического восстановления кремния на сегодняшний день является самым распространённым и обеспечивает качество выпускаемого кремния 97-99,9% по массе, необходимое далее при производстве стали и различных сплавов с алюминием. Так как в процессе карботермического восстановления чистота кремния не превышает 99,99% по массе, а требуемая чистота для нужд солнечной энергетики и электроники начинается от 99,999%, кремний подвергается глубокой доочистке химическими либо металлургическими методами. После выплавки кремния в руднотермической печи он сливается в изложницы, где происходит прямой контакт жидкого кремния и поверхности изоляции, что в свою очередь приводит к попаданию примесей, а именно поверхностной пыли. Далее произойдет механическое разрушение и раздробление кремния на мелкие фракции, что тоже способствует попаданию промышленной грязи и пыли в кремний.

Состав примесей на данной стадии очень разнообразен для каждого конкретного производства, но есть усредненный состав пыли и грязи в цехе по производству технического кремния, который приведен в таблице 1.1 с химическим составом пыли кремниевого производства ЗАО «Кремний» [16].

Таблица 1.1

Состав пыли при производстве технического кремния

примесь	SiO ₂	C	CaO	MgO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	другие
концентрация	85,41%	6,09%	1,5%	1,24%	0,46%	0,30%	3,5%

Для примерной оценки количества примесей на данной стадии надо учесть площадь поверхности соприкосновения кремния и изложницы. По усредненным расчётам количество данных примесей может достигать 27 кг примесей на 2600 кг кремния или примерно 1%. Далее кремний разрушают на более мелкие фракции для дальнейшей упаковки в мешки по 1 тонне, что так же приводит к попаданию большого количества примесей в продукцию. По

усреднённым расчетам 3% содержимого 1 мешка являются примесями в виде промышленной пыли и грязи. Основное производство металлургического кремния в России представлено двумя компаниями на 70000 тонн/год:

- ООО «СУАЛ-Кремний-Урал» г.Каменск-Уральский, Свердловская область;
- ЗАО «Кремний» г. Шелехов, Иркутская область.

1.1.2. Метод направленной кристаллизации металлургического кремния

В настоящее время солнечные элементы из мультикристаллического кремния конкурируют с монокристаллическими за лидерство на рынке фотоэлектрических систем. В то время как мультикристаллический кремний характеризуется более низкой эффективностью по сравнению с монокристаллическим кремнием, технология выплавки мультикремния более энергоэффективна и обладает меньшими издержками при производстве. Мультикремний производится методом направленной кристаллизации. Направленная кристаллизация кремния, как упоминалось ранее, является ключевым этапом процесса производства кремния солнечного качества [5]. Малый коэффициент сегрегации многих примесей (кроме бора В и фосфора Р) между твердым и расплавленным кремнием обеспечивает правильные условия для рафинирования кремния путем направленной кристаллизации [17,18]. Направленная кристаллизация расплава протекает при удалении теплоты плавления, чтобы охладить кремний до температуры затвердевания. Как правило градиент кристаллизации имеет одно направление [19]. Направленная кристаллизация обычно выполняется вдоль вертикального направления, то есть от дна до вершины слитка. Что касается эффективности направленной кристаллизации при удалении широкого спектра примесей из кремния, ожидается, что этот процесс будет продолжать оставаться частью процесса для производства кремния солнечного качества. Данный подход является безусловно самым эффективным на сегодняшний день, но направленная кристаллизация требует повторной выплавки кремния, что приводит к

высокому расходу электроэнергии и требует постоянной замены тигля. Так как установки направленной кристаллизации являются индукторами, а кремний – диэлектрик в твердом состоянии, то предусмотрены сборный графитовый тигель и внутренний корундовый тигель для обеспечения изоляции от частиц углерода. Применение внешнего графитового тигля обусловлено высокой электрической проводимостью и тугоплавкостью графита. В нем наводятся вихревые токи, которые обеспечивают нагрев графита до температуры порядка 1800 градусов Цельсия. Далее тепло передается теплопроводностью в корундовый тигель и в кремний. Требуется создание вакуума или применение инертного газа для данной технологии, так как графит при нагреве начинает интенсивно окисляться. Тигель перемещается относительно индукционного нагревателя со скоростью 0,5 – 1,4 мм/мин. После выплавки и кристаллизации графитовый тигель разбирается, а керамический тигель разрушается механически, что приводит к дефектам слитка кремния и большому расходу материалов. Метод направленной кристаллизации позволяет получать кремний чистотой 99,999%.

1.1.3. Процедура производства слитков мультикристаллического кремния методом направленной кристаллизации

На сегодняшний день главным производителем кремния, пригодного для производства солнечных панелей, на территории Российской Федерации, является компания ООО «Солар Кремниевые технологии». По данным компании ООО «Солар Кремниевые технологии» производство мультикремния из металлургического кремния происходит по следующему алгоритму, представленному на рисунке 1.

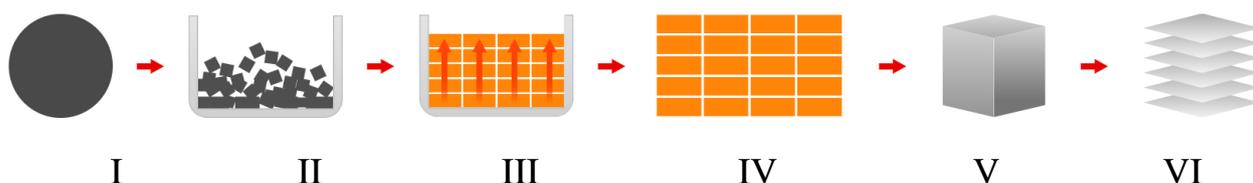


Рис.1.1 Последовательность операций при производстве кремния

Алгоритм включает шесть производственных процессов: подготовка сырья, плавка, кристаллизация, квадратирование, резка алмазной проволокой, отмывка пластин.

I. Этап подготовки сырья включает в себя загрузку тигля. Исходный материал, прошедший стадию тщательной очистки, загружается в тигель, который помещается в печь и в вакууме нагревается до температуры плавления.

II. Этап плавки включает в себя нагрев с шести сторон (сверху, снизу и по бокам) плоскими индукторами графитовых пластин до полного перехода в жидкое состояние.

III. Этап роста кристаллов (кристаллизация) включает в себя процессы формирования градиента температуры для обеспечения требуемой кристаллической решетки и удаления примесей. Расплавленный кремний начинает медленно охлаждаться так, чтобы рост кристаллов начинался в нижней части тигля и происходил вертикально. Такое протекание процесса роста позволяет добиться максимальной эффективности будущих ФЭП. (Метод направленной кристаллизации).

IV. Этап квадратирования, измерения и резки алмазной проволокой включает в себя ряд технологических процессов. Выращенный слиток помещается на оборудование «квадратирования», где при помощи алмазной проволоки он разрезается на 49 одинаковых брикетов заданного размера. Каждый полученный брикет проверяется на соответствие геометрических размеров и электрофизических параметров. По результатам контроля брикеты передаются на этап обрезки, в ходе которого алмазной проволокой отрезаются низкоэффективные верхняя и нижняя части, в которых сегрегировались «вредные» примеси, и передаются на шлифовку для придания им размеров конечной пластины.

V. Резка алмазной проволокой. Проволока натягивается одновременно по всей длине брикета и формируется количество струн необходимое для одновременного разрезания на пластины толщиной 0,3 мм. Резка брикетов на

пластины производится с помощью тонкой стальной проволоки с алмазным покрытием, натянутой на два вращающихся барабана.

VI. Отмывка пластин. После завершения процесса резки пластины остаются приклеенными к подложке. Для отклеивания они помещаются в специальную корзину, которая поочередно опускается в ванны с разной концентрацией моющих растворов. По истечении установленного времени клей размягчается, и отклеенные пластины извлекаются из ванны и передаются на финишную отмывку в специальных ваннах с установленными режимами отмывки, после чего они сушатся и поступают на этап контроля качества и сортировки.

1.1.4. Метод зонной плавки кремния

Данный метод основан на различной растворимости примесей в жидкой и твердой фазах [20]. Благодаря сравнительно низкому коэффициенту теплопроводности кремний хорошо очищается процессом зонной очистки. Метод основан на применении высокочастотных индукционных нагревателей для плавки и перемещения расплавленного слоя кремния вдоль продолговатого тигля. Примеси в зависимости от коэффициента распределения перемещаются вдоль или против движения расплавленной зоны. Данный метод позволяет получать кремний чистотой 99,99999%. Плавка происходит в графитовых тиглях в защитной атмосфере инертного газа или вакуума [21]. Для нагрева применяется одновитковые высокочастотные индукционные нагреватели.

По всей вероятности, монокристаллы кремния были самыми чистыми и совершенными по своему кристаллическому строению из монокристаллов всех элементов, выращивавшихся до 1965 г. Толчок к изучению возможностей очистки кремния вызвал спрос на него со стороны полупроводниковой промышленности. Первые операции зонной очистки кремния проводились в лодочках из плавленого кварца. Однако кремний взаимодействовал с материалом тиглей, что вело к их растрескиванию и попаданию в кремний примесей. В дальнейшем больших успехов достигла зонная очистка в

охлаждаемых водой лодочках из плавленого кварца с индукционным нагревом [20]. Крупным достижением ознаменовался переход к бестигельной очистке кремния. Освобождение кремния от контакта с тиглем привело к повышению степени его чистоты и более совершенным монокристаллам. Метод бестигельной очистки неуклонно совершенствовался и был полностью автоматизирован [20]. В 1964 году в промышленном масштабе выпускались монокристаллические слитки кремния диаметром больше 25 мм высокой степени чистоты и совершенного кристаллического строения. До этого бор, являющийся преобладающей примесью в кремнии, с трудом удалялся при зонной очистке, так как коэффициент распределения бора в кремнии близок к единице. Тейерер [20] обошел эту трудность путем введения паров воды в атмосферу при очистке по методу плавающей зоны. У поверхности зоны образовывалась и испарялась окись бора. В дальнейшем повысили чистоту галогенидов бора. В 1964 г. промышленная практика заключалась в выращивании прутков кремния путем разложения галогенида и последующем получении монокристалла по методу плавающей зоны, причем нужная примесь вводилась в него через газовую фазу. Для достижения максимальной степени чистоты пользуются многократным автоматическим перемещением плавающей зоны. Дальнейшее развитие технология зонной очистки кремния происходили с учетом изменения оборудования и метода: индукционный, электронно-лучевой, оптический. Особое развитие получил метод бестигельной зонной плавки кремния [22].

1.2. Анализ экспериментальных и математических методов моделирования процесса направленной кристаллизации

Печи направленной кристаллизации основаны на хорошо зарекомендовавшей себя технологии, однако все еще возможны инновации для увеличения выхода и качества продукции, а также снижения производственных затрат на рынке, где даже высококачественная продукция должна соответствовать дорожной карте по снижению затрат. Лучшего

контроля процесса литья слитков мультикристаллического кремния можно достичь с помощью печи, основанной на системе индукционного нагрева (индукционная система направленной кристаллизации). Печь содержит три независимых системы индукционного нагрева: верхний индуктор для управления температурным градиентом; нижний индуктор, который работает как система нагрева во время процесса плавления, так и система охлаждения во время процесса кристаллизации; боковой индуктор с несколькими катушками с независимым подключением витков, который позволяет контролировать форму фронта кристаллизации и уменьшить толщину изоляции за счет компенсации тепловых потерь, действуя как система «активной изоляции». Боковой индуктор также может быть использован для формирования бегущих магнитных полей и электромагнитного перемешивания в расплаве. Эта конструкция, по сравнению с традиционным резистивным нагревом, позволяет лучше контролировать важные параметры процесса во время плавления и кристаллизации, а также снизить эксплуатационные расходы, связанные с расходом графитовых резисторов.

Система индукторов состоит из трех индукторов: нижнего, четырехкатушечного бокового и верхнего. Каждая катушка индуктивности подключена к генератору мощностью 50 кВт с частотой 6 кГц. Регулирование мощности каждого индуктора во время процесса позволяет полностью контролировать тепловой поток в горячей зоне без необходимости использования каких-либо движущихся частей внутри вакуумной камеры. Верхний индуктор был спроектирован с той же формой, что и нижний индуктор, но с круглым поперечным сечением, поскольку он расположен над изолирующей пластиной, которая снижает явления теплового излучения. Индуктор наводит вихревые токи в графитовой пластине, от которой путем излучения тепло передается к верхней поверхности расплава кремния, как в процессе плавления, так и в процессе затвердевания. Боковой индуктор представляет собой систему из четырех отдельных катушек. Он обеспечивает нагрев во время процесса плавления, а также может использоваться для

лучшего управления границей раздела системы «твердое тело-жидкость» и направленного роста кристаллов во время процесса затвердевания [26]. Систему питания бокового индуктора можно модернизировать с помощью устройства, которое позволит отключать каждую катушку во время процесса отверждения. Система бокового индуктора позволит лучше контролировать теплопередачу, реализуя систему активной изоляции.

1.2.1. Индукционные печи для направленной кристаллизации кремния

Исследования направленной кристаллизации кремния реализуются на лабораторной индукционной печи. Параметры индукционной установки направленной кристаллизации приведены в таблице 1.2 [23-26].

В процессе плавления и кристаллизации кремний помещается в кварцевый тигель, снаружи обкладывается графитовыми пластинами для обеспечения нагрева высокочастотным индуктором.

Кристаллизация обеспечивает перемещение примесей в зависимости от коэффициента распределения. Кварцевый тигель после кристаллизации разрушается для извлечения мультикремния, как показано на рис.1.2 [23-26].

Таблица 1.2

Параметры лабораторного кристаллизатора

Параметр печи	Значение
Мощность преобразователя частоты	150 кВт
Частота	6 кГц
Наружная камера печи	водоохлаждаемая сталь
Рабочая атмосфера печи	аргон
Мощность охладительный систем	82 кВт
Расход воды	400 л/мин
Материал для нагрева тигля	графит
Толщина графитового слоя	30-50 мм
Материал тигля	Кварц
Размеры тигля	440x440x420 мм
Максимальная загрузка тигля	120 кг



Рис.1.2 Кремний перед и после плавления

1.2.2. Экспериментальное исследование повторно используемых тиглей для процесса направленной кристаллизации

Экспериментальное исследование процесса направленной кристаллизации происходит для улучшения технологического оборудования или увеличения эффективности технологии кристаллизации. В ряде работ была рассмотрена направленная кристаллизация солнечного кремния в повторно используемых графитовых тиглях, были рассмотрены и исследованы тигли технологических установок [24-26]. Графитовые тигли потенциально интересны для обработки фотоэлектрического кремния с направленной кристаллизацией, поскольку, в отличие от стандартных тиглей из кремнезема, их можно использовать многократно. В настоящей работе исследуются два типа графитовых тиглей:

- графит, непосредственно покрытый порошком Si_3N_4 , который обычно используется в качестве разделительного слоя для стандартных тиглей из диоксида кремния
- графит, защищенный плотным слоем SiC перед нанесением разделительного покрытия.

В обоих случаях наблюдается самопроизвольный отрыв кремниевого слитка во время охлаждения.

Приводятся и обсуждаются результаты, касающиеся примесей, внесенных в кремний во время цикла плавления и затвердевания, а также их влияния на фотоэлектрические характеристики кремния. Эти результаты

сравниваются с результатами, полученными при использовании стандартного кварцевого тигля. Показано, что повторно используемые тигли из графита, защищенные SiC, обеспечивают те же характеристики, что и стандартный диоксид кремния. Воспроизводимые результаты обнаруживаются после четырех прогонов с одним и тем же тиглем, и никакой деградации тигля не наблюдается.

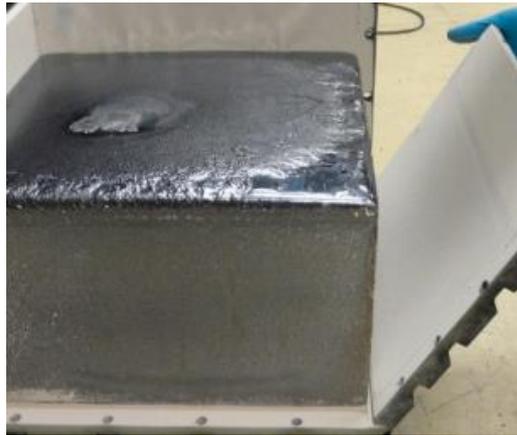


Рис.1.3 Слиток после кристаллизатора

1.2.3. Компьютерное моделирование процессов плавки и кристаллизации кремния

Численное моделирование процесса направленной кристаллизации позволяет оптимизировать энергопотребление в системе направленной кристаллизации кремния, для этого была разработана компьютерная модель процесса. Снижение производственных затрат было постоянным требованием в промышленности [23]. В систему направленной кристаллизации кремния была внесена модификация геометрии для экономии энергии. Экспериментальные данные показали, что он эффективен. Затем было проведено численное моделирование, чтобы помочь понять физику, лежащую в основе конструкции. В работе [23] проведено исследование затвердевания кристаллического кремния при контролируемой принудительной конвекции численными методами. Пластины из поликристаллического кремния имеют более низкую стоимость производства по сравнению с пластинами из монокристалла. Это происходит за счет снижения качества с точки зрения

электрических свойств, и в результате солнечные элементы, изготовленные из таких материалов, имеют пониженную эффективность.

Присутствие различных примесей в сыпучем материале играет важную роль в процессе затвердевания. Примеси связаны с различными дефектами (дислокациями, границами зерен), встречающимися в поликристаллических пластинах. Применение переменного магнитного поля во время процесса кристаллизации дает различные преимущества. Конвективное движение расплавленного кремния обеспечивает перемещение примесей из внутренних областей на границу, что снижает концентрацию примесей. Еще один фактор, который зависит от электромагнитного перемешивания, - это форма поверхности раздела затвердевания. Вертикальная печь использовалась для изучения процесса затвердевания кремния под действием бегущего магнитного поля, способного вызвать конвективный поток в жидкости. Численная модель печи была разработана в коммерческой программе ANSYS Fluent.

1.2.4. Численное моделирование термонапряжений при направленной кристаллизации

В работе «Численное моделирование формы фронта и термические напряжения при выращивании мульткристаллического кремния» авторы Чэнминь Чен, Гуансиа Лю рассмотрели вопросы моделирования переходных процессов при направленной кристаллизации [23]. Метод численного моделирования переходных процессов используется для исследования влияния двух конфигураций печи на тепловое поле и формы границы раздела в системе «расплав-кристалл», а также на термонапряжения в растущем мульткристаллическом слитке. Сначала исследуются четыре различных отношения мощности (максимальная мощность к боковой мощности), а затем три положения (вертикальное, наклонное и горизонтальное положения) изоляционного блока сравниваются с традиционной установкой. Результаты моделирования тепловых процессов при разных положениях изоляционного

блока показывают, что при уменьшении отношения мощностей граница раздела становится более плоской, а тепловое напряжение в затвердевшем слитке ниже. Результаты моделирования положения тепловых процессов показывают, что горизонтальный блок может более эффективно уменьшить радиальный градиент температуры, что приводит к более плоской границе раздела и меньшему тепловому напряжению.

1.3 Выводы по первой главе

- Рассмотрены современные способы выплавки и кристаллизации кремния, использующие индукционный подогрев, охлаждение с помощью специальных охладителей, Длительность технологических процессов равна от 3 до 6 часов при объеме загрузки до 120 кг. Недостатком является чрезмерная затянутость процесса, приводящая к повышенному расходу энергии.
- Рассмотрены конструкционные особенности процесса направленной кристаллизации кремния, заключающиеся в наличии графитового корпуса тигля и дополнительной кварцевой изоляции, которую приходится разрушать.
- Наличие графитовых элементов в системе подогрева приводит к дополнительным мерам по созданию газовой защитной среды или вакуумирования, что усложняет и удорожает технологию.
- В качестве средств моделирования и проектирования систем нагрева и кристаллизации кремния использован программный комплекс ANSYS, позволяющий решать нелинейные задачи в том числе кристаллизации и термонапряжений.
- Требуется разработка более совершенной технологии с пониженным расходом энергии, затрачиваемой на кристаллизацию.

2. РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ПРОЦЕССОВ В ЭЛЕКТРОМАГНИТНОМ КРИСТАЛЛИЗАТОРЕ КРЕМНИЯ

Управление процессом кристаллизации кремния из расплава требует учета изменения свойств и поддержания определенной скорости охлаждения и величины тепловых потоков [25-27]. Использование электромагнитных сил, необходимых для удержания расплава на расстоянии от футеровки, предполагает решение задачи расчета индуктора. Подобные задачи давно решаются для процессов, связанных с кристаллизаторами алюминия и сплавов цветных металлов [28-35]. Формирование распределения температуры должно осуществляться с учетом внутренних источников тепла, тепловых потоков, обусловленных всеми видами теплообмена между расплавом, теплоизоляцией и охладителем, а также окружающей средой. Решение указанных проблем требует применения математического моделирования нелинейных связанных электромагнитных и тепловых процессов, протекающих в условиях изменения агрегатного состояния [36-45].

Индукционная система электромагнитного кристаллизатора (рис.2.1) обеспечивает сжатие расплава электромагнитными силами.

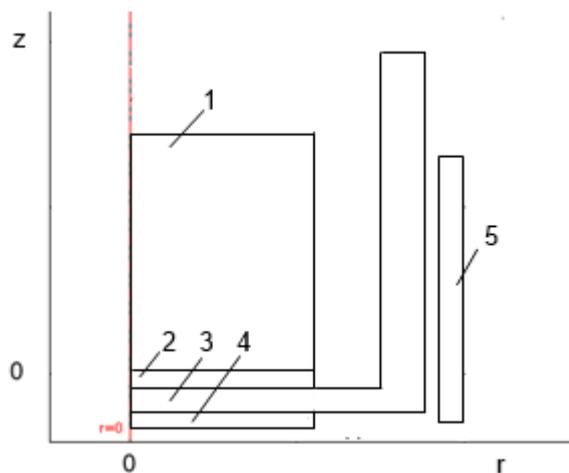


Рис.2.1 Индуктор с загрузкой: 1 – расплав кремния; 2 – подложка из кремния; 3 – футеровка; 4 – охладитель; 5 – индуктор.

Величина тока в расплаве должна обеспечить необходимую величину электромагнитной силы и давления, чтобы компенсировать статическое

давление столба жидкости. В то же время высокое значение удельного электрического сопротивления расплавленного кремния при использовании индукционного нагрева приводит к выделению большого количества тепла.

При анализе электромагнитных сил необходимо рассмотрение всех составляющих, так как в условиях продольной неоднородности температурного распределения возникают вертикальные составляющие усилий, приводящие к перемешиванию, что затрудняет расчеты. В верхней части расплава диаметр уменьшается значительно, что приводит к увеличению высоты.

Особенностью коротких индукторов, у которых длина соизмерима с диаметром, является неравномерное распределение плотности тока по длине загрузки (в данном случае, по высоте) [39]. Увеличение длины индуктора нежелательно, так как это усложняет процедуру заливки и выемки кремния из тигля. Дополнительно, возрастает мощность тепловыделения в металлическом основании (охладитель), что затрудняет теплоотвод и увеличивает тепловые потери. Конструктивные ограничения на минимальную толщину теплоизолирующего слоя приводят к снижению теплового потока от расплава кремния к охладителю и увеличению времени кристаллизации. Дополнительно, катушка и расплав имеют смещение относительно друг друга. Таким образом, сложной задачей является обеспечение электромагнитной силы, достаточной для удержания расплава, и минимизация тепловыделения в загрузке, что требует обоснованного выбора геометрических параметров загрузки, индуктора и частоты напряжения на основе численных расчетов [32,33,38,42].

В дополнение к электромагнитным и тепловым процессам важное значение имеет исследование процессов упругой деформации, вызываемых кристаллизацией в условиях значительных перепадов температуры [46,47]. На рост кристаллов и их форму влияют различные условия, что необходимо учитывать в ходе процесса [48-54].

Для разработки моделей процессов используется программное обеспечение, построенное на основе метода конечных элементов [42,55-58]. Важную роль играет проблема сходимости вычислительного процесса, от возможности решения которой зависит вид модели – сепаратная или мультифизическая, а также способ решения систем для связанных моделей [58].

2.1 Модель электромагнитных процессов в системе «расплав кремния – твердый кремний – металлическое основание индуктор» с учетом изменения температуры

Электромагнитная задача формулируется в виде уравнений Максвелла [36,37,39,40,44,59], описывающих связь между основными электромагнитными величинами, такими как напряженность магнитного поля и индукция.

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} = \sigma(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}) + \mathbf{J}^e; \quad (2.1)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}; \quad (2.2)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0; \quad (2.3)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho; \quad (2.4)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{J} = 0. \quad (2.5)$$

Здесь: \mathbf{H} , \mathbf{E} – векторы напряженности магнитного и электрического поля; \mathbf{B} , \mathbf{D} – векторы индукции магнитного и электрического поля; \mathbf{J}^e – вектор плотности внешнего тока; \mathbf{v} – вектор скорости движущегося проводника; σ – электропроводность материала; ρ – плотность электрического заряда.

Важнейшим критерием квазистационарной постановки задачи является то, что токи и электромагнитные поля меняются медленно. Это условие соблюдается, когда размеры структуры в задаче являются небольшими по сравнению с длиной волны.

Уравнение непрерывности, которое получается путем определения приращения для вышеуказанного уравнения, дает нам уравнение

$$-\nabla \cdot \left(\sigma \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} + \sigma \mathbf{v} \times (\nabla \times \mathbf{A}) + \sigma \nabla V - \mathbf{J}^e \right) = 0. \quad (2.6)$$

Эти два уравнения дают нам систему уравнений для векторного \mathbf{A} и скалярного V потенциалов.

Для решения проблемы используются два новых потенциала

$$\bar{\mathbf{A}} = \mathbf{A} + \nabla \psi; \quad (2.7)$$

$$\bar{V} = V - \nabla \psi; \quad (2.8)$$

Это дает одинаковые электрические и магнитные поля:

$$\mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} - \nabla V = -\frac{\partial (\bar{\mathbf{A}} - \nabla \psi)}{\partial t} - \nabla (\bar{V} + \frac{\partial \psi}{\partial t}) = -\frac{\partial \bar{\mathbf{A}}}{\partial t} - \nabla \bar{V}; \quad (2.9)$$

$$\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A} = \nabla \times (\bar{\mathbf{A}} - \nabla \psi) = \nabla \times \bar{\mathbf{A}}. \quad (2.10)$$

Переменное преобразование потенциалов называется калибровочным преобразованием. Чтобы получить уникальное решение, требуется выбрать калибр, то есть наложить ограничения на Ψ , которые делают решение уникальным. Одна конкретная калибровка - это кулоновская калибровка, определяемая ограничением

$$\nabla \cdot \mathbf{A} = 0. \quad (2.11)$$

Для рассматриваемых в работе двухмерных задач использование этой калибровки решает проблему неоднозначности.

Спектр рассматриваемых задач электромагнитного поля ограничивается время-гармоническим квазистационарным анализом, так как форма напряжения принята синусоидальной.

В случае гармонического во времени анализа уравнение Ампера включает ток смещения:

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} = \sigma (\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}) + j\omega \mathbf{D} + \mathbf{J}^e. \quad (2.12)$$

Поскольку из уравнений исчезает выражение для \bar{V} , то остается

$$(j\omega\sigma - \omega^2 \varepsilon_0) \bar{\mathbf{A}} + \nabla \times \left(\mu_0^{-1} \nabla \times \bar{\mathbf{A}} - \mathbf{M} \right) - \sigma \mathbf{v} \times \left(\nabla \times \bar{\mathbf{A}} \right) = (\mathbf{J}^e + j\omega \mathbf{P}). \quad (2.13)$$

Работа с векторным магнитным потенциалом $\tilde{\mathbf{A}}$ является удобным вариантом, так как для задач индукционного нагрева можно указать все как внешние токи \mathbf{J}^e .

Для перехода к численному решению исходная система преобразуется в терминах векторного магнитного потенциала к виду:

$$(j\omega\sigma - \omega^2\varepsilon_0)\mathbf{A} + \nabla \times (\mu_0^{-1}\nabla \times \mathbf{A}) - \sigma \mathbf{v} \times (\nabla \times \mathbf{A}) = \left(\frac{\sigma V_{витк}}{2\pi r} + \mathbf{J}_\varphi^e \right); \quad (2.14)$$

$$\mathbf{A} = A_\varphi e^{j\varphi}. \quad (2.15)$$

Здесь: $\omega = 2\pi f$ - круговая частота; μ_r - относительная магнитная проницаемость среды; $V_{витк}$ - потенциал витка; J_φ^e - плотность стороннего тока; φ - сдвиг по фазе вектора тока относительно напряжения.

В качестве граничных условий принимается равенство нулю векторного магнитного потенциала на границе расчетной области

$$A_\varphi = A_{0\varphi}. \quad (2.16)$$

На линии осевой симметрии граничное условие задается в виде равенства нулю производной функции магнитного потенциала.

На базе основного дифференциального уравнения и граничных условий осуществляется переход к конечно-элементной формулировке и строится система алгебраических уравнений. В результате ее решения определяются значения магнитного потенциала для каждого элемента, по которым производится расчет токов и других переменных. В индукционной системе нагрева расплава кремния не предусматривается применение ферромагнитных материалов, поэтому для всех сред магнитная проницаемость равна единице.

Объемная плотность внутренних источников тепла, создаваемых в проводящей неподвижной среде, определяется в соответствии с выражением

$$Q = \frac{1}{2} \operatorname{Re} \left(J_z \sigma^{-1} J_z^* \right). \quad (2.17)$$

Здесь в скобках показано произведение плотности тока на его комплексно сопряженную величину.

На расплав и твердый кремний со стороны катушки индуктора действуют силы Лоренца [36,37], определяемые векторным произведением плотности тока и индукции

$$\mathbf{F} = \mathbf{J} \times \mathbf{B} . \quad (2.18)$$

В последнем выражении все значения представляют собой векторы. В данном случае это важно, так как направление отталкивающих сил на жидкий кремний имеет две составляющие, создающие эффект перемешивания, аналогично тому, как это происходит в индукционных плавильных тигельных печах.

Электропроводность кремния значительно возрастает при нагреве от температуры 300 К до температуры плавления, но все-таки недостаточно велика, чтобы индукционный нагрев был эффективен. Значение электропроводности увеличивается приблизительно в 10 раз при переходе из твердого в жидкое состояние, что делает материал сравнимым с горячей сталью [60-62]. Значения электропроводности приведены в таблице 2.1.

Таблица 2.1.

Зависимость электропроводности кремния от температуры

Т, К	300	800	1200	1500	1600	1900
σ , См/м	$5 \cdot 10^3$	$2.4 \cdot 10^4$	$5 \cdot 10^4$	$1 \cdot 10^5$	$1.22 \cdot 10^6$	$1.25 \cdot 10^6$

Индукционный нагрев в этих условиях становится эффективным. Одновременно электромагнитные силы между катушкой индуктора и расплавом возрастают до значений, способных удержать жидкий кремний на расстоянии от внутренней боковой поверхности футеровки.

Для задания температурной зависимости электропроводности удобно использовать ступенчатую функцию H , задающую скачкообразное изменение при переходе через температуру плавления

$$\sigma = 10000 \cdot (1 + 0,005 \cdot T) + 1,1 \cdot 10^6 \cdot H(T - 1688) \text{ См/м}. \quad (2.19)$$

Такой способ хорошо реализуется в программных пакетах, где имеется несколько видов аппроксимирующих выражений ступенчатой функции (функция Хевисайда) [54,56,63], позволяющих задавать скачкообразное

изменение свойств или переменных при достижении аргументом заданной величина. Аргументом ступенчатой функции может быть время или, например, температура. .

Здесь и далее в выражениях для компьютерной модели температура задается в Кельвинах. На рис. 2.2 приведены для сравнения зависимости электропроводности от температуры, построенные по табличным данным и по аппроксимирующему выражению (2.19), показывают хорошее совпадение.

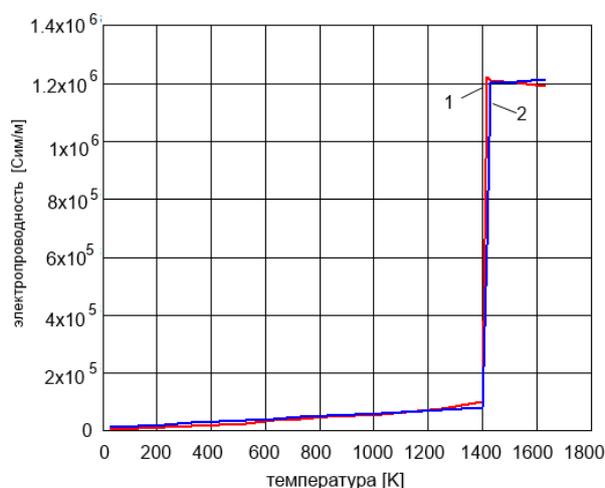


Рис.2.2 Зависимости электропроводности кремния от температуры: 1 – табличные значения; 2 – расчет по аппроксимирующему выражению.

2.2 Математическая модель теплового процесса при охлаждении и кристаллизации расплава кремния

Для реализации управляемого процесса кристаллизации расплава кремния необходим учет нескольких факторов [25–29]. Формирование кристаллов нужной величины и предотвращение недопустимых термонапряжений требует определенной скорости охлаждения и поддержания величины тепловых потоков. Создание магнитного поля, обеспечивающего электромагнитную силу, необходимую для удержания расплава на расстоянии от футеровки, требует решения задачи проектирования индуктора.

Поддержание общего характера процесса кристаллизации направлено на формирование распределения электромагнитной силы на боковой

поверхности расплава по высоте. При этом требуется преобладание охлаждающего теплового потока над мощностью тепловыделения.

Для получения цилиндрической формы столба расплава необходимо снижение силы по линейному закону с увеличением высоты. Решение данной задачи требует применения математического моделирования нелинейных связанных электромагнитных и тепловых процессов, протекающих в условиях изменения агрегатного состояния [35].

Математическая модель, в общем случае, представляется системой нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных [57,58,63,65]. В рассматриваемой задаче необходимо учитывать целый ряд нелинейных процессов при переходе металла из жидкого состояния в твердое:

- теплообмен между расплавом, футеровкой, системой охлаждения и окружающей средой, т.е. одновременно протекающие процессы кондуктивного, конвективного, радиационного теплообмена;

- в процессе охлаждения расплава теплофизические и электрофизические свойства нагреваемого изделия изменяют свои значения с падением температуры, что приводит к изменению распределения мощности и силы по высоте расплава.

Кристаллизатор имеет цилиндрическую форму. В качестве теплоизоляции используется карбид кремния, что исключает попадание нежелательных веществ. В нижней части корпуса имеется тонкий слой металла, выполняющий функции несущей конструкции. Под металлическим основанием располагается охладитель, который выполнен в виде медной трубки с проточной водой.

Процессы передачи тепла в многослойной системе (рис.2.3), состоящей из расплавленного кремния 4, подложки из твердого кремния 3, слоя теплоизоляции (футеровка) 2 и металлического основания 1, соединенного с охладителем, в общем случае описываются системой дифференциальных уравнений в частных производных.

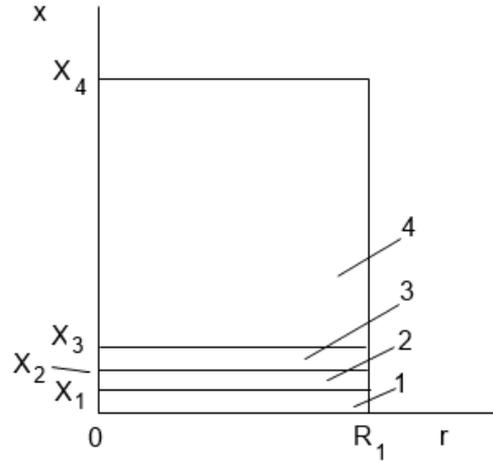


Рис.2.3 Геометрическая модель кристаллизатора: 1 – металлическое охлаждаемое основание; 2 – теплоизоляция; 3 – твердый кремний; 4 – жидкий кремний.

Учитывая сложность задача, она представлена в линейной постановке.

$$\frac{\partial T_1}{\partial t} = a_1 \left[\frac{\partial^2 T_1}{\partial x^2} \right] + \frac{\partial}{\partial r} \left[r \frac{\partial T_1}{\partial r} \right] + Q_1; \quad (2.19)$$

$$\frac{\partial T_2}{\partial t} = a_2 \left[\frac{\partial^2 T_2}{\partial x^2} \right] + \frac{\partial}{\partial r} \left[r \frac{\partial T_2}{\partial r} \right] + Q_2; \quad (2.20)$$

$$\frac{\partial T_3}{\partial t} = a_3 \left[\frac{\partial^2 T_3}{\partial x^2} \right] + \frac{\partial}{\partial r} \left[r \frac{\partial T_3}{\partial r} \right]; \quad (2.21)$$

$$\frac{\partial T_4}{\partial t} = a_4 \left[\frac{\partial^2 T_4}{\partial x^2} \right] + \frac{\partial}{\partial r} \left[r \frac{\partial T_4}{\partial r} \right] + Q_4; \quad (2.22)$$

с краевыми условиями:

$$\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial r} \Big|_{r=0} = 0; \quad \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial r} \Big|_{r=0} = 0; \quad \lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial r} \Big|_{r=0} = 0; \quad \lambda_4 \frac{\partial T_4}{\partial r} \Big|_{r=0} = 0; \quad (2.23)$$

$$\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial r} \Big|_{r=R_1} = \alpha_1 [T_c - T_1]; \quad \text{при } 0 < x < X_1 \quad (2.24)$$

$$\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial x} \Big|_{x=X_1} = \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial x} \Big|_{x=X_1}; \quad (2.25)$$

$$\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial r} \Big|_{r=R_1} = \alpha_2 [T_c - T_2]; \quad \text{при } X_1 < x < X_2 \quad (2.26)$$

$$\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial x} \Big|_{x=X_2} = \lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial x} \Big|_{x=X_2} \quad (2.27)$$

$$\lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial r} \Big|_{r=R_1} = \alpha_3 [T_c - T_3]; \quad \text{при } X_2 < x < X_3 \quad (2.28)$$

$$\lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial x} \Big|_{x=X_3} = \lambda_4 \frac{\partial T_4}{\partial x} \Big|_{x=X_3} \quad (2.29)$$

$$\lambda_4 \frac{\partial T_4}{\partial r} \Big|_{r=R_1} = \alpha_4 [T_c - T_4]; \quad \text{при } X_3 < x < X_4; \quad (2.30)$$

$$\lambda_4 \frac{\partial T_4}{\partial x} \Big|_{x=X_4} = \alpha_4 [T_c - T_4]; \quad (2.31)$$

$$T_1(r, x, 0) = T_{01}(r, x); \quad T_2(r, x, 0) = T_{02}(r, x); \quad (2.32)$$

$$T_3(r, x, 0) = T_{03}(r, x); \quad T_4(r, x, 0) = T_{04}(r, x). \quad (2.33)$$

К граничным условиям (2.25), (2.27), (2.29) должны добавляться выражения равенства на границах температур сопряженных слоев. Это отражает постановку задачи нестационарной теплопроводности с граничными условиями четвертого рода. При записи выражений, описывающих систему, пришлось исключить теплообмен излучением, как признак нелинейности. Формально задача может быть решена в аналитическом виде [64,65], но при этом множество допущений и процедуры линеаризации настолько повысят погрешность вычислений, что смысл таких расчетов будет потерян. Но главная проблема заключается в необходимости учета перемещения фронта кристаллизации. Таким образом, комбинация многослойного объекта, описанного системой дифференциальных уравнений в частных производных, с граничными условиями четвертого рода делает необходимым применение численного метода решения задачи.

Тепловая задача, более корректно отражающая особенности теплового процесса, формулируется с учетом реальных режимов теплообмена с окружающей средой. На рис.2.4 геометрическая модель теплового процесса установки кристаллизации дополнена верхней крышкой теплоизоляции. Это позволяет ограничить потери тепла в окружающую среду и сделать процесс охлаждения более управляемым.

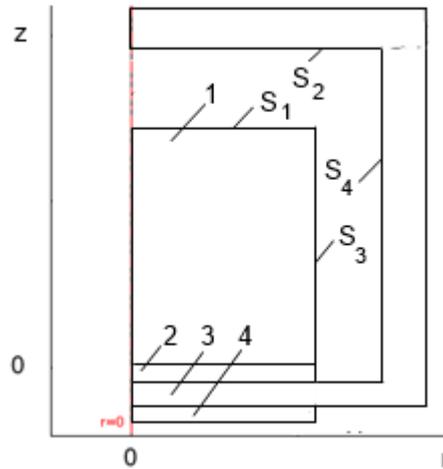


Рис.2.4 Геометрическая модель кристаллизатора: 1 – металлическое охлаждаемое основание; 2 – теплоизоляция; 3 – твердый кремний; 4 – жидкий кремний.

В качестве исходной модели принято нелинейное уравнение теплопроводности вида [64]

$$C\rho \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial r} \left[\lambda r \frac{\partial T}{\partial r} \right] - \rho L \frac{\partial b}{\partial t} + Q \quad (2.34)$$

с начальными условиями

$$T(r, x, 0) = T_0, \quad (2.35)$$

и граничными условиями:

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=0} = 0; \quad (2.36)$$

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=R} = \alpha_1 [T(R, x, t) - T_{ext}] + \varepsilon \sigma [T^4(R, x, t) - T_{wall}^4]; \quad (2.37)$$

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0} = -\alpha_2 [T(r, ., t) - T_{ext}]; \quad (2.38)$$

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=X} = \alpha_3 [T(r, X, t) - T_{ext}] + \varepsilon \sigma [T^4(r, X, t) - T_{ext}^4]. \quad (2.39)$$

Здесь: C - удельная теплоемкость; L – удельная теплота плавления; b – подвижная граница раздела твердой и жидкой фаз металла; ρ - плотность; λ - теплопроводность; Q - плотность внутренних источников тепла; α_i - коэффициенты конвективного теплообмена на поверхностях загрузки, футеровки, основания под расплавом; ε - степень черноты загрузки и футеровки; T_{wall} - температура внутренней стенки футеровки, T_{ext} - температура окружающей среды.

Теплообмен излучением предусмотрен между поверхностями S_1, S_2 и S_3, S_4 . Это позволяет более точно моделировать тепловые процессы в динамике, когда распределение температуры ни в загрузке, ни в футеровке еще не установилось.

При решении тепловой задачи использован программный пакет на основе метода конечных элементов, который позволяет учитывать нелинейные свойства и изменение параметров во времени [58].

Выражение (2.20) содержит две неизвестные – температура T и граница раздела жидкой и твердой фаз b . В такой постановке задача слишком сложна: фактически вместо одного уравнения требуется решать два уравнения, связанные через свойства материала. При использовании численного метода решения задачи для учета изменения агрегатного состояния используется коррекция удельной теплоемкости с помощью функции Хевисайда [58,63], позволяющей увеличить значение в заданном диапазоне температуры, чтобы отразить повышение (уменьшение) теплосодержания. Удельная теплота плавления приравнивается к произведению задаваемого диапазона температуры на приращение теплоемкости

$$L = C_{пл} \cdot \Delta T. \quad (2.26)$$

При расчете теплообмена излучением в системе «расплав – футеровка» вместо температуры внешней среды T_{ext} в выражении для теплового потока фигурирует температура внутренней поверхности футеровки T_{wall} .

Определение распределения температуры в нагреваемом изделии сводится к решению уравнения теплопроводности с функцией распределения внутренних источников тепла, которая находится в результате решения электромагнитной задачи.

В качестве теплоизоляции используется карбид кремния, что исключает попадание нежелательных веществ. В нижней части корпуса имеется тонкий слой металла, выполняющий функции несущей конструкции. Под металлическим основанием располагается охладитель, который выполнен в виде медной трубки с проточной водой.

Вид теплообмена в ходе поиска более подходящих значений тепловых потоков с верхней поверхности может изменяться: вместо теплообмена с открытым пространством возможен вариант с ограничением потерь с помощью верхней теплоизолирующей крышки.

При расчете теплообмена излучением в системе «расплав – футеровка» вместо температуры внешней среды T_{ext} в выражении для теплового потока фигурирует температура внутренней поверхности футеровки T_{wall} .

Определение распределения температуры в нагреваемом изделии сводится к решению уравнения теплопроводности с функцией распределения внутренних источников тепла, которая находится в результате решения электромагнитной задачи.

2.3 Задание физических свойств материалов

Свойства кремния зависят от разных параметров. Вид кристаллической структуры и наличие примесей сказываются довольно значительно на механических свойствах. Для расчетов тепловых процессов приняты

теплофизические свойства кремния, приведенные в работах [60-62], и которые представлены в табл.2.2.

При температуре выше температуры плавления коэффициент теплопроводности снижается незначительно.

Для удобства в использовании при расчетах на основе табличных значений найдены аналитические аппроксимирующие выражения, на основе которых построены диаграммы. Построенные по табличным данным зависимости теплопроводности и теплоемкости приведены на рис.2.5, 2.6.

Сравнение диаграмм, построенных на по табличным данным и по найденным выражениям, показали незначительное расхождение (рис.2.5).

Таблица 2.2

Теплофизические свойства кремния

T, K	$\alpha \times 10^6, K^{-1}$	C, Дж / (кг · K)	k, Вт / (м · K)
300	2,54	714	148
400	3,05	793	98,9
500	3,39	837	76,2
600	3,68	865	61,2
700	3,95	885	50,8
800	4,19	901	42,2
900	4,43	914	35,9
1000	4,65	926	31,2
1200	-	966	25,7
1400	-	1006	23,5
1600	-	1027	22,1
1700	-	1048	-
1800	-	1057	-
1900	-	1066	-

Для аналитических расчетов обычно используют аппроксимирующие выражения для теплопроводности и теплоемкости следующего вида

$$\lambda = 148,4 - 0,0734 \cdot T \text{ Вт / (м · K)}; \quad [2.27]$$

$$C = 504,9 + 0,389 \cdot T \text{ Дж / (кг · K)}. \quad [2.28]$$

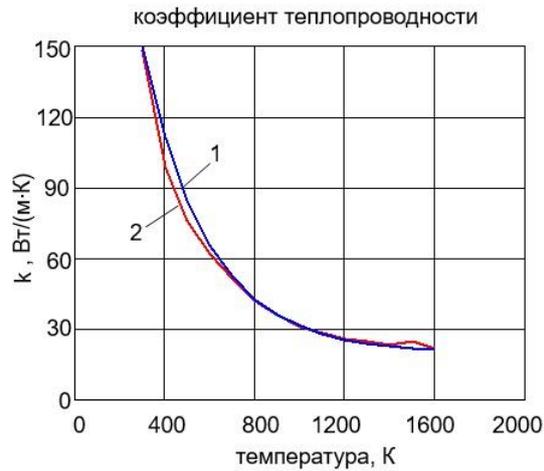


Рис.2.5 Зависимость коэффициента теплопроводности кремния от температуры: 1 – табличные данные; 2 – аппроксимация.

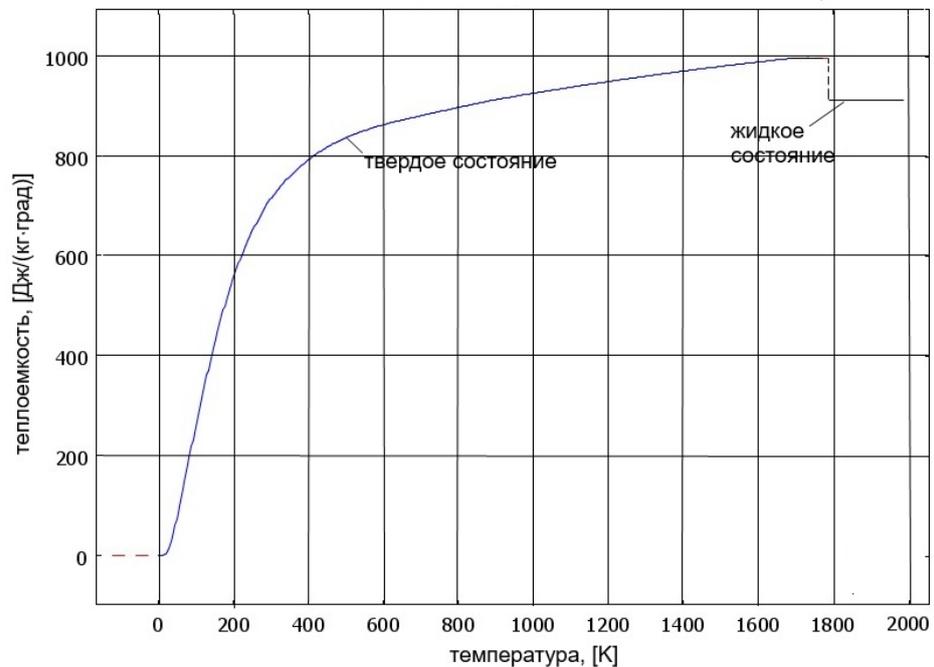


Рис.2.6 Зависимость коэффициента теплоемкости кремния от температуры.

При переходе из жидкого в твердое происходит выделение теплоты плавления кремния $L=1409$ кДж/кг. Учет этого процесса удобно производить с помощью коррекции зависимости теплоемкости от температуры. Для этого в выражение для теплоемкости добавляется компонента, которая приводит к значительному увеличению в окрестности температуры затвердевания. В результате теплоемкость приобретает вид

$$C_{res} = 504 + 0,389 \cdot T + \frac{L}{\Delta T} (H(T_{L-H} - T) - H(T_{L-H} - \Delta T - T)) \quad . \quad [2.29]$$

Здесь: ΔT - принятый для расчетов интервал температуры, на котором происходит изменение состояния и выделение теплоты плавления; H - ступенчатая функция; T_{L-H} - температура затвердевания.

С учетом температуры плавления кремния и величины принятого интервала температур, где происходит кристаллизация, равного 30 градусам, коэффициент теплоемкости принимает вид

$$C_{res} = 504 + 0,389 \cdot T + 46900 \cdot (H(1688 - T) - H(1718 - T)) \text{ Дж} / (\text{кг} \cdot \text{K}); \quad [2.30]$$

Представленная на рис.2.7 зависимость теплоемкости от температуры с учетом теплоты плавления характеризуется сильным увеличением на участке температур от 1688 до 1718 К. Даже применение логарифмической шкалы не уменьшает значительности отклонения.

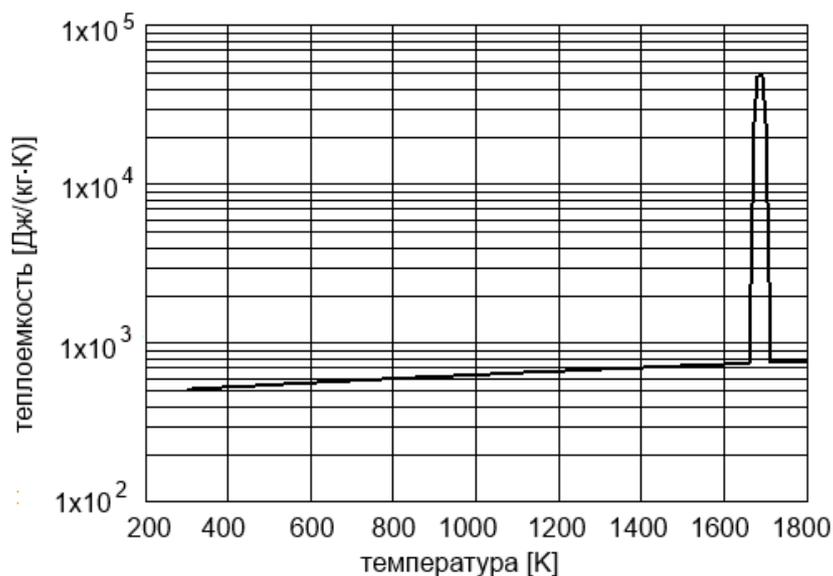


Рис.2.7 Зависимость коэффициента теплоемкости кремния от температуры с учетом теплоты плавления.

Для коэффициента теплопроводности в расчетах более удобно использование аппроксимирующего выражения, обеспечивающего меньшую погрешность

$$\lambda = 20 + 32 \cdot H(T - T_{пл}) + 32 \cdot \exp(-0,0035 \cdot (T - 700)). \text{ Вт} / (\text{м} \cdot \text{K}) \quad [2.31]$$

Для материала теплоизоляции коэффициенты теплопроводности и теплоемкости имеют вид функций от температуры

$$\lambda = 12,2 - 0,86 \cdot 10^{-3} \cdot T \text{ Вт} / (\text{м} \cdot \text{К}); \quad [2.32]$$

$$C = 680,3 + 0,42 \cdot T \text{ Дж} / (\text{кг} \cdot \text{К}). \quad [2.33]$$

Плотность используемых в расчетах материалов приняты при температуре 20°C приняты равными: для кремния $2330 \text{ кг}/\text{м}^3$, для корунда $3600 \text{ кг}/\text{м}^3$.

2.4 Математическая модель процессов упругой деформации

Переход жидкого кремния в твердое состояние сопровождается сильным возрастанием коэффициента упругости [66,67]. В зависимости от тепловых потоков охлаждения, приложенных к разным поверхностям расплава цилиндрической формы фронт кристаллизации может возникать в разных частях объема. Возможно возникновение процесса кристаллизации в верхней, нижней или боковой части цилиндра, а также в их сочетании. Таким образом, затвердевание может протекать одновременно с нескольких сторон и приводить к появлению замкнутых областей с жидким кремнием, ограниченных твердыми стенками. Значительное уменьшение объема материала при кристаллизации приводит к возникновению деформаций и напряжений, способных вызвать появление микротрещин в слитке, учитывая высокую хрупкость кремния. При моделировании тепловых процессов во время кристаллизации необходим расчет процессов упругой деформации, чтобы правильно определить величину тепловых потоков, обеспечивающих требуемую скорость и направление кристаллизации [50,66,68-70].

Расчет перемещений и концентрации напряжений в элементах конструкций сводится к определению компонентов векторов перемещений точек тела

$$\{\Delta\} = \{u, v, w\}^T, \quad (2.34)$$

деформаций

$$\{\varepsilon\} = \left\{ \varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z, \frac{1}{2} \gamma_{xy}, \frac{1}{2} \gamma_{yz}, \frac{1}{2} \gamma_{zx} \right\}^T \quad (2.35)$$

и напряжений

$$\{\sigma\} = \left\{ \sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \frac{1}{2} \tau_{xy}, \frac{1}{2} \tau_{yz}, \frac{1}{2} \tau_{zx} \right\}^T, \quad (2.36)$$

В статической задаче компоненты вектора напряжений должны удовлетворять уравнениям равновесия

$$\begin{cases} \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + p_{v_x} = 0; \\ \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} + p_{v_y} = 0; \\ \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + p_{v_z} = 0, \end{cases} \quad (2.37)$$

где $p_{v_x}, p_{v_y}, p_{v_z}$ – компоненты вектора массовых сил. Три других уравнения равновесия в виде сумм моментов внутренних сил относительно координатных осей приводят к известным условиям парности касательных напряжений $\tau_{xy} = \tau_{yx}, \tau_{yz} = \tau_{zy}, \tau_{zx} = \tau_{xz}$.

Компоненты u, w, v вектора перемещений однозначно связаны с компонентами вектора деформаций соотношениями Коши:

$$\begin{aligned} \varepsilon_x &= \frac{\partial u}{\partial x}; \quad \varepsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y}; \quad \varepsilon_z = \frac{\partial w}{\partial z}; \\ \gamma_{xy} &= \frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}; \quad \gamma_{yz} = \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y}; \quad \gamma_{zx} = \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z}. \end{aligned} \quad (2.38)$$

Эти уравнения, справедливые для малых деформаций, выражают условия сплошности тела. На той части (S_u) поверхности тела, где заданы перемещения, функции удовлетворяют кинематическим граничным условиям вида

$$u = u^*(x, y, z); \quad v = v^*(x, y, z); \quad w = w^*(x, y, z) \quad (2.39)$$

где u^*, v^*, w^* – известные функции координат. Заметим, что поверхности S_σ и S_u должны образовывать полную поверхность (S) тела, то есть $S = S_\sigma + S_u$.

Замкнутая система уравнений краевой задачи получается из уравнений (2.37), дополненных физическими уравнениями, связывающими векторы напряжений $\{\sigma\}$ и деформаций $\{\varepsilon\}$. Последние строятся на основе физических и математических моделей конструкционных материалов.

Система разрешающих уравнений МКЭ для осесимметричной задачи имеет тот же вид, что и для объемной, то есть

$$[K]\{U^\varepsilon\} = \{P\}, \quad (2.40)$$

Здесь: $[K]$ - матрица жесткости; $\{U^\varepsilon\}$ - вектор перемещений; $\{P\}$ - вектор внешних сил.

Природа внешних сил может быть различной – от механических усилий до электродинамических сил. Кроме того, вектор деформаций связан через коэффициент линейного расширения с температурой

$$\{\varepsilon^0\} \equiv \{\varepsilon^T\} = \alpha \Delta T \{1 \ 1 \ 1 \ 0\}^T. \quad (2.41)$$

Здесь: α - коэффициент линейного температурного расширения; ΔT - перепад температур.

2.5 Связанные математические модели для задач кристаллизации кремния

В рассмотренных примерах при индукционном нагреве одновременно протекают несколько физических процессов: электромагнитные, тепловые, электродинамические, термоупругие.

Решение поставленных задач возможно при высокой точности моделирования процессов с учетом их взаимного влияния. Для этого создаются мультифизические задачи, объединяющие несколько процессов. От конкретных условий зависит, какими должны быть отдельные модели – стационарными или нестационарными, линейными или нелинейными. Метод решения связанных задач зависит от возможностей программы и от вида постановки. Например, в Elcut связанные электротепловые задачи решаются последовательно. Сначала решается электромагнитная задача, результаты в виде источников тепла передаются в тепловую задачу, которая может быть

стационарной или нестационарной. Comsol позволяет решать задачи с взаимовлиянием через зависимость удельного сопротивления от температуры, зависимость источников тепла от распределения тока [58]. Наличие нелинейности приводит к использованию итерационных методов.

Формулировка связанной задачи включает систему расчетных уравнений. Например, для задачи термоупругой деформации постановка содержит задачи тепловых процессов и упругой деформации:

В зависимости от вида анализа той или иной составляющей связанной модели в формулировке может присутствовать или отсутствовать динамическая составляющая, отражаемая наличием матрицы демпфирования [С].

Для решения системы уравнений в Comsol можно использовать два способа: полностью взаимосвязанный подход (*Fully Coupled*) и отдельный подход (*Segregated*).

В первом случае производится одновременное решение нескольких задач, например, электромагнитной и тепловой. Большинство задач может быть решено только с помощью итерационного решателя, так как в итоге преобразований системы результирующая матрица жесткости становится несимметричной. Взаимные связи электромагнитных и тепловых процессов, тепловых и гидравлических, электромагнитных и гидравлических превращают исходную систему односвязных линейных задач в нелинейную многосвязную задачу.

Решение такой задачи сложно и очень ресурсоемко. Основное направление достижения сходимости решения – увеличение числа элементов сетки. Требования к объему оперативной памяти и времени счета могут стать очень высокими.

Альтернативный вариант – отдельный подход к решению задачи. Отдельный подход рассматривает каждый физический процесс последовательно, используя результаты решения предыдущего физического процесса для оценки входных данных и свойств материала при решении

следующей физической задачи. Преимуществом изложенного выше подхода является то, что на каждой линейной стадии шага (на каждом подшаге) можно использовать оптимальный итерационный решатель. В этом случае требуется решать не только меньшую задачу на каждой стадии, но можно также задействовать для этого наиболее эффективный и быстродействующий решатель. Хотя, как правило, отдельный подход требует большего числа итераций для сходимости, на каждую итерацию тратится гораздо меньше времени, чем на соответствующую итерацию полностью взаимосвязанного подхода.

2.5.1 Электротепловая задача в электромагнитном кристаллизаторе

Рассмотренные выше модели электромагнитной и тепловой задач формулируются в виде дифференциальных уравнений в частных производных

$$\nabla^2 \{\bar{A}\} - j\omega\sigma(T)\{\bar{A}\} - \{\bar{J}\} = 0; \quad (2.42)$$

$$\rho C_P \frac{\partial T}{\partial t} - \nabla \cdot (-k\nabla T) - \rho C_P \mathbf{u} \cdot \nabla T = Q. \quad (2.43)$$

Они дополняются граничными условиями (2.16) и (2.36)-(2.39). В уравнениях правая часть содержит источники. Связь между процессами обеспечивается через электропроводность в уравнении (2.42), зависящую от температуры и через источники тепла в уравнении (2.43). После преобразований исходные уравнения (2.42), (2.43) приводятся к конечному виду систем алгебраических уравнений, которые для совместной задачи объединяются

$$\begin{cases} [\hat{K}_I] \{I\} = \{Q_I\}; \\ [\hat{K}_T] \{T\} = \{Q_T\}. \end{cases} \quad (2.44)$$

Система алгебраических уравнений (2.34) для нестационарной нелинейной задачи требует многократного решения на каждом шаге по времени. Учитывая зависимость параметров от температуры, так же, как и распределения токов в проводящей среде, сходимость вычислительных

процессов и погрешность расчетов являются серьезной проблемой. Для решения задачи необходимо увеличивать число элементов и уменьшать шаг по времени. Однако серьезное влияние на сходимость оказывает еще и вид нелинейности. Более гладкие зависимости при решении создают меньше затруднений.

В случае моделирования электромагнитных и тепловых процессов при индукционном нагреве иногда не удастся ограничиться неизменными во времени значениями тока или мощности. Необходимость применения системы регулирования приводит к резкопеременному характеру изменения тока. Ухудшение сходимости вычислительного процесса в связанной задаче в этом случае требует гораздо больших усилий на ее преодоление.

2.5.2 Связанная задача теплового процесса и процесса упругой деформации

Переход жидкого кремния в твердое состояние сопровождается сильным возрастанием коэффициента упругости [67]. В зависимости от тепловых потоков охлаждения, приложенных к разным поверхностям расплава цилиндрической формы фронт кристаллизации может возникать в разных частях объема. Возможно возникновение процесса кристаллизации в верхней, нижней или боковой части цилиндра, а также в их сочетании. Таким образом, затвердевание может протекать одновременно с нескольких сторон и приводить к появлению замкнутых областей с жидким кремнием, ограниченных твердыми стенками. Значительное уменьшение объема материала при кристаллизации приводит к возникновению деформаций и напряжений, способных вызвать появление микротрещин в слитке, учитывая высокую хрупкость кремния. При моделировании тепловых процессов во время кристаллизации необходим расчет процессов упругой деформации, чтобы правильно определить величину тепловых потоков, обеспечивающих требуемую скорость и направление кристаллизации [66,68].

Тепловые процессы в расплаве и футеровке описываются уравнением теплопроводности

$$\rho C_p \partial T / \partial t + \nabla \cdot (-k \nabla T) = Q. \quad (2.45)$$

Коэффициенты теплопроводности и теплоемкости зависят от температуры.

Граничные условия задаются в виде (2.36) – (2.39) и соответствуют условиям осевой симметрии и теплообмену с окружающей средой посредством конвекции и излучения.

После преобразований с помощью метода конечных элементов формируется система уравнений

$$[K^T] \{T\} + [C^T] \{\dot{T}\} = \{Q\}. \quad (2.46)$$

В системе алгебраических уравнений (3.2) не предусмотрено влияние процессов упругой деформации. На практике существует класс задач, когда под воздействием механического давления при пластической деформации происходит выделение тепла. В этом случае к существующим источникам Q в выражениях 3.1, 3.2 добавляются объемные распределения, обусловленные давлением.

Задача упругой деформации формулируется системой дифференциальных уравнений (2.37), которая преобразуется в методе конечных элементов к виду

$$[K] \{U^\varepsilon\} = \{P\}, \quad (2.47)$$

Вектор источников $\{P\}$ может содержать различные виды воздействий, как внешних, так и внутренних. К последним относится тепловая деформация, создающая напряжения в различных областях объекта.

При создании модели задаются параметры, влияющие на величину деформаций и напряжений: модуль упругой деформации, коэффициент Пуассона, коэффициент теплового расширения.

Для кремния коэффициент теплового расширения принимается постоянным и равным $\alpha = 2,6 \cdot 10^{-6} \text{ 1/К}$.

Возникающие в процессе теплового расширения или сжатия напряжения пропорциональны разности начального и конечного значений температуры. Таким образом, в модели теплового процесса при кристаллизации кремния отсутствует влияние напряжений, а в модели процесса упругой деформации температура присутствует.

При переходе в твердое состояние в слитке в силу имеющихся перепадов температуры возникают деформации и термические напряжения. Для расчета термонапряжений используется подход, аналогичный тому, что применен при построении электротепловой модели.

Для совместного решения используется связанная модель, позволяющая корректно учесть влияние тепловых процессов на деформацию и термонапряжения:

$$\begin{bmatrix} C^T & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{T} \\ 0 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} K^T & 0 \\ 0 & K^\varepsilon \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} T \\ U^\varepsilon \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} Q \\ Q^\varepsilon \end{Bmatrix}. \quad (2.48)$$

Здесь: C^T - матрица демпфирования для тепловой задачи; K^T и K^ε матрицы жесткости для тепловой задачи и задачи упругой деформации; T и U^ε - векторы переменных; \dot{T} вектор производной от переменной T ; Q и Q^ε - векторы источников.

Особенностью данной модели является одностороннее влияние тепловых процессов на деформации. Это позволяет использовать более простой и экономичный тип решателя Segregated (раздельный), выполняющий расчет отдельно для теплового процесса и процесса упругой деформации.

2.6 Моделирование программного управления электротепловыми процессами в системе «индуктор – нагрузка»

Моделирование электротепловых процессов в системе индукционного нагрева многослойной загрузки из кремния, переходящего из жидкого в твердое состояние, позволяет учесть изменение теплофизических параметров. Самый простой вид управляющего воздействия в виде постоянного значения

мощности позволяет в большинстве случаев получить требуемое распределение температуры. Вместе с тем, существует необходимость корректировки мощности тепловыделения в отдельных областях для обеспечения нужного усилия, воздействующего на боковую стенку расплава по мере затвердевания расплава и изменения удельного сопротивления.

Для моделирования таких процессов требуется в электротепловой модели предусмотреть возможность задания настроек параметров интервалов управления. В общем случае управляющее воздействие должно иметь вид

$$u(t) = a \cdot f_1(t) \cdot (1 - H(t - t_1)) + b \cdot f_2(t) \cdot H(t - t_2); \quad (2.49)$$

Здесь: a, b – масштабирующие коэффициенты, соответствующие уровням мощности до и после переходного процесса; $f_1(t), f_2(t)$ – функции, описывающие плавное изменение управляющего воздействия во время переходного процесса; $H(t - t_1)$ – ступенчатая функция, описывающая скачкообразный переход от одного значения к другому (от 0 к 1); t_1 – момент времени, когда происходит переключение функции управления.

Изменение мощности тепловыделения возможно программировать разными способами. В первом случае функцию (2.46) можно непосредственно задать при описании источников в модели электромагнитной задачи. Тогда функция $u(t)$ будет иметь размерность тока (плотности тока) или напряжения

$$j(t) = a \cdot f_1(t) \cdot (1 - H(t - t_1)) + b \cdot f_2(t) \cdot H(t - t_2). \quad (2.50)$$

Второй вариант – это введение функции множителя перед выражением, выполняющим расчет мощности тепловыделения в элементе согласно (2.31)

$$Q(t) = Q_1 \cdot f_1(t) \cdot (1 - H(t - t_1)) + Q_2 \cdot f_2(t) \cdot H(t - t_2). \quad (2.51)$$

Для немагнитного материала загрузки оба варианта задания мощности источников тепловыделения равноценны, так как связь между плотностью тока и мощностью тепловыделения не содержит нелинейной составляющей, как в случае с ферромагнитными материалами. Существует проблема ухудшения сходимости вычислительного процесса для нелинейных задач. От

вида нелинейности, скорости изменения параметров зависит то, как сильно ухудшится сходимость. В связи с этим, изменение управляющего воздействия в тепловой модели меньше сказывается на устойчивости, и задача решается быстрее.

2.7 Выводы по второй главе

1. Разработана нелинейная тепловая модель процесса индукционной кристаллизации жидкого кремния, учитывающая теплообмен между загрузкой и окружающей средой, теплопередачу между загрузкой и водоохлаждаемой подложкой через слой теплоизоляции.

2. Построены аналитические аппроксимирующие выражения для температурных зависимостей физических свойств кремния с учетом изменения агрегатного состояния.

3. Разработана модель электромагнитных процессов в системе «индукционный кристаллизатор – жидкий кремний», учитывающая изменение электрической проводимости в загрузке с учетом послойного изменения агрегатного состояния кремния.

4. Разработана мультифизическая электротепловая модель индукционного кристаллизатора с учетом изменения электрической проводимости кремния в жидкой и твердой фазе.

5. Разработана модель процесса деформации и термонапряжений в кремнии при кристаллизации.

3. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ КРИСТАЛЛИЗАТОР КРЕМНИЯ ПЕРИОДИЧЕСКОГО ДЕЙСТВИЯ

3.1 Разработка индукционной системы электромагнитного кристаллизатора кремния периодического действия

3.1.1 Моделирование электромагнитных процессов при кристаллизации расплава кремния в условиях подогрева внутренними источниками

В современной цветной металлургической промышленности широко применяются системы кристаллизации расплавов при одновременном воздействии электромагнитного поля и быстрого охлаждения потоками воды [28,29]. Взаимодействие токов индуктора и расплава обеспечивает отталкивание расплава от стенок футеровки. Интенсивное водяное охлаждение приводит к формированию твердого слоя сначала в поверхностном слое, а затем и в более глубоких областях. Необходимым условием успешного протекания процесса является большой коэффициент теплопроводности материала расплава, чтобы было возможным завершить переход в твердое состояние за минимальное время. Дополнительно, сплав должен обладать достаточной пластичностью для предотвращения появления критических термонапряжений, способных привести к внутренним дефектам в слитке.

В работе [28] была показана технология литья алюминия в сжимающем электромагнитном поле. Данный способ позволяет получать цилиндрические слитки с контролируемым диаметром и ровной поверхностью без дополнительного загрязнения расплава. Последующее широкое распространение электромагнитных кристаллизаторов в промышленности нашло отражение в трудах, посвященных как самой технологии, так и моделированию процессов. Среди последних работ, посвященных проблемам моделирования можно отметить [30-34,54,72-82]. Кроме тепловых процессов в них рассмотрены вопросы гидродинамики при течении расплава [71].

Электромагнитное поле индуктора создает отталкивающие силы, действующие на расплав. Движение металла вниз относительно индуктора сопровождается быстрым охлаждением поверхностного слоя и кристаллизацией. На выходе из индуктора твердая корка уже способна удержать внутреннюю незатвердевшую часть. Продолжение охлаждения слитка и после выхода из индуктора позволяет завершить кристаллизацию. Параметры процесса подобраны таким образом, что радиус слитка не изменяется. Индуктор может иметь минимальную длину и содержать один виток.

Исходная система «индуктор – расплав кремния» представлена на рис. 3.1. Подложка может быть выполнена из металла или из диэлектрического материала. Охладитель содержит катушку с циркулирующей водой и является электропроводящим объектом. Эти особенности сказываются на распределении напряженности поля в загрузке и на общих энергетических характеристиках индуктора.

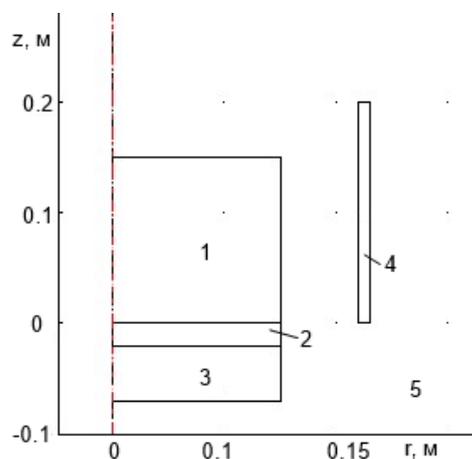


Рис.3.1 Геометрическая модель индукционной системы: 1 – расплав кремния; 2 – подложка; 3 – охладитель; 4 – индуктор; 5 – воздух.

Главным отличием кремния от металлов является нелинейная зависимость удельного сопротивления от температуры в твердом состоянии и резкое снижение при расплавлении. Электропроводность кремния увеличивается приблизительно в 10 раз при расплавлении. Для представления электропроводности используется ступенчатая функция, задающая

скачкообразное изменение при переходе через температуру плавления (рис.3.2). Одновременно учитывается плавное изменение электропроводности кремния в твердом состоянии при охлаждении от температуры плавления до температуры окружающей среды

$$\sigma = 10000 \cdot (1 + 0,005 \cdot T) + 1,1 \cdot 10^6 \cdot H(T - 1688). \quad (3.1)$$

Мощность тепловыделения в кремнии при переходе через температуру плавления изменяется в несколько раз.

Для исходной конструкции индукционной системы (рис.3.1) произведен расчет параметров индуктора. Мощность тепловыделения в расплаве составляет 280 Вт, суммарная отталкивающая сила в расплаве F_r равна 29 Н. При таких параметрах получена диаграмма распределения силы Лоренца на боковой поверхности загрузки и слоев охладителя и подложки, представленная на рис.3.2.

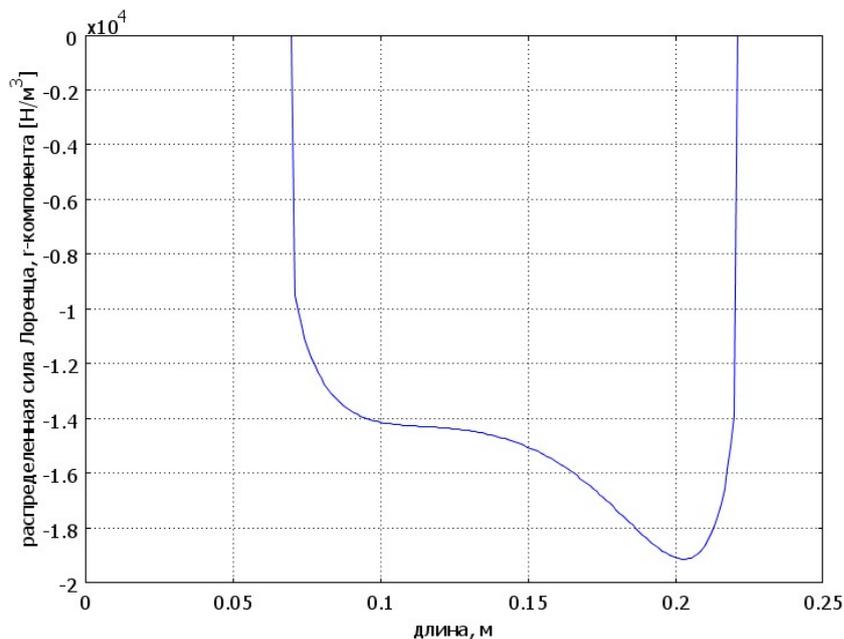


Рис.3.2 Диаграмма плотности силы Лоренца на боковой поверхности загрузки, охладителя и подложки

Сила направлена к осевой линии, поэтому имеет отрицательный знак. Из диаграммы следует, что отталкивающая сила имеет максимальное значение в верхней части расплава. Это связано с тем, что в верхней части краевой эффект является более сильным, так как изначально ставится задача снижения

мощности тепловыделения в основании для уменьшения тепловыделения и создания более благоприятных условий для кристаллизации. В итоге создается ситуация, не позволяющая обеспечить цилиндрическую форму слитка при кристаллизации.

Для оценки справедливости рассуждений выполнен расчет параметров индукционной системы для цилиндрического индуктора с загрузкой конической формы. Для конструкции индукционной системы (рис.3.3) при токе $I=60$ кА мощность тепловыделения в расплаве составляет 9110 Вт, суммарная отталкивающая сила в расплаве F_r равна 800 Н.

Диаграмма r-компоненты распределенной силы Лоренца на поверхности загрузки представлена на рис.3.4. На диаграмме, близкой к прямой линии, наблюдаются отклонения от требуемых значений на краях.

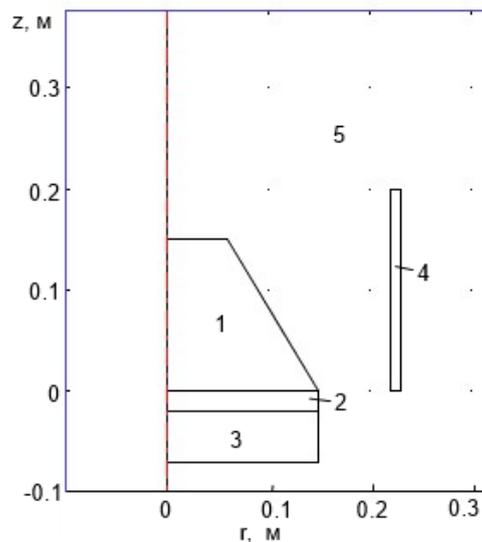


Рис.3.3. Геометрическая модель индукционной системы: 1 – расплав кремния; 2 – подложка; 3 – охладитель; 4 – индуктор; 5 – воздух.

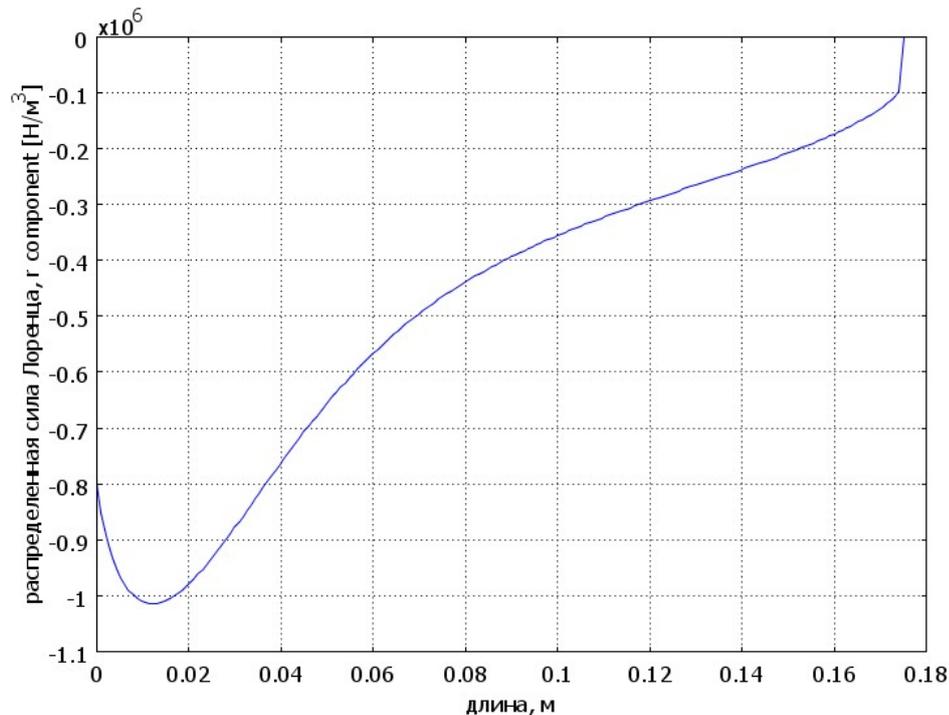


Рис.3.4 Диаграмма плотности силы Лоренца на боковой поверхности загрузки, охладителя и подложки

3.1.2 Определение требуемого гидростатического давления по высоте расплава для формирования цилиндрической формы

Использование цилиндрического вертикально расположенного индуктора для обжата магнитным полем расплава кремния позволяет обеспечить воздушный зазор между стенкой футеровки и расплавом. Возникает проблема переменного гидростатического давления по высоте столба расплава. В самом простом случае можно обеспечить постоянство электромагнитного давления на боковую стенку загрузки при подборе заглубления загрузки, за исключением областей краевых эффектов. Гидростатическое давление расплавленного кремния снижается с максимального значения в нижней части до нуля в верхней части. Разница двух давлений (гидростатического и электромагнитного) при условии постоянства электромагнитной силы по высоте приводит к образованию конической формы расплава, а затем и слитка. Для придания расплаву цилиндрической формы необходимо выполнить расчет параметров индуктора с переменной величиной электромагнитного давления по высоте.

Исходными данными для расчета послужили следующие значения для двух вариантов цилиндрической загрузки диаметром 0,3 и 0,6 м и индуктора (табл.3.1).

Таблица 3.1.

Параметры индуктора и цилиндрической загрузки

Индуктор		
R_u , м	0,22	0,35
H_u , м	0,2	0,2
Цилиндрическая загрузка		
$H_{заг}$, м	0,15	0,3
$R_{заг}$, м	0,15	0,3
V , м ³	0,0106	0,085
$S_{осн}$, м ²	0,07065	0,283
$S_{бок}$, м ²	0,143	0,57
m , кг	24,7	198
$P_{стат}$, Па	3429	6863
$F_{бок}$, Н	490	3912

Здесь: R_u - радиус индуктора; H_u - высота индуктора; $H_{заг}$ - высота загрузки; $R_{заг}$ - радиус загрузки; V - объем цилиндра; m - масса загрузки; $S_{осн}$ - площадь основания цилиндра (загрузки); $S_{бок}$ - площадь боковой поверхности цилиндра (загрузки); $P_{стат} = g \cdot m / S_{осн}$ - гидростатическое давление в основании загрузки; $F_{бок} = P_{стат} \cdot S_{бок}$ - максимальное значение силы на боковую поверхность.

Для обеспечения силы, прилагаемой к стенке расплава и достаточной для создания зазора, электромагнитное давление на расплавленный кремний должно превышать гидростатическое давление столба жидкого металла

$$p = \rho gh. \quad (3.2)$$

Расчетные значения гидростатического давления и боковой силы, обеспечивающие цилиндрическую форму столба расплавленного кремния.

Боковая сила определяется как интегральное значение при переменной величине бокового давления

$$F = \int_0^S P(z) ds = \sum_{n=1}^{50} P_n S. \quad (3.3)$$

Криволинейная форма распределения электромагнитной силы по высоте затрудняет расчет баланса силы тяжести и бокового электромагнитного давления. Это приводит к искажению формы слитка. В этих условиях удобнее произвести дискретизацию загрузки на слои и рассчитывать силы, действующие на каждый слой в отдельности. Для уменьшения погрешности расчета высоту кольцевых участков целесообразно делать небольшой. Площади боковой поверхности колец одинаковы и определяются выражением

$$S = 2\pi rh. \quad (3.4)$$

При разбиении цилиндрической загрузки высотой 0,15 м и радиусом 0,15 м на 10 частей получается десять колец высотой 0,015 м и радиусом 0,15 м. Площадь боковой поверхности каждого кольца равна 0,0143 м².

Для цилиндра диаметром 0,3 м и высотой 0,15 м значения приведены в табл.3.2. В таблице высота цилиндра определяется при вычитании нижнего слоя (слоев). Значения силы F_n^{pez} определены по выражению (3.3) и учитывают высоту столба над рассматриваемым кольцом. В нижней строке значения $F_n^{эм}$ взяты из численного расчета индуктора с разбиением загрузки на десять колец. Боковая сила для нижнего кольца определяется как произведение гидростатического давления всей загрузки на высоту кольца. Таким образом, в обоих расчетах максимальная величина гидростатического давления принята одинаковой. Суммарное значение электромагнитных сил для нижней строки таблицы равно 298,8 Н. (Для сокращения объема представляемого материала параметры индуктора приняты соответствующими результатам поиска из последующих разделов.)

В результате полученное значение меньше, чем суммарная сила, полученная другим способом (484 Н). Отличия значений, приведенных в таблице 3.2 объясняются ступенчатым характером функций и способами расчета.

Учитывая искажения на диаграмме плотности силы, аналогичные показанной на рис.3.4, расчетные значения отталкивающей силы, действующей на расплав по всей длине, за исключением основания, будут больше требуемого. Такой подход, учитывая ограничения в возможностях программы Comsol, позволяет при определении требуемых параметров индуктора брать за основу гидростатическое давление и расчет электромагнитной силы в нижнем кольце загрузки.

Таблица 3.2.

Расчетные значений гидростатического давления и боковой силы в слоях расплава

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$H_n, \text{ м}$	0.15	0.135	0.12	0.105	0.09	0.075	0.06	0.045	0.03	0.015
$P, \text{ Па}$	3768	3425	3083	2740	2398	2055	1370	1028	685	342
$F_n^{pez}, \text{ Н}$	484	392	310	237	174	121	77	44	19	5
$F_n^{эм}, \text{ Н}$	53,9	49	44,1	39,2	34,3	29,4	19,6	14,7	9,8	4,9

Для цилиндра диаметром 0,6 м и высотой 0,3 м значения сил и давлений приведены в табл.3.3. Площадь боковой поверхности нижнего кольца

$$S = 2\pi rh = 6,28 \cdot 0,3 \cdot 0,03 = 0,05652 \text{ м}^2. \quad (3.5)$$

Сила, приложенная к боковой поверхности нижнего кольца, должна быть равна

$$F_1^{эм} = P \cdot S_{\sigma} = 6850 \cdot 0,05652 = 387 \text{ Н}. \quad (3.6)$$

Полученное значение должно быть достигнуто в расчете с помощью программы Comsol.

При задании тока $I_{инд}^1 = 76,9 \text{ кА}$ в одновитковом индукторе получены значения сил в слоях загрузки, которые представлены в табл. 3.3.

При использовании модели индуктора с реальным числом витков ток индуктора $I_{инд}$ определяется с учетом Ампер-витков $I_{инд}^1 = w \cdot I_{инд}$.

Таблица 3.3.

Расчетные значений гидростатического давления и боковой силы в слоях расплава

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$H_n, м$	0.3	0.27	0.24	0.21	0.18	0.15	0.12	0.09	0.06	0.03
$P, Па$	6850	6185	5480	4795	4110	4325	2740	2055	1370	685
$F_n^{рез}, Н$	3872	3136	2478	1897	1394	968	620	349	155	39
$F_n^{эм}, Н$	387	452	432	367	289	217	160	117	84	56

В результате расчета в Comsol получено суммарное значение силы, приложенной к расплаву, равное 2563 Н.

3.1.3 Расчет параметров индуктора конической формы с цилиндрической загрузкой

При проектировании индуктора необходимо соблюдение соотношения глубины проникновения тока к радиусу загрузки 1:3 – 1:4, чтобы коэффициент полезного действия был максимальным. Представленная на рис.3.5 диаграмма соответствует расчету индуктора на частоте 500 Гц при удельном сопротивлении загрузки, равном $\rho = 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{м}$, что соответствует расплавленному кремнию.

В качестве исходной конструкции индуктора служит катушка высотой 0,15 м, что совпадает с высотой загрузки. Исследования влияния длины индуктора (высоты) и угла наклона направляющей конуса показали перспективность применения конической формы с углом наклона направляющей 25 градусов. В расчетах для разных вариантов производилось изменение длины индуктора и сдвига по высоте относительно основания загрузки (рис.3.6). В расчетах подложка принималась неэлектропроводящей.

Во всех вариантах высота индуктора принималась уменьшенной по сравнению с обычными индукторами, где требуется снижение краевых эффектов. Предыдущие расчеты показали сложность в управлении

распределением радиальной составляющей электромагнитной силы в загрузке. Результаты расчета сведены в табл.3.4 и проиллюстрированы на рис. 3.7.

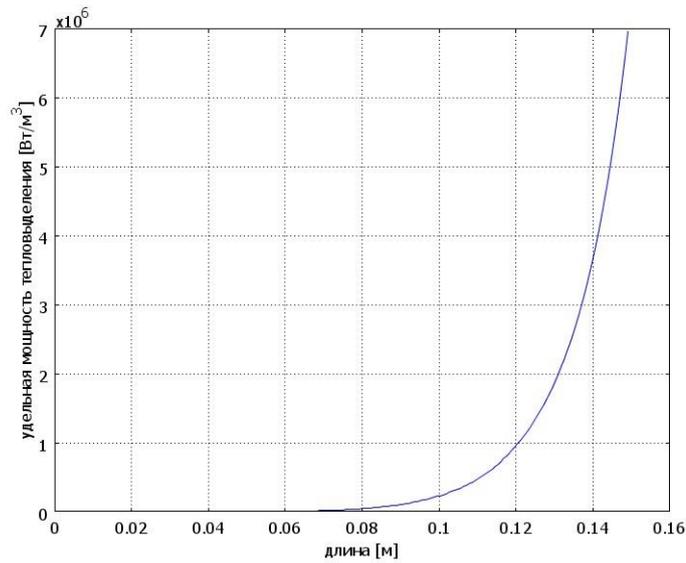


Рис.3.5 Диаграмма распределения удельной мощности по толщине загрузки на линии $z=0,12$ м.

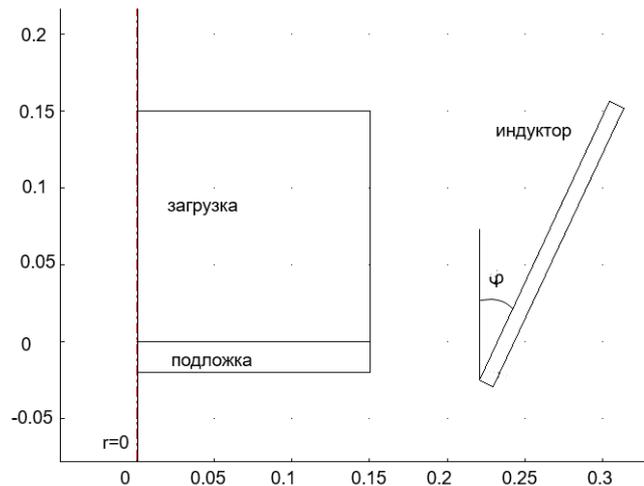


Рис.3.6 Индуктор с загрузкой и подложкой: φ - угол наклона направляющей конуса.

Таблица 3.4

Расчетные значения силы и мощности тепловыделения в расплаве при разной длине индуктора

№	$I_{инд}^1$, кА	φ , град	$L_{инд}$, м	ΔH , м	$P_{загр}$, кВт	F_r , Н
1	60	25	0,2	-0,05	16,6	453
2	60	25	0,2		18,2	509
3	60	25	0,17	-0,02	18,9	527
4	60	25	0,15		20,4	575
5	60	25	0,3	-0,15	10	260

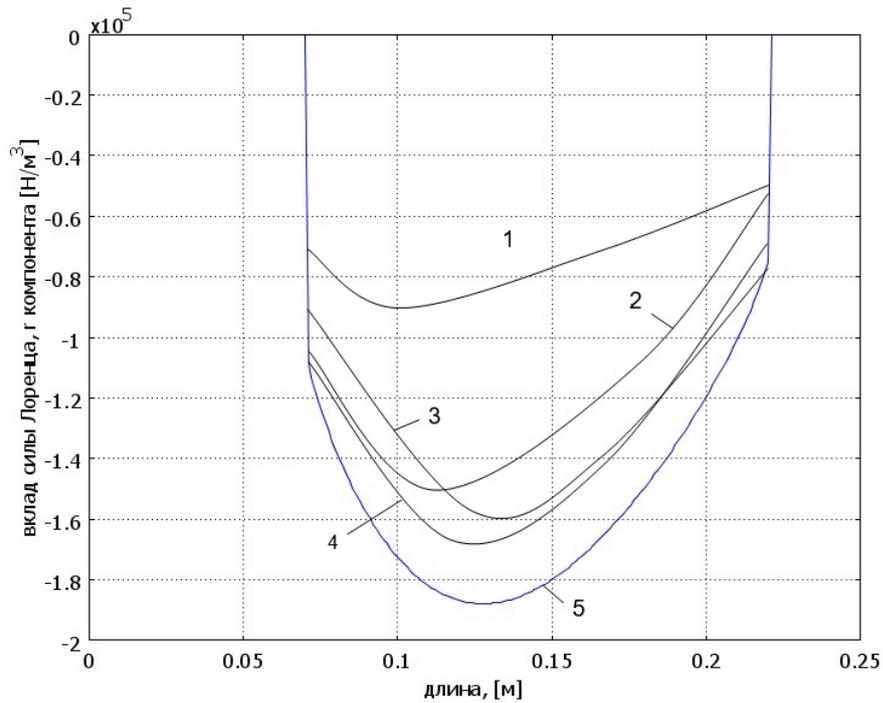


Рис.3.7 Диаграмма вклада силы Лоренца на боковой поверхности загрузки: 1 – длина индуктора 0,3 м, сдвиг по высоте на – 0,15 м; 2 - длина индуктора 0,2 м, сдвиг по высоте на – 0,05 м; 3 - длина индуктора 0,2 м; 4 - длина индуктора 0,17 м, сдвиг по высоте на – 0,02 м; 5 - длина индуктора 0,15 м.

Из представленных расчетов следует, что форма диаграммы очень чувствительна к длине и сдвигу индуктора относительно загрузки. В целом, оценивая форму полученных диаграмм силы по высоте загрузки, можно сказать, что отличие от конической формы очень велико, и достижение получения слитка цилиндрической формы затруднительно.

Расчеты тепловых процессов возможно проводить как совместно с электромагнитной задачей, так и отдельно. В последнем случае для корректного задания источников тепла в загрузке удобно пользоваться диаграммами распределения мощности в загрузке. Для этого при решении электромагнитной задачи выполняется построение диаграммы мощности на поверхности загрузки, как показано на рис.3.8.

На данном этапе значения интегральных сил и амплитуды объемных распределений определены при одинаковой величине тока индуктора. Единственной целью является поиск приемлемого распределения силы по высоте. Учитывая линейный характер задачи, переход к другим значениям

тока может быть выполнен без решения электромагнитной задачи для каждой модели.

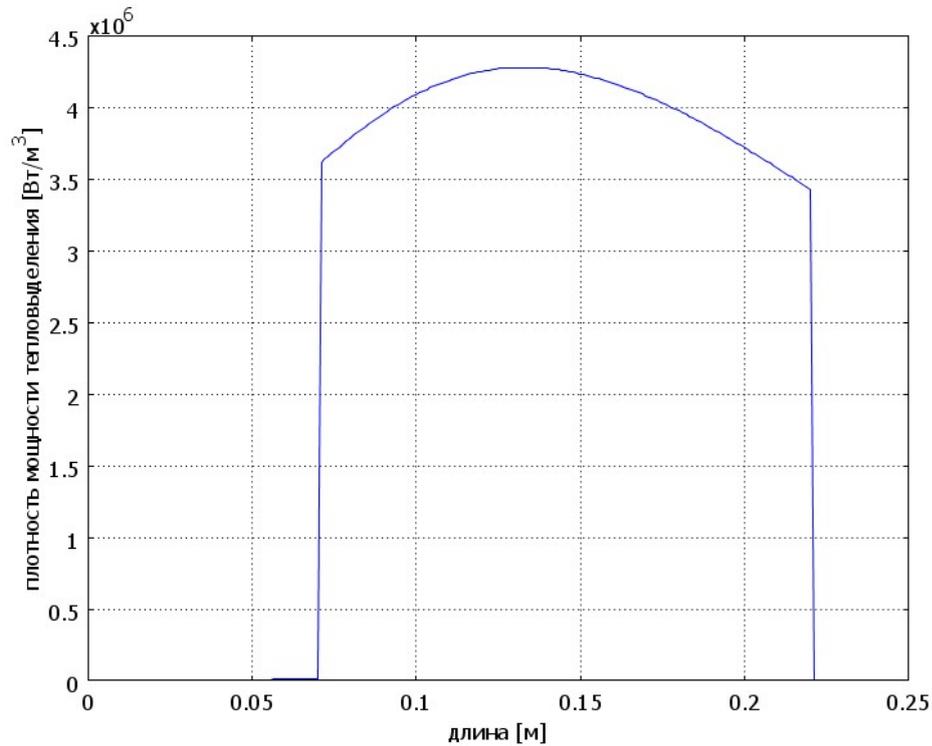


Рис.3.8 Диаграмма удельной мощности тепловыделения на боковой поверхности загрузки при длине индуктора 0,2 м.

В целом, для всех вариантов наблюдается значительное снижение усилия в основании, что объясняется малой длиной индуктора и отсутствием зоны краевых эффектов, которые обычно для немагнитных материалов всегда сопровождаются увеличением мощности. Для варианта с самой большой длиной индуктора ожидаемого эффекта с увеличением силы у основания загрузки не получилось. Объяснение заключается в большом зазоре между индуктором и загрузкой, а также малой электропроводности материала. При таких параметрах магнитная связь между отдельными элементами системы становится менее чувствительной к конструктивным отклонениям.

Для сравнения выполнен расчет индуктора длиной 0,2 м с загрузкой, имеющей электропроводность в 10 раз больше, чем у расплавленного кремния. Диаграмма силы Лоренца на боковой поверхности представлена на рис.3.9.

Полученное распределение силы намного ближе к желаемой форме в виде диаграммы, которая представлена на рис.3.4, хотя искажения и там имеют место.

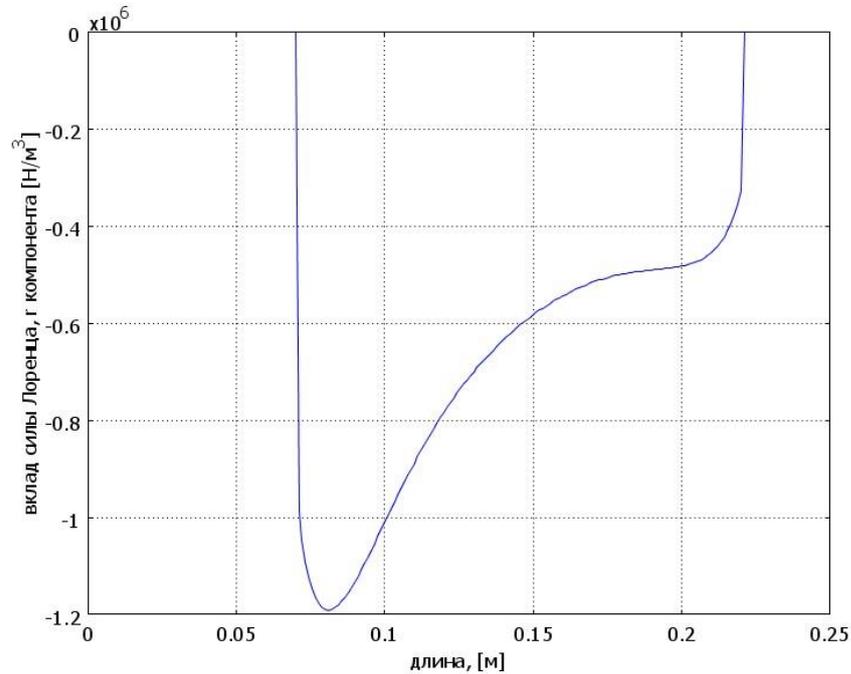


Рис.3.9 Диаграмма плотности силы Лоренца на боковой поверхности загрузки при длине индуктора 0,2 м и сдвиге по высоте на $-0,05$ м.

3.1.4 Исследование влияния параметров подложки на диаграмму распределения силы Лоренца по высоте на поверхности расплава

Проведенные расчеты параметров индуктора конической формы разной длины и смещения относительно загрузки показали, что диаграммы распределения силы Лоренца на боковой поверхности загрузки имеют сложный вид. При кристаллизации расплава это приведет к искривлению вертикальной линии поверхности. Цилиндрическая поверхность будет иметь впадины и выпячивания. С целью выравнивания распределения силы Лоренца по высоте расплава были выполнены расчеты для подложки из электропроводящего материала. Дополнительно исследовано влияние диаметра загрузки вид диаграмм.

Сложная связь между электромагнитными силами, распределенными в объеме расплава, гидростатическим давлением и интегральными силами не позволяет в простой форме сформулировать соотношение между

интегральной силой и амплитудой поверхностной плотности. В геометрическую модель внесены изменения: загрузка разбита по высоте на несколько слоев. Это позволит в последующем анализе найти более корректное соотношение между интегральными и амплитудными значениями. Для оценки влияния геометрических размеров загрузки выполнены расчеты для двух диаметров загрузки – 0,15 м и 0,3 м. Результаты расчетов для загрузки диаметром 0,3 м представлены в табл.3.5 -3.7 и на рис.3.10.

Таблица 3.5

Расчетные значения силы и мощности тепловыделения в расплаве при разной электропроводности подложки

№	R, м	$I_{инд}^1$, кА	σ , См/м	$P_{загр}$, кВт	$P_{подл}$, кВт	F_r , Н
1	0,15	60	10^5	15,6	0,4	377
2	0,15	60	10^6	14,6	3,6	393
3	0,3	40	10^5	23,1	0,6	689
4	0,3	40	10^6	20,1	5	871

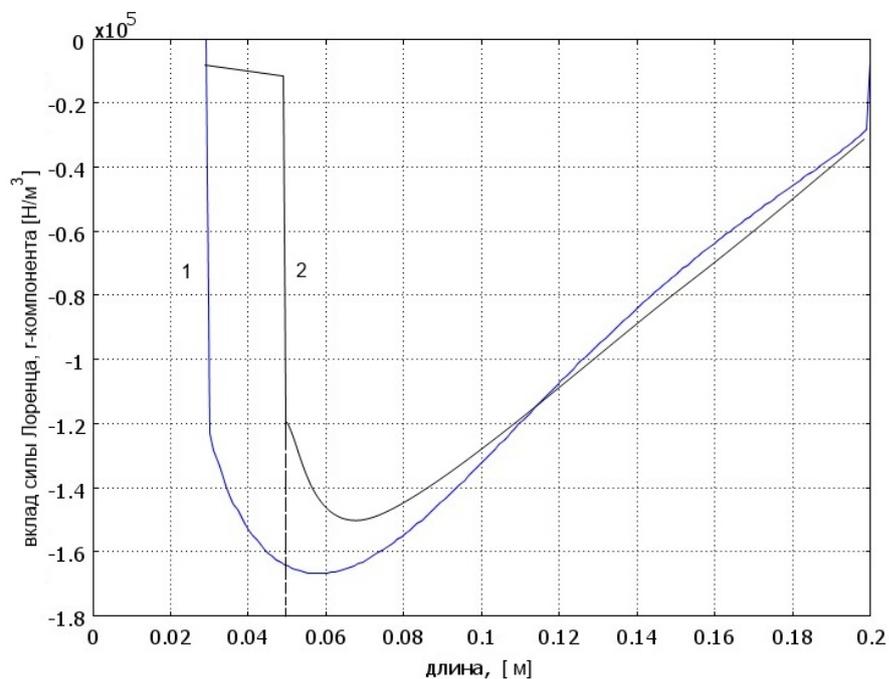


Рис.3.10 Диаграммы плотности силы Лоренца на боковой поверхности загрузки радиусом 0,15 м высотой 0,15 м: 1 – при электропроводности подложки $\sigma = 10^5$ См/м; 2 – при электропроводности подложки $\sigma = 10^6$ См/м.

Из диаграмм сил Лоренца, представленных на рис.3.10, видно улучшение формы по сравнению с предыдущими расчетами (рис.3.7).

(Пунктиром показана граница между основанием расплава и подложкой.) В то же время для значения электропроводности материала подложки $\sigma = 10^5$ См/м в нижней части диаграммы снижение амплитуды составляет также 35%, как и для подложки из диэлектрического материала (рис.3.7). Увеличение электропроводности материала подложки или увеличение длины (высоты) индуктора приводит не только к выравниванию диаграммы в нижней части, но и к значительному увеличению мощности тепловыделения в подложке, что усложняет задачу охлаждения.

Использование для подложки материала с более высокой электропроводностью приводит к уменьшению снижения силы до 25%.

На правом краю диаграмм сила снижается до 18% от максимального значения при значении электропроводности материала подложки $\sigma = 10^5$ См/м и до 21% при значении электропроводности материала подложки $\sigma = 10^6$ См/м.

а) Расчет распределения силы Лоренца в слоях загрузки радиусом 0,15 м высотой 0,15 м при значении электропроводности подложки $\sigma = 10^6$ См/м.

Определены значения боковых сил, давления и мощности тепловыделения для каждого слоя, которые представлены в табл.3.6.

Таблица 3.6

Расчетные значения силы и мощности тепловыделения в расплаве в слоях загрузки

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$F_n^{эм}$, Н	59,6	59,3	55,5	50	43,5	36,9	30,6	24,7	19,2	14,1
P , кПа	4,2	4,1	3,9	3,5	3	2,6	2,1	1,7	1,3	1
$P_{эм}$, кВт	2,5	2,27	2	1,75	1,49	1,26	1,1	0,9	0,75	0,63

Суммарная мощность тепловыделения в загрузке составляет 14,65 кВт, суммарная сила - 393,4 Н.

б) Расчет распределения силы Лоренца в слоях загрузки радиусом 0,15 м высотой 0,15 м при значении электропроводности подложки $\sigma = 10^5$ См/м.

Определены значения боковых сил, давления и мощности тепловыделения для каждого слоя, которые представлены в табл.3.7.

Таблица 3.7.

Расчетные значения давления и боковой силы в слоях расплава

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$F_n^{эм}$, Н	49,9	53,9	52,9	48,9	43,3	37,2	31,1	25,3	19,7	14,5
P , кПа	3,5	3,8	3,7	3,4	3,1	2,6	2,2	1,8	1,4	1
$P_{эм}$, кВт	2,7	2,4	2,1	1,9	1,6	1,3	1,1	0,9	0,8	0,7

Суммарное значение силы в расплаве равно 377 Н, а суммарное значение мощности тепловыделения составляет 15,6 кВт.

Результаты расчетов для загрузки радиусом 0,15 м представлены в табл.3.5, 3.8 и на рис.3.11.

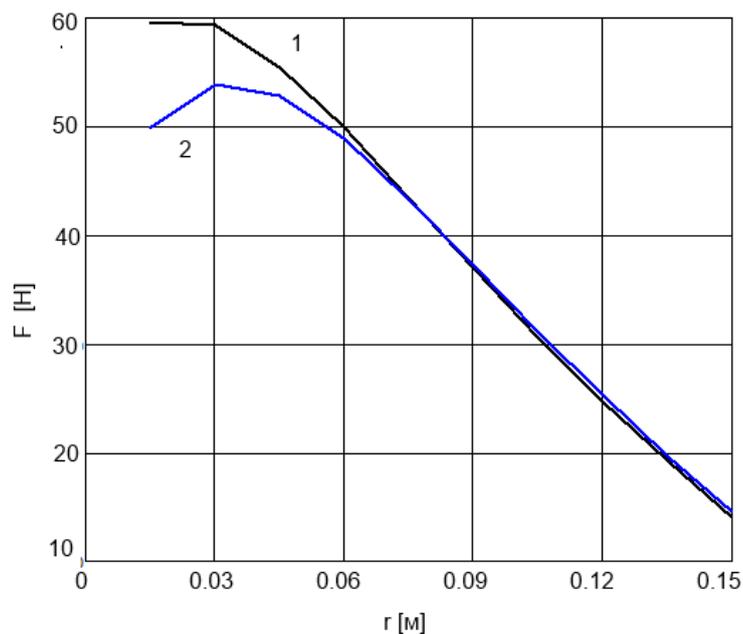


Рис.3.11 Диаграммы распределения сил в расплаве радиусом 0,15 м высотой 0,15 м: 1 – для электропроводности 1000000 См/м; 2 - для электропроводности 100000 См/м.

На диаграммах (рис.3.11) видно, что в начале имеется существенное отклонение от линейной характеристики, свидетельствующее о уменьшении электромагнитной силы в нижней части расплава. Это приведет к увеличению радиуса слитка в нижней части. Кроме того, угол наклона диаграмм не обеспечивает должного уменьшения сил в верхней части, что будет сопровождаться уменьшением радиуса слитка и некоторым удлинением.

Проведены аналогичные расчеты распределения силы Лоренца в слоях загрузки высотой 0,3 м.

с) Расчет распределения силы Лоренца в слоях загрузки высотой 0,3 м радиусом 0,3 м при значении электропроводности подложки $\sigma = 10^5$ См/м.

Необходимое давление и сила Лоренца получены при токе одновиткового индуктора $I_{инд}^1 = 60$ кА. Суммарное значение силы равно 1549 Н, мощность тепловыделения в загрузке составляет 51,9 кВт.

Таблица 3.8.

Расчетные значений давления и боковой силы в слоях расплава

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
F, Н	200	209	205	193	175	156	134	113	93	73
P, кПа	7	7,3	7,17	6,75	6,1	5,45	4,69	3,95	3,25	2,55
$P_{эм}$, кВт	8,8	7,8	6,8	6	5,2	4,5	3,9	3,4	3	2,6

Суммарное значение силы равно 1549 Н, мощность тепловыделения в загрузке составляет 51,9 кВт.

d) Расчет распределения силы Лоренца в слоях загрузки высотой 0,3 м радиусом 0,3 м при значении электропроводности подложки $\sigma = 10^6$ См/м.

Необходимое давление и сила Лоренца получены при токе одновиткового индуктора $I_{инд}^1 = 36,8$ кА. Результаты расчета представлены в таблице 3.9.

Таблица 3.9.

Расчетные значения гидростатического давления и боковой силы в слоях расплава

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
F, Н	203	156	115	85	64,7	51,1	42,8	37,7	33,8	27
P, кПа	7,09	5,45	4,02	2,97	2,26	1,79	1,5	1,32	1,18	0,94
$P_{эм}$, кВт	17,4	11,5	7,96	5,8	4,42	3,5	2,96	2,75	2,89	3,5

Мощность тепловыделения в загрузке равна 62,7 кВт, суммарная сила составляет 818,9 Н.

- е) Расчет распределения силы Лоренца в слоях загрузки высотой 0,3 м радиусом 0,3 м для электропроводности подложки $\sigma = 5 \cdot 10^5$ См/м.

Необходимое давление и сила Лоренца получены при токе одновиткового индуктора $I_{инд}^1 = 34,4$ кА.

Таблица 3.10.

Расчетные значения давления и боковой силы в слоях расплава

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
F, Н	202	161	116,6	82,9	60,7	46,9	38,6	33,8	30,2	24,1
$P_{эм}$, кВт	21,3	13	8,3	5,6	4,1	3,2	2,7	2,5	2,6	3,1

Мощность тепловыделения в загрузке равна 66,3 кВт, суммарная сила составляет 797 Н.

- ф) Расчет распределения силы Лоренца в слоях загрузки радиусом 0,15 м высотой 0,3 м для электропроводности подложки $\sigma = 5 \cdot 10^5$ См/м в индукторе длиной 0,25 м и смещением -0,04 м.

Расчет выполнен при токе одновиткового индуктора $I_{инд}^1 = 128$ кА.

Таблица 3.11.

Расчетные значения давления и боковой силы в слоях расплава

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
F, Н	402	432	406	353	290	228	173	127	89	56
$P_{эм}$, кВт	15,4	14,5	12,8	10,8	8,7	6,8	5,2	3,9	3	2,3
W, Вт / м ³	1,3e7	1,2e7	1,1e7	9,1e6	7,3e6	5,7e6	4,4e6	3,3e6	2,5e6	1,9e6

Мощность тепловыделения в загрузке равна 83,1 кВт, суммарная сила составляет 2556 Н.

- г) Расчет распределения силы Лоренца в слоях загрузки радиусом 0,3 м высотой 0,3 м для электропроводности подложки $\sigma = 9 \cdot 10^5$ См/м в индукторе длиной 0,25 м и смещением -0,04 м.

Расчет выполнен при токе одновиткового индуктора $I_{инд}^1 = 47$ кА.

Таблица 3.12.

Расчетные значений гидростатического давления и боковой силы в слоях расплава

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
F, Н	405	296	227	179	137	101	72	52	43	37
$P_{эм}$, кВт	32,4	20,5	15,9	12,7	9,7	7,1	5	3,6	3	4
W, Вт / м ³	1,2e7	7,9e6	6,1e6	4,9e6	3,7e6	2,7e6	1,9e6	1,4e6	1,2e6	1,5e6

Мощность тепловыделения в загрузке равна 114,1 кВт, суммарная сила составляет 1551 Н.

Результаты расчетов проиллюстрированы в виде диаграмм плотности силы по высоте боковой поверхности расплава (рис.3.12).

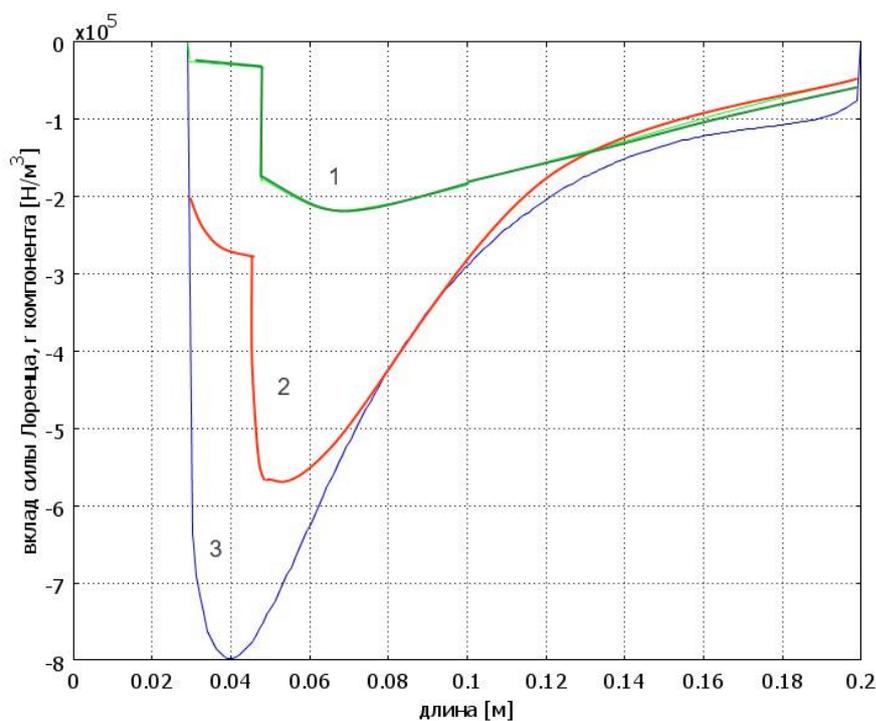


Рис.3.12 Диаграммы плотности силы Лоренца на боковой поверхности загрузки радиусом 0,3 м высотой 0,15 м при электропроводности подложки: 1 - $\sigma = 10^5$ См/м; 2 - $\sigma = 5 \cdot 10^5$ См/м; 3 - $\sigma = 10^6$ См/м.

Как видно из диаграмм, наблюдается нелинейная зависимость плотности силы от аксиальной координаты. Как и в предыдущем случае с радиусом загрузки, равным 0,15 м, отсутствуют варианты, полностью удовлетворяющие одновременно требованиям линейного характера зависимости и снижения силы в верхней части слитка.

Дополнительно к диаграммам, полученным в ходе решения задачи, построены диаграммы распределения интегральных значений сил, приложенных к слоям расплава (рис.3.13).

Исследования показали более высокую степень приближения диаграммы силы Лоренца по высоте загрузки для загрузки радиусом 0,3 м. Это позволяет обеспечить большую производительность кристаллизатора.

Увеличение диаметра загрузки до 0,6 м показало более сильное влияние удельного сопротивления подложки на форму диаграмм на начальном участке (рис.3.13).

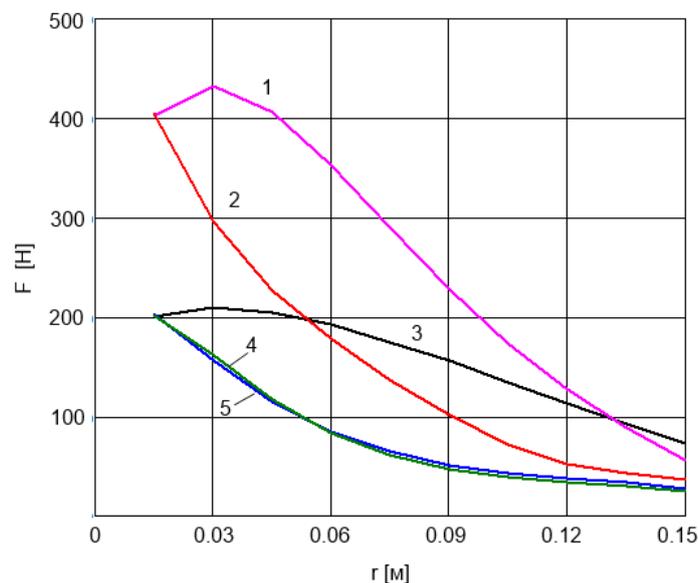


Рис.3.13 Диаграммы распределения силы Лоренца на боковой поверхности загрузки:
 1 - радиус 0,15 м, высота 0,3 м, электропроводность подложки $\sigma = 5 \cdot 10^5$ См/м, индуктор длиной 0,25 м со смещением -0,04 м; 2 - радиус 0,3 м, высота 0,3 м, электропроводность подложки $\sigma = 9 \cdot 10^5$ См/м, индуктор длиной 0,25 м со смещением -0,04 м; 3 - радиус 0,3 м, высота 0,3 м, электропроводность подложки $\sigma = 10^5$ См/м; 4 - радиус 0,3 м, высота 0,3 м, электропроводности подложки $\sigma = 5 \cdot 10^5$ См/м; 5 - радиус 0,3 м, высота 0,3 м, электропроводность подложки $\sigma = 10^6$ См/м.

Применение в качестве подложки стали с таким же удельным сопротивлением, как у расплавленного кремния ($\sigma = 10^6$ См/м), привело к значительному увеличению силы тока и силы Лоренца в левой части, что соответствует основанию загрузки. Фактически, загрузка и подложка превратились в единое целое, что способствует формированию яркого краевого эффекта. Последующее снижение силы на правом краю диаграмм

(основание загрузки) по отношению к максимальному значению происходит по нелинейному закону.

Для материала подложки при значении электропроводности $\sigma = 10^5$ См/м зависимость силы от высоты имеет более близкую к прямой линии форму.

На правом краю диаграмм сила снижается до 21% от максимального значения при значении электропроводности материала подложки $\sigma = 10^5$ См/м и до 26% при значении электропроводности материала подложки $\sigma = 10^6$ См/м. Таким образом, улучшение соотношения сил в нижней части боковой поверхности сопровождается ухудшением соотношения сил в верхней части.

Расчеты для индукторов с различными геометрическими параметрами показали сложность формирования линейного распределения силы Лоренца по высоте загрузки. Выявлена нецелесообразность использования индукторов большой длины, так как вид краевых эффектов при больших зазорах между индуктором и загрузкой, особенно при конической форме, проявляются в отличающейся от известного вида форме (должно наблюдаться увеличение плотности тока на краях загрузки).

Увеличение производительности кристаллизатора при большей высоте слитка приводит к необходимости повышения мощности индуктора. При кристаллизации слитка радиусом 0,15 м мощность тепловыделения составляет 15 кВт, а для слитка радиусом 0,3 м она увеличивается до 50 – 100 кВт.

3.1.5 Определение формы расплава под воздействием электромагнитных сил

Проведенные исследования по формированию заданного распределения электромагнитной силы вдоль боковой поверхности расплава кремния показали, что обеспечить полное совпадение заданного и фактического распределения по высоте не представляется возможным при существующих ограничениях на форму индуктора, ширину проводника, количество каналов

управления. Теоретически, даже применение нескольких одновитковых индукторов, управляемых автономно, не решает проблему полностью. Поэтому представляет интерес оценка влияния получаемого распределения усилий по высоте на форму расплава.

По результатам расчетов, приведенным в табл.3.6-3.12, величины электромагнитных сил, приложенным к слоям превышают заданную величину до 30%, что приводит к изменению радиальной координаты в каждом слое загрузки. Радиальная координата на каждом слое уменьшается или увеличивается до выравнивания заданных и расчетных сил.

Алгоритм расчета формы расплава строится на последовательном приближении электромагнитной силы, действующей на рассматриваемый слой, к силе тяжести, действующей на рассматриваемый слой, путем коррекции радиуса слоя. Учитывая, что любые изменения геометрических размеров или величины тока индуктора приводят к перераспределению сил в слоях и общей мощности тепловыделения в расплаве, итерационная процедура содержит несколько шагов, пока не будет достигнуто заданное отклонение силы в каждом слое. В проведенных расчетах было принято отклонение, равное 5%.

В качестве исходных данных были приняты следующие параметры индукционных систем (табл.3.6-3.12):

- высота индуктора 0,12 м; смещение индуктора относительно основания загрузки -0,06 м; материал подложки – медь; угол наклона стенки индуктора 0.
- высота индуктора 0,08 м; смещение индуктора относительно основания загрузки -0,03 м; материал подложки - медь; угол наклона стенки индуктора 30 градусов
- высота индуктора 0,10 м; -0,06 м смещение индуктора относительно основания загрузки -0,06 м; материал подложки - медь; угол наклона стенки индуктора 30 градусов;

- высота индуктора 0,08 м; смещение индуктора относительно основания загрузки -0,06 м; материал подложки - нержавеющей сталь; угол наклона стенки индуктора 30 градусов;
- высота индуктора 0,10 м; смещение индуктора относительно основания загрузки -0,06 м; материал подложки - нержавеющей сталь; угол наклона стенки индуктора 30 градусов
- высота индуктора 0,12 м; смещение индуктора относительно основания загрузки -0,06 м; материал подложки - нержавеющей сталь; угол наклона стенки индуктора 0.

Частота напряжения для всех вариантов равна 500 Гц.

а) Расчет параметров индуктора конической формы с углом наклона стенки 30 градусов

- длина индуктора 0,12 м;
- смещение индуктора -0,06 м;
- материал подложки – шамот;
- радиус расплава 0,15 м;
- высота расплава (включая нижний твердый слой) 0,15 м.

Ток однофазного индуктора $I_{инд}^1 = 60$ кА.

Результаты расчета представлены в таблице 3.13.

Таблица 3.13

Параметры индукционной системы с переменным радиусом загрузки

Слои	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
h	0,015	0,03	0,045	0,06	0,075	0,09	0,105	0,12	0,135	0,15
$F_{зд}$, Н	0	43,6	38,8	33,9	29	24	19,4	14,5	9,7	4,8
F_p , Н	3,1	44,1	40,8	38,6	33,6	26,1	23,5	16,3	10,7	5,2
$P_{зд}$, Вт	432,6	4578	4037	3228	2454	1833	1395	1129	1009	1021
P_p , Вт	477	4340	3270	2887	2426	1847	1710	1211	889	621
ΔF , %		-1	-5	-14	-16	-9	-21	-12	-10	-8
ΔP , %	-10	5	19	11	1	-1	-23	-7	12	39

Таблица 3.16

Заданные и расчетные параметры слоев расплава – шаг 2

F_{30}, H	0	43,6	38,8	33,9	29	24	19,4	14,5	9,7	4,8
$R_{p,n-1}, \text{M}$	0,15	0,145	0,142	0,142	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,13
$F_{p,n}, \text{H}$	3,7	37,5	36,7	36,5	31,8	28,5	24,5	20,4	16,4	8,6
$R_{p,n}$		0,148	0,143	0,141	0,138	0,137	0,135	0,135	0,13	0,125

Таблица 3.17

Заданные и расчетные параметры слоев расплава – шаг 3

F_{30}, H	0	43,6	38,8	33,9	29	24	19,4	14,5	9,7	4,8
$R_{p,n-1}, \text{M}$	0,15	0,148	0,143	0,141	0,138	0,137	0,135	0,135	0,13	0,125
$F_{p,n}, \text{H}$	3,5	41,4	38,1	35,6	30,1	26,3	21,2	17,9	12	7,5
$R_{p,n}, \text{M}$	0,15	0,149	0,144	0,14	0,137	0,135	0,132	0,131	0,125	0,12

Таблица 3.18

Заданные и расчетные параметры слоев расплава – шаг 4

F_{30}, H	0	43,6	38,8	33,9	29	24	19,4	14,5	9,7	4,8
$R_{p,n-1}, \text{M}$	0,15	0,149	0,144	0,14	0,137	0,135	0,132	0,131	0,125	0,12
$F_{p,n}, \text{H}$	3,5	42,7	38,5	34,5	29,4	24,8	19,4	15,8	10,3	6,4
$R_{p,n}, \text{M}$	0,15	0,151	0,145	0,139	0,137	0,134	0,132	0,128	0,123	0,115

Таблица 3.19

Заданные и расчетные параметры слоев расплава – шаг 5

F_{30}, H	0	43,6	38,8	33,9	29	24	19,4	14,5	9,7	4,8
$R_{p,n-1}, \text{M}$	0,15	0,151	0,145	0,139	0,137	0,134	0,132	0,128	0,123	0,115
$F_{p,n}, \text{H}$	3,5	45,3	40,7	33,2	29,4	24	19,5	14,3	9,6	5,3
$R_{p,n}, \text{M}$	0,15	0,1505	0,1445	0,1395	0,1365	0,134	0,1315	0,1285	0,1235	0,112

Таблица 3.20

Заданные и расчетные параметры слоев расплава – шаг 6

F_{30}, H	0	43,6	38,8	33,9	29	24	19,4	14,5	9,7	4,8
$R_{p,n-1}, \text{M}$	0,15	0,1505	0,1445	0,1395	0,1365	0,134	0,1315	0,1285	0,1235	0,112
$F_{p,n}, \text{H}$	3,5	44,7	40,1	33,9	28,9	24	19,2	14,5	9,8	4,6
$R_{p,n}, \text{M}$	0,15	0,1495	0,144	0,1395	0,1365	0,134	0,1315	0,1285	0,1235	0,112

Таблица 3.21

Заданные и расчетные параметры слоев расплава – шаг 7

$F_{30}, \text{Н}$	0	43,6	38,8	33,9	29	24	19,4	14,5	9,7	4,8
$R_{p,n-1}, \text{м}$	0,15	0,1495	0,144	0,1395	0,1365	0,134	0,1315	0,1285	0,1235	0,112
$F_{p,n}, \text{Н}$	3,5	43,4	39,5	34	29	24	19,2	14,6	9,8	4,64
$R_{p,n}, \text{м}$	0,15	0,1496	0,1435	0,1395	0,1365	0,134	0,1317	0,1284	0,1234	0,113

Таблица 3.22

Заданные и расчетные параметры слоев расплава – шаг 8

$F_{30}, \text{Н}$	0	43,6	38,8	33,9	29	24	19,4	14,5	9,7	4,8
$R_{p,n-1}, \text{м}$	0,15	0,1496	0,1435	0,1395	0,1365	0,134	0,1317	0,1284	0,1234	0,113
$F_{p,n}, \text{Н}$	3,5	43,6	38,9	34	29	24	19,3	14,5	9,8	4,8
$\Delta F, \%$	0	0	-0,25	-0,29	0	0	-0,5	0	1	0
$\Delta R, \%$	0	-0,2	-4,3	-7	-9	-10,7	-12,2	-14,4	-17,7	-24,6

F_{30} - заданное значение радиальной составляющей силы, Н;

F_p - расчетное значение радиальной составляющей силы, Н;

R_p - расчетное значение радиуса слоя загрузки, м;

P_{30} - заданное значение мощности тепловыделения в слое загрузки, Вт;

P_p - расчетное значение мощности тепловыделения в слое загрузки, Вт;

ΔF – соотношение заданного и расчетного значений силы в слое загрузки, %

ΔR – соотношение заданного и расчетного радиуса слоя загрузки, %;

ΔP – соотношение заданного и расчетного значений мощности тепловыделения в слое загрузки, % .

Полученное приближение к заданному распределению силы не превышает одного процента. При этом итоговые значения радиусов слоев отличаются от заданного на 0,2% – 24,6%. Минимальное отклонение радиуса получено в нижней части слитка, а максимальное в верхней части. Форма расплава в соответствии с полученными значениями радиусов показана на рис.3.14.

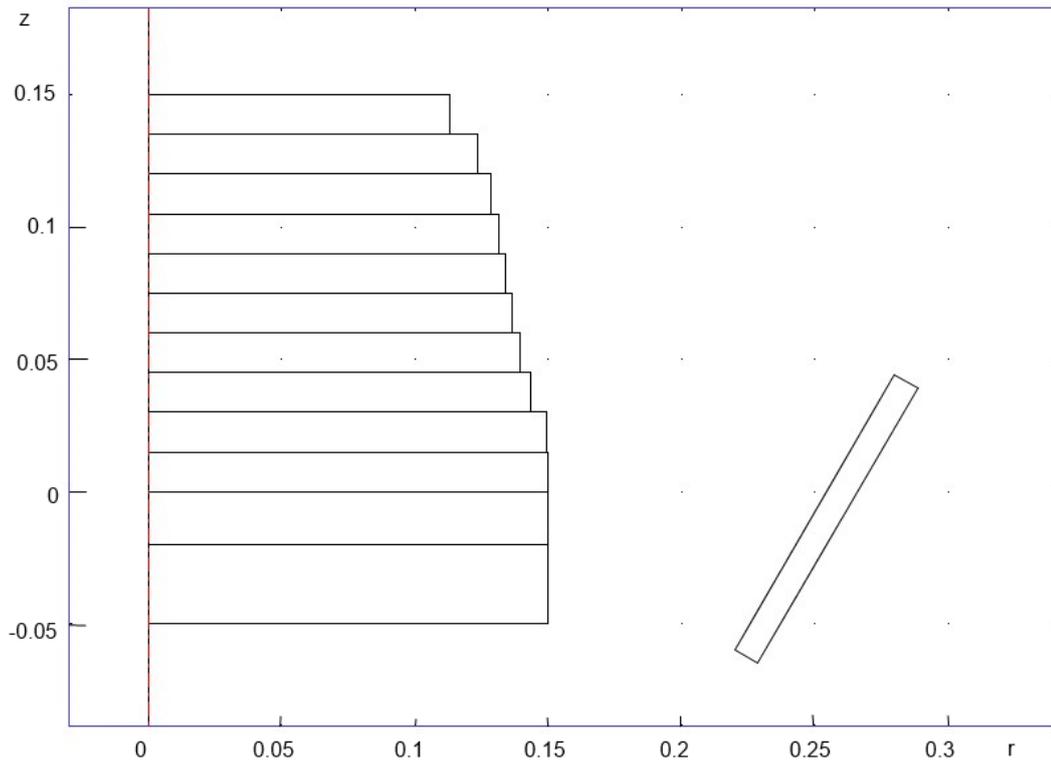


Рис.3.14 Геометрическая модель расплава кремния в индукторе с учетом воздействия электромагнитных сил

Расчеты выполнены без учета увеличения высоты расплава из-за уменьшения радиуса верхних слоев.

б) Расчет параметров индуктора конической формы

- длина индуктора 0,08 м;
- Смещение индуктора на $-0,03$ м;
- Угол наклона стенки индуктора 30 градусов;
- материал подложки – медь.

После коррекции формы загрузки ток одновиткового индуктора $I_{инд}^1 = 27,2$ кА.

Результаты расчета приведены в таблице 3.23.

Таблица 3.23

Параметры индукционной системы с переменным радиусом загрузки

Слои	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
h	0,015	0,03	0,045	0,06	0,075	0,09	0,105	0,12	0,135	0,15
F_{30} , Н	0*	43,6	38,8	33,9	29	24	19,4	14,5	9,7	4,8
F_{p0} , Н	2,9	44,5	42,9	37,9	33,9	25,8	21,7	15,2	11	5,2
R_p , м	0,15	0.1495	0.1481	0.148	0.149	0.148	0.148	0.145	0.143	0.135
P_{30} , Вт	410	4268	3725	2979	2301	1781	1428	1234	1181	1274
P_p , Вт	432	4390	3459	2808	2449	1826	1558	1127	996	662
ΔF , %		-2	-11	-12	-17	-8	-12	-5	-20	-8
ΔR , %		0	1	1	1	1	1	3	5	10
ΔP , %		-3	7	6	-6	-3	-9	9	16	48

с) Расчет параметров индуктора конической формы:

- длина индуктора 0,10 м;
- смещение индуктора $-0,06$ м;
- угол наклона стенки индуктора 30 градусов;
- материал подложки – медь.

После коррекции формы загрузки ток одновиткового индуктора $I_{инд}^1 = 40$ кА.

Результаты расчета приведены в таблице 3.24.

Таблица 3.24

Параметры индукционной системы с переменным радиусом загрузки

Слои	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
h	0,015	0,03	0,045	0,06	0,075	0,09	0,105	0,12	0,135	0,15
F_{30} , Н	0*	43,6	38,8	33,9	29	24	19,4	14,5	9,7	4,8
F_{p0} , Н	3	46,2	38,2	33	33,4	27	22,5	15,8	10,6	4,9
R_p , м	0,15	0,15	0,147	0,147	0,15	0,15	0,15	0,147	0,143	0,135
P_{30} , Вт	435	4341	3656	2848	2166	1670	1349	1184	1158	1280
P_p , Вт	459	4671	3076	2422	2431	1937	1639	1192	917	632
ΔF , %		-6	2	3	-15	-13	-16	-9	-9	-2
ΔR , %		0	2	2	0	0	0	2	5	10
ΔP , %	-6	-8	16	15	-12	-16	-21	-1	21	51

* - сила в нижнем слое твердого кремния (подложка) не нормируется.

d) Расчет параметров индуктора конической формы:

- длина индуктора 0,08 м;
- смещение индуктора $-0,06$ м;
- угол наклона стенки индуктора 30 градусов;

- материал подложки – нержавеющая сталь.

После коррекции формы загрузки ток одновиткового индуктора $I_{инд}^1 = 30,46$ кА.

Результаты расчета представлены в таблице 3.25.

Таблица 3.25

Параметры индукционной системы с переменным радиусом загрузки

Слои	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
h	0,015	0,03	0,045	0,06	0,075	0,09	0,105	0,12	0,135	0,15
F_{p0} , Н	3,3	43,6	41,5	33,4	25,4	19,2	15	12,5	10,5	8
$F_{з0}$, Н	0*	43,6	38,8	33,9	29	24	19,4	14,5	9,7	4,8
R_m , м	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15
$R_{pм}$	0,15	0,15	0,15	0,15	0,153	0,153	0,153	0,15	0,15	0,145
$P_{з0}$, Вт	485	4346	3385	2483	1801	1338	1051	903	870	951
P_p , Вт	479	4248	3259	2348	2163	1599	1260	859	850	679
ΔF , %		1	-3	6	-2	4	7	17	-3	-15
ΔR , %	0,000	0	0	0	-2	-2	-2	0	0	3
ΔP , %	1	2	4	5	-20	-20	-20	5	2	29

е) Расчет параметров индуктора конической формы:

- длина индуктора 0,10 м.
- смещение индуктора на $-0,06$ м.
- угол наклона стенки индуктора 30 градусов;
- материал подложки – нержавеющая сталь.

После коррекции формы загрузки ток одновиткового индуктора $I_{инд}^1 = 37,5$ кА.

Результаты расчета приведены в таблице 3.26.

Таблица 3.26

Параметры индукционной системы с переменным радиусом загрузки

Слои	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
h	0,015	0,03	0,045	0,06	0,075	0,09	0,105	0,12	0,135	0,15
F_{p0} , Н	3,2	43,4	42,5	35,2	27,5	21,5	17,3	14,6	12,5	9,6
F_{30} , Н	0*	43,6	38,8	33,9	29	24	19,4	14,5	9,7	4,8
F_{pn} , Н	3,2	43,6	42,8	35,7	28,3	22,5	18,5	15,9	10,5	5
R_p , м	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,146	0,139
P_{30} , Вт	465	4283	3443	2609	1954	1495	1204	1056	1032	1140
P_p , Вт	467	4304	3469	2645	2007	1573	1314	1200	899	647
ΔF , %		0	-10	-5	2	6	5	-10	-8	-4
ΔR , %	0,000	0	0	0	0	0	0	0	3	7
ΔP , %	0	0	-1	-1	-3	-5	-9	-14	13	43

f) Расчет параметров индуктора конической формы:

- длина индуктор 0,12 м;
- смещение индуктора $-0,06$ м;
- материал подложки – нержавеющая сталь.

После коррекции формы загрузки ток одновиткового индуктора $I_{инд}^1 = 35,7$ кА.

Результаты расчета приведены в таблице 3.27.

Таблица 3.27

Параметры индукционной системы с переменным радиусом загрузки

Слои	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
h	0,015	0,03	0,045	0,06	0,075	0,09	0,105	0,12	0,135	0,15
F_p , Н	3	43,6	44,7	37,9	29,6	22,4	17,1	13,4	10,6	7,8
F_{30} , Н	0	43,6	38,8	33,9	29	24	19,4	14,5	9,7	4,8
R'_m , м	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15
R_p , м	0,15	0,15	0,147	0,15	0,15	0,152	0,153	0,15	0,148	0,143
P_{30} , Вт	435,3	4264	3602	2812	2111	1568	1191	963	861	872
P_p , Вт	447	4402	2858	2857	2124	1867	1548	991	778	578
ΔF , %		-2	7	-12	0	-8	-8	6	2	-2
ΔR , %	0,000	0	2	0	0	-1	-2	0	1	5
ΔP , %	-3	-3	21	-2	-1	-19	-30	-3	10	34

Результирующие распределения интегральных сил, приложенных к слоям расплава, сведены в таблицу 3.15.

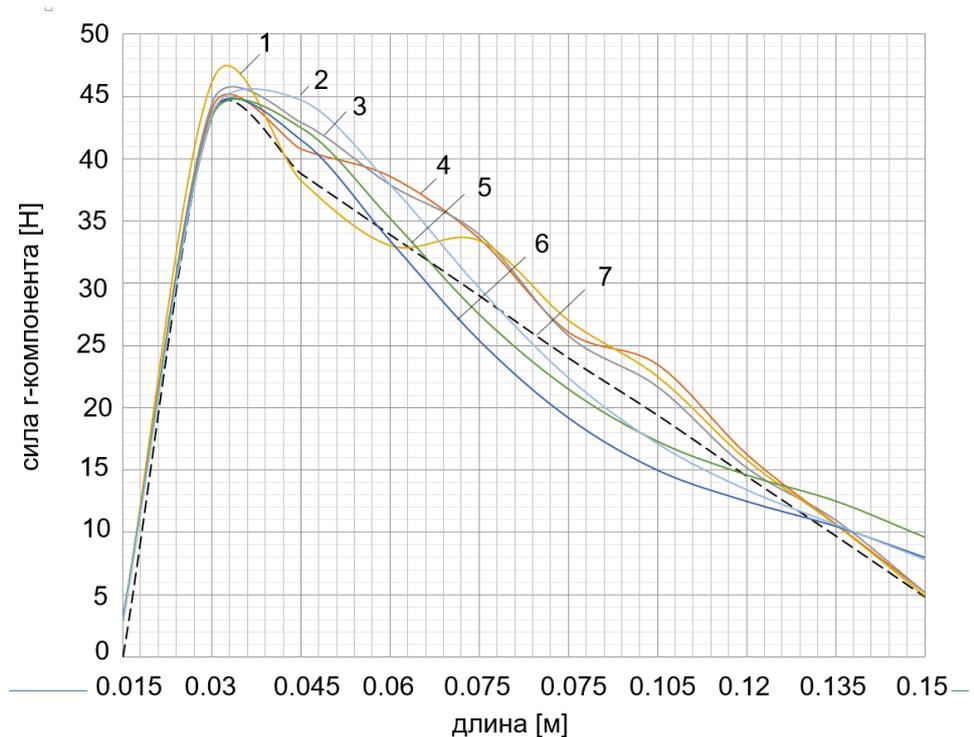


Рис.3.15 Диаграммы распределения сил по высоте боковой поверхности:
 1 – высота индуктора 0,1 м; смещение -0,06 м; подложка – медь; 2 – высота индуктора 0,12 м; смещение -0,06 м; подложка – сталь; 3 – высота индуктора 0,08 м; смещение -0,03 м; подложка – медь; 4 – высота индуктора 0,12 м; смещение -0,06 м; подложка – медь; 5 – высота индуктора 0,1 м; смещение -0,06 м; подложка – сталь; 6 – высота индуктора 0,08 м; смещение -0,06 м; подложка – сталь; 7 – заданное распределение.

Из диаграмм видно, что отталкивающие усилия ближе к заданным значениям в нижней части загрузки, а затем происходит увеличение отклонения. Подтверждением сказанному служат диаграммы отклонения формы слитка от цилиндра, представленные на рис. 3.16.

Для выбранных шести моделей в процессе литья жидкого кремния в индукционных кристаллизатор происходит изменение формы согласно рисунку 3.14. Отклонение от цилиндрической формы происходит не более чем на 10-15%. Данное изменение формы соответствует моменту времени до начала кристаллизации кремния.

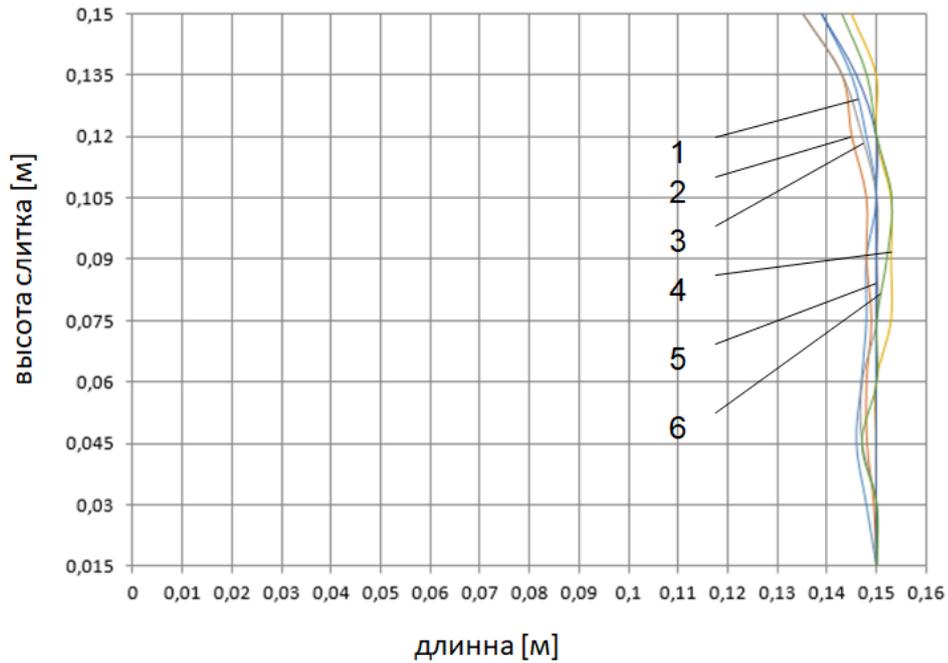


Рис.3.16 Диаграммы распределения радиуса боковой поверхности расплава с учетом электромагнитных сил: 1 – высота индуктора 0,12 м; смещение -0,06 м; подложка – медь; 2 – высота индуктора 0,08 м; смещение -0,03 м; подложка – медь; 3 – высота индуктора 0,10 м; смещение -0,06 м; подложка – медь; 4 – высота индуктора 0,08 м; смещение -0,06 м; подложка – нержавеющая сталь; 5 – высота индуктора 0,10 м; смещение -0,06 м; подложка – нержавеющая сталь; 6 – высота индуктора 0,12 м; смещение -0,06 м; подложка – нержавеющая сталь;

3.1.6 Определение вертикальной составляющей электромагнитной силы в расплаве

В цилиндрических индукторах продольная составляющая электромагнитной силы в загрузке возникает из-за переменных по длине физических свойств. Яркий пример – втягивание холодных ферромагнитных заготовок и выталкивание горячих. Величина таких усилий недостаточна, чтобы заготовки начали самостоятельно перемещаться по направляющим. В плавильных индукторах загрузка имеет форму ограниченного конуса, что приводит к проявлению вертикальных сил, перемешивающих расплав. В исследуемом электромагнитном кристаллизаторе коническую форму имеет сам индуктор, что также приводит к проявлению продольных усилий.

На рис.3.17 показаны две диаграммы распределения силы Лоренца на боковой поверхности расплава: F_z – вдоль оси z ; F_r – вдоль оси r .

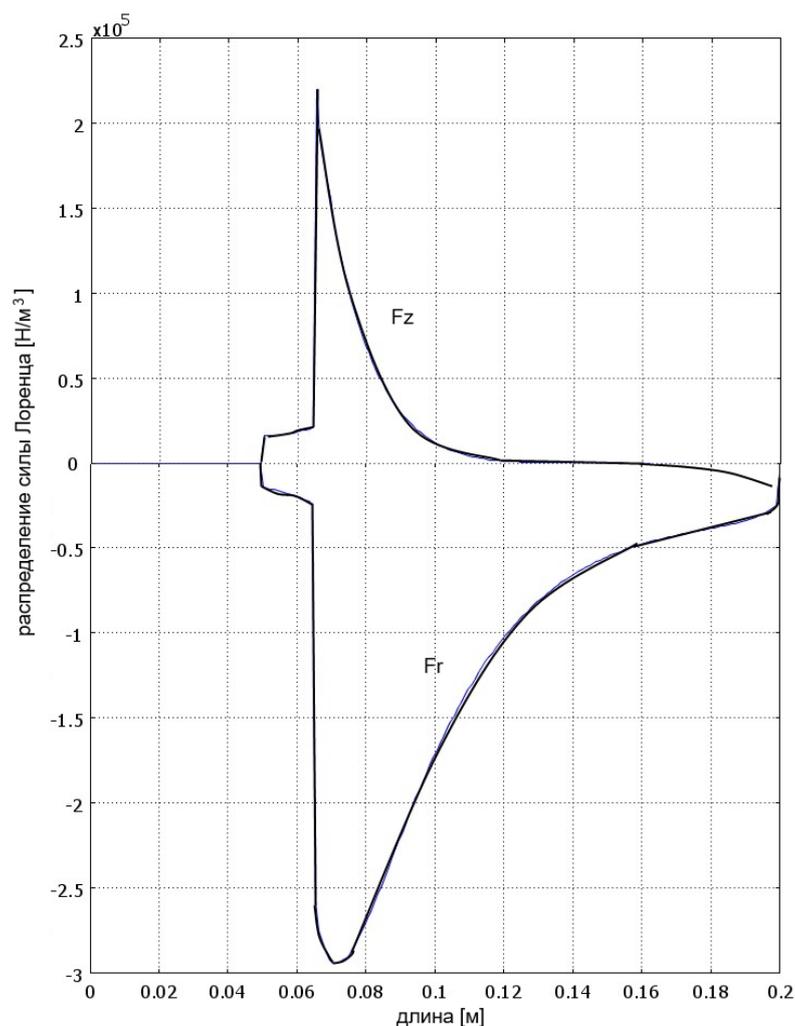


Рис.3.17 Диаграммы распределения составляющих силы Лоренца вдоль осей z и r

В качестве примера взят вариант с полностью жидким расплавом. Высота слитка 0,15 м, радиус слитка 0,15 м.

Из рисунка видно, что диаграмма вдоль оси z имеет более узкую зону, где наблюдаются существенные силы. Картина не отражает распределения сил по объему расплава. Интегральное значение вдоль оси z равно 88 Н, а вдоль оси r -193 Н.

Воздействие силы F_z на расплав проявляется в формировании процесса перемешивания. Для подъема расплава этой силы недостаточно, так как вес значительно больше. Перемешивание расплава способствует переносу тепла между различными областями. Это явление могло бы замедлить процесс кристаллизации, но в данном случае нижние слои охлаждаются интенсивнее

верхних и служить источником тепла для верхних слоев не могут, хотя мощность тепловыделения в них больше.

Численная оценка процесса переноса жидкости и теплоты требует применения мультифизической модели, содержащей электромагнитную, тепловую и гидродинамическую модели, что представляет очень сложную задачу в вычислительном плане. Для получения ответа на этот вопрос предстоит выполнить эксперимент на разрабатываемой установке, чтобы скорректировать параметры системы управления, если в этом появится необходимость.

3.2 Моделирование тепловых процессов при кристаллизации расплава кремния в условиях подогрева внутренними источниками

Основное внимание при моделировании процессов было уделено достижению требуемого распределения электромагнитных сил. Однако, процесс кристаллизации возможен только при условии эффективного охлаждения. Отвод тепла осуществляется через основание загрузки посредством потоков, обусловленных теплопроводностью, а также тепловых потоков с боковой и верхней поверхностей, обусловленных, в основном, излучением.

В основании загрузки предусмотрено принудительное охлаждение с помощью катушки из медной трубки, по которой циркулирует вода. Катушка плотно прилегает к основанию нижней части теплоизоляции. Несмотря на низкое значение коэффициента теплопроводности теплоизолирующего слоя процесс охлаждения слитка протекает успешно при разных значениях коэффициента теплообмена между основанием и охладителем. Даже при значении коэффициента теплообмена, равном $100 \text{ Вт}/(\text{м}^2\text{град})$, что обеспечивается при принудительном воздушном, а не жидкостном, охлаждении, процесс остывания не прекращается. Это возможно при условии относительно низких значений мощности тепловыделения в загрузке по сравнению с тепловыми потоками охлаждения в окружающую среду и к

охладителю.

В качестве исходной конструкции теплоизоляции кристаллизатора принята цилиндрическая форма (рис.3.18). В нижней часть корпуса располагается тонкая кремниевая подложка, чтобы на начальном этапе кристаллизации не было контакта с футеровкой. Под основанием футеровки располагается теплообменник в виде медной трубки с проточной водой, поэтому охлаждающий поток препятствует расплавлению подложки.

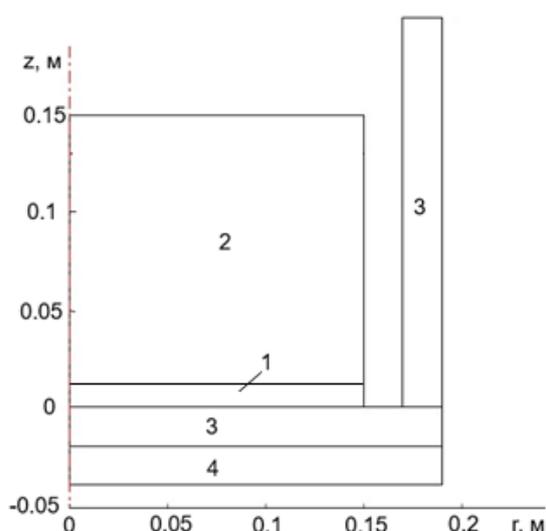


Рис.3.18 Геометрическая модель тепловой задачи: 1 – кристаллический кремний; 2 – расплав кремния; 3 – футеровка; 4 – охладитель.

Для решения тепловой задачи с учетом реальных режимов теплообмена используется модель, содержащая основные конструктивные элементы, что позволяет учесть все виды теплопередачи. Особенностью процесса теплообмена излучением между несколькими объектами является необходимость отсутствия преград. Такой преградой в реальной задаче является воздух, поэтому необходимо исключить его из набора сред и объектов модели. В соответствии с данным требованием применение мультифизических моделей затруднено. Чтобы обойти это затруднение в некоторых случаях производится упрощение способов теплообмена и излучение между объектами заменяется на теплообмен с окружающей средой с уменьшенными коэффициентами теплообмена или вообще заменяется на конвективный теплообмен.

Физические свойства кремния и футеровки задаются с учетом зависимости от температуры.

Для учета перехода через точку кристаллизации (плавления) добавлена процедура выделения (поглощения) теплоты плавления.

$$C = C_1(T) + C_2(T); \quad (3.9)$$

$$C_2(T) = L / \Delta T_{пл} \cdot (H(T - T_1) - H(T - T_2)). \quad (3.10)$$

Здесь: L – теплота плавления; $C_1(T)$ – теплоемкость кремния; $C_2(T)$ – эквивалентное значение теплоемкости, обусловленное изменением агрегатного состояния; T_1, T_2 – значения границ интервала плавления $\Delta T = T_2 - T_1$; H – ступенчатая функция.

Зависимость теплоемкости кремния от температуры представлена на рис.3.15.

При использовании численного метода решения задач для повышения точности расчетов удобно пользоваться аппроксимирующими выражениями для физических параметров. Коэффициенты теплопроводности и теплоемкость часто представлены линейными функциями.

Коэффициент теплопроводности на участке до температуры плавления может быть аппроксимирован выражением, которое для улучшения приближения к табличным значениям усложняется за счет введения экспоненциальной и ступенчатой функции

$$\lambda = 20 + 32 \cdot flc1hs(T - T_{пл}, \Delta T) + 32 \cdot \exp(-0,0035 \cdot (T - 700)); \quad (3.11)$$

Здесь выражение `flc1hs`, являющееся библиотечной функцией программы Comsol, представляет собой аппроксимацию функции Хевисайда.

Удельная теплоемкость для кремния в твердом состоянии удовлетворительно описывается выражением

$$C = 504,9 + 0,389 \cdot T. \quad (3.12)$$

Переход из жидкого в твердое состояние [61] сопровождается выделением теплоты плавления кремния $L=1409$ кДж/кг.

Температура плавления кремния равна $1415\text{ }^{\circ}\text{C}$, и в качестве интервала температур, где происходит кристаллизация, можно взять величину $\Delta T = 30\text{ }^{\circ}\text{C}$. Дальнейшее уменьшение диапазона нежелательно из-за вычислительных проблем, вызванных плохой сходимостью.

Для интервала температур $\Delta T = 30$ градусов значение эквивалентной теплоемкости составляет 46900 Дж/кг. Выражение для эффективной теплоемкости с учетом зависимости от температуры принимает вид

$$C_{res} = 504 + 0,389 \cdot T + 46900 \cdot (flchs(1688 - T, 5) - flchs(1718 - T, 5)). \quad (3.13)$$

Для теплоизоляции, в качестве которой используется корунд, коэффициент теплопроводности и удельная теплоемкость представлены линейными функциями

$$\lambda = 12,2 - 0,86 \cdot 10^{-3} \cdot T; \quad (3.14)$$

$$C = 680,3 + 0,42 \cdot T. \quad (3.15)$$

При моделировании задаются плотность кремния, равная 2330 кг/м^3 , и плотность корунда, равная 3600 кг/м^3 .

Задание граничных условий имеет несколько вариантов. Теплообмен между верхней поверхностью загрузки и окружающей средой задается выбором вида теплообмена с окружающей средой (surface-to-ambient) и присвоением значений коэффициенту излучения $\varepsilon = 0,7$ и температуре окружающей среды $T = 293\text{ K}$.

Для теплообмена излучением между поверхностями загрузки и футеровки выбран режим surface-to-surface. Коэффициент излучения задается везде одинаковым и равным $0,7$. В качестве температуры участвующей в теплообмене отражающей поверхности задается переменная величина T , которая в ходе решения изменяет свое значение. Для более корректного расчета тепловых потоков между обменивающимися теплом поверхностями формируются группы, внутри которых излучение взаимно излучается, поглощается и отражается. В рассматриваемой задаче геометрическая модель

загрузки и футеровки разбита на 10 слоев (рис.3.16). Для слоев заданы номера – от 1 до 10.

Правая сторона футеровки охлаждается с помощью теплообменника, чтобы увеличить тепловые потоки и ускорить скорость охлаждения и кристаллизации. Граничные условия задаются в виде конвективного теплообмена с коэффициентом $h = 500 \text{ Вт} / (\text{м}^2 \cdot \text{К})$.

На геометрической модели (рис.3.16) номерами 1 – 10 обозначены блоки области расплавленного кремния без внутренних источников тепла. Блоки с номерами 11 – 20 соответствуют области загрузки с внутренними источниками тепла. Блоки с номерами 21 – 30 соответствуют футеровке.

Удельная мощность источников тепла рассчитывается, исходя из представленных значений мощности в таблицах 3.6 – 3.10 и объема областей тепловыделения (номера 11 – 20 на рис.3.19).

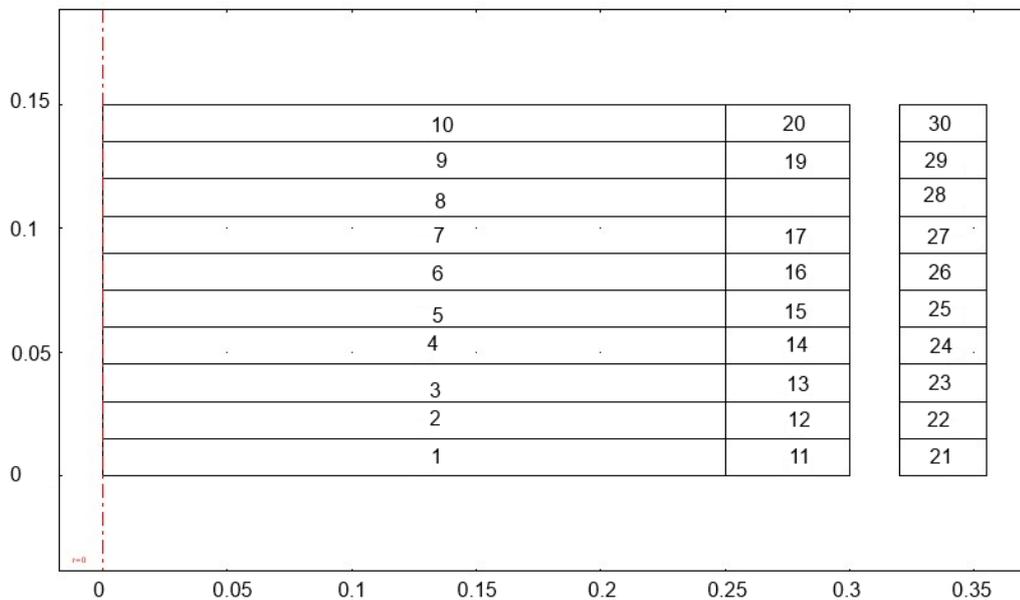


Рис.3.19. Геометрическая модель тепловой задачи кристаллизации кремния

3.2.1 Расчет мощности для моделирования процесса кристаллизации

Для исследования принята загрузка радиусом 0,15 м высотой 0,15 м.

Для варианта загрузки радиусом 0,15 м и высотой 0,15 м и подложки с электропроводностью $\sigma = 10^6 \text{ См/м}$ определены значения боковых сил,

давления и мощности тепловыделения для каждого слоя, которые представлены в табл.3.29.

Таблица 3.28.

Расчетные значений гидростатического давления и боковой силы в слоях расплава

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$H_n, \text{ м}$	0.15	0.135	0.12	0.105	0.09	0.075	0.06	0.045	0.03	0.015
$P, \text{ Па}$	3768	3425	3083	2740	2398	2055	1370	1028	685	342
$F_n^{\text{эм}}, \text{ Н}$	53,9	49	44,1	39,2	34,3	29,4	19,6	14,7	9,8	4,9

Таблица 3.29

Расчетные значения силы и мощности тепловыделения в расплаве в слоях загрузки

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$F_n^{\text{эм}}, \text{ Н}$	59,6	59,3	55,5	50	43,5	36,9	30,6	24,7	19,2	14,1
$P, \text{ кПа}$	4,2	4,1	3,9	3,5	3	2,6	2,1	1,7	1,3	1
$P_{\text{эм}}, \text{ кВт}$	2,5	2,27	2	1,75	1,49	1,26	1,1	0,9	0,75	0,63
$W, \text{ Вт/м}^3 \cdot 10^6$	4.24	3.85	3.39	2.97	2.53	2.14	1.86	1.53	1.27	1.07

Суммарная мощность тепловыделения в загрузке составляет 14,65 кВт, суммарная сила - 393,4 Н.

3.2.2 Расчет тепловых процессов в загрузке:

радиус 0,15 м;

высота 0,15 м;

боковая стенка футеровки охлаждаются с коэффициентом конвективного теплообмена, равным $5 \text{ Вт} / (\text{м}^2 \cdot \text{град})$;

верхняя стенка футеровки (крышка) подогревается – задан постоянный тепловой поток 2,5 кВт в виде плотности теплового потока $12800 \text{ Вт} / \text{м}^2$;

отвод тепла снизу осуществляется при коэффициенте конвективного теплообмена, равном $1000 \text{ Вт} / (\text{м}^2 \cdot \text{град})$.

Коэффициент теплопроводности боковой футеровки принят равным $2 \text{ Вт/м} \cdot \text{град}$.

Исследование распределений температуры в различные моменты времени показало наличие двух фронтов кристаллизации, движущихся к

средней, почти плоской, области (рис.3.46). Однако затвердевание, движущееся от боковой стенки, не привело к образованию верхней корки. Таким образом, процесс кристаллизации завершился в центре верхней поверхности. Такой вариант исключает возникновение термонапряжений. Возможно только искажение формы цилиндра в виде впадины.

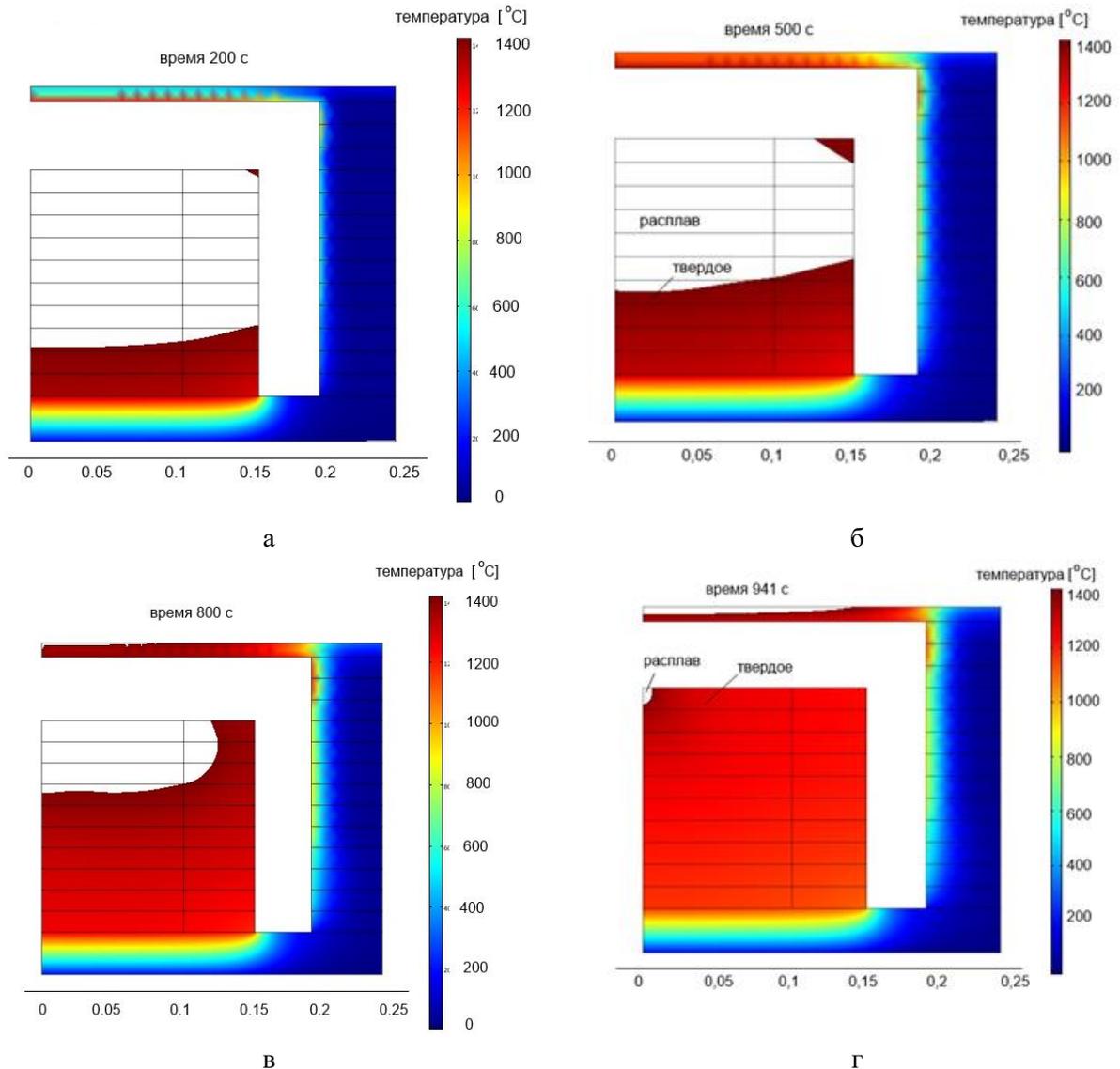


Рис.3.20 Распределение температуры в расплавленной части загрузки в моменты времени: а – 200 с; б - 500 с; в – 800 с; г - 941 с.

Результаты расчета тепловых потоков и мощности тепловыделения, представленные в табл.3.30, показали общее увеличение значений тепловых потоков, а также длительность процесса кристаллизации.

Расчетные значений мощности и потоков

время	0	600	1200	2400	3600
$Q_{верх}$, кВт	21,1	5,2	-1,9	-2,1	-1,8
$Q_{бок}$, кВт	13	9,6	3,1	0,8	0,4
$Q_{низ}$, кВт	2,8	15,9	12,9	6,7	4,6
$Q_{сум}$, кВт	36,9	30,7	14,1	5,4	3,2
P, кВт	12,2	5,7	1,5	1,5	1,5

Верхняя крышка взята уменьшенной толщины (0,01 м) для ускорения прогрева и повышения температуры, чтобы снизить тепловой поток с верхней поверхности слитка.

Как и в предыдущих расчетах тепловой поток через нижнюю поверхность определялся на границе с охладителем

Максимальное значение теплового потока составляет 36,9 кВт. Мощность тепловыделения равна 12,2 кВт. Кроме того, мощность нагревателя верхней крышки равна 2,5 кВт. Баланс мощностей отрицательный, что приводит к охлаждению загрузки.

Проведенные расчеты энергозатрат представлены в табл.3.31.

Таблица 3.31.

Расчетные значения мощности на интервале работы индуктора

время	0	600	1200	2400	3600
P, кВт	14,7	8,2	1,5	93,6	89,3
W, МДж		8,82	4,92	-	-

При массе загрузки, равной 24 кг, удельные энергозатраты составляют $W/M=13,74/24=0,575$ МДж/кг.

Предыдущее значение удельных энергозатрат, приведенное для загрузки радиусом 0,15 м в табл.3.39, составляет 249 кДж/кг. Таким образом, для предотвращения образования корки из твердого кремния вокруг жидкости требуется увеличение расхода энергии в два раза.

Результаты расчетов для различных вариантов теплоизоляции, подогрева, геометрических размеров загрузки приведены в приложении П-1, а

в табл.3.32 показаны основные показатели. Кроме энергозатрат охарактеризована возможность ведения процесса кристаллизации с положительным результатом – формирование кристаллической структуры без возможных внутренних напряжений и дефектов.

Таблица 3.32
Параметры тепловых процессов при кристаллизации расплава кремния

Вар-т	1	2	3	4	5	6	7	8
$R_{загр}$, м	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,3	0,15
$h_{загр}$, м	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,3	0,3	0,15
$\alpha_{бок}$, $Вт / м^2$	100	5	5	5	5	100	100	5
$\alpha_{ниж}$, $Вт / м^2$	1000	300	1000	1000	1000	1000	1000	1000
$\alpha_{верх}$, $Вт / м^2$	5	5	5	5	5	5	5	5
$\lambda_{бок}$, $Вт / (м \cdot ^\circ C)$	2	2	2	1	0,5	0,5	2	2
$\lambda_{ниж}$, $Вт / (м \cdot ^\circ C)$	5	5	5	5	5	5	5	5
$\lambda_{верх}$, $Вт / (м \cdot ^\circ C)$	-	-	2	1	0,5	-	-	1
$P_{верх.нагр}$, кВт	0	0	0	0	0	0	0	2,5
$P_{загр}$, кВт	12,2	12,2	12,2	12,2	12,2	83,5	109	12,2
$Q_{сум.макс}$, кВт	43,2	43,2	34,1	39,2	39,4	89,4	210,3	36,9
W, кДж	5315	5735	5370	8325	5901	беск	555000	13740
$t_{крист}$, с	700	750	700	1120	920	беск	2400	940
Кол-во фронт. кристаллиз.	2	2	2	2	2	1	2	1
Окончание кристаллиз.	внутр	внутр	внутр	внутр	внутр	внутр	внеш	внеш

Вариация коэффициентов теплопроводности материала теплоизоляции, коэффициентов конвективного теплообмена на боковой и верхней поверхностях теплоизоляции показали невозможность обойтись только этими

средствами для достижения заданного распределения температуры в слитке. Особое требование заключается в завершении процесса кристаллизации на поверхности, чтобы не возникли внутренние пустоты, что приведет к внутренним дефектам кристаллической решетки. Этому требованию удовлетворяет один вариант №8, в котором верхняя часть теплоизоляции снабжена подогревателем.

Среди других вариантов обеспечивает требуемый ход процесса и заданное распределение температуры вариант №7. Загрузка в этом варианте имеет в два раза большие значения радиуса и высоты. Большая масса обеспечивает высокую инерционность тепловых процессов, что облегчает формирование нужных градиентов во всем объеме за счет уменьшения влияния локальных процессов на общее состояние. Однако данный вариант характеризуется временем кристаллизации 2400 с, что по сравнению с 800 или 900 с, выглядит не так привлекательно. В то же время, соотношение мощности нагревателей и потоков охлаждения для загрузки высотой 0,15 м и радиусом 0,15 м составляет 1:4 против 1:2 для загрузки высотой 0,3 м и радиусом 0,3 м. Это приводит к тому, что охлаждение слитка до 300 градусов происходит за 2000 с для загрузки с малыми размерами, а охлаждение крупного слитка до такой же температуры за 7000 с. Учитывая мощность в загрузке, равную 109 кВт (мощность индуктора будет больше 300 кВт), данный вариант не является привлекательным.

3.3 Расчет термонапряжений при моделировании процесса кристаллизации расплава кремния

Процесс кристаллизации расплава рассмотрен при разных конструкциях и значениях коэффициентов теплопроводности футеровки.

3.3.1 Расчет термонапряжений при моделировании процесса кристаллизации расплава кремния с футеровкой без верхней крышки

В качестве объекта для исследования примем конструкцию с открытой верхней частью.

Исходные данные для расчета:

- радиус загрузки 0,15 м;
- высота загрузки 0,15 м;
- внешняя боковая стенка футеровки охлаждается с коэффициентом конвективного теплообмена, равным $50 \text{ Вт} / (\text{м}^2 \cdot \text{град})$;
- отвод тепла снизу осуществляется при коэффициенте конвективного теплообмена, равном $1000 \text{ Вт} / (\text{м}^2 \cdot \text{град})$;
- коэффициент теплопроводности нижней части футеровки принят равным $5 \text{ Вт} / (\text{м} \cdot \text{град})$;
- коэффициент теплопроводности боковой футеровки принят равным $2 \text{ Вт} / (\text{м} \cdot \text{град})$;
- модуль упругости кремния равен $1,7 \cdot 10^{11} \text{ Па}$;
- коэффициент Пуассона для кремния принят равным 0,25;
- модуль упругости шамота равен $40 \cdot 10^6 \text{ Па}$; [52]
- коэффициент Пуассона для шамота принят равным 0,33.

Расчеты выполнены на связанной термо-упругой модели. Отличие от ранее проведенных расчетов для охлаждения и кристаллизации расплава заключается в том, что значительно возросли требования к оперативной памяти, и увеличились затраты времени. Сходимость вычислительного процесса заметно ухудшилась.

В результате расчета процесса кристаллизации получены временные диаграммы температуры, представленные на рис.3.21.

Для отдельных моментов времени построены диаграммы температуры по высоте боковой стенки расплава (рис.3.22). Диаграммы 1 и 2 показывают, что температура выше температуры плавления наблюдаются в средней части. Ситуация неблагоприятная для управления фронтом кристаллизации.

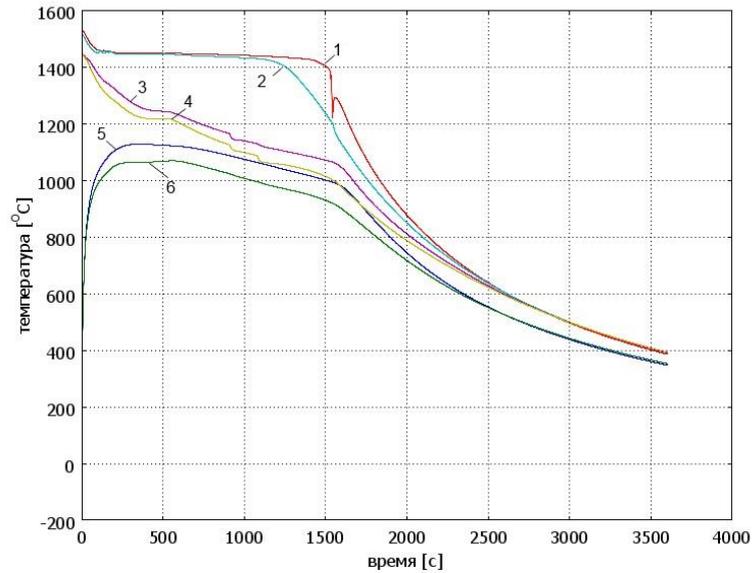


Рис.3.21 Временные диаграммы температуры в загрузке: 1 – при $x=0,075$ м, $r=0,15$ м; 2 – при $x=0,075$ м, $r=0$; 3 – при $x=0,15$ м, $r=0,15$ м; 4 – при $x=0,15$ м, $r=0$; 5 – при $x=0$, $r=0$; 6 – при $x=0$, $r=0,15$ м;

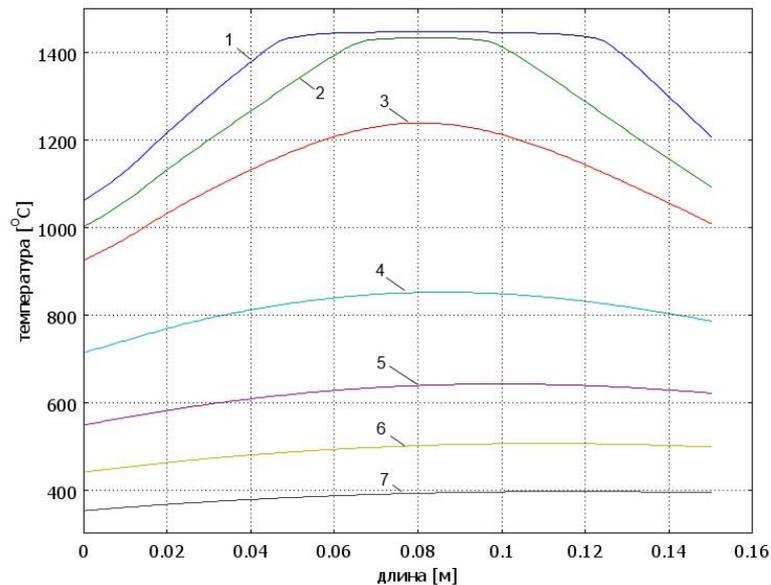


Рис.3.22 Диаграммы температуры на боковой поверхности загрузки в момент времени: 1 – $t=500$ с; 2 – $t=1000$ с; 3 – $t=1500$ с; 4 – $t=2000$ с; 5 – $t=2500$ с; 6 – $t=3000$ с; 7 - $t=3600$ с.

Для получения более детальной картины о распределении температуры построены распределения для моментов времени 500 с, 1000 с, 1500 с и 3000 с. Области с более темным цветом на рисунках 3.23-3.26 соответствуют жидкому состоянию кремния. Участки с твердым кремнием имеют температуру намного меньше. При переходе в твердое состояние всего слитка температура выравнивается.

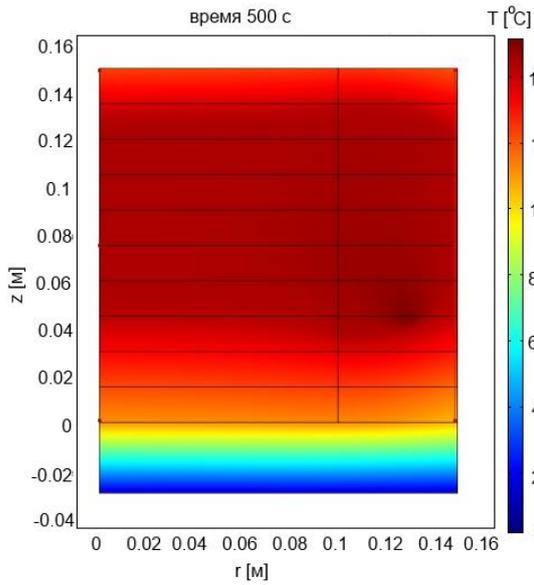


Рис.3.23 Распределение температуры в загрузке в момент времени 500 с

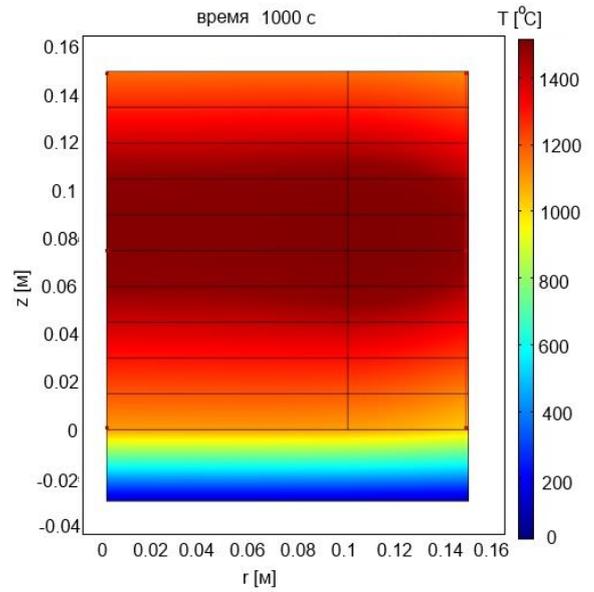


Рис.3.24 Распределение температуры в загрузке в момент времени 1000 с

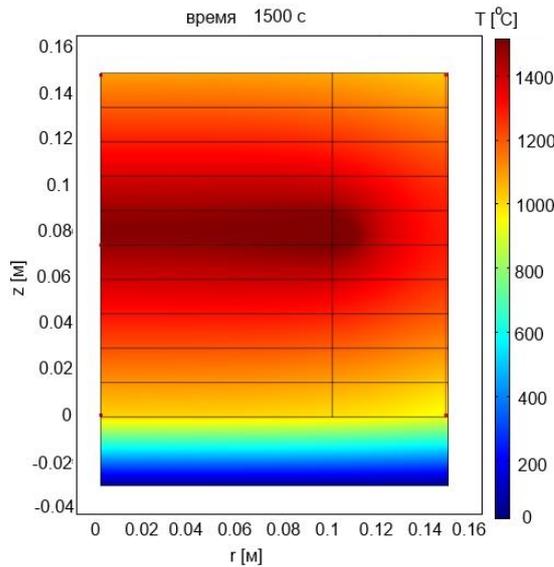


Рис.3.25 Распределение температуры в загрузке в момент времени 1500 с

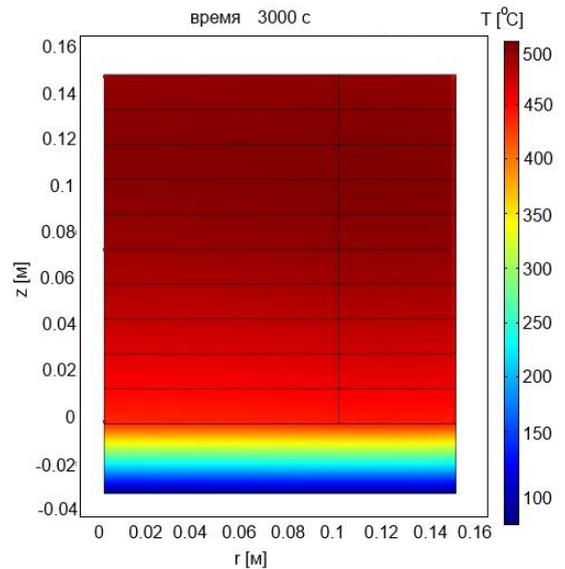


Рис.3.26 Распределение температуры в загрузке в момент времени 500 с

Использование приема с исключением из распределения областей с температурой выше температуры плавления позволяет наглядно представить фронт кристаллизации (рис. 3.27, 3.28).

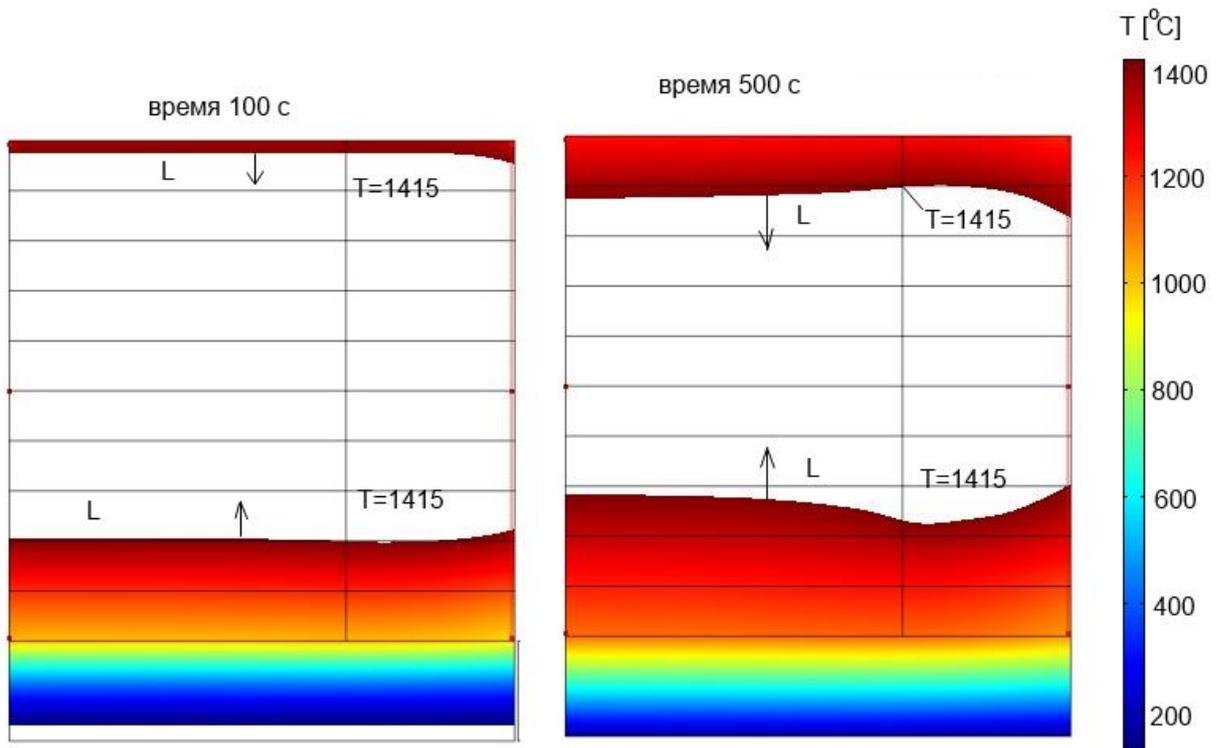


Рис.3.27 Фронт кристаллизации в моменты времени 100 и 500 с.

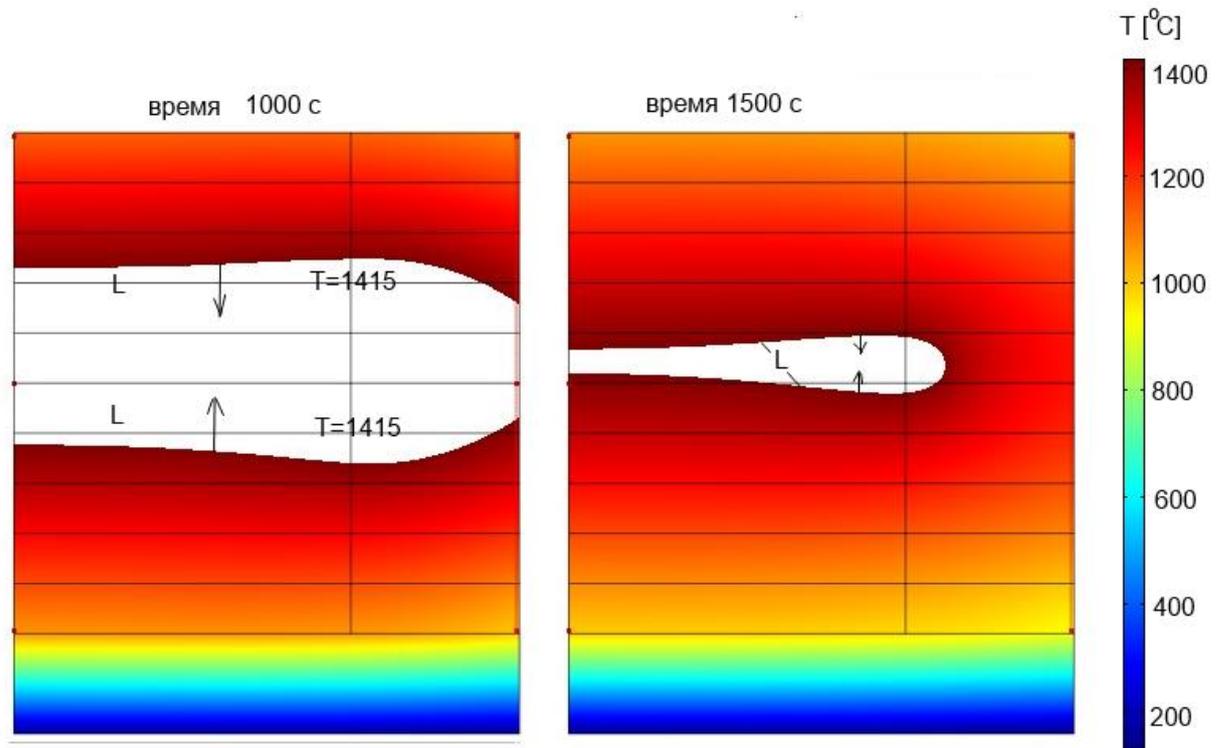


Рис. 3.28 Фронт кристаллизации в моменты времени 1000 и 1500 с.

Окончание процесса кристаллизации происходит во внутренней области. Это приводит к напряжениям, так как вокруг жидкой фракции уже

сформировалась твердая область. Так как при затвердевании происходит уменьшение объема, неизбежно возникают растягивающие силы.

В результате расчета термонапряжений для каждого момента времени могут быть построены распределения различных напряжений. На рис.3.29 - 3.30 показаны распределения напряжения сдвига для моментов времени 500 с и 3000 с. Возникают отчетливые области с положительными и отрицательными направлениями сдвига.

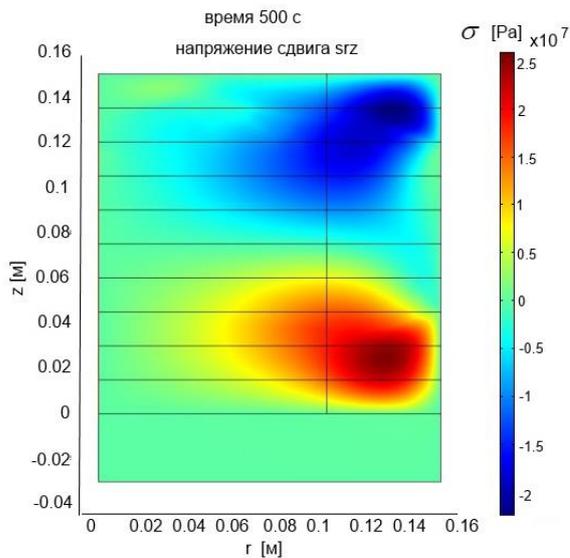


Рис.3.29 Напряжение сдвига загрузке в момент времени 500 с.

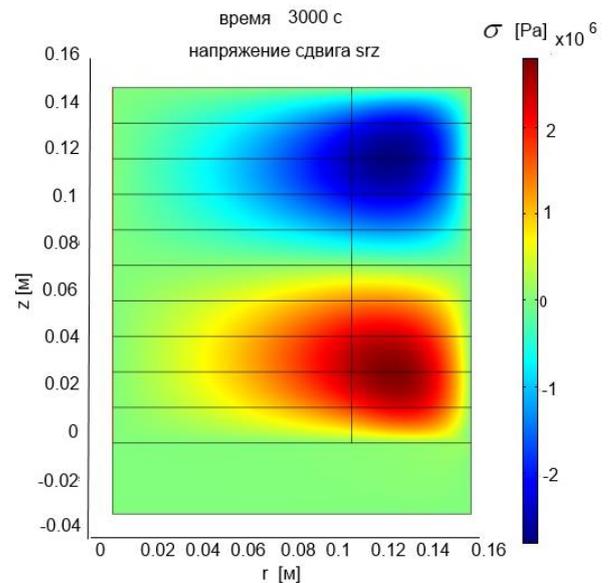


Рис.3.30 Напряжение сдвига загрузке в момент времени 3000 с.с.

При снижении температуры и уменьшения градиентов внутри всего объема загрузки напряжения уменьшаются более, чем в 10 раз. Формально величина напряжений далеко от предельных значений для кремния. Аналогичные процедуры построения распределений выполнены для нормального напряжения для моментов времени 500 с и 3500 с (рис.3.31 -3.32). Данный вид напряжений превосходит напряжения сдвига в пять раз. В итоге, напряжения намного меньше, чем предельные для кремния. Однако нельзя говорить, что процесс кристаллизации проходит без последствий для целостности кристаллической структуры слитка. В программе не предусмотрено изменение геометрии слитка, как это происходит в реальном физическом процессе. В результате процесса термоусадки, хорошо известного в металлургии [53, 54, 66], возникают не только локальные дефекты

кристаллической структуры, но и появляются явные трещины разной длины и направления.

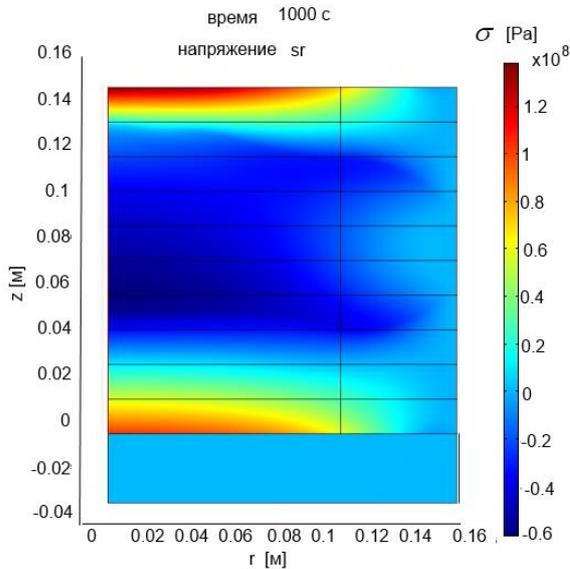


Рис.3.31 Нормальное напряжение в загрузке по оси r в момент времени 1000 с

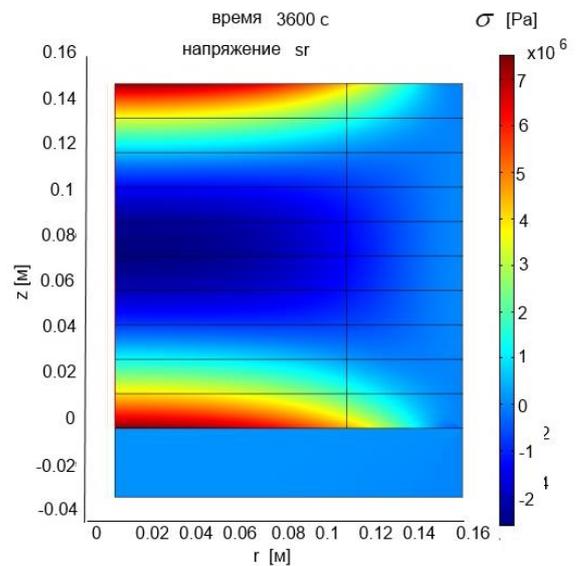


Рис.3.32 Нормальное напряжение в загрузке по оси r в момент времени 3600 с

3.3.2 Расчет термонапряжений при моделировании процесса кристаллизации расплава кремния с футеровкой с верхней крышкой

В качестве объекта для исследования примем конструкцию с открытой верхней частью.

Исходные данные для расчета:

- радиус загрузки 0,15 м;
- высота загрузки 0,15 м;
- внешние верхняя и боковая стенки футеровки охлаждаются с коэффициентом конвективного теплообмена, равным $5 \text{ Вт} / (\text{м}^2 \cdot \text{град})$;
- отвод тепла снизу осуществляется при коэффициенте конвективного теплообмена, равном $1000 \text{ Вт} / (\text{м}^2 \cdot \text{град})$;
- коэффициент теплопроводности нижней части футеровки принят равным $5 \text{ Вт/м} \cdot \text{град}$;
- коэффициент теплопроводности боковой футеровки принят равным $2 \text{ Вт/м} \cdot \text{град}$;
- модуль упругости кремния равен $1,7 \cdot 10^{11} \text{ Па}$;

- коэффициент Пуассона для кремния принят равным 0,25;
- модуль упругости шамота равен $40 \cdot 10^6$ Па;
- коэффициент Пуассона для шамота принят равным 0,33;

В результате расчетов получены распределения температуры, которые представлены на рис.3.33, 3.34. Выбранный вариант параметров кристаллизатора приводит к образованию двух фронтов кристаллизации кремния (рис.3.35, 3.36).

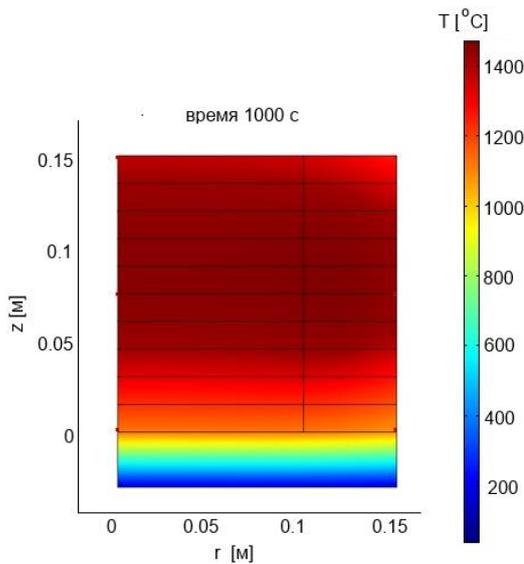


Рис.3.33 Распределение температуры в загрузке в момент времени 1000 с

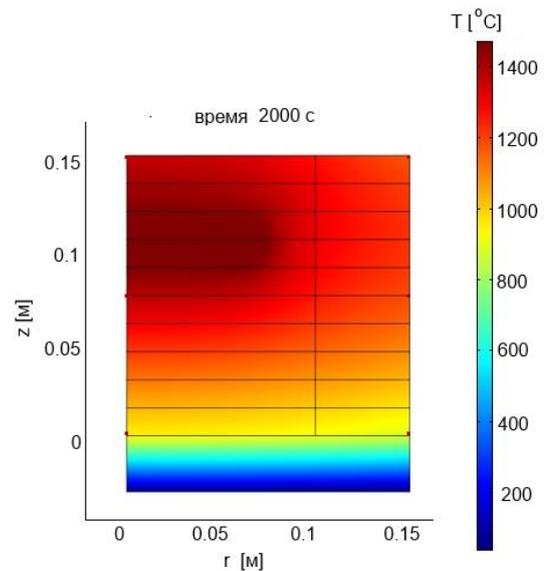


Рис.3.34 Распределение температуры в загрузке в момент времени 2000 с

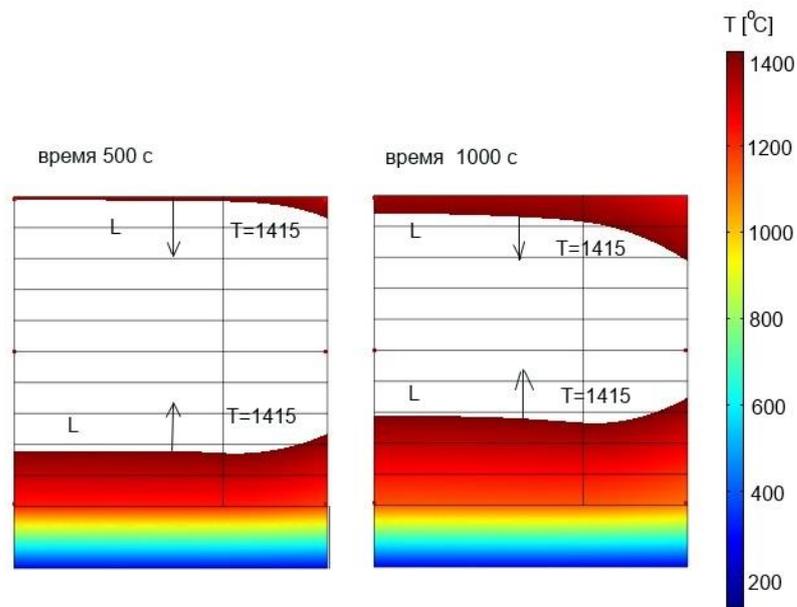


Рис.3.35 Фронт кристаллизации кремния в кристаллизаторе с верхней крышкой в моменты времени 500 и 1000 с.

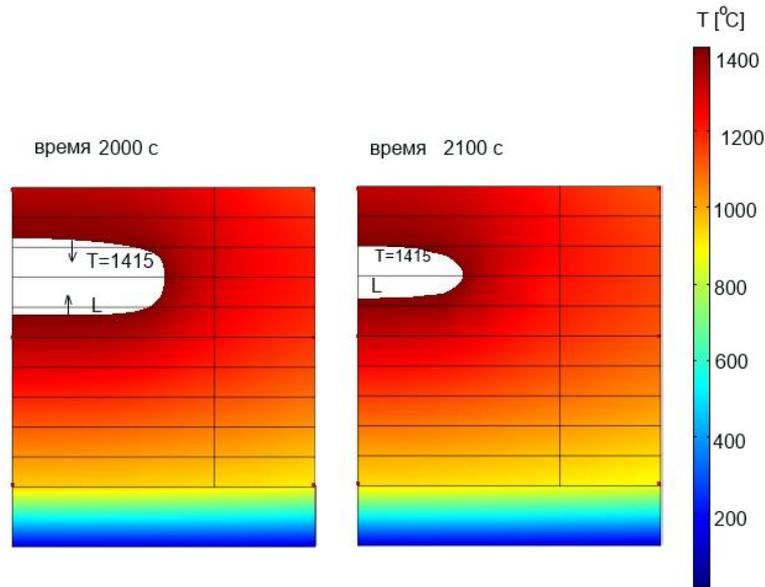


Рис.3.36 Фронт кристаллизации кремния в кристаллизаторе с верхней крышкой в моменты времени 2000 и 2100 с.

Окончание процесса кристаллизации происходит внутри на некотором расстоянии от верхней поверхности слитка. Тем самым создаются условия для образования раковин и трещин. Между тем, расчет термонапряжений показывает, что величины разных видов напряжений (нормальные и Мизеса) результаты далеки от предельно допустимых значений (рис.3.37-3.40).

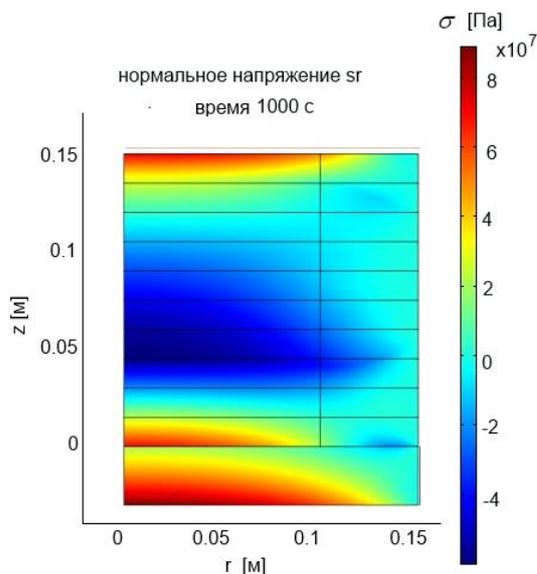


Рис.3.37 Нормальное напряжение в загрузке по оси r в момент времени 1000 с

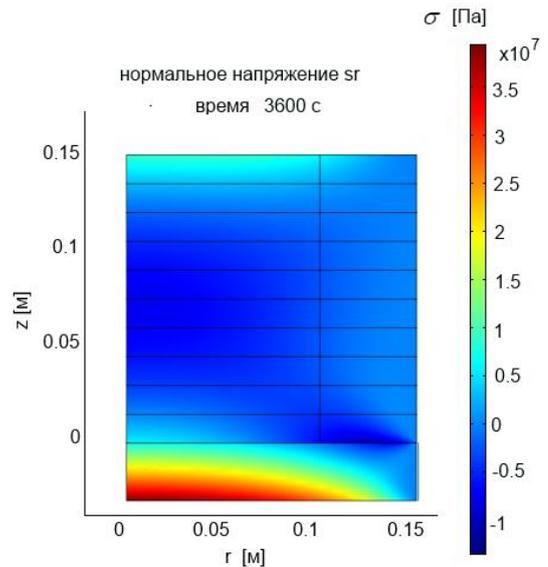


Рис.3.38 Нормальное напряжение в загрузке по оси r в момент времени 3600 с

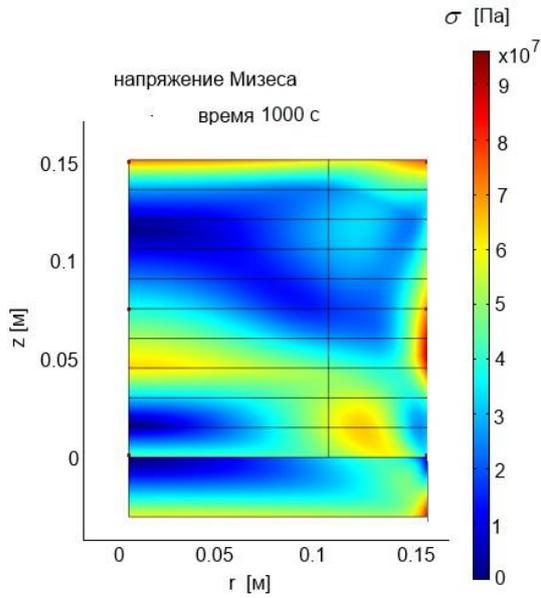


Рис.3.39 Напряжение Мизеса в загрузке в момент времени 1000 с

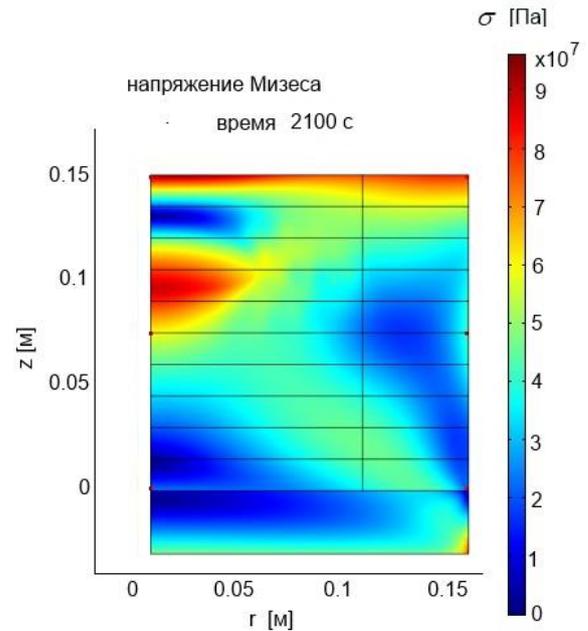


Рис.3.40 Напряжение Мизеса в загрузке в момент времени 2100 с

Напряжения Мизеса, показанные в виде диаграмм на линии боковой поверхности слитка, также не дают основания для беспокойства (рис.3.41).

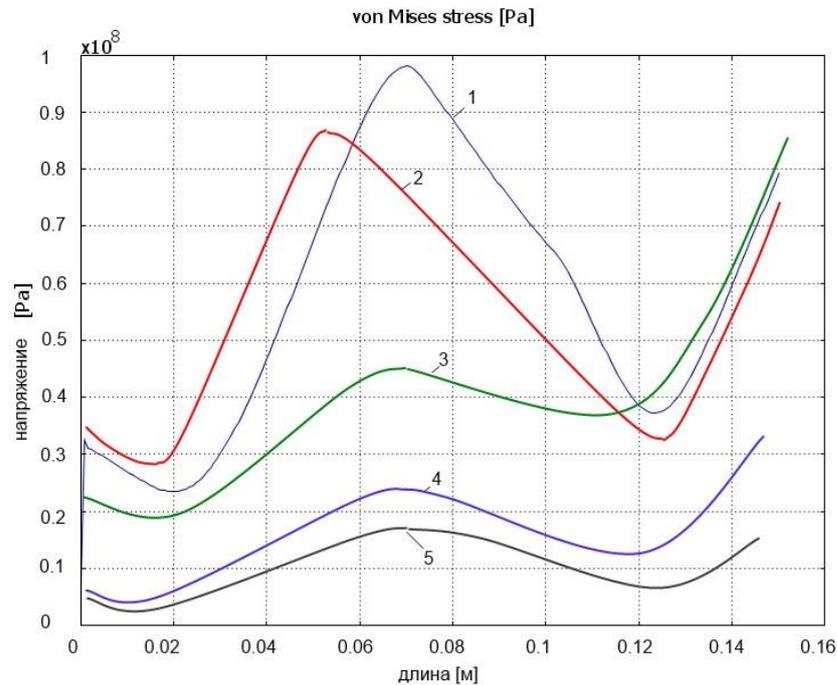


Рис.3.41 Диаграммы напряжений Мизеса на боковой поверхности загрузки в моменты времени: 1 – 1000 с; 2 – 1500 с; 3 – 2000 с; 4 – 2500 с; 5 – 3000 с.

Таким образом, для надежного предотвращения внутренних повреждений в слитке необходимо кроме расчета напряжений обеспечить исключение завершения кристаллизации во внутренней области слитка.

Чтобы снизить потери тепла с верхней поверхности нужно верхнюю часть футеровки снабдить устройством подогрева. Мощность подогрева составляет 2,5 кВт.

3.4 Определение параметров охладителя

В задачу расчета системы охлаждения входит: определение потребного расхода воды, необходимого для отведения тепла, вызываемого электрическими потерями в индукторе, и тепловых потерь от загрузки к индуктору (через футеровку); определение потерь напора воды в индукторе, а также проверка допустимой температуры меди индуктора [59].

Число витков катушки охладителя определяется с учетом того, что минимальный размер внутреннего витка ограничен возможностью изгиба трубки. Принимаем диаметр внутреннего витка дисковой катушки равным 100 мм. Ширина кольца определяется как разность внешнего и внутреннего радиусов:

$$\Delta R = R_2 - R_1 = 0,15 - 0,05 = 0,1 \text{ м.} \quad (3.16)$$

Для трубки с шириной 16 мм число витков

$$w = \Delta R / 0,016 = 6. \quad (3.17)$$

Площадь сечения трубки

$$S_g = 3,14r^2 = 3,14 \cdot 0,013^2 = 5,3 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2. \quad (3.18)$$

Допустимые потери напора воды в системе охлаждения $\Delta p_{дон}$ задаются на уровне $\Delta p = 2 \cdot 10^5$ Па.

Потребный расход воды, м³/с:

$$Q_{охл} = 0,24 \frac{P_{охл}}{T_{вых} - T_{вх}} 10^{-6}, \quad (3.19)$$

где $T_{вх}$ – температура воды на входе в охладитель (при охлаждении водопроводной водой: $15^{\circ}C \leq T_{вх} < 25^{\circ}C$; при замкнутом цикле охлаждения $15^{\circ}C \leq T_{вх} < 35^{\circ}C$);

$T_{\text{вых}}$ – температура воды на выходе из индуктора $T_{\text{вых}} \leq 50^{\circ}\text{C}$ (при замкнутом цикле охлаждения $T_{\text{вых}} \leq 65^{\circ}\text{C}$).

При этом нижняя граница для $T_{\text{вых}}$ устанавливается из условия исключения отпотевания индуктора, которое может привести к нарушению прочности электроизоляции индуктора и к пробое, а верхняя граница для $T_{\text{вых}}$ устанавливается с целью снижения образования накипи на стенках канала охлаждения, уменьшающей эффективность теплоотвода и сечение канала.

Скорость воды в канале охлаждения, м/с :

$$v_{\text{в}} = Q_{\text{охл}} / S_{\text{в}} n_{\text{в}}, \quad (3.20)$$

где $n_{\text{в}}$ – число параллельных ветвей охлаждения индуктора (принято $n_{\text{в}} = 1$).

Число Рейнольдса Re , которое характеризует режим течения жидкости в канале:

$$\text{Re} = v_{\text{в}} d_{\text{в.э}} / \nu_{\text{в}}, \quad (3.21)$$

где $\nu_{\text{в}}$ – кинематическая вязкость воды, $\text{м}^2/\text{с}$;

$d_{\text{в.э}}$ – гидравлический эквивалент диаметра канала охлаждения, м :

$$d_{\text{в.э}} = 4S_{\text{в}} / P_{\text{в}}. \quad (3.22)$$

Для охладителя трубка не профилирована, поэтому принята трубка круглого сечения внешним диаметром 16 мм с толщиной стенки 1 мм. Внутренний диаметр равен 14 мм.

При турбулентном движении Δp , Па:

$$\Delta p = \omega \frac{v_{\text{в}}^2}{2} \left(\xi k_{\text{ш}} \frac{l_{\text{в}}}{d_{\text{в.э}}} + \zeta_{\text{нов}} \right), \quad (3.23)$$

где $l_{\text{в}}$ – длина канала охлаждения одного витка индуктора, мм;

ξ – коэффициент трения для гладких труб, зависящий от числа Рейнольдса: при $\text{Re} \leq 2 \cdot 10^3$

$$\xi = 64 / \text{Re}, \quad (3.24)$$

при $2 \cdot 10^3 < \text{Re} < 10^5$

$$\xi = 0,316 / (\text{Re})^{0,25}; \quad (3.25)$$

ζ – коэффициент сопротивления поворота струи на 360 градусов;

$k_{ш}$ – коэффициент увеличения сопротивления, вызванный шероховатостью внутренней поверхности канала охлаждения.

Для дисковой катушки для расчета принято среднее значение радиуса

$$r_{cp} = (R_1 + R_2) / 2 = (0,05 + 0,15) / 2 = 0,1 \text{ м.}$$

Коэффициент учета шероховатости принимаем равным $k_{ш} = 2$.

Величина Δp , найденная по выражению (3.23), не должна превышать допустимых потерь напора $\Delta p_{дон}$. При использовании воды из городского водопровода, должно соблюдаться условие $\Delta p < 2 \cdot 10^5 \text{ Па}$. Если это условие не выполняется, необходимо разделить охладитель на несколько секций, причем число секций охлаждения определяют из выражения

$$n_e = \sqrt[3]{\Delta p / \Delta p_{дон}}. \quad (3.26)$$

Согласно представленной методике выполнены расчеты для нескольких значений расхода воды. Все результаты сведены в табл.3.33.

Таблица 3.33

Расчетные параметры системы водяного охлаждения

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$Q, \text{ м}^3 / \text{с}$	0,08	0,16	0,24	0,32	0,4	0,48	0,56	0,64	0,72
$v, \text{ м/с}$	0,52	1,04	1,56	2,08	2,6	3,12	3,64	4,16	4,68
$\text{Re}, \times 10^{-4}$	1,352	2,704	4,056	5,408	6,759	8,111	9,463	10,82	12,17
$dP, \text{ Па}$	2,29	7,72	15,7	26	38,4	52,8	69,2	87,4	107,4
$\alpha, \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \text{К}}$	3534	6154	8512	10710	12810	14820	16760	18650	20500

Теперь необходимо убедиться, что условия конвективной теплопередачи в канале охлаждения обеспечивают отвод от индуктора (катушки охладителя) суммарных потерь $P_{охл}$.

Мощность, которая может быть отведена охлаждающей водой, Вт:

$$P_e = \alpha_e (T_{ст} - T_{cp}) \cdot S_{охл}. \quad (3.27)$$

где $T_{ст}$ – температура стенки индуктора, К;

k_g – коэффициент, учитывающий неравномерность распределения теплового потока по периметру канала охлаждения ($0,5 < k_g < 1,0$);

α_g – коэффициент теплоотдачи от стенки индуктора к охлаждающей воде, $Вт/(м^2 \cdot К)$

$$\alpha_g = Nu \frac{\lambda_g}{d_{г.э}}, \quad (3.28)$$

здесь λ_g – теплопроводность воды, $Вт/(м \cdot К)$;

Nu – критерий Нуссельта (его называют также безразмерным коэффициентом теплоотдачи при конвективном теплообмене).

При турбулентном режиме

$$Nu = 0.023(Re)^{0.8}(Pr)^{0.4}, \quad (3.29)$$

где Pr – критерий Прандтля, являющийся теплофизической характеристикой теплоносителя

$$Pr = \frac{\eta C}{\lambda}. \quad (3.30)$$

Здесь C – удельная теплоемкость жидкости.

Число Прандтля для воды равно 3,5.

В результате расчета определяем площадь контактной поверхности охладителя

$$S_{охл} = 3,14 \cdot (0,15^2 - 0,05^2) = 0,0628 \text{ м}^2.$$

Для максимального значения температуры воды на выходе из охладителя, равного 50 градусов, и коэффициента теплообмена, соответствующего максимальному значению критерия Рейнольдса расчетное значение отводимой тепловой мощности будет равно

$$P_g = 16700(50 - 20) \cdot 0,063 = 31563 \text{ Вт}.$$

Полученное значение теплового потока не должно быть превышено при тепловом расчете процесса кристаллизации.

3.5 Выводы по третьей главе

1. Применение электромагнитного кристаллизатора периодического действия для расплава кремния позволяет получить слиток без загрязнения боковых стенок.
2. Размеры слитка ограничены из-за нагрева расплава индуцированными токами. При определении геометрических размеров слитка значения высоты и радиуса, равные 0,15 м, соответствуют минимальным энергозатратам в системе «индуктор – расплав», а создаваемые силы обеспечивают заданную цилиндрическую форму.
3. Форма слитка отличается от правильного цилиндра. Сужения возникают в нижнем основании и наверху слитка. Отклонение значения радиуса от заданной величины составляют от 3 до 10% при разной длине индукторов.
(С.31)
4. В процессе кристаллизации мощность тепловыделения в загрузке уменьшается снижается в 10 раз. Это приводит к изменению параметров индуктора и требует специальных мер для обеспечения заданных усилий по высоте слитка и нормального функционирования системы «индуктор – источник питания».
5. Для предотвращения недопустимых термонапряжений разработан алгоритм управления фронтом кристаллизации расплава. Обеспечение заданного градиента температуры по радиальной координате и высоте достигается применением подогрева крышки футеровки. В результате предотвращается появление внутренних полостей во время усадки кремния.

4. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ КРИСТАЛЛИЗАТОР КРЕМНИЯ МЕТОДИЧЕСКОГО ДЕЙСТВИЯ

4.1 Моделирование электромагнитных процессов при кристаллизации слитка

В индукционной установке при дискретном повышении уровня расплава с последующей кристаллизацией происходит изменение интегральных параметров индуктора. Рассмотрим процедуру заполнения рабочего пространства тигля с изменением свойств.

Форма индуктора задается соленоидальной. В тигель заливается небольшой по толщине слой расплава кремния на подложку, через которую тепло передается к охладителю. Кроме основного теплового потока имеют место потоки излучением и конвекцией в сторону боковой стенки тигля и вверх в окружающее пространство. Стенка тигля снаружи имеет контакт с водоохлаждаемой катушкой индуктора, поэтому тепловой поток зависит от нескольких факторов и меняется в процессе работы кристаллизатора.

Электропроводность кремния при переходе из расплавленного в твердое состояние изменяется от $1,1 \cdot 10^6$ до $1 \cdot 10^5$ См/м. В твердом состоянии электропроводность мала, но все же токи в загрузке сказываются на общем магнитном поле системы.

Для определения наилучшего сочетания производительности и энергоэкономичности выполнено моделирование электромагнитных процессов в системе «индуктор – загрузка» для разных габаритов тигля.

4.1.1 Расчет параметров индуктора для загрузки диаметром 0,3 м высотой 0,15 м при заданном токе

В результате моделирования системы, состоящей из разного количества слоев кремния и катушки индуктора, определяются значения напряжений и мощностей индуктора. Ток индуктора был задан неизменным на всех этапах расчета. Исходной является система с незагруженным индуктором. Затем заполняется нижний слой расплавленным кремнием. На следующем шаге слой кремния приобретает свойства твердого материала. После этого добавляется

сверху слой жидкого кремния. Изменение уровня и свойств каждого слоя сопровождается новым расчетом. Таким образом, для каждого слоя выполняется два расчета параметров индуктора – с жидким и затвердевшим кремнием в последнем слое. Для загрузки высотой 0,15 м, разбитой на 10 слоев по высоте, предусмотрен двадцать один расчет. На первом шаге расчет выполнен для пустого индуктора.

Исходными данными для определения параметров индуктора являются значения, найденные в предыдущих разделах. Они соответствуют соблюдению теплового режима и выполнению требования о необходимой величине электромагнитной силы отталкивания.

Обеспечение отталкивающей сила 5 Н в одновитковом индукторе достигается при задании тока $I_{инд}^1 = 5760$ А. При этом мощность в загрузке (слой расплава) должна быть равна 1007 Вт. Распределение силы Лоренца по толщине имеет большую плотность в поверхностном слое, как показано на рис.4.1. Это обеспечивается при использовании напряжения частотой 500 Гц.

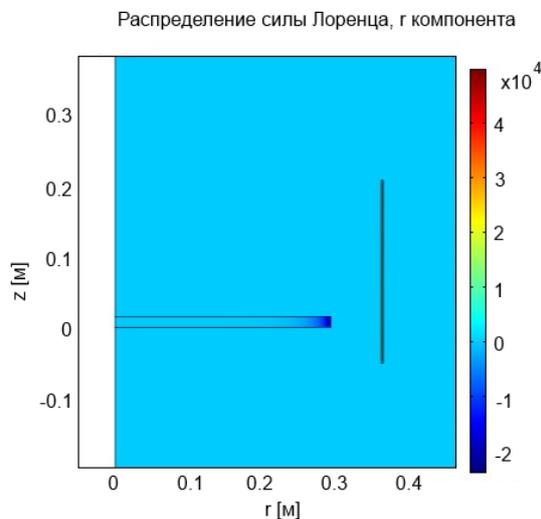


Рис.4.1 Распределение г-компоненты силы Лоренца в одном слое жидкого кремния высотой 15 мм

Для расчета в программном комплексе Elcut создана модель индуктора, содержащая катушку с числом витков $w=16$. Ширина витка равна 16 мм, общая длина индуктора $L=16*16=256$ мм. При переходе к многовитковому индуктору скорректированный расчетный ток принимает немного меньшее

значение, чем соответствующее предварительно найденному, и равен ток одновиткового индуктора $I_{инд} = I_{инд}^1 / w = 336$ А вместо 360 А.

Результаты выполненных расчетов представлены в таблице 4.1.

Таблица 4.1

Мощность и импеданс индуктора при послойном заполнении расплавом

№	N1	N2	N3	U, В	$P_{верх}$, Вт	$P_{инд}$, Вт	Z, Ом	R, Ом	X, Ом	L, Гн
1	10	0	0	120	0	713	0,336	0,0111	0,335	$10,65 \cdot 10^{-5}$
2	9	1	0	113	1024	1718	0,314	0,0267	0,313	$9,966 \cdot 10^{-5}$
3	9	0	1	120	303	1016	0,334	0,0158	0,333	$10,62 \cdot 10^{-5}$
4	8	1	1	112	1007	1787	0,311	0,0278	0,31	$9,874 \cdot 10^{-5}$
5	8	0	2	120	307	1303	0,332	0,0202	0,332	$10,56 \cdot 10^{-5}$
6	7	1	2	111	994	1874	0,309	0,0292	0,308	$9,789 \cdot 10^{-5}$
7	7	0	3	119	301	1562	0,33	0,0243	0,329	$10,48 \cdot 10^{-5}$
8	6	1	3	110	976	1970	0,307	0,0306	0,305	$9,712 \cdot 10^{-5}$
9	6	0	4	118	290	1789	0,327	0,0278	0,326	$10,39 \cdot 10^{-5}$
10	5	1	4	110	947	2071	0,305	0,0322	0,303	$9,642 \cdot 10^{-5}$
11	5	0	5	117	276	1987	0,325	0,0308	0,323	$10,29 \cdot 10^{-5}$
12	4	1	5	109	906	2172	0,303	0,0338	0,301	$9,58 \cdot 10^{-5}$
13	4	0	6	116	260	2159	0,322	0,0335	0,32	$10,2 \cdot 10^{-5}$
14	3	1	6	109	854	2271	0,301	0,0353	0,299	$9,53 \cdot 10^{-5}$
15	3	0	7	115	242	2309	0,319	0,0358	0,317	$10,1 \cdot 10^{-5}$
16	2	1	7	108	793	2364	0,3	0,0367	0,298	$9,49 \cdot 10^{-5}$
17	2	0	8	114	222	2439	0,317	0,0379	0,314	$10,01 \cdot 10^{-5}$
18	1	1	8	108	724	2448	0,3	0,038	0,0297	$9,457 \cdot 10^{-5}$
19	1	0	9	113	201	1869	0,314	0,0396	0,311	$9,925 \cdot 10^{-5}$
20	0	1	9	108	649	2524	0,299	0,0392	0,296	$9,435 \cdot 10^{-5}$
21	0	0	10	112	179	2642	0,312	0,041	0,309	$9,849 \cdot 10^{-5}$

В приведенной таблице введены обозначения: N1 – число слоев без кремния; N2 – число слоев с расплавленным кремнием; N3 – число слоев с затвердевшим кремнием. В моделях тепловых процессов задач для ускорения процесса подготовки исходных данных и решения используется одна геометрическая модель с разными свойствами слоев. В пустом слое задается

удельная электропроводность равная нулю $\sigma = 0$, в слое с расплавом кремния задается удельная электропроводность $\sigma = 10^6$ См/м, в слое с твердым кремнием задается удельная электропроводность $\sigma = 10^5$ См/м.

В таблице значение N1 соответствует номеру слоя, для которого производится расчет. Отсчет идет снизу.

Значение N2 означает состояние кремния в рассматриваемом слое: при N2=0 жидкое состояние, а при N2=1 твердое.

Значение N3 соответствует количеству слоев твердого кремния при общем числе залитых слоев на данный момент.

Из приведенных в таблице значений следует, что по мере роста числа слоев происходит увеличение мощности в нагрузке и снижение импеданса индуктора. При неизменном токе индуктора мощность в слое жидкого кремния уменьшается за счет того, что все большее число слоев твердого кремния участвует в расчете и возрастает их доля в общее значение. Кроме того, изменяется соотношение сопротивлений катушки индуктора и нагрузки.

Переход кремния из жидкого в твердое состояние для каждого слоя приводит к циклическому ступенчатом изменению параметров. Приведенные на рис.4.2, 4.3 диаграммы иллюстрируют для каждого слоя изменение активной и реактивной мощности индуктора.

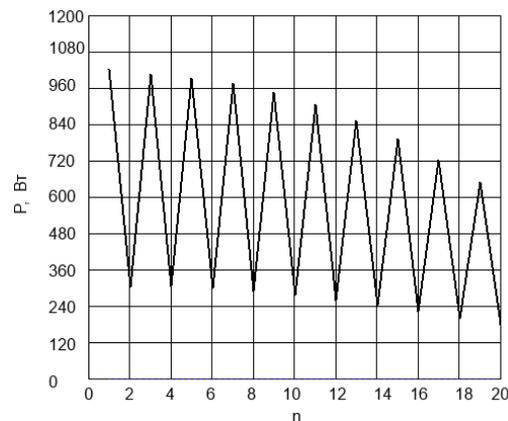


Рис.4.2. Зависимость активной мощности от числа слоев кремния

Большие колебания активной мощности не так опасны, как сравнительно небольшие отклонения для реактивной мощности. Согласно расчетам

коэффициент мощности составляет около 0,05. Изменение реактивной мощности на 5% приводит к значительному изменению тока, потребляемого контуром «индуктор – конденсаторная батарея» при условии неизменной емкости батареи. Практически ток контура изменяется на 100% относительно уровня активной составляющей тока индуктора, то есть увеличивается в два раза.

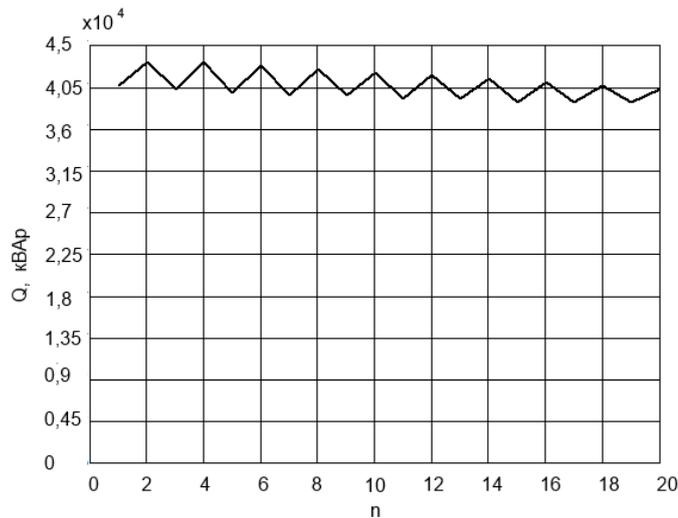


Рис.4.3. Зависимость реактивной мощности от числа слоев кремния

Питание индуктора неизменным по величине током по мере увеличения общей высоты цилиндра приводит к снижению мощности в слое с жидким кремнием. Начальное значение мощности, равное 1 кВт, в слое с расплавом обеспечивает достаточное усилие для отталкивания. При общей высоте 0,15 м мощность в верхнем слое снижается до 649 Вт, соответственно усилие становится на 35% меньше. Для исследования этой проблемы рассмотрена система питания при неизменном напряжении, равном 120 В.

Аналогичные расчеты выполнены для вариантов 2-7 для разных значений диаметра, высоты загрузки, разности высоты основания индуктора и загрузки, длины индуктора. Исследования параметров проводились при постоянном значении тока или напряжения. Величина ширины витка неизменна, число витков зависит от длины индуктора.

Результаты расчетов приведены в приложении П-2, а некоторые параметры представлены в табл.4.2.

При увеличении количества слоев мощность тепловыделения в верхнем слое снижается, что объясняется постоянством тока индуктора и суммарного магнитного потока. Происходит лишь перераспределение источников в слитке. Проблема возникает при переходе слоя в твердое состояние, когда проводимость снижается в 10 раз. Каждый раз потребляемая индуктором мощность увеличивается. На первый взгляд, это противоречит теории: увеличение сопротивления должно приводить к снижению нагрузки. В данном случае сказывается изменение размеров области с током, что отражается на реактивном сопротивлении загрузки.

Таблица 4.2

Параметры индуктора и верхнего слоя загрузки

	$D_{загр}$, м	$H_{загр}$, м	Δh , м	$h_{инд}$, м	$U_{инд}$, В	$I_{инд}$, А	$P_{верх.сл}$ Вт	F , Гц
1	0,3	0,15	0	0,256	120-108	336	1024-649	500
2	0,3	0,15	0,053	0,256	120	358-401	1155-800	500
3	0,3	0,15	0,04	0,256	120	358-403	1051-886	500
4	0,3	0,15	0,04	0,304	134	357-381	1061-1188	500
5	0,6	0,15	0,12	0,384	90	660	1548-1425	50
6	0,6	0,15	0,053	0,256	211-161	288	2142-1014	500
7	0,6	0,15	0,12	0,384	200	177-196	1499-874	500

Для сравнения представлены зависимости мощности в слое расплавленного кремния от числа слоев для индукторов с разной длиной при различных частотах (рис.4.4).

Зависимость мощности тепловыделения в слое с жидким кремнием для индуктора на частоте 50 Гц имеет меньшие отклонения от заданного значения. Однако КПД индуктора на этой частоте гораздо ниже, чем на частоте 500 Гц, так как не соблюдается соотношение радиуса загрузки и глубины проникновения, обеспечивающее выгодные характеристики.

На рис.4.4 приведены диаграммы максимальной мощности в жидком слое кремния в зависимости от номера слоя (числа залитых слоев) для вариантов с параметрами согласно табл.4.2.

После кристаллизации верхнего слоя мощность снижается. В целом характер диаграмм, представленных на рис.4.5, для мощности отвердевшего

верхнего слоя похож на те, что показаны на рис.4.4. Однако имеются отличия, обусловленные меньшим весом токопроводящей области в общем магнитном поле индуктора по сравнению с предыдущим случаем, когда электропроводность и ток слоя жидкого кремния создают сильное отклонение в ровном распределении напряженности.

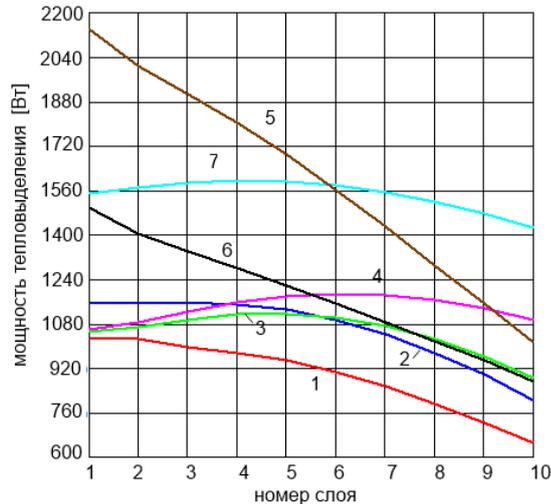


Рис.4.4. Зависимости мощности тепловыделения в слоях с расплавленным кремнием от числа слоев: для загрузки диаметром 0,3 м: 1 - $h_{и}=0,256$ м; ток 336 А; $f=500$ Гц; 2 - $h_{и}=0,256$ м; напряжение 120 В; $f=500$ Гц; 3 - $h_{и}=0,256$ м; напряжение 120 В; 4 - $h_{и}=0,384$ м; напряжение 134 В; $f=500$ Гц; для загрузки диаметром 0,6 м: 5 - $f=50$ Гц; 6 - $f=500$ Гц; $h_{и}=0,256$ м; 7 - $f=500$ Гц; $h_{и}=0,384$ м;

По результатам анализа вариантов конструкций индукционных систем можно сказать, что для загрузки диаметром 0,3 м предпочтительным является вариант №4 со смещением индуктора на 0,04 м вниз по отношению к нижнему слою кремния, так как обеспечивается малое изменение мощности в слое расплавленного кремния, и мощность не снижается сверх допустимой величины. Это гарантирует нужное значение электромагнитной силы, действующей на расплав.

Для индуктора, питающегося от источника напряжением 50 Гц, обеспечивается почти неизменное значение мощности тепловыделения в расплаве при любом числе слоев. Недостатком является низкий электрический КПД и большие токи, что затрудняет изготовление индуктора с заданными геометрическими размерами. Кроме того, низкое напряжение и однофазное напряжение требуют мер по согласованию с сетью.

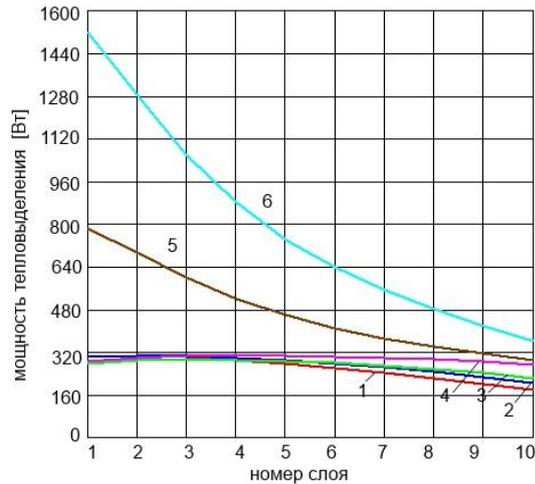


Рис.4.5. Зависимости мощности тепловыделения в верхних слоях с затвердевшим кремнием от числа слоев: для загрузки диаметром 0,3 м: 1 - $h_i=0,256$ м; ток 336 А; $f=500$ Гц; 2 - $h_i=0,256$ м; напряжение 120 В; $f=500$ Гц; 3 - $h_i=0,256$ м; напряжение 120 В; 4 - $h_i=0,384$ м; напряжение 134 В; $f=500$ Гц; для загрузки диаметром 0,6 м: 5 - $f=500$ Гц; 6 - $f=500$ Гц; $h_i=0,256$ м.

Применение токов частотой 500 Гц для загрузки диаметром 0,6 м сопровождается значительным изменением мощности в верхнем слое как при неизменном токе индуктора, так и при неизменном напряжении. Необходимо использование регулирующих устройств. Учитывая малую толщину заливаемого слоя, инерционность процесса невелика и система регулирования должна обладать хорошим быстродействием.

4.2 Тепловые процессы в кристаллизаторе методического действия

Существующие технологии кристаллизации сплавов алюминия в электромагнитных кристаллизаторах используют режим непрерывной подачи расплава внутрь соленоидальной катушки с одновременным охлаждением потоком воды. Физические свойства алюминиевых сплавов позволяют обеспечить быстрое охлаждение и исключить появление внутренних дефектов, ухудшающих качество слитков. Для кремния водяное охлаждение чревато появлением микротрещин. Поэтому более подходящим вариантом является охлаждение с более низкими скоростями снижения температуры, что достигается при ограничении охлаждающих потоков. В отличие от предыдущих вариантов системы кристаллизации расплав загружается порциями в виде тонкого слоя поверх уже затвердевшего предыдущего слоя.

Маленькая высота слоя расплава позволяет снизить электромагнитную силу и, соответственно, ток и мощность тепловыделения в расплаве. В этом случае процесс кристаллизации протекает при меньших энергозатратах и за меньшее время. Целью расчетов является определение распределения температуры в загрузке в процессе охлаждения на каждом шаге и поиск наиболее приемлемых параметров – скорости охлаждения и длительности интервалов.

4.2.1 Расчет процессов кристаллизации при коэффициенте теплопроводности футеровки 5 Вт/(м град) и времени цикла 300 с.

Исходные данные:

радиус 0,15 м;

высота 0,15 м;

коэффициент теплопроводности боковой стенки футеровки $2 \text{ Вт/(м} \cdot \text{°C)}$;

коэффициент теплопроводности нижней части футеровки $5 \text{ Вт/(м} \cdot \text{°C)}$;

боковая футеровка охлаждается с коэффициентом конвективного теплообмена, равным $5 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{°C)}$;

отвод тепла снизу осуществляется при коэффициенте конвективного теплообмена, равном $1000 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{°C)}$.

Результаты расчета представлены в табл.4.3. Значения тепловых потоков на нижней, боковой и верхней поверхности расплава, переходящего в твердое состояние, показаны в моменты начала каждого этапа охлаждения после заливки нового слоя расплавленного кремния. Тепловой поток с верхней поверхности в окружающую среду превосходит по величине другие составляющие до тех пор, пока из-за снижения температуры поверхности, поток излучения не станет меньше потока в основании слитка, определяемого процессом теплопроводности.

Распределение температуры в слитке, быстро проходящем стадию расплава, выравнивается после кристаллизации каждого слоя (рис.4.6, 4.7).

Тепловые потоки с поверхности загрузки при дискретном повышении уровня расплава при коэффициенте теплопроводности футеровки $5 \text{ Вт} / (\text{м} \cdot \text{град})$

t, с	1	301	601	901	1201	1501	1801	2101	2401	2701	3001	3600
$Q_{\text{низ}}$, кВт	0	5,62	7,03	7,55	7,66	7,85	7,84	8,13	8,22	8,16	8,14	4,92
$Q_{\text{бок}}$, кВт	2,25	1,8	1,45	1,34	0,61	0,43	0,32	0,38	0,38	0,39	0,39	0,15
$Q_{\text{верх}}$, кВт	11,9	11,9	11,9	11,9	11,9	11,9	11,9	11,9	11,9	2,39	1,97	0,55
P, кВт	1,1	0,9	1,1	1,2	1,3	1,3	1,5	1,6	1,8	1,9	1,1	1,1

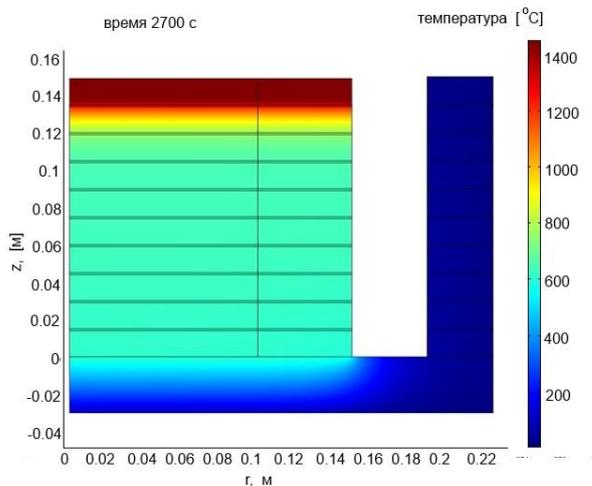


Рис.4.6. Распределение температуры в загрузке в момент времени 2700 с.

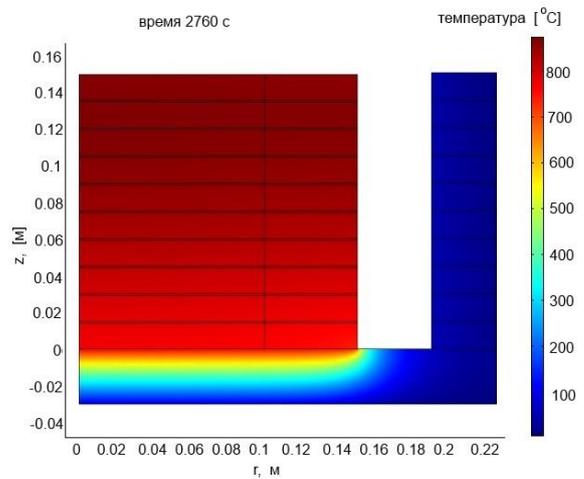


Рис.4.7. Распределение температуры в загрузке в момент времени 2760 с.

Кристаллизация каждого слоя завершается в течение одной минуты, но на этом процесс не прерывается, чтобы температура успела снизиться до значения, которое не позволит повторно перейти в расплавленное состояние при заливке нового слоя. Диаграммы температуры в точках на боковой поверхности слоев представлены на рис.4.8.

В целом, диаграммы повторяются для каждого слоя, но минимальное значение температуры возрастает. Это свидетельствует о том, что среднее значение температуры слитка становится больше из-за недостаточности охлаждающих потоков.

На рис.4.9 показаны диаграммы температуры по высоте слитка на боковой поверхности в отдельные моменты времени.

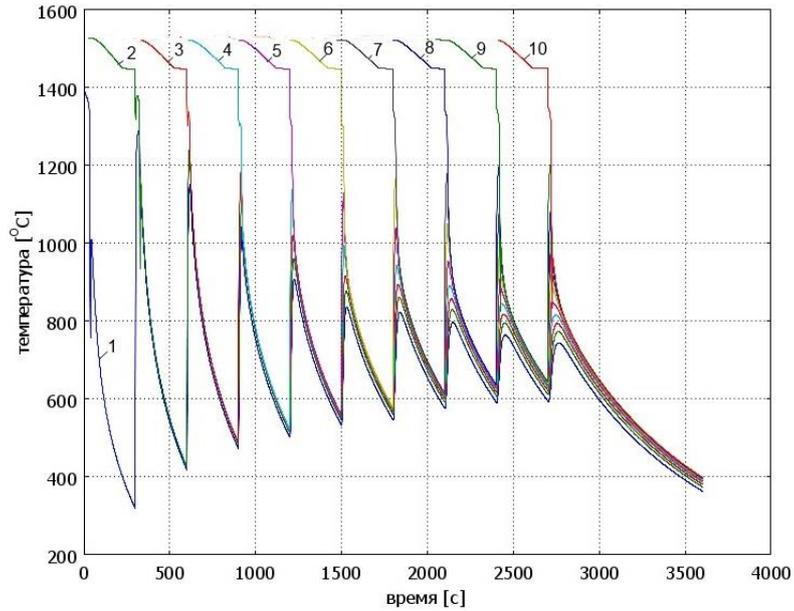


Рис.4.8 Временные диаграммы температуры на боковой поверхности при охлаждении в кристаллизаторе с коэффициентом теплопроводности футеровки $10 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{град})$ и временем цикла 300 с точках: 1 – $z=0,001 \text{ м}$; 2 – $z=0,016 \text{ м}$; 3 – $z=0,031 \text{ м}$; 4 – $z=0,046 \text{ м}$; 5 – $z=0,061 \text{ м}$; 6 – $z=0,076 \text{ м}$; 7 – $z=0,091 \text{ м}$; 8 – $z=0,106 \text{ м}$; 9 – $z=0,121 \text{ м}$; 10 – $z=0,136 \text{ м}$.

Как видно из рисунка, уже через одну секунду начинается процесс кристаллизации, а через пятьдесят секунд диаграмма температуры во всем слитке выравнивается с учетом того, что среднее значение температуры слитка в этот момент увеличилось на 150 градусов.

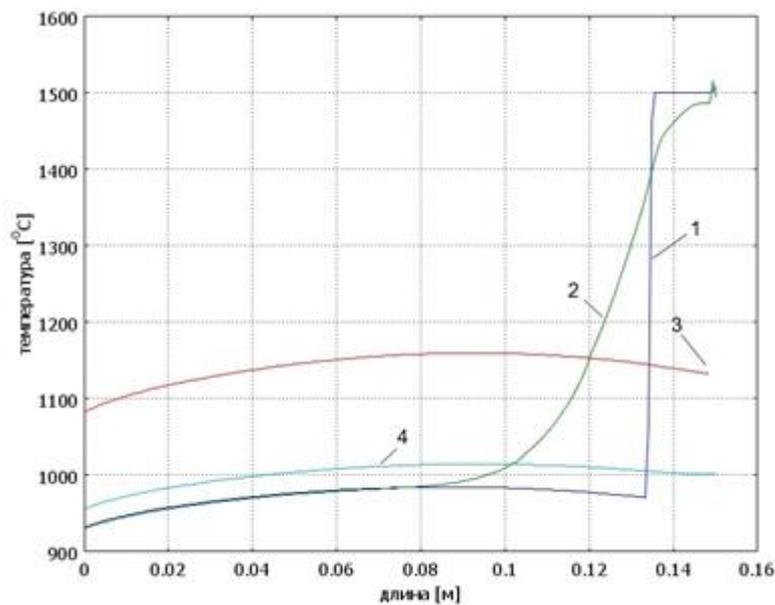


Рис.4.9 Диаграммы температуры по высоте на боковой поверхности при охлаждении в кристаллизаторе с коэффициентом теплопроводности футеровки $10 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{град})$ и временем цикла 300 с в моменты времени: 1 – 2699 с; 2 – 2701 с; 3 – 2850 с; 4 – 3000 с.

В момент времени 3000 с средняя температура слитка имеет значение 610 градусов.

4.2.2 Расчет процессов кристаллизации при коэффициенте теплопроводности футеровки 10 Вт/(м град) и времени цикла цикл 300 с.

Исходные данные:

радиус 0,15 м;

высота 0,15 м;

коэффициент теплопроводности боковой стенки футеровки 10 Вт / (м · °С);

коэффициент теплопроводности нижней части футеровки 10 Вт / (м · °С).

боковая футеровка охлаждается с коэффициентом конвективного теплообмена, равным 500 Вт / (м² · °С);

отвод тепла снизу осуществляется при коэффициенте конвективного теплообмена, равном 1000 Вт / (м² · °С).

Результаты расчета представлены в табл.4.4.

Таблица 4.4

Тепловые потоки с поверхности загрузки при дискретном повышении уровня расплава при коэффициенте теплопроводности футеровки 10 Вт/(м град)

t, с	1	301	601	901	1201	1501	1801	2101	2401	2701	3001	3600
$Q_{низ}$, кВт	0	26,26	25,2	17,2	10,84	7,26	5,06	4,07	2,77	2,18	1,8	1,38
$Q_{бок}$, кВт	4,5	2,49	1,5	1,18	0,5	0,02	0,38	0,35	0,3	0,4	0,31	0,11
$Q_{верх}$, кВт	10	11,9	11,9	11,9	11,9	11,9	11,9	11,9	11,9	2,48	1,02	0,19

При сравнении результатов расчета с предыдущим вариантом (коэффициент теплопроводности нижней части футеровки равен 5 Вт / (м · °С) увеличился тепловой поток через основание футеровки с 7,85 до 10,8 кВт. Одновременно увеличился тепловой поток через боковую стенку футеровки с 1,8 до 2,49 кВт (момент времени 300 с). Это отразилось на скорости охлаждения и кристаллизации слитка, что показано на рис.4.10-4.13.

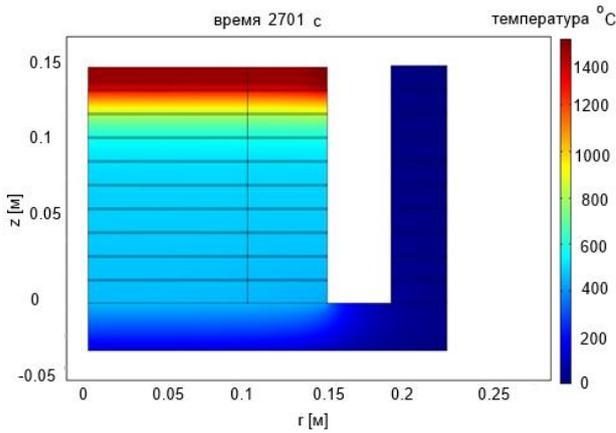


Рис.4.10 Распределение температуры в загрузке в момент времени 2701 с.

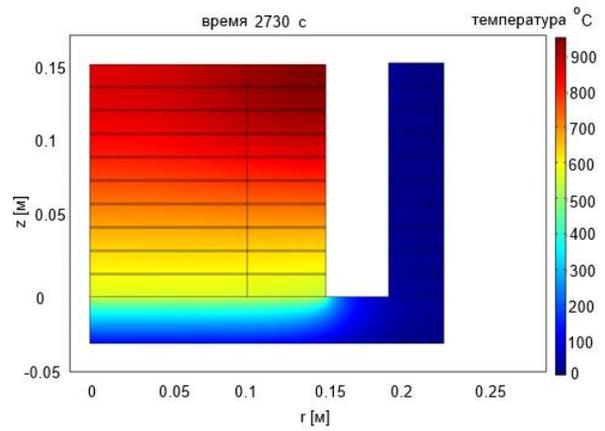


Рис.4.11. Распределение температуры в загрузке в момент времени 2730 с.

Из рис.4.11 видно, что через тридцать секунд после заливки последнего слоя расплава температура слитка находится в пределах от 900 до 550 градусов. Еще через семьдесят секунд температура слитка выравнивается и приобретает значение 600 градусов, что показано на рис. 4.12.

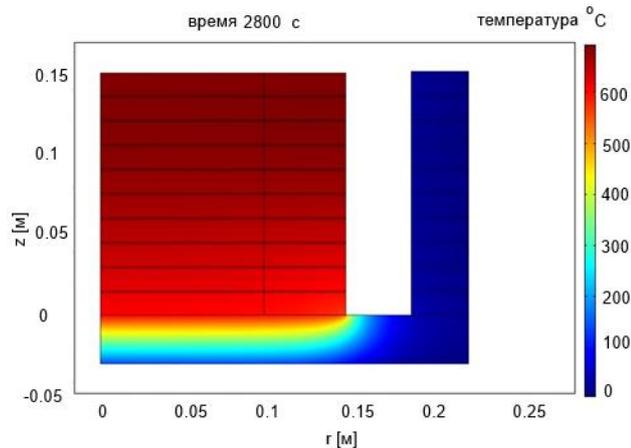


Рис.4.12. Распределение температуры в загрузке в момент времени 2800 с.

Временные диаграммы температуры в точках на поверхности каждого слоя показаны на рис.4.13. Значение температуры кремния перед заливкой следующего слоя возрастает с 200 до 420 градусов. При сравнении с диаграммами из предыдущего расчета (рис.4.8) видно, что минимальное значение в начале процесса снизилось на 100 секунд (с 300 до 200 с), а в конце процесса снизилось на 180 секунд (с 600 до 420 с).

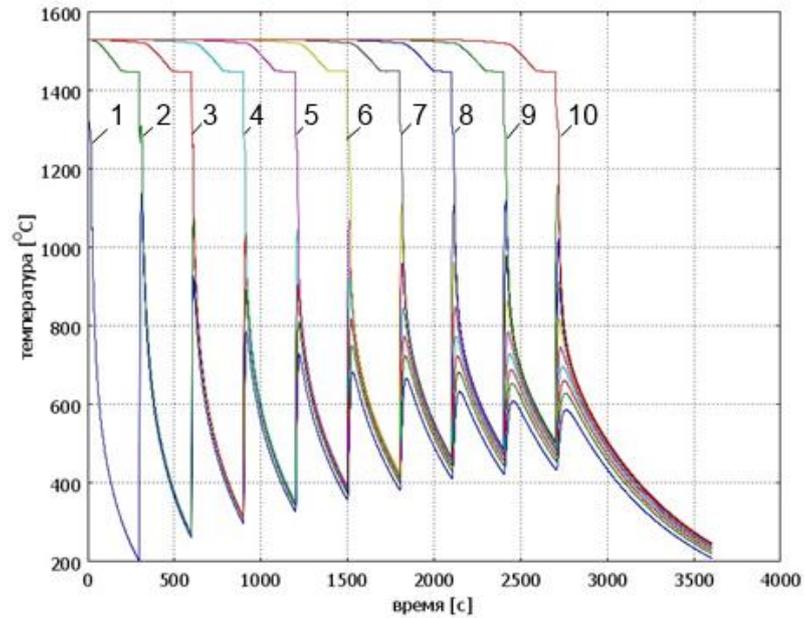


Рис.4.13 Временные диаграммы температуры на боковой поверхности при охлаждении в кристаллизаторе с коэффициентом теплопроводности футеровки 10 Вт/(м град) и временем цикла 300 с точках: 1 – $z=0,001$ м; 2 – $z=0,016$ м; 3 – $z=0,031$ м; 4 – $z=0,046$ м; 5 – $z=0,061$ м; 6 – $z=0,076$ м; 7 – $z=0,091$ м; 8 – $z=0,106$ м; 9 – $z=0,121$ м; 10 – $z=0,136$ м.

В момент времени, равный 3000 секунд, температура слитка имеет значение 430 градусов, что меньше на 180 градусов по сравнению с предыдущим вариантом (рис.4.9).

Диаграммы температуры на боковой поверхности слоя быстро изменяются, что показано на рис.4.14. За время, равное 2 с, температура в точках лежащего ниже слоя возрастает на сотни градусов. В то же время, в слое расплавленного кремния изменения наступают не так быстро. До тех пор, пока жидкий кремний не отдаст теплоту плавления нижнему слою, температура держится выше точки плавления. Это позволяет протекать кристаллизации жидкого слоя более равномерно.

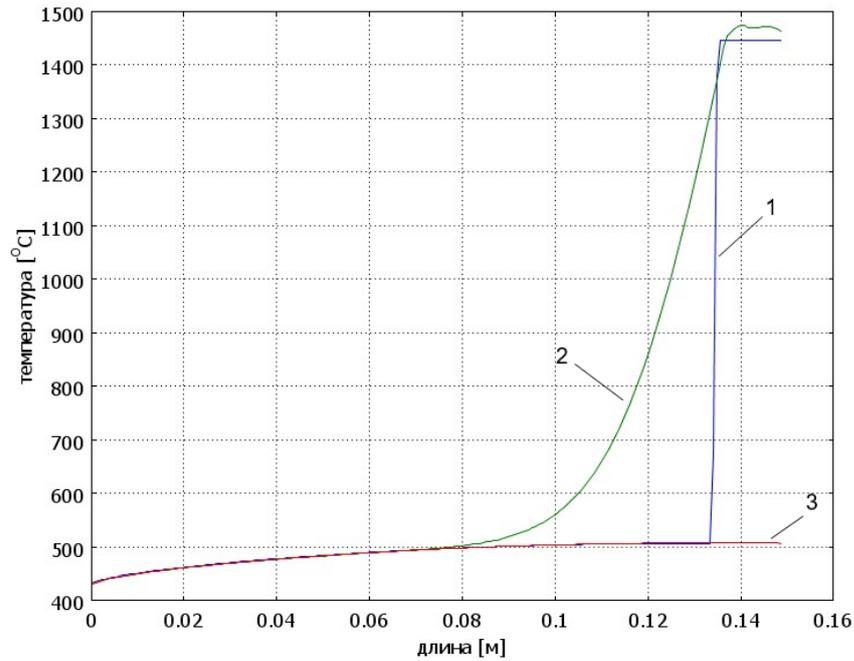


Рис.4.14 Диаграммы температуры по высоте на боковой поверхности при охлаждении в кристаллизаторе с коэффициентом теплопроводности футеровки 10 Вт/(м град) и временем цикла 300 с в моменты времени: 1 – 2699 с; 2 – 2701 с; 3 – 3000 с.

4.2.3 Расчет процессов кристаллизации при коэффициенте теплопроводности футеровки 15 Вт/(м град) и времени цикла цикл 300 с.

Исходные данные:

радиус 0,15 м;

высота 0,15 м;

коэффициент теплопроводности боковой стенки футеровки 15 Вт / (м · °С);

Коэффициент теплопроводности нижней части футеровки 15 Вт / (м · °С).

боковая футеровка охлаждается с коэффициентом конвективного теплообмена, равным 500 Вт / (м² · °С);

отвод тепла снизу осуществляется при коэффициенте конвективного теплообмена, равном 1000 Вт / (м² · °С).

Результаты расчета представлены в табл.4.5. При сравнении результатов расчета с предыдущим вариантом (коэффициент теплопроводности нижней части футеровки равен 10 Вт / (м · °С)) увеличился тепловой поток через

основание футеровки с 10,8 до 11,1 кВт. Одновременно увеличился тепловой поток через боковую стенку футеровки с 2,49 до 2,31 кВт (момент времени 300 с). Это отразилось на скорости охлаждения и кристаллизации слитка, что показано на рис.4.15.

Таблица 4.5.

Тепловые потоки с поверхности загрузки при дискретном повышении уровня расплава при коэффициенте теплопроводности футеровки 15 Вт/(м град) цикл 300

t, с	1	301	601	901	1201	1501	1801	2101	2401	2701	3001	3600
$Q_{\text{низ}}$, кВт	0	6,26	7,91	8,32	9,29	9,97	10,1	10,6	10,6	11,1	11,1	4,48
$Q_{\text{бок}}$, кВт	5,2	2,61	1,37	1,34	0,46	0,14	0,21	0,24	0,13	0,16	0,24	0,08
$Q_{\text{верх}}$, кВт	11,8	11,9	11,9	11,9	11,9	11,9	11,9	11,9	11,9	2,39	0,59	0,09

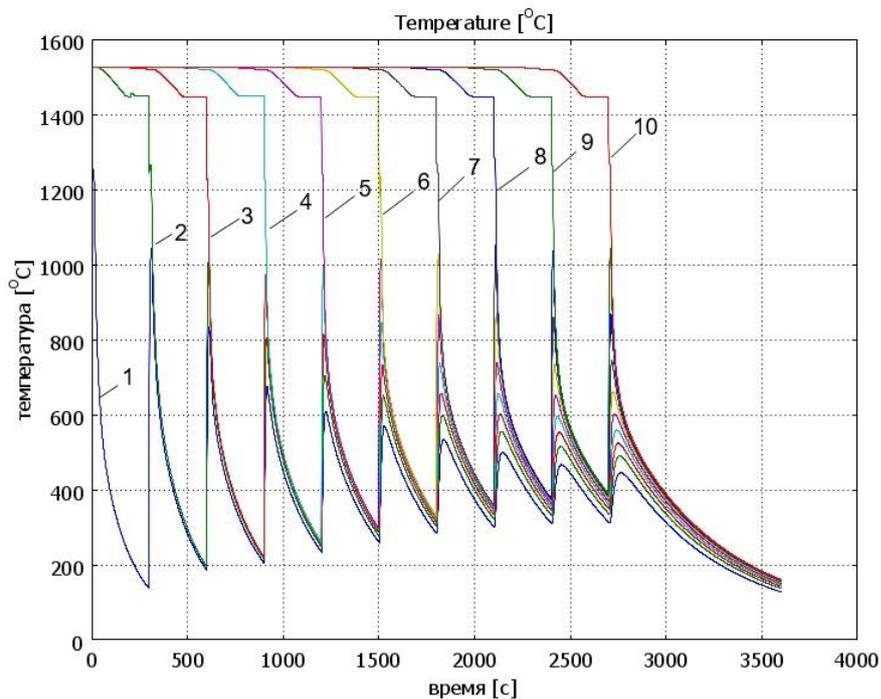


Рис.4.15 Временные диаграммы температуры на боковой поверхности при охлаждении в кристаллизаторе с коэффициентом теплопроводности футеровки 15 Вт/(м град) и временем цикла 300 с точках: 1 – $z=0,001$ м; 2 – $z=0,016$ м; 3 – $z=0,031$ м; 4 – $z=0,046$ м; 5 – $z=0,061$ м; 6 – $z=0,076$ м; 7 – $z=0,091$ м; 8 – $z=0,106$ м; 9 – $z=0,121$ м; 10 – $z=0,136$ м.

Из диаграмм на рис.4.15 видно, что минимальное значение температуры кремния изменяется в пределах от 150 до 300 градусов. Что соответствует

моментам времени перед заливкой следующего слоя расплава. В предыдущем варианте аналогичный диапазон температур составляет 200 – 420 градусов (рис.4.13).

В момент времени, равный 3000 секунд, средняя температура слитка имеет значение 350 градусов, что меньше на 80 градусов по сравнению с предыдущим вариантом (рис.4.13).

Диаграммы температуры на боковой поверхности слоя так же быстро изменяются, что показано на рис.4.16. В момент времени, равный 3000 секунд, температура слитка имеет значение 400 градусов, что меньше на 30 градусов по сравнению с предыдущим вариантом (рис.4.14).

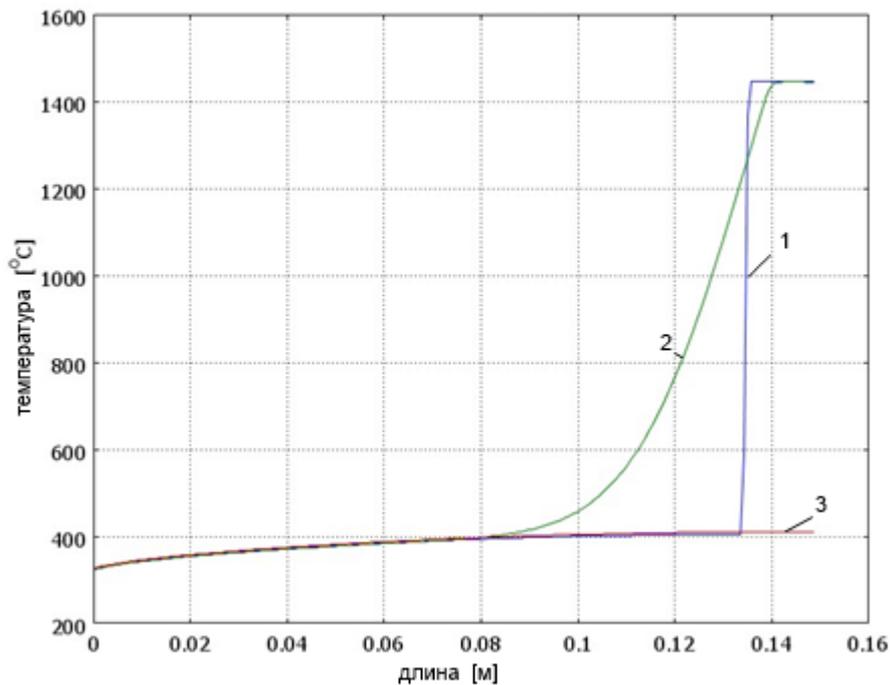


Рис.4.16 Диаграммы температуры по высоте на боковой поверхности при охлаждении в кристаллизаторе с коэффициентом теплопроводности футеровки 15 Вт/(м град) и временем цикла 300 с в моменты времени: 1 – 2699 с; 2 – 2701 с; 3 – 3000 с.

На основе результатов расчета, представленных в табл. 4.3-4.5, определены максимальные значения тепловых потоков с боковой и нижней поверхности слитка, минимальные значения температуры и средние значения в момент времени 3000 с. Указанные значения сведены в таблицу 4.6.

Отдельно показаны временные зависимости теплового потока через нижнюю поверхность при разных значениях коэффициента теплопроводности футеровки, чтобы проиллюстрировать влияние процессов в слое изоляции, которая в начале процесса сначала разогревается сама, и лишь затем тепловой поток к охладителю начинает увеличиваться (рис.4.19).

Таблица 4.6.

Тепловые потоки и температуры при разных коэффициентах теплопроводности футеровки

	5	10	15
$Q_{\text{низмакс}}$, кВт	8,2	10,8	10,6
$Q_{\text{бокмакс}}$, кВт	2,25	2,49	2,61
$T_{\text{мин}}$, °C	300	200	150
$T_{\text{ср}}$, °C	610	430	350

Для наглядности данные из табл.4.6 представлены в виде зависимостей от коэффициента теплопроводности футеровки на рис.4.17, 4.18.

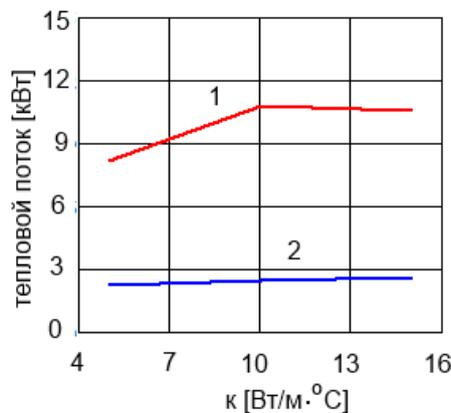


Рис.4.17 Зависимости тепловых потоков от коэффициента теплопроводности футеровки: 1 – для нижней поверхности; 2 – для боковой поверхности

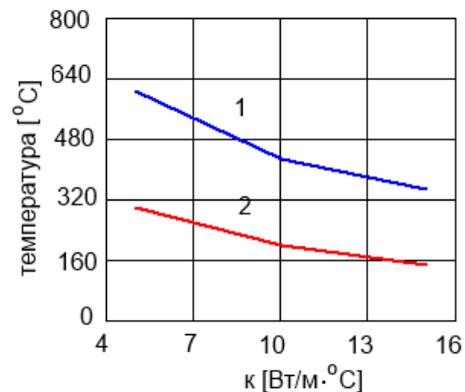


Рис.4.18 Зависимости температуры слитка от коэффициента теплопроводности футеровки: 1 – минимальная; 2 – средняя для $t=3000$ с

Из рисунка 4.17 следует, что тепловой поток через нижнюю поверхность возрастает до определенного значения, а затем немного уменьшается. Объяснение этому состоит в том, что кроме термического сопротивления нижней части футеровки сказывается сопротивление самого слитка. Эти величины становятся сопоставимыми. Тепловой поток с боковой поверхности зависит не только от теплопроводности через стенку футеровки, но и от

теплообмена излучением между футеровкой и боковой поверхностью. Поэтому величина данного потока меньше, чем через основание. Тепловые потери через верхнюю поверхность практически не меняются, пока температура поверхности не снизится достаточно значительно. Увеличение скорости охлаждения возможно только при использовании металлической подложки вместо керамики. Все же это нежелательно из-за того повышения опасности растрескивания кремния.

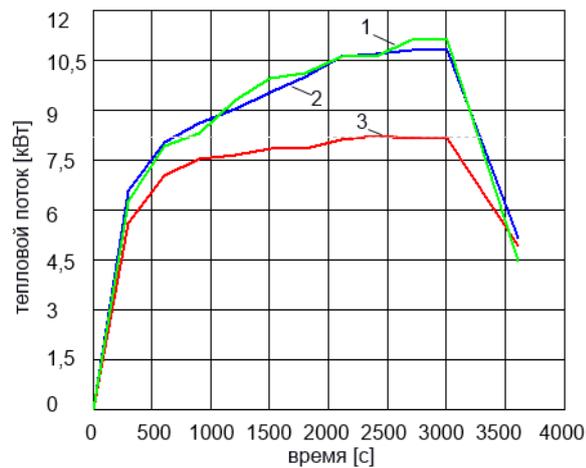


Рис.4.19 Зависимости теплового потока с нижней поверхности загрузки при коэффициенте теплопроводности подложки: 1 – 15 Вт/м град; 2 – 10 15 Вт/м град; 3 – 5 15 Вт/м град.

4.3 Определение минимальной длительности интервала заливки-охлаждения

Расчеты процесса кристаллизации при различных коэффициентах теплопроводности показали, что температура слитка в конце каждого интервала достаточно снижается и не происходит повторного расплавления уже затвердевшего слоя. Целесообразно проведения поиска минимального интервала, при котором кристаллизация идет непрерывно. Для этого выполнен ряд расчетов, в которых время интервала изменялось от 200 до 50 секунд.

4.3.1 Расчет процессов кристаллизации при коэффициенте теплопроводности футеровки $15 \text{ Вт} / (\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$ и времени цикла 200 с.

Результаты расчета представлены в табл.4.7. При сравнении результатов расчета с предыдущим вариантом при таком же коэффициенте

теплопроводности футеровки, равном $15 \text{ Вт} / (\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$), но при длительности времени интервала, равной 300 секунд, увеличился тепловой поток на нижней поверхности с 11,9 до 16,4 кВт. Одновременно незначительно увеличилось среднее значение теплового потока через боковую стенку футеровки. Это отразилось на скорости охлаждения и кристаллизации слитка, что показано на рис.4.20. На рис.4.20 показаны временные диаграммы температуры в слоях слитка. По сравнению с рис.4.15, где приведены диаграммы при длительности интервала 300 секунд, видно, что минимальное значение температуры кремния изменялось в пределах от 150 до 300 градусов, а теперь находится в пределах от 210 до 470 секунд.

Таблица 4.7

Тепловые потоки с поверхности загрузки при дискретном повышении уровня расплава при коэффициенте теплопроводности футеровки $15 \text{ Вт} / (\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$ и времени цикла 200 с.

t, с	1	201	401	601	801	1001	1201	1401	1601	1801	2001	3600
$Q_{\text{низ}}$, кВт	0	9,59	12,4	14,1	14,3	15	15,1	15,3	15,4	16,3	16,2	1,89
$Q_{\text{бок}}$, кВт	3,48	2,23	1,59	1,39	0,64	0,39	0,39	0,42	0,36	0,44	0,41	0,04
$Q_{\text{верх}}$, кВт	10,9	11,9	11,9	11,8	11,9	11,9	11,9	12	11,9	11,2	1,54	0,025

Уменьшение длительности интервала привело к значительному увеличению средней температуры, которая составляет 600 градусов.

Из диаграмм, представленных на рис.4.21, также видно, что среднее значение температуры кремния в конце последнего интервала заливки и охлаждения составляет 600 градусов.

Изменение теплового потока к охладителю в процессе кристаллизации показано на рис.4.22. Своего максимума значение потока достигает во время третьего интервала и остается практически неизменным в оставшееся время.

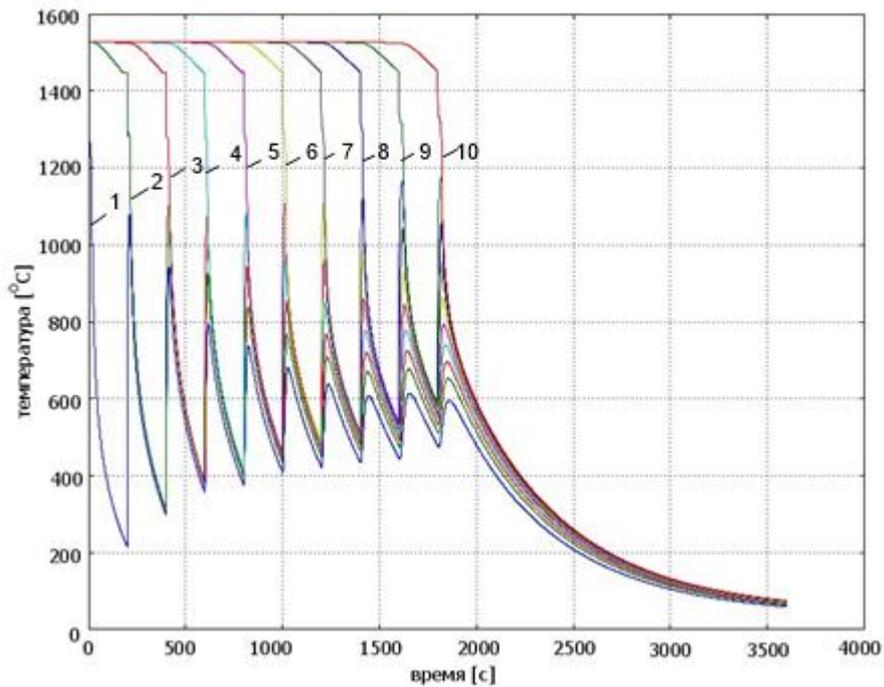


Рис.4.20 Временные диаграммы температуры на боковой поверхности при охлаждении в кристаллизаторе с коэффициентом теплопроводности футеровки $15 \text{ Вт} / (\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$ и временем цикла 200 с точках: 1 – $z=0,001 \text{ м}$; 2 – $z=0,016 \text{ м}$; 3 – $z=0,031 \text{ м}$; 4 – $z=0,046 \text{ м}$; 5 – $z=0,061 \text{ м}$; 6 – $z=0,076 \text{ м}$; 7 – $z=0,091 \text{ м}$; 8 – $z=0,106 \text{ м}$; 9 – $z=0,121 \text{ м}$; 10 – $z=0,136 \text{ м}$.

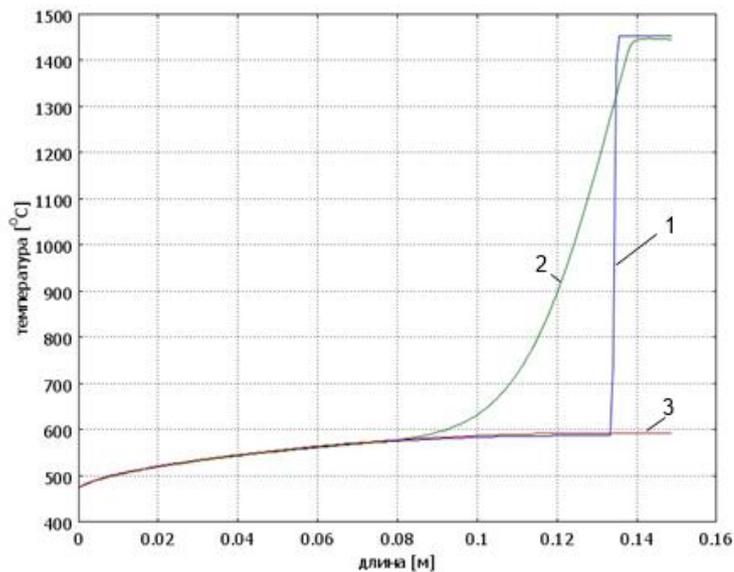


Рис.4.21 Диаграммы температуры по высоте на боковой поверхности при охлаждении в кристаллизаторе с коэффициентом теплопроводности футеровки $15 \text{ Вт} / (\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$ и временем цикла 200 с в моменты времени: 1 – 1799 с; 2 – 1801 с; 3 – 2000 с.

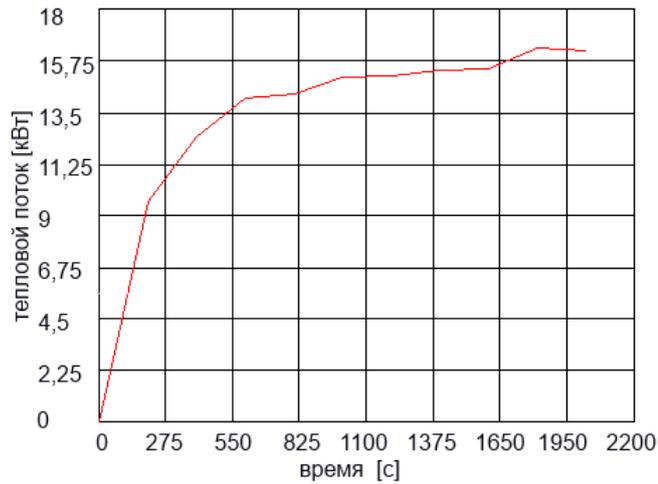


Рис.4.22. Зависимость теплового потока с нижней поверхности загрузки при коэффициенте теплопроводности подложки $15 \text{ Вт} / (\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$ и времени цикла 200 с.

4.3.2 Расчет процессов кристаллизации при коэффициенте теплопроводности футеровки $15 \text{ Вт} / (\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$ и времени цикла 100 с.

Результаты расчета представлены в табл.4.8. При сравнении результатов расчета с предыдущим вариантом при длительности времени интервала, равной 200 секунд, тепловой поток на нижней поверхности увеличился с 16,4 до 24,8 кВт. Это отразилось на скорости охлаждения и кристаллизации слитка, что иллюстрируют временные диаграммы температуры в слоях слитка (рис.4.23). По сравнению с рис.4.20, где приведены диаграммы при длительности интервала 200 секунд, видно, что минимальное значение температуры кремния изменялось в пределах от 210 до 470 градусов, а теперь находится в пределах от 400 до 720 секунд.

Таблица 4.8

Тепловые потоки с поверхности загрузки при дискретном повышении уровня расплава при коэффициенте теплопроводности футеровки $15 \text{ Вт} / (\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$ и времени цикла 100 с.

t, с	1	101	201	301	401	501	601	701	801	901	1001	3600
$Q_{\text{низ}}$, кВт	0	16,4	22	24,4	24,8	24,8	24,7	24,6	24,4	24,1	23,8	1,26
$Q_{\text{бок}}$, кВт	3,23	2,33	1,74	1,72	1,12	0,9	0,87	0,91	0,92	0,88	0,97	0,03
$Q_{\text{верх}}$, кВт	13,9	11,7	11,4	11,7	11,4	11,6	11,7	11,6	11,6	11,5	5,48	0,02

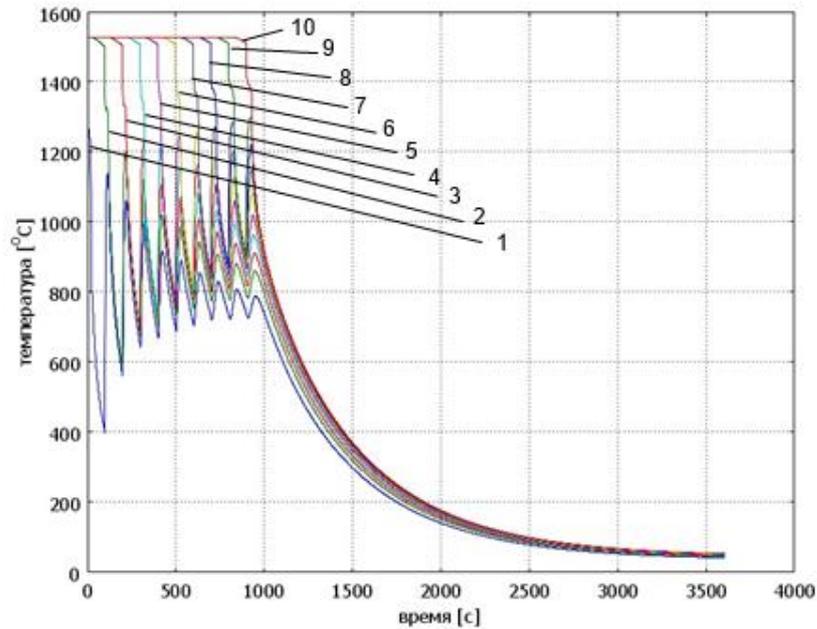


Рис.4.23 Временные диаграммы температуры на боковой поверхности при охлаждении в кристаллизаторе с коэффициентом теплопроводности футеровки $15 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{C})$ и временем цикла 100 с точках: 1 – $z=0,001$ м; 2 – $z=0,016$ м; 3 – $z=0,031$ м; 4 – $z=0,046$ м; 5 – $z=0,061$ м; 6 – $z=0,076$ м; 7 – $z=0,091$ м; 8 – $z=0,106$ м; 9 – $z=0,121$ м; 10 – $z=0,136$ м.

Уменьшение длительности интервала привело к дальнейшему увеличению средней температуры, которая составляет более 800 градусов.

Из диаграмм рис.4.24 также видно, что среднее значение температуры кремния в конце последнего интервала заливки и охлаждения составляет 900 градусов.

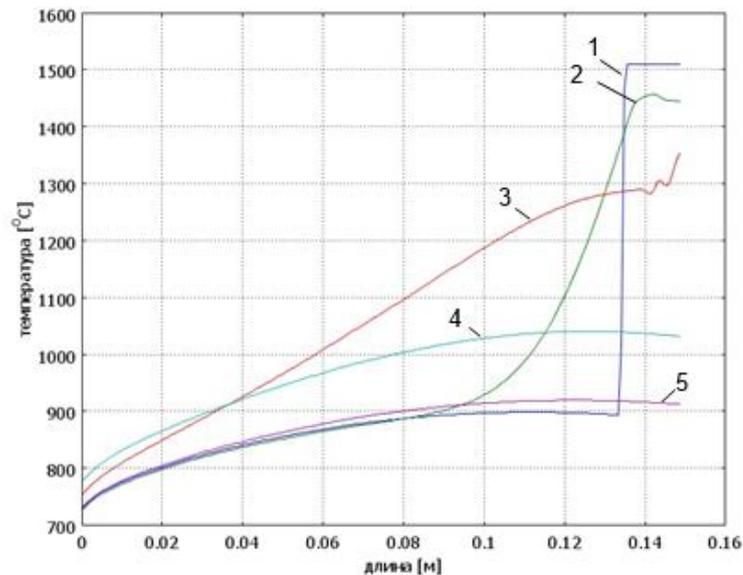


Рис.4.24 Диаграммы температуры по высоте на боковой поверхности при охлаждении в кристаллизаторе с коэффициентом теплопроводности футеровки $15 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{C})$ и временем цикла 100 с в моменты времени: 1 – 899 с; 2 – 901 с; 3 – 930 с; 4 – 960 с; 5 – 1000 с.

Изменение теплового потока к охладителю в процессе кристаллизации показано на рис.4.25. Своего максимума значение потока достигает во время третьего интервала и остается практически неизменным на протяжении остальных интервалов.

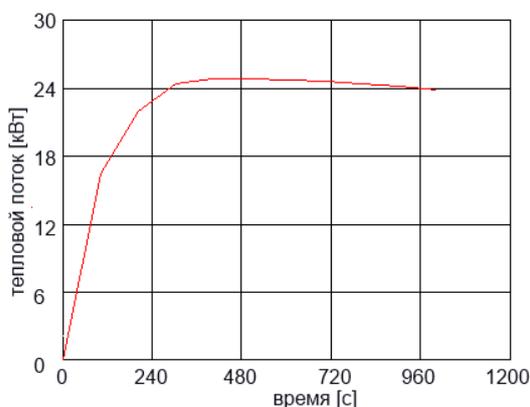


Рис.4.25. Зависимость теплового потока с нижней поверхности загрузки при коэффициенте теплопроводности подложки $15 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{C})$ и времени цикла 100 с.

4.3.3 Расчет процессов кристаллизации при коэффициенте теплопроводности футеровки $15 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{C})$ и времени цикла цикл 50 с.

Результаты расчета представлены в виде иллюстраций на рис.4.26. Необходимости обработки и формирования таблицы нет, так как согласно диаграммам температуры процесс кристаллизации протекает неудовлетворительно. На последних интервалах в жидком состоянии находятся несколько слоев расплава. Такой режим не предусмотрен конструкцией индукционного кристаллизатора, сила отталкивания недостаточна для удержания столба расплавленного кремния в заданных размерах. Произойдет контакт кремния с футеровкой, что приведет к загрязнению и кристаллизации, после которой извлечение слитка будет затруднительным. Это потребует разрушения футеровки.

На рис.4.27 показаны диаграммы температуры по высоте расплава на боковой поверхности в разные моменты времени. Через 30 секунд после заливки слоя расплава кремния в верхней части находится все еще в жидком состоянии.

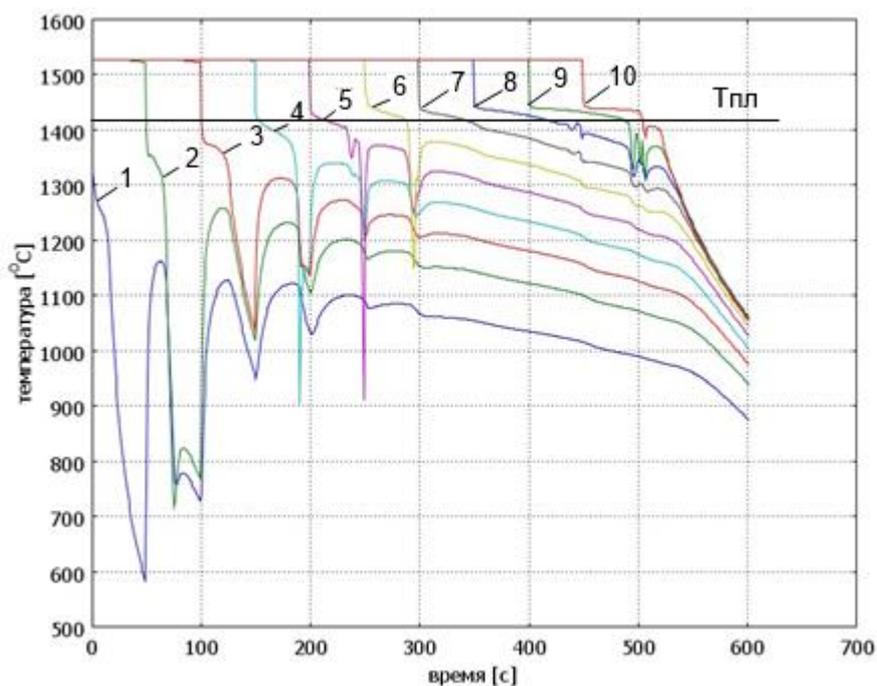


Рис.4.26 Временные диаграммы температуры на боковой поверхности при охлаждении в кристаллизаторе с коэффициентом теплопроводности футеровки $15 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$ и временем цикла 50 с точках: 1 – $z=0,001 \text{ м}$; 2 – $0,016 \text{ м}$; 3 – $0,031 \text{ м}$; 4 – $0,046 \text{ м}$; 5 – $0,061 \text{ м}$; 6 – $0,076 \text{ м}$; 7 – $0,091 \text{ м}$; 8 – $0,106 \text{ м}$; 9 – $0,121 \text{ м}$; 10 – $0,136 \text{ м}$.

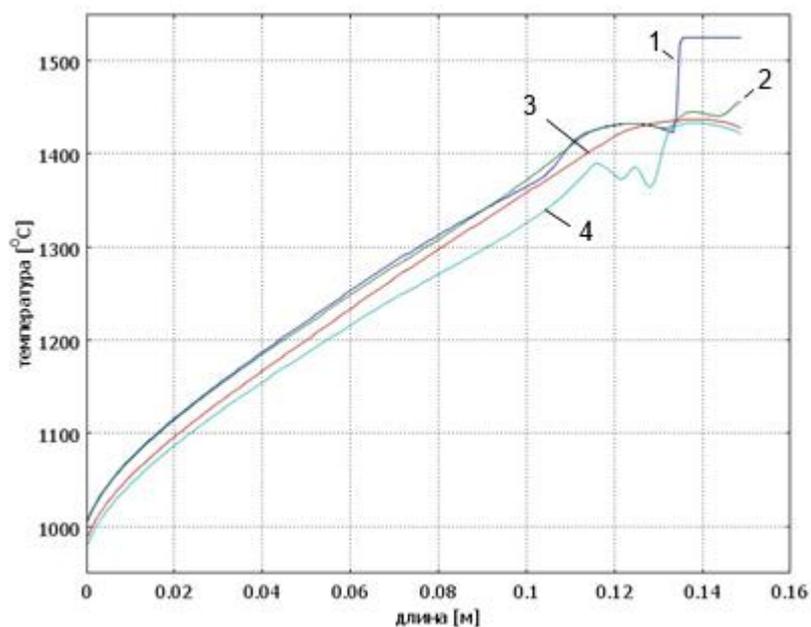


Рис.4.27 Диаграммы температуры по высоте на боковой поверхности при охлаждении в кристаллизаторе с коэффициентом теплопроводности футеровки $15 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$ и временем цикла 50 с в моменты времени: 1 – 449 с; 2 – 451 с; 3 – 480 с; 4 – 500 с.

Определение тепловых потоков при времени цикла 50 с не производилось, так как температура в конце последних циклов не становилась ниже точки затвердевания. В этом случае столб жидкого кремния создает давление больше, чем может компенсировать поле индуктора. Эффект сжатия расплава электромагнитным полем недостаточен, и расплав стекает к основанию. Таким образом, данный вариант не может быть использован в качестве пригодного для работы.

4.4 Выводы по четвертой главе

1. Использование повышенной частоты приводит к сильной неравномерности распределения мощности по длине (высоте): отклонение 10% наблюдается всего у третьего слоя.

2. Увеличение длины индуктора для выравнивания распределения мощности эффективно только при одновременном снижении частоты: на частоте 50 Гц при длине индуктора 0,384 м достигается снижение отклонения мощности до 10%.

3. Кристаллизация кремния в кристаллизаторе методического действия эффективна при коэффициенте теплопроводности футеровки не менее $5 \text{ Вт} / (\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$. С ростом коэффициента теплопроводности футеровки увеличивается размах колебаний температуры во время каждого интервала с 1150 до 1255 градусов. Минимальная температура при этом уменьшается с 300 до 150 градусов, что создает условия для возникновения термонапряжений.

4. Увеличение производительности электромагнитного кристаллизатора обеспечивается за счет сокращения интервала между заливками расплава при максимальном коэффициенте теплопроводности футеровки в основании. При времени интервала меньше ста секунд процесс кристаллизации нарушается. Однако ведение процесса кристаллизации при больших минимальных значениях температуры расплава предотвращает растрескивание. При заданных параметрах кристаллизатора (радиус 0,15 м,

коэффициент теплопроводности футеровки $15 \text{ Вт} / (\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$) наиболее благоприятные условия для процесса достигаются при времени интервала, равном 75 с.

5. Предельное минимальное значение тепловыделения от индукционного подогрева за весь процесс кристаллизации составляет 1,63 МДж, что в 23 раза меньше аналогичного показателя лучшего варианта кристаллизатора периодического действия. Время кристаллизации составляет 750 секунд, что в 1,25 раза меньше времени для кристаллизатора периодического действия.

5. РЕАЛИЗАЦИЯ ИНДУКЦИОННОЙ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО КРИСТАЛЛИЗАТОРА

5.1 Исследование энергетических параметров индукционной системы для электромагнитного кристаллизатора

Проведенные в разделах 3, 4 исследования показали возможность реализации разных систем – периодического и методического действия. Частота тока индуктора также может принимать разные значения – 50 или 500 Гц.

Рассмотрим систему электромагнитного кристаллизатора периодического действия, как обеспечивающую лучшие показатели: постоянство радиуса слитка по высоте, отсутствие внутренних полостей и напряжений, более простой процесс литья (не требуется перемещать индуктор и дозировать порции добавляемого расплава).

5.1.1 Определение параметров индуктора на частоте 50 Гц в процессе кристаллизации слоев расплавленного кремния

В таблице 5.1 приведены расчетные значения давлений, сил и мощности тепловыделения в слоях расплава кремния высотой 0,15 м и диаметром 0,3 м при использовании индуктора с частотой тока 50 Гц.

Таблица 5.1.

Расчетные значений гидростатического давления и боковой силы в слоях расплава

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$H_n, \text{ м}$	0.15	0.135	0.12	0.105	0.09	0.075	0.06	0.045	0.03	0.015
$P, \text{ Па}$	3768	3425	3083	2740	2398	2055	1370	1028	685	342
$F_n^{pez}, \text{ Н}$	484	392	310	237	174	121	77	44	19	5
$F_n^{эм}, \text{ Н}$	53,9	49	44,1	39,2	34,3	29,4	19,6	14,7	9,8	4,9
$P_n^{эм}, \text{ Вт}$	481	4390	3944	3489	3044	2627	2025	1917	1628	1384

Дополнительно определены интегральные параметры индуктора для режима максимальной мощности:

Мощность в загрузке $P_{загр} = 25 \text{ кВт}$;

Потери мощности в индукторе $\Delta P_u = 78,7 \text{ кВт}$;

Мощность индуктора $P_u = 103$ кВт;

Напряжение на индукторе $U = 94$ В;

Ток одновиткового индуктора $I_{инд}^1 = 13000$ А;

Активная составляющая тока индуктора $I_a = P_u / U = 103000/94 = 1096$ А;

Полная мощность индуктора $S = 1220$ кВА;

Активное сопротивление индуктора $R = 0,00123$ Ом;

Индуктивность индуктора $L = 22,9$ мГн.

Главными недостатками данного решения являются габаритные показатели индуктора, обусловленные низкой частотой. Кроме того, при сравнении энергетических характеристик с индуктором на частоте 500 Гц можно отметить более низкий электрический КПД, приводящий к увеличению расчетной мощности преобразователя частоты.

5.1.2 Определение параметров индуктора на частоте 500 Гц в процессе кристаллизации слоев расплавленного кремния

Ранее расчеты мощности тепловыделения в слоях расплавленного кремния и электромагнитные силы, действующие на боковую поверхность слоев, выполнялись с помощью программы Comsol. Для определения напряжения на индукторе необходимо применение программы Elcut. Отличие геометрических моделей для этих программ заключается в способах рисования индуктора: для Comsol индуктор выполнен одновитковым с заданным углом наклона; для Elcut индуктор выполнен многовитковым, причем витки не имеют наклона. В результате во второй модели имеет место ступенчатая форма индуктора. Такое различие в форме индуктора отражается на расчетных параметрах.

На рисунке 5.1 показана разбитая на слои система «охладитель - теплоизоляция – расплав кремния» и многовитковый индуктор. Крайние справа слоя представляют собой теплоизоляцию и охладитель. Третий справа

слой является подложкой из твердого кремния, остальные слои – жидкий кремний, постепенно переходящие в твердое состояние.

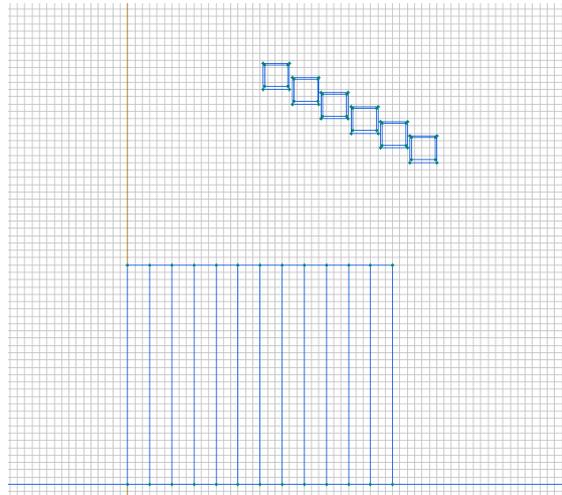


Рис.5.1 Геометрическая модель индуктора с расплавом кремния

1. Все слои в расплавленном состоянии (2-10)

В таблице 3.3 представлены значения сил, приложенных к слоям, полученные из гидростатического F_n^{zc} и электромагнитного $F_n^{эм}$ расчетов. При одинаковых токах одновитковых индукторов рассчитаны мощности тепловыделения в слоях с помощью программы Comsol и Elcut. При этом средние значения удельной мощности Q в слоях для разных программ совпадают.

Таблица 5.2

Мощности и силы в слоях расплава кремния

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$F_n^{zc}, Н$	53,9	49	44,1	39,2	34,3	29,4	19,6	14,7	9,8	4,9
$F_n^{эм}, Н$		49	44,5	33,5	23,9	17,4	13,1	10,9	9,2	7
$P_n^{Com}, Вт$	1110	6835	4100	2547	1665	1174	909	784	762	839
$P_n^{Elc}, Вт$	1233	6821	4055	2529	1681	1217	968	858	859	978
$Q_n, Вт / м^3$	$2 \cdot 10^6$	$1,2 \cdot 10^7$	$7 \cdot 10^6$	$4,3 \cdot 10^6$	$2,9 \cdot 10^6$	$2 \cdot 10^6$	$1,6 \cdot 10^6$	$1,5 \cdot 10^6$	$1,5 \cdot 10^6$	$1,7 \cdot 10^6$

Для модели Comsol ток одновиткового индуктора равен $I_{инд}^1 = 27$ кА.

Для модели Elcut задано: число витков $w=6$; ток индуктора $I_{инд} = 4620$ А;

напряжение на индукторе $U=305,9$ В.

Мощность в загрузке $P_{загр}=21,2$ кВт;

Потери в индукторе $\Delta P_{инд}=39,741$ кВт;

Мощность индуктора $P_{инд}=60,941$ кВт;

Полная мощность индуктора $S_{инд} = U \cdot I_{инд} = 4620 \cdot 306 = 1414$ кВА;

Реактивная мощность $Q=1412$ кВар;

Активное сопротивление индуктора $R=0,002855$ Ом;

индуктивное сопротивление индуктора $X=0,066$ Ом;

индуктивность индуктора $L=21,07$ мкГн.

2. 1-й и 2-й слои твердые, 3-10 в расплавленном состоянии

Таблица 5.3

Мощности и силы в слоях расплава кремния

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
F_n^{zc}, H	53,9	49	44,1	39,2	34,3	29,4	19,6	14,7	9,8	4,9
$F_n^{эм}, H$	3,2	3,6	44	37,9	27,8	19,6	14,4	11,3	9,2	6,8
$P_n^{Com}, Вт$	1452	876	5199	2990	1796	1157	831	681	645	704
$P_n^{Elc}, Вт$	1634	970	5183	2955	1782	1169	862	731	717	813

Для модели Comsol ток одновиткового индуктора равен $I_{инд}^1 = 24,36$ кА.

Для модели Elcut задано: число витков $w=6$; ток индуктора $I_{инд} = 4150$ А;

получено напряжение на индукторе $U=277,5$ В.

Мощность в загрузке $P_{загр}=16,815$ кВт;

Потери в индукторе $\Delta P_{инд}=32,123$ кВт;

Мощность индуктора $P_{инд}=48,939$ кВт;

Полная мощность индуктора $S_{инд} = U \cdot I_{инд} = 1149$ кВА;

Реактивная мощность $Q=1149$ кВар;

Активное сопротивление индуктора $R=0,0028416$ Ом;

индуктивное сопротивление индуктора $X=0,06681$ Ом;

индуктивность индуктора $L=21,276$ мкГн.

3. 1-3 слоя твердые, 4-10 в расплавленном состоянии

Таблица 5.4

Мощности и силы в слоях расплава кремния

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
F_n^{zc}, H	53,9	49	44,1	39,2	34,3	29,4	19,6	14,7	9,8	4,9
$F_n^{эм}, H$	3,7	3,7	3,5	39,2	32,4	23,3	16,5	12,3	9,6	6,9
$P_n^{Com}, Вт$	1939	1346	791	4538	2523	1491	973	735	657	699
$P_n^{Elc}, Вт$	2182	1505	973	4520	2490	1475	981	766	716	797

Для модели Comsol ток одновиткового индуктора равен $I_{инд}^1 = 23,88$ кА.

Для модели Elcut задано: число витков $w=6$; ток индуктора $I_{инд} = 4050$ А;
получено напряжение на индукторе $U=273,4$ В.

Мощность в нагрузке $P_{загр} = 16,303$ кВт;

Потери в индукторе $\Delta P_{инд} = 30,667$ кВт;

Мощность индуктора $P_{инд} = 46,970$ кВт;

Полная мощность индуктора $S_{инд} = U \cdot I_{инд} = 1107$ кВА;

Реактивная мощность $Q=1106$ кВар;

Активное сопротивление индуктора $R=0,00286359$ Ом;

индуктивное сопротивление индуктора $X=0,06745$ Ом;

индуктивность индуктора $L=21,4794$ мкГн.

4. 1-4 слоя твердые, 5-10 в расплавленном состоянии

Таблица 5.5

Мощности и силы в слоях расплава кремния

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
F_n^{zc}, H	53,9	49	44,1	39,2	34,3	29,4	19,6	14,7	9,8	4,9
$F_n^{эм}, H$	4	4,1	3,6	3,2	34,3	27,5	19,7	14,1	10,5	7,3
$P_n^{Com}, Вт$	2723	2081	1412	810	4518	2469	1474	1006	819	920
$P_n^{Elc}, Вт$	3075	2347	1587	901	4542	2457	1471	1028	876	928

Для модели Comsol ток одновиткового индуктора равен $I_{инд}^1 = 25,32$ кА.

Для модели Elcut задано витков $w=6$; ток индуктора $I_{инд} = 4300$ А;
получено напряжение на индукторе $U=292$ В.

Мощность в нагрузке $P_{загр} = 19,2$ кВт;

Потери в индукторе $\Delta P_{инд} = 34,659$ кВт;

Мощность индуктора $P_{инд} = 53,871$ кВт;

Полная мощность индуктора $S_{инд} = U \cdot I_{инд} = 1256$ кВА;

Реактивная мощность $Q=1254$ кВАр;

Активное сопротивление индуктора $R=0,002914$ Ом;

индуктивное сопротивление индуктора $X=0,068$ Ом;

индуктивность индуктора $L=21,61$ мкГн.

5. 1-5 слои твердые, 6-10 в расплавленном состоянии

Для модели Comsol ток одновиткового индуктора равен $I_{инд}^1 = 23,04$ кА.

Для модели Elcut задано: число витков $w=6$; ток индуктора $I_{инд} = 3900$ А;
получено напряжение на индукторе $U=267$ В.

Таблица 5.6

Мощности и силы в слоях расплава кремния

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
F_n^{zc}, H	53,9	49	44,1	39,2	34,3	29,4	19,6	14,7	9,8	4,9
$F_n^{эм}, H$	4,9	5	4,5	3,7	3	29,5	23,6	17,2	12,3	8,1
$P_n^{Com}, Вт$	2620	2128	1591	1056	594	3263	1800	1122	817	736
$P_n^{Elc}, Вт$	2933	2384	1783	1183	659	3275	1788	1121	844	808

Мощность в нагрузке $P_{загр} = 16781$ Вт;

Потери в индукторе $\Delta P_{инд} = 28579$ Вт;

Мощность индуктора $P_{инд} = 45360$ Вт;

Полная мощность индуктора $S_{инд} = U \cdot I_{инд} = 1041$ кВА;

Реактивная мощность $Q=1040$ кВАр;

Активное сопротивление индуктора $R=0,00298$ Ом;

индуктивное сопротивление индуктора $X=0,068$ Ом;

индуктивность индуктора $L=21,78$ мкГн.

6. 1-6 слои твердые, 7-10 в расплавленном состоянии

Таблица 5.7

Мощности и силы в слоях расплава кремния

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
F_n^{zc} , Н	53,9	49	44,1	39,2	34,3	29,4	19,6	14,7	9,8	4,9
$F_n^{эм}$, Н	3,8	3,9	3,7	3,1	2,5	2	19,5	15,7	11,5	7,5
P_n^{Com} , Вт	2494	2106	1673	1225	900	445	2461	1423	948	751
P_n^{Elc} , Вт	2763	2365	1861	1367	892	492	2464	1413	951	788

Для модели Comsol ток одновиткового индуктора равен $I_{инд}^1 = 21,36$ кА.

Для модели Elcut задано: число витков $w=6$; ток индуктора $I_{инд} = 3605$ А;
получено напряжение на индукторе $U=248$ В.

Мощность в загрузке $P_{загр} = 15329$ Вт;

Потери в индукторе $\Delta P_{инд} = 24469$ Вт;

Мощность индуктора $P_{инд} = 39798$ Вт;

Полная мощность индуктора $S_{инд} = U \cdot I = 894$ кВА;

Реактивная мощность $Q=893$ кВАр;

Активное сопротивление индуктора $R=0,003062$ Ом;

индуктивное сопротивление индуктора $X=0,069$ Ом;

индуктивность индуктора $L=21,89$ мкГн.

7. 1-7 слои твердые, 8-10 в расплавленном состоянии

Таблица 5.8

Мощности и силы в слоях расплава кремния

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
F_n^{zc} , Н	53,9	49	44,1	39,2	34,3	29,4	19,6	14,7	9,8	4,9
$F_n^{эм}$, Н	3,3	3,6	3,4	2,9	2,4	1,9	1,5	14,7	12	8,1
P_n^{Com} , Вт	2158	1871	1546	1204	869	563	314	1834	1159	838
P_n^{Elc} , Вт	2379	2064	1711	1339	969	628	349	1839	1152	845

Для модели Comsol ток одновиткового индуктора равен $I_{инд}^1 = 19,2$ кА.

Для модели Elcut задано: число витков $w=6$; ток индуктора $I_{инд} = 3240$ А;
получено напряжение на индукторе $U=225$ В.

Мощность в загрузке $P_{загр} = 13,275$ кВт;

Потери в индукторе $\Delta P_{инд} = 19,797$ кВт;

Мощность индуктора $P_{инд} = 33,073$ кВт;

Полная мощность индуктора $S_{инд} = U \cdot I = 729$ кВА;

Реактивная мощность $Q=728$ кВАр;

Активное сопротивление индуктора $R=0,0031505$ Ом;

индуктивное сопротивление индуктора $X=0,06925$ Ом;

индуктивность индуктора $L=22,0539$ мкГн.

8. 1-8 слои твердые, 9-10 в расплавленном состоянии

Для модели Comsol ток одновиткового индуктора равен $I_{инд}^1 = 15,44$ кА.

Для модели Elcut задано: число витков $w=6$; ток индуктора $I_{инд} = 2605$ А;
получено напряжение на индукторе $U=181,3$ В.

Таблица 5.9

Мощности и силы в слоях расплава кремния

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
F_n^{zc} , Н	53,9	49	44,1	39,2	34,3	29,4	19,6	14,7	9,8	4,9
$F_n^{эм}$, Н	2,3	2,5	2,4	2,2	1,8	1,9	1,2	0,96	9,75	7,5
P_n^{Elc} , Вт	1463	1291	1096	890	686	494	325	192	1268	897
P_n^{Elc} , Вт	1600	1415	1205	938	761	550	361	212	1264	885

Мощность в загрузке $P_{загр} = 9,240$ кВт;

Потери в индукторе $\Delta P_{инд} = 12,813$ кВт;

Мощность индуктора $P_{инд} = 22,054$ кВт;

Полная мощность индуктора $S_{инд} = U \cdot I = 471,5$ ВА;

Реактивная мощность $Q=471$ кВАр;

Активное сопротивление индуктора $R=0,003293$ Ом;

индуктивное сопротивление индуктора $X=0,06952$ Ом;

индуктивность индуктора $L=22,14$ мкГн.

9. 1-9 слои твердые, 10 в расплавленном состоянии

Для модели Comsol ток одновиткового индуктора равен $I_{инд}^1=10,296$ кА.

Для модели Elcut задано: число витков $w=6$; ток индуктора $I_{инд}=1750$ А;

получено напряжение на индукторе $U=123$ В.

Таблица 5.10

Мощности и силы в слоях расплава кремния

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
F_n^{zc} , Н	53,9	49	44,1	39,2	34,3	29,4	19,6	14,7	9,8	4,9
$F_n^{эм}$, Н	1,1	1,2	1,2	1,1	0,97	0,83	0,69	0,57	0,5	4,9
P_n^{Com} , Вт	677	605	525	442	360	282	212	152	106	839
P_n^{Elc} , Вт	746	668	581	490	400	314	237	169	117	843

Мощность в нагрузке $P_{загр}=4,564$ кВт;

Потери в индукторе $\Delta P_{инд}=5,789$ кВт;

Мощность индуктора $P_{инд}=10,354$ кВт;

Полная мощность индуктора $S_{инд} = U \cdot I = 215,2$ кВА;

Реактивная мощность $Q=215$ кВАр;

Активное сопротивление индуктора $R=0,0033796$ Ом;

индуктивное сопротивление индуктора $X=0,07$ Ом;

индуктивность индуктора $L=22,36$ мкГн.

10. 1-10 слои в твердом состоянии

Таблица 5.11

Мощности и силы в слоях расплава кремния

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
P_n^{Elc} , Вт	801	735	663	588	514	445	383	327	279	238

Для модели Elcut задано: число витков $w=6$; ток индуктора $I_{инд}=1750$ А;
получено напряжение на индукторе $U=123,5$ В.

Мощность в загрузке $P_{загр}=4,975$ кВт;

Потери в индукторе $\Delta P_{инд}=5,813$ кВт;

Мощность индуктора $P_{инд}=10,788$ кВт;

Полная мощность индуктора $S_{инд} = U \cdot I = 216$ кВА;

Реактивная мощность $Q=215,85$ кВАр;

Активное сопротивление индуктора $R=0,00352$ Ом;

индуктивное сопротивление индуктора $X=0,07048$ Ом;

индуктивность индуктора $L=22,447$ мкГн.

11. 1-й слой в твердом состоянии, остальные слои отсутствуют (кремний не залит)

Для модели Elcut задано: число витков $w=6$; ток индуктора $I_{инд}=1750$ А;
получено напряжение на индукторе $U=127,5$ В.

Мощность в загрузке $P_{загр}=1,201$ кВт.

Таблица 5.12

Мощности и силы в слоях расплава кремния

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
P_n^{Elc} , Вт	1201	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Потери в индукторе $\Delta P_{инд}=5,857$ кВт;

Мощность индуктора $P_{инд}=7,058$ кВт;

Полная мощность индуктора $S_{инд} = U \cdot I = 223$ кВА;

Реактивная мощность $Q=223,013$ кВАр;

Активное сопротивление индуктора $R=0,002305$ Ом;

индуктивное сопротивление индуктора $X=0,07282$ Ом;

индуктивность индуктора $L=23,913$ мкГн.

Для проведенных вариантов расчетов с разным числом слоев жидкого кремния (табл.5.2 – 5.10) определены интегральные характеристики индуктора и представлены в табл. 5.13.

Таблица 5.13

Интегральные параметры индуктора в процессе кристаллизации

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Рзаг, Вт	21,2	16,82	16,3	19,21	16,78	15,3	21,2	9,24	4,56
Ринд, Вт	60,94	48,94	46,97	53,87	45,36	39,8	33,07	22,05	10,35
U, В	306	277	273	292	267	248	225	181	123
$I_{инд}$, А	4620	4150	4050	4300	3900	3605	3240	2605	1750
R, мОм	2,855	2,842	2,863	2,913	2,982	3,062	3,15	3,2	3,379
X, мОм	0,0662	0,0668	0,0675	0,0678	0,0684	0,0687	0,0693	0,0695	0,070
L, мГн	21,07	21,24	21,45	21,61	21,78	21,89	22,054	22,1	22,36

На рис.5.2 представлена зависимость активного сопротивления индуктора от числа кристаллизовавшихся слоев.

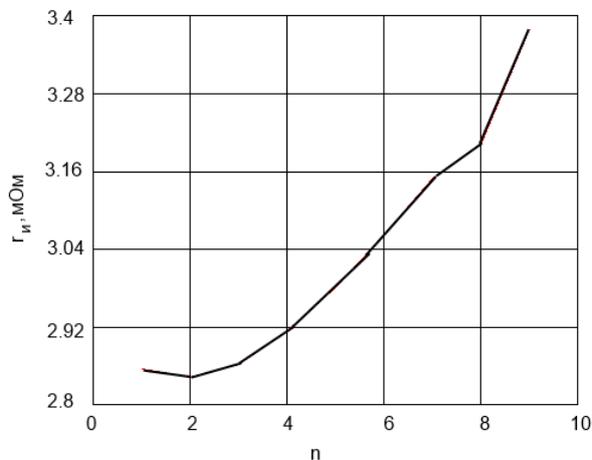


Рис.5.2 Зависимость активного сопротивления индуктора от числа кристаллизовавшихся слоев слитка кремния.

Изначально первый слой кремния является твердым (подложка, на которую заливается расплав). Верхние девять слоев вначале жидкие, затем переходят в твердое состояние. Все расчеты выполнены для варианта индуктора и системы теплоизоляции, в котором обеспечивается формирование фронта кристаллизации, постепенно перемещающегося в направлении снизу вверх и от осевой линии к боковой поверхности слитка.

Каждый вариант имеет свой номер n : при $n=1$ твердой является только подложка; при $n=9$ жидким является только верхний слой. В соответствии с состоянием слоя для каждого варианта задается послойное распределение удельного сопротивления кремния.

Особенностью диаграммы на рис.5.2 является поведение на начальном участке. Причина заключается в проявлении изменения краевого эффекта. Обычно для немагнитных материалов на краю заготовки наблюдается локальное увеличение плотности тока и удельной мощности, которое зависит от удельного сопротивления. В рассматриваемом случае удельное сопротивление на краю резко снижается, так как кроме первого слоя и следующие слои становятся твердыми. Происходит перераспределение тока по высоте слитка (соответствует длине индуктора) и изменение области, где протекает ток.

Проявившийся нелинейный характер изменения активного сопротивления индуктора делает сложным использование этого параметра в качестве сигнала обратной связи при построении системы управления мощностью тепловыделения в слоях кремния.

Более удобной для использования в задаче построения системы управления является величина полного сопротивления индуктора, которая имеет более гладкую форму (рис.5.3).

При построении системы регулирования удобнее использовать в качестве опорной величины полное или реактивное сопротивление индуктора (на диаграмме они практически сливаются).

В зависимости от значения полного сопротивления индуктора в соответствии с диаграммой на рис.5.3 необходимо задать напряжение на индукторе. На рис.5.4 приведена расчетная зависимость напряжения индуктора от полного сопротивления индуктора, которая соответствует требуемому значению мощности индуктора для каждого варианта распределения удельного сопротивления (агрегатного состояния) кремния по

высоте. Ранее было определено соответствие мощности тепловыделения приложенной отталкивающей электромагнитной силе.

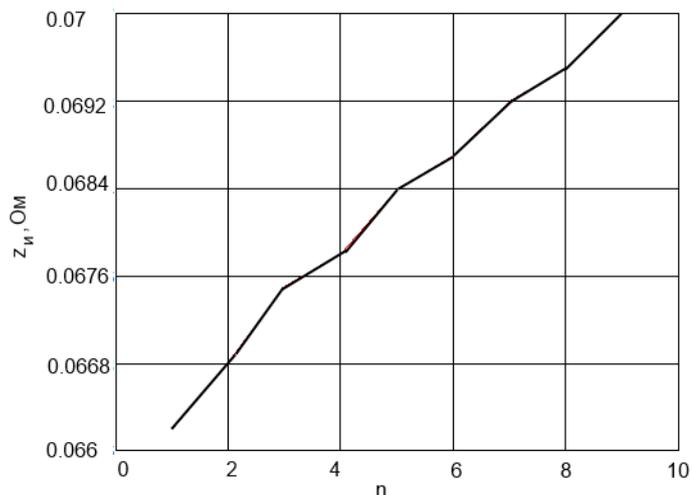


Рис.5.3 Зависимости полного сопротивления индуктора от числа кристаллизовавшихся слоев слитка кремния.

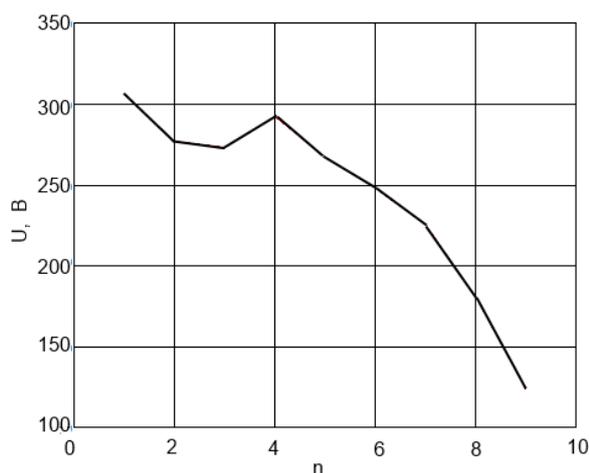


Рис.5.4 Расчетная зависимость напряжения индуктора от числа кристаллизовавшихся слоев слитка кремния.

Для применения полученной диаграммы при построения замкнутой системы управления осуществлен переход к другой системе координат – вместо числа кристаллизовавшихся слоев (степень перехода расплава в твердое состояние) используется величина полного (комплексного) сопротивления индуктора $z_{инд}$.

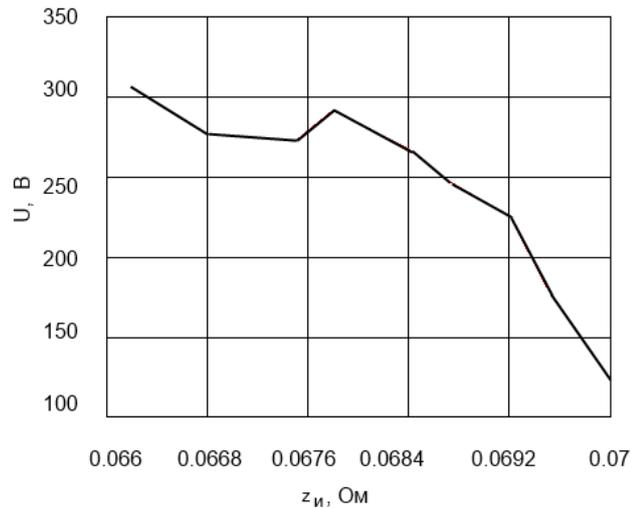


Рис.5.5 Расчетная зависимость напряжения индуктора от полного сопротивления индуктора.

В соответствии с приведенной диаграммой возможно определение заданного напряжения на индукторе при любом значении полного сопротивления индуктора из заранее рассчитанного диапазона. Из диаграммы на рис.5.7 следует, что интервал значений полного сопротивления индуктора равен

$$\Delta Z = 0,07 - 0,066 = 0,004 \text{ Ом.}$$

Для практического применения в системе управления (ПЛК) необходимо ввести расчетные значения для сопротивления и напряжения индуктора. Возможны варианты: ввод табличных значений и ввод математических выражений. Второй способ экономичнее, но требует определения коэффициентов для аппроксимирующих функций. В рассматриваемой задаче выражение функции, аппроксимирующей зависимость на рис.5.7, кроме полиномов содержит ступенчатые функции (функция Хевисайда).

$$u_n = 270 + k_1 \cdot (1 - H(z_n - z_{01})) \cdot (z_n - z_{01})^2 - k_2 \cdot H(z_n - z_{02}) \cdot z_n - k_3 \cdot H(z_n - z_{03}) \cdot z_n \quad (5.1)$$

Здесь: $H(r)$ – ступенчатая функция; z_{01} , z_{02} , z_{03} – сопротивления, при которых наблюдается излом на диаграмме на рис.5.7; z_n – расчетное значение полного сопротивления индуктора на n шаге дискретизации временного процесса.

В выражении (5.1) задана параболическая и две линейные функции, что

обеспечивает приближение к исходному виду, показанному на рис.5.7.

Таким образом, определение параметров программы осуществляется автоматически с помощью расчетов. Важно учитывать, что работоспособность системы регулирования при таком подходе полностью зависит от соблюдения расчетных значений мощности индуктора, тепловых потоков через основание, верхнюю и боковую стенки футеровки. В течение всего процесса кристаллизации должен формироваться градиент температуры, направленный сверху вниз и от боковой поверхности в центр загрузки. В противном случае значения сопротивления индуктора могут соответствовать нежелательным распределениям температуры в слитке, что приведет к недопустимо большим термонапряжениям в слитке.

5.1.3 Определение параметров индуктора при пуске и при завершении кристаллизации

Результаты расчетов индуктора кристаллизатора, в котором все слои перешли в твердое состояние, приведены в табл.5.11. Для сравнения с предыдущим вариантом, когда верхний слой является жидким, сведем интегральные параметры индуктора в таблицу 5.14. В первой строке таблицы приведены параметры индуктора, в котором верхний слой находится в жидком состоянии, а во второй строке – параметры индуктора со всеми твердыми слоями кремния.

Таблица 5.14
Интегральные параметры индуктора при окончании кристаллизации

вариант	$I_{инд}$, А	U, В	$P_{загр}$, кВт	$\Delta P_{инд}$, кВт	$P_{инд}$, кВт	$S_{инд}$, кВА	Q, кВт
9	1750	123	4,564	5,789	10,354	215,2	215
10	1750	123,5	4,975	5,813	10,788	216,1	215,85

В целом значения параметров индуктора с одним жидким слоем кремния и со всеми твердыми слоями очень близки. Изменения параметров индуктора в процессе кристаллизации происходят плавно, и система регулирования

способна осуществить регулирование оперативно, чтобы не допустить режимов с недопустимыми для источника токами.

Сравнение параметров индуктора при пустом индукторе (имеется подложка из твердого кремния) и при наличии всех слоев с жидким кремнием является важной задачей, так как происходит резкое изменение объема загрузки. Этот процесс требует быстрой перенастройки колебательного контура, чтобы не произошло отключения преобразователя частоты из-за перегрузки по току. В табл.5.15 приведены значения параметров индуктора для варианта 10 с условно пустым индуктором, где кремний не залит, и для варианта 1, где все слои кремния (1-9) являются жидкими. Для более удобного сопоставления параметров для разных вариантов выполнено приведение параметров варианта 1 к напряжению 127,5 В.

Таблица 5.15

Интегральные параметры индуктора в начале процесса кристаллизации

вариант	$I_{инд},$ А	U, В	$P_{загр},$ кВт	$\Delta P_{инд},$ кВт	$P_{инд},$ кВт	$S_{инд},$ кВА	Q, кВар	$\cos \varphi$
10	1750	127,5	1,201	5,857	7,058	223,125	215,01	0,04312
1	4620	305,9	21,2	39,74	60,94	1414	1412	0,04312
1 привед	1926	127,7	3,683	6,904	10,59	245,5	245,3	0,04312

При сравнении параметров индуктора без загрузки и индуктора, заполненного жидким кремнием, видно, что отклонения уже не столь велики и составляют 13,9% для реактивной мощности и 10% для тока индуктора.

В последнем столбце таблицы 5.15 представлены расчетные значения коэффициента мощности, которые не изменяются при столь резком изменении характера загрузки. Объяснением этому факту может служить то, что индуктор имеет большие поля рассеяния, а изменения сопротивления загрузки вносят малое возмущение. В основном, коэффициент мощности определяется импедансом катушки индуктора. В целом, такое низкое значения коэффициента мощности является нехарактерным для индукционных нагревателей.

Из анализа режимов работы индуктора при переходе из режима холостого хода (кристаллизатор индуктора содержит один слой твердого кремния) в рабочий можно сделать вывод об отсутствии заметных отклонений параметров и необходимости дополнительной настройки колебательного контура. Единственным условием безаварийного перехода является включение индуктора на пониженное напряжение $U=127,5$ В с последующим подъемом до расчетного значения $U=305,9$ В после окончания заливки.

5.1.4 Определение длительности включения индуктора и верхнего нагревателя

Для создания необходимых условий перед заливкой не требуется заранее включать верхний резистивный нагреватель. Выход на рабочий режим происходит быстро, так как слой верхней теплоизоляции специально сделан небольшим.

На рис.5.6 приведены временные диаграммы температуры слитка высотой 0,15 м и радиусом 0,15 м в кристаллизаторе с подогреваемой крышкой.

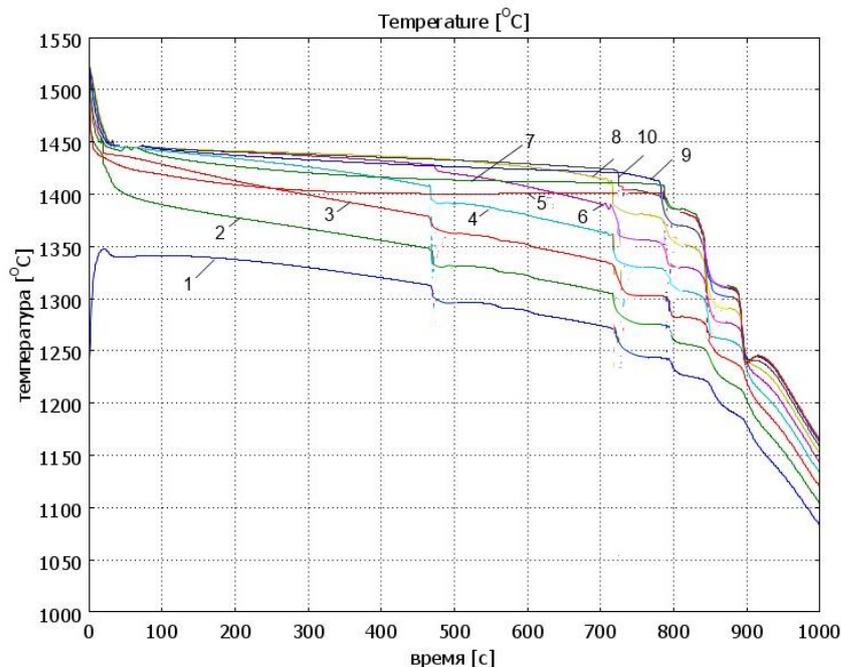


Рис.5.6 Диаграммы температуры в точках загрузки: 1 – $r=0,15$ м; $h=0,015$ м; 2 – $r=0,15$ м; $h=0,03$ м; 3 – $r=0,15$ м; $h=0,045$ м; 4 – $r=0,015$ м; $h=0,06$ м; 5 – $r=0,015$ м; $h=0,075$ м

м; 6 – $r=0,015$ м; $h=0,09$ м; 7 – $r=0,015$ м; $h=0,105$ м; 8 – $r=0,015$ м; $h=0,12$ м; 9 – $r=0,015$ м; $h=0,135$ м; 10 – $r=0,015$ м; $h=0,15$ м.

Происходит послойный переход в твердое состояние, начиная с нижнего слоя слитка. Процесс кристаллизации завершается через 800 с, после чего подогреватель и индуктор отключаются. После этого происходит дальнейшее охлаждение в замкнутом пространстве для выравнивания температуры. Циркуляция охлаждающей жидкости в охладителе и индукторе не прекращается.

В табл.5.2 приведены значения мощности тепловыделения в расплаве, обусловленные индуцированными токами в момент заливки расплава. Мощность в слитке составляет 21,2 кВт, а подведенная к индуктору 60,9 кВт. Мощность нагревателя верхней крышки равна 2,5 кВт

5.2 Определение параметров источника питания колебательного контура в режиме максимальной нагрузки

Согласно проведенным расчетам в режиме максимальной нагрузки получены следующие значения

ток индуктора $I_{инд} = 4620$ А;

напряжение на индукторе $U = 305,9$ В.

мощность в загрузке $P_{загр} = 21,2$ кВт;

потери в индукторе $\Delta P_{инд} = 39,741$ кВт;

мощность индуктора $P_{инд} = 60,941$ кВт;

полная мощность индуктора $S_{инд} = U \cdot I_{инд} = 1414$ кВА;

реактивная мощность индуктора $Q = 1412$ кВАр;

активное сопротивление индуктора $R = 0,002855$ Ом;

индуктивное сопротивление индуктора $X = 0,066$ Ом;

индуктивность индуктора $L = 21,07$ мкГн;

электрический КПД равен $\eta_{эл} = P_{загр} / P_{инд} = 21,2 / 60,94 = 0,35$;

коэффициент мощности $\cos \varphi = P_{инд} / S_{инд} = 60,94 / 1414 = 0,043$.

Активная составляющая тока индуктора

$$I_a = I_{инд} \cdot \cos \varphi = 4620 \cdot 0,043 = 198,66 \text{ А.}$$

Таким образом, можно принять мощность источника питания $P \geq 60$ кВт при максимальном значении тока $I=200$ А. Так как напряжение индуктора отличается от стандартного (400 В) необходимо увеличить мощность преобразователя или установить согласующий трансформатор. Второй вариант сложнее реализовать, так как трансформатор на частоту 500 Гц сложно найти, и напряжение согласующего трансформатора не имеет нужных ступеней.

Преобразователи частоты для индукционного нагрева на средние частоты выпускаются с некоторыми отличиями схемы. Выпрямитель может быть выполнен неуправляемым (рис.5.7) или управляемым (рис.5.8). В зависимости от этого применяются диоды или тиристоры. В первом случае регулирование напряжения на входе инвертора обеспечивается за счет транзистора в цепи выпрямленного тока, управляемого в режиме широтно-импульсной модуляции. Для схемы с тиристорами в выпрямителе регулирование обеспечивается за счет системы импульсно-фазового управления.

Разные варианты выпрямителя имеют свои достоинства. Применение ШИМ позволяет сделать более компактным сглаживающий фильтр, а применение тиристоров позволяет проще решить проблему отключения выпрямителя за счет блокировки управляющих импульсов на тиристорах.

Выпускаемые на предприятиях России, Украины, Эстонии преобразователи средней частоты большей частью предназначены для использования в установках достаточно большой мощности (табл.5.16), где нагреваются крупногабаритные изделия. Поэтому более оправданным является применение более дешевых, но более мощных тиристоров вместо транзисторов.

Линейка мощности преобразователей частоты на частоту 500 Гц для некоторых фирм-производителей индукционного оборудования приведена в

табл.5.16. Из представленных фирм только одна выпускает преобразователи в широком диапазоне мощностей. Преобразователи фирмы Aljuel имеют значения мощности, близкие к расчетным для разработанного электромагнитного кристаллизатора - 63, 80, 100 кВт.

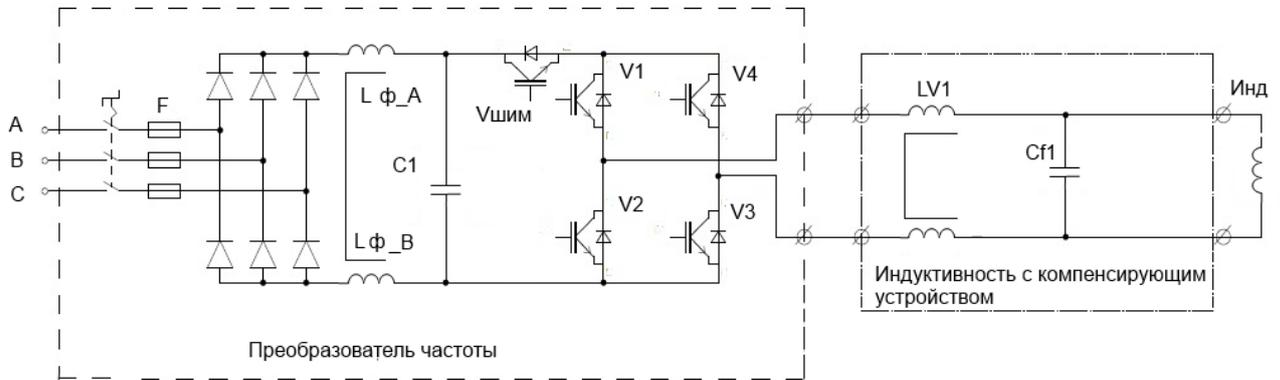


Рис.5.7 Преобразователь частоты с неуправляемым выпрямителем и транзисторным инвертором

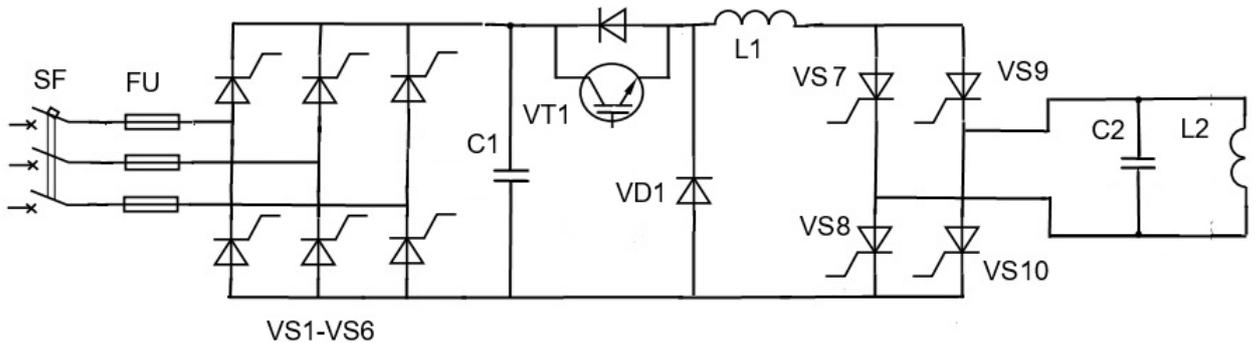


Рис.5.8 Преобразователь частоты с управляемым выпрямителем и тиристорным инвертором

Табл.5.16

Мощность генераторов от различных производителей

фирма				
Aljuel.eu (Таллинн)	Termolit.com (Украина)	Reltec.biz (Екатеринбург)	Ameritherm.com	Rosinductor.ru (Челябинск)
50/4000	320/3600	150/750	200/800	1000

С учетом сделанных выше рекомендаций в качестве источника питания принимается ТПЧ мощностью 80 кВт на частоту 500 Гц с выходным напряжением 400 В.

5.3 Система настройки параметров преобразователя частоты

Проведенные выше расчеты показали необходимость изменения

напряжения на индукторе в зависимости от того, насколько слиток перешел в твердое состояние. Приведенные на рис.5.3,5.4 диаграммы иллюстрируют связь реактивного сопротивления индуктора с количеством кристаллизовавшихся слоев слитка и зависимость требуемого напряжения от полного сопротивления индуктора. Для реализации системы регулирования необходимо использование в качестве задающего сигнала графика реактивного сопротивления индуктора, который нужно сравнивать с текущим значение. В качестве управляющего воздействия служит значение напряжения, которое может быть рассчитано по аппроксимирующему выражению для диаграммы на рис.5.4. Более простым способом задания соотношения между полным сопротивлением индуктора и требуемым напряжением на индукторе является табличное представление. В этом случае не требуется подбирать коэффициенты полинома.

Упрощенная структурная схема системы управления представлена на рис.5.9.

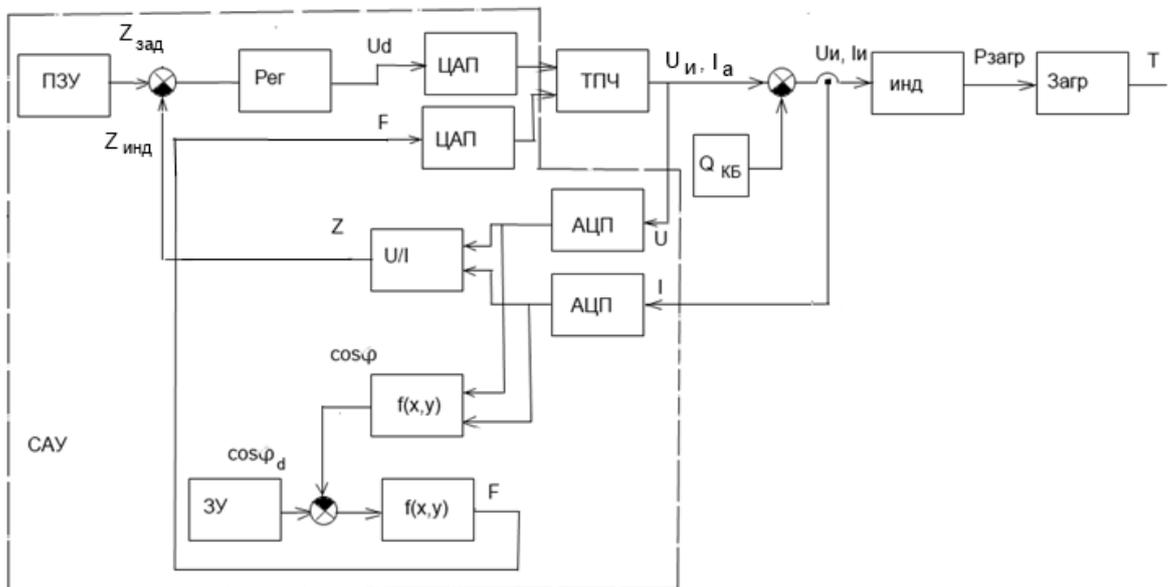


Рис.5.9 Структурная схема системы управления индуктором кристаллизатора

В программно-задающем устройстве формируется график изменения полного сопротивления индуктора во времени. Для этого используется

информация о температуре в точках для каждого слоя из рис.5.6 на каждом временном участке. По этим значениям определяется состояние каждого слоя. Комбинация состояний для всех слоев позволяет найти из таблиц 5.2 – 5.10,5.13 значения мощности и напряжения, соответствующие каждому варианту. Таким образом, формируется программа изменения полного сопротивления индуктора.

Упрощение алгоритма и использование в качестве задающего сигнала зависимости напряжения индуктора от времени приведут к возможности срыва нормального процесса кристаллизации и значительному ухудшению формы слитка, вплоть до прямого контакта боковой стенки с футеровкой. Поэтому такой вариант неприемлем.

Разностный сигнал, поступающий на вход регулятора $\varepsilon = z_{зад} - z_{инд}$, используется для расчета требуемого напряжения и формирования управляющего воздействия на его выходе u_d . Для формирования сигнала, пропорционального полному сопротивлению индуктора z , используется математический блок, в котором осуществляется деление сигнала напряжения на токовый сигнал.

В системе управления предусмотрено регулирование коэффициента мощности колебательного контура. Для этого используется встроенная в преобразователь частоты функция подстройки частоты напряжения при изменении реактивного сопротивления индуктора.

Выбираем для компенсирующего устройства конденсаторы типа ЭЭПВ-0,4-0,5 У3, Т3 на напряжение 0,4 кВ, четырех-секционные, емкость банки $C=448$ мкФ.

В режиме максимальной нагрузки реактивное сопротивление индуктора составляет $X_u=0,066271$ Ом. Реактивное сопротивление одной банки составляет $X_{c1}=0,711$ Ом. Число банок $n = X_u = X_{KB} / X_{c1}=10,719$ округляем до 10,75 (10 банок +3 секции).

Расчетная частота напряжения определяется из условия равенства реактивных сопротивлений индуктора и батареи конденсаторов

$$f = 1 / (2 \cdot \pi \cdot X_u \cdot C \cdot n) = 498,919 \text{ Гц.}$$

В режиме минимальной нагрузки реактивное сопротивление индуктора составляет $X_u = 0,072894$ Ом. Реактивное сопротивление одной банки составляет $X_{c1} = 0,711$ Ом. Расчетное число банок $n = X_u = X_{KB} / X_{c1} = 9,83$, но оставляем прежним 10,75 (10 банок +3 секции).

Расчетная частота напряжения определяется из условия равенства реактивных сопротивлений индуктора и батареи конденсаторов

$$f = 1 / (2 \cdot \pi \cdot X_u \cdot C \cdot n) = 453,169 \text{ Гц.}$$

Таким образом, для обеспечения параллельного резонанса в колебательном контуре без изменения емкости конденсаторной батареи требуется регулировать частоту в диапазоне 450 – 500 Гц.

Разработанная система управления процессом кристаллизации кремния позволяет обеспечить заданные параметры слитка. Улучшение динамических показателей возможно после проведения наладочных работ.

5.4 Методика расчета электромагнитного кристаллизатора кремния периодического действия

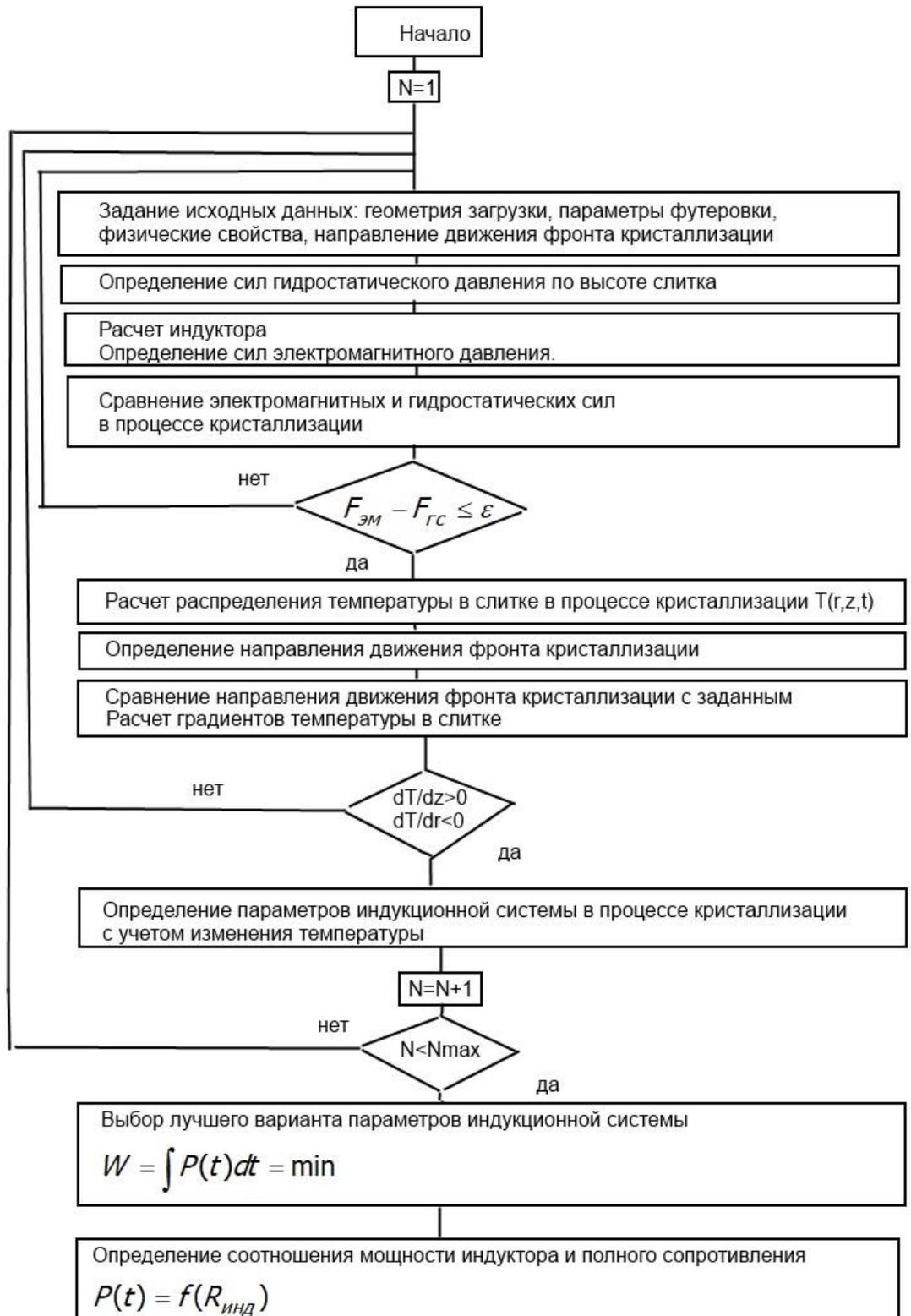
Для упрощения процедуры расчета и исключения лишних вычислений сформулированы условия, при выполнении которых возможно решение поставленной задачи:

- градиент температуры по высоте столба расплава всегда направлен от основания к верхней поверхности и от осевой линии к боковой поверхности;
- мощность тепловыделения, обусловленная вихревыми токами, всегда меньше теплового потока к охладителю.

В основу методики расчета положен алгоритм, построенный на исследованиях, выполненных в главе 3. В качестве инструмента предусматривается применение программных средств, позволяющих

проводить расчеты электромагнитных и тепловых процессов, а также процессов упругой деформации.

Алгоритм поиска параметров электромагнитного кристаллизатора периодического действия



1. Задание исходных данных. Для расчетов необходимо задать температурные зависимости физических свойств - коэффициенты теплопроводности, теплоемкости, удельного сопротивления, упругости. В зависимости от возможностей программы расчета тепловых процессов нужно задать теплоту плавления кремния или задать теплоемкость с учетом локального изменения, соответствующего теплоте плавления в принятом диапазоне температур.

В соответствии с заданной производительностью определить массу и габаритные размеры столба расплавленного кремния. Для поисковых процедур требуется использование информации о требуемом значении или знаке градиента температуры во всем объеме слитка в диапазоне температуры плавления с принятыми отклонениями $\pm 50^{\circ}\text{C}$.

2. При заданных высоте и радиусе слитка определение значения давления, создаваемого расплавом на основании слитка. Для выбранного числа слоев определение давления для каждого слоя. Расчет средних значений давления и силы в слоях, действующих на боковую поверхность слоя. Построение диаграммы гидростатической силы по высоте слитка.

3. Расчет индуктора конической формы для формирования сил Лоренца по высоте боковой поверхности слитка, обеспечивающих компенсацию гидростатических сил. Ввиду нелинейного характера распределения сил по высоте расчет выполняется в несколько шагов. В итоге получается приближение к заданному распределению сил в нижней части диаграммы. Для результирующего варианта определяются параметры индуктора и мощности тепловыделения в слоях расплавленного кремния.

4. Расчет тепловых процессов и распределения температуры в слитке в процессе кристаллизации. Модель тепловых процессов в системе «расплав кремния – футеровка – охладитель – система подогрева» содержит задачи теплопроводности в твердом и жидком кремнии, а также теплообмен излучением между поверхностями расплава кремния и футеровки.

Производится определение потоков тепла к стенкам футеровки, оценка их влияния на фронт кристаллизации, расчет градиентов температуры.

По результатам расчета выполняется построение распределения температуры и фронта кристаллизации. Производится расчет затрат энергии, обусловленных работой индуктора и подогревателя крышки.

Расчет выполняется неоднократно при вариации значений коэффициентов теплопроводности стенок футеровки и мощности подогревателя крышки с целью поиска лучшего варианта, обеспечивающего минимум затрат энергии и требуемые градиенты температуры, при которых процесс кристаллизации завершается на боковой и верхней поверхностях слитка.

5. Процесс расчета завершается при выполнении поставленных задач и выборе приемлемых параметров кристаллизатора. В противном случае необходима корректировка геометрии слитка и индуктора – уменьшение высоты при соответствующем увеличении радиуса.

5.5 Выводы по пятой главе

1. Выполнен анализ и установлены основные зависимости электрических параметров индуктора от температурного распределения и агрегатного состояния кремния по длине загрузки в процессе кристаллизации. Установлен разный характер зависимостей, что затрудняет формирование аппроксимирующих выражений для функциональных соотношений между температурой и измеряемыми параметрами индуктора.

2. Установлена зависимость между диаграммой изменения напряжения (активной мощности нагревателя) в процессе кристаллизации и полным сопротивлением индуктора. На основании этой зависимости и выявленного соответствия электромагнитных сил и мощности тепловыделения в загрузке предложен алгоритм построения системы управления процессом кристаллизации, использующей в качестве задающего сигнала

экспериментально определенную временную зависимость сигнала полного сопротивления индуктора, а в качестве сигнала обратной связи текущую величину полного сопротивления индуктора.

3. Построена замкнутая система управления режимами работы индукционного кристаллизатора периодического действия с обратной связью по величине полного сопротивления индуктора, которая вычисляется на основании измеряемых значений тока и напряжения индуктора. Система управления содержит канал регулирования коэффициента мощности за счет частоты напряжения. Функционирование системы позволяет изменять распределение отталкивающих сил по высоте расплава в условиях изменения агрегатного состояния и удельного сопротивления, что обеспечивает снижение отклонений радиуса слитка до 5%.

4. Предложена реализация электромагнитного кристаллизатора, содержащего конический индуктор с расплавленным кремнием, и систему управления процессом кристаллизации на базе промышленного логического контроллера. Система управления обеспечивает коррекцию распределения электромагнитных сил в загрузке при изменении распределения плотности тока вдоль боковой поверхности слитка в процессе кристаллизации.

5. Функционирование преобразователя частоты происходит при плавном изменении мощности индуктора в пределах от 61 до 7 кВт, изменении частоты в диапазоне 450-500 Гц. Скорость снижения средней температуры расплава (~1 °/с) позволяет осуществлять регулирование параметров без отключения нагрузки.

6. Предложена методика поиска параметров электромагнитного кристаллизатора, построенная на основе проведенных исследований и обеспечивающая получение заданных характеристик и минимизацию энергозатрат.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании проведенных исследований процесса кристаллизации технического кремния подтверждена идея использования магнитного поля в качестве средства для изоляции расплава от футеровки с целью повышения чистоты продукции. Применение метода конечных элементов позволило получить результаты расчета удовлетворительной точности на всех этапах моделирования, что обусловлено корректным описанием задачи, учетом нелинейностей, достаточно плотной сеткой элементов. Параметры индуктора и системы охлаждения, найденные при анализе вариантов, позволяют обеспечить низкие энергозатраты и малое время кристаллизации кремния с повышенной степенью чистоты.

В работе получены следующие основные результаты:

1. Обзор промышленных технологий производства кремния показал, что имеются неиспользованные резервы для повышения качества и снижения затрат при производстве кремния для солнечных панелей.
2. Выполнен анализ состояния проблем моделирования, показывающий необходимость применения методов численного моделирования электромагнитных и тепловых процессов при проектировании электромагнитного кристаллизатора.
3. Предложен алгоритм численного расчета взаимосвязанных электромагнитных и тепловых процессов методом конечных элементов в системе «индуктор – расплав кремния – теплоизоляция», позволяющий учесть изменение электро- и теплофизических свойств кремния, в том числе теплоту плавления.
4. Использование ступенчатой зависимости электропроводности от температуры в модели процесса кристаллизации отражается на перераспределении электромагнитных сил и внутренних источников тепловыделения в ходе процесса, что позволяет определить соотношения геометрических параметров индуктора и системы охлаждения, а также

динамически корректировать мощность для получения цилиндрической формы слитка.

5. Проведено исследование электромагнитных и тепловых процессов при кристаллизации в условиях значительного неравномерного по объему изменения электропроводности и теплопроводности кремния, показавшее необходимость поиска параметров кристаллизатора и условий, способных обеспечить заданную траекторию движения фронта кристаллизации для предотвращения раковин в слитке и остаточных термонапряжений.

6. Определены конструктивные параметры кристаллизаторов периодического и методического действия, а также мощность резистивного нагревателя верхней крышки футеровки, мощность бокового индуктора и тепловой поток охладителя, обеспечивающие получение качественного слитка.

7. Найдены геометрические размеры и предложена программа изменения мощности индуктора в кристаллизаторе периодического действия, при которых обеспечивается формирование цилиндрического слитка с отклонениями не более 5% и минимизация энергозатрат и времени кристаллизации.

8. Найдены геометрические размеры и предложена программа изменения мощности индуктора в кристаллизаторе методического действия, при которых обеспечивается формирование цилиндрического слитка и снижение мощности индукционной системы по сравнению с кристаллизатором периодического действия в 23 раза (2,6 кВт) и времени кристаллизации в 1,25 раза.

9. Разработана система индукционного нагрева на основе преобразователя частоты мощностью 80 кВт, обеспечивающая стабилизацию коэффициента мощности, равного 0,98, при изменении импеданса индуктора за счет автоматической настройки частоты.

10. Разработана система управления мощностью индуктора на базе промышленного контроллера, обеспечивающая изменение мощности тепловыделения и электромагнитной силы в расплаве в функции импеданса индуктора, зависящего от средней температуры слитка.

11. Разработана методика проектирования электромагнитного кристаллизатора периодического действия, позволяющая определить на основе моделирования электромагнитных и тепловых процессов параметры индуктора и систем подогрева верхней крышки футеровки, а также и охладителя в его основании.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Schei A., Tuset J Kr, Tveit H. Production of high silicon alloys. Trondheim, Tapir Forlag; 1998. 363 p.
2. Processes for upgrading metallurgical grade silicon to solar grade silicon. Jafar Safariana , Gabriella Tranella , Merete Tangstada. // Energy Procedia. Vol.20 (2012) pp.88 – 97.
3. Gribov B.G., Zinov'ev K.V. Preparation of high-purity silicon for solar cells. Inorganic Materials. 2003: vol.39(7): pp.653-662.
4. Bathey B.R., Cretella M.C. Solar-grade silicon. Journal of Materials Science. 1982; vol.17: pp.3077-3096.
5. Braga A.F.B., Zampieri P.R., Vacchin J.M., Mei P.R. New processes for the production of solar-grade polycrystalline silicon: A review. Solar Energy Materials & Solar Cells 2008; vol.92: pp.418-424.
6. Немчинова Н. В., Клец В. Э., Черняховский Л. В. Силикаты натрия как связующее для образования брикетов при выплавке кремния // Изв. вузов. Цветная металлургия. — М., 1999. — № 2. — С. 14–18.
7. Елкин К. С. Производство металлического кремния в России — состояние и перспективы// «Цветные металлы и минералы 2014»: материалы шестого международного конгресса (16–19 сентября 2014 г.). — Красноярск, ООО «Легкие металлы», 2014. 180 с..
8. Juneja J.M., Mukherjee T.K. A study of the purification of metallurgical grade silicon. Hydrometallurgy 1986; vol.16(1): pp.69-75.
9. Santos I.C., Goncales A.P., Silva Santos C., Almeida M., Afonso M.H., Cruz M.J. Purification of metallurgical grade silicon by acid leaching. // Hydrometallurgy. 1990; 23: 237-246.
10. Lian S.S., Kammel R., Kheiri M.J. Preliminary study of hydrometallurgical refining of MG-silicon with attrition grinding. // Solar Energy Materials & Soalr Cells 1992; vol.26: pp.269-276.

11. Suzuki K., Kumagai T., Sano N. Removal of boron from metallurgical grade silicon by applying the plasma treatment. // ISIJ International. 1992; vol.32: pp.630-634.
12. Yuge N., Abe M., Hanazawa K., Baba H., Nakamura N., Kato Y., Sakaguchi Y., Hiwasa, Aratani F. Purification of metallurgical grade silicon up to solar grade. // Progress in Photovoltaics: Research and Applications. 2001; Volume 9, pp 203-209.
13. Margaria1 T., Cocco F., Neulat L, Kraiem J., Einhaus R., Degoulange J., Pelletier D., Dubois S., Delannoy Y., Chichignoud G., Delsol R., Bruni M.D. UMG Silicon from the PHOTOSIL project a status overview // 2011 on the way towards industrial production, 26th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Hamburg, Germany 2011: pp. 1806-1809.
14. Ji-Jun W., Wen-hui M., Bin Y., Yong-nian D., Morita K. Boron removal from metallurgical grade silicon by oxidizing refining. // Transactions of Nonferrous Metals Society of China. 2009; 19: pp. 463.467.
15. Черкасов, Н.М. Электрооборудование кристаллизационных установок / Н. М. Черкасов. - Москва : Металлургия, 1975. - 295 с.
16. Катков О. М. Выплавка технического кремния: учеб. пособие: Изд-е –2, Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 1999. — 243 с.
17. Davis J.R, Rohatgi A, Hopkins R.H, Blais P.D, Rai-Choudhury P, McCormick J.R, Mollenkopf H.C. Impurities in silicon solar cells. // IEEE Trans. Elect. Dev. 1980; ED-27: pp. 677-687.
18. Hopkins R.H, Rohatgi A. Impurity effects in silicon for high efficiency solar cells. J. // Journal of Crystal Growth 1986; 75: pp. 67-79.
19. Kishida Y, Okajima M, Kondo J, Okazawa K, Tokumaru S, Dohnomae H, Hiyoshi M. Compensation free SoG silicon feedstock by metallurgical refinement. // 26th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Hamburg, Germany 2011: pp. 925-928.
20. Пфанн, В. Зонная плавка. М.: Мир 1970. - 366 с.
21. Парр Н. Зонная очистка и ее техника. Пер. с англ. — М.: Metallurgizdat, 1963. — 210 с.

22. Ратников Д. Г. Бестигельная зонная плавка. Москва: Metallurgy, 1976. — 224 с.
23. Chengmin Chen, Guangxia Liu, Lei Zhang, Guodong Wang, Yanjin Hou, Yan L. Numerical Simulation Study on the Front Shape and Thermal Stresses in Growing Multicrystalline Silicon Ingot: Process and Structural Design. // China Journal of Crystal Growth Volume 354, Issue 1, 1 September 2012, Pages 86-92.
24. Georgi Djambazov, Valdis Bojarevics, Koulis A Pericleou, Michele Forzan. Numerical modelling of silicon melt purification in induction directional solidification system. // International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics October 2016 vol. 53(10). pp.1-8
25. Feng Huang, Chen Ruirun, Guo Jingjie, Ding Hongsheng. Continuous melting and directional solidification of silicon ingot with an electromagnetic cold crucible. // February China Foundry 2012. Vol. 9(1). Pp.24-27
26. Lifeng Zhang, Yusheng Ma, Yaqiong Li. Preparing crystalline silicon from Si-Sn solvent by zone melting directional solidification method. // November. Materials Science in Semiconductor Processing 2017. Vol. 71. Pp.12-19.
27. Колядов Е.В., Герасимов В.В., Висик Е.М., Межин Ю.А. Литье методом направленной кристаллизации с управляемым градиентом температуры на фронте кристаллизации / Литейное производство. 2016. № 8. С. 24-26.
28. Непрерывное литье в электромагнитный кристаллизатор / З. Н. Гецелев, Г.А. Балахонцев, Ф.И. Квасов и др. - М.: Metallurgy, 1983. - 152 с.
29. Первухин М.В., Сергеев Н.В., Хацаюк М.Ю. Электромагнитный кристаллизатор для получения непрерывно литых слитков с высокими скоростями охлаждения / Известия Российской академии наук. Энергетика. 2013. № 3. С. 121-129.
30. Авдулов А.А., Усынина Г.П., Сергеев Н.В., Гудков И.С. Технология литья алюминиевых сплавов в электромагнитный кристаллизатор для производства длинномерных заготовок малого диаметра / Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Химия. 2017. Т. 10. №1. С.82-89.

31. Авдулов А.А., Сергеев Н.В., Гудков И.С., Тимофеев В.Н., Горохов Ю.В., Авдулова Ю.С. Разработка технологии производства проволоки из специальных алюминиевых сплавов на основе способа литья в электромагнитный кристаллизатор и непрерывного прессования способом конформ / Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Техника и технологии. 2017. Т. 10. № 1. С. 85-94.
32. Минаков А.В., Хацаюк М.Ю., Первухин М.В. Численное моделирование динамики свободной поверхности и кристаллизации расплава в электромагнитном кристаллизаторе / Индукционный нагрев. 2014. № 1 (27). С. 37-42.
33. Демидович В.Б., Хацаюк М.Ю., Тимофеев В.Н., Максимов А.А. Численное моделирование бестигельного плавления титанового сплава в переменном магнитном поле / Metallurgy машиностроения. 2017. № 3. С. 2-5.
34. О математическом моделировании задач с фазовыми переходами в металлургии и литейном производстве / Л. А. Соколовская, В. А. Мамишев. // Процессы литья. - 2009. - N 2. - С. 24-29.
35. П.В. Антонов, В.С. Бердников. Зависимости формы фронта кристаллизации и скорости роста слитка кремния от режима теплообмена в методе Бриджмена – Стокбаргера // Прикладная механика и техническая физика. 2012. том 53, N 6 с.65-77
36. Демидович В.Б., Чмиленко Ф.В. Численное моделирование устройств индукционного нагрева. СПб: СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2010. 158 с.
37. Демидович В.Б., Растворова И.И. Моделирование индукционного нагрева легких сплавов перед обработкой давлением. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2015. 158 с.
38. Прахт В.А., Сарапулов Ф.Н., Дмитриевский В.А., Гоман В.В. Компьютерное моделирование установки индукционного нагрева цилиндрических заготовок // Дистанционное и виртуальное обучение, № 9, 2009. С. 17-21.

39. Немков В.С., Демидович В.Б. Теория и расчет устройств индукционного нагрева. Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. Отд-ние, 1988. 280 с.
40. Демидович В.Б., Чмиленко Ф.В. Компьютерное моделирование устройств индукционного нагрева. СПб: СПбГЭТУ "ЛЭТИ", 2013. 160 с.
41. Жорник А.И., Прокопенко Ю.А., Чистяков А.Е. Численное решение задачи индукционного нагрева полого цилиндра // Известия ЮФУ. Технические науки. 2011. № 8 (121). С. 175-182.
42. Демидович В.Б., Чмиленко Ф.В. Программное обеспечение для моделирования и расчета индукционных нагревателей / Индукционный нагрев. 2009. № 3. С. 5-10.
43. Bajda Y.I., Klymenko V.V., Pantelyat M.G., Trichet D., Wasselynck G. Electromagnetic and thermal transients during induction heating of cylindrical workpieces / Acta technica CSAV (Ceskoslovensk akademie VED) Akademie Ved Ceske Republiky ISSN: 0001-7043 Vol: 63, № [5](#), 2018, pp. 657-682.
44. Демидович В.Б., Чмиленко Ф.В. Численные методы в теории индукционного нагрева. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2008. 220 с.
45. Головенко Е.А., Кинев Е.С., Первухин М.В., Хохлов Д.В., Комаров А.В., Михайлов К.А. Результаты математического моделирования процесса нагрева цилиндрической загрузки в однофазном индукционном нагревателе / Научный вестник Новосибирского государственного технического университета. Новосибирск. № 3 (40), 2010, с. 19-25.
46. Chakraborty, S., Ganguly, S., Talukdar, P. Determination of optimal taper in continuous casting billet mould using thermo-mechanical models of mould and billet / Journal of Materials Processing Technology. 2019. Vol. 270, Pp. 132-141.
47. Строителева Н.И., Головки А.К., Червонный И.Ф. О влиянии внешних воздействий на трансформации микродефектов в монокристаллах кремния // Наука и инновации в современном мире: техника и технологии. В 3-книгах. Одесса. 2017. Т.2. с.143-156.
48. Моделирование процессов плавления и кристаллизации монокристаллического кремния и германия при воздействии наносекундного

лазерного излучения. С.П.Жвавый // 4-я международная конференция «Взаимодействие излучений с твердым телом», 3-5 октября 2001 г., Минск, Беларусь с.142-144.

49. С.И. Ананин, В.М. Асташинский, А.С. Емельяненко, Е.А. Костюкевич, А.М. Кузьмицкий, С.П. Жвавый, В.М. Анищик, В.В. Углов, А.В. Пунько/ Динамика плавления и кристаллизации монокристаллического кремния при воздействии компрессионных плазменных потоков / Журнал технической физики, 2006, том 76, вып. 7. С.34-40.

50. Направленная кристаллизация мультикристаллического кремния в условиях ослабленной конвекции расплава и газообмена *М. А. Гоник* / Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники. Том 18, № 2 (2015) с.69-82.

51. Китаев Е.М. Затвердевание стальных слитков. – М.: Металлургия, 1982. – 168с.

52. Дюдкин Д.А., Крупман Л.И., Максименко Д.М. Усадочные раковины в стальных слитках и заготовках. – М.: Металлургия, 1983. – 136с.

53. Постольник Ю.С. Тимошпольский В.И. Трусова И.А. Ратников П.Э. Температурные напряжения в затвердевающем непрерывнолитом слитке при управляемом охлаждении. / Литьё и металлургия. 2008.вып. 3 (47). С.106-114.

54. Повитухин С.А., Гусева Е.Н., Стащук П.В. Дискретизация нестационарной пространственной модели, описывающей процесс затвердевания слитка в кристаллизаторе машины непрерывного литья заготовок // Интернет-журнал «Отходы и ресурсы», 2020 №1, <https://resources.today/PDF/16INOR120.pdf>

55. Зенкевич, О. Метод конечных элементов в технике / О. Зенкевич. — М.: Мир, 1975. – 541 с.

56. Зенкевич, О. Конечные элементы и аппроксимация / О. Зенкевич, К. Морган. — Л.: Мир, 1986. – 318 с.

57. Elcut Руководство пользователя: URL: elcut.ru/free_doc_r.htm (дата обращения: 20.11.2021). – Текст: электронный.

58. Введение в COMSOL Multiphysics. URL: www.comsol.ru/documentation (дата обращения: 5.10.2020). – Текст: электронный.
59. А.Е. Слухоцкий. Индукторы для индукционного нагрева / А.Е. Слухоцкий, С.Е. Рыскин. — Л.: Энергия, 1974. – 264 с.
60. Basic Mechanical and Thermal Properties of Silicon. Virginia Semiconductor, Inc. URL: www.virginiasemi.com (дата обращения: 5.10.2020). – Текст: электронный
61. Ю.Е. Шелудяк, Л.Я. Кашпуров, Л.А. Малинин, В.Н. Цалков Теплофизические свойства компонентов горючих систем. Справочник. Под ред. Н.А. Силина. НПО «Информация и технико-экономические исследования» М. 1992, 186 с.
62. Высокотемпературная теплопроводность кремния в твердом и жидком состояниях / Я. Б. Магомедов, Г. Г. Гаджиев. // Теплофизика высоких температур. - 2009, том 46, №3, - с. 466–467.
63. Г. Корн, Т.Корн. Справочник по математике для научных работников и инженеров / М.: «Наука», 1973, с.833
64. А.В. Лыков. Теория теплопроводности. - М.: Высшая школа, 1967. - 599 с.
65. Лыков А.В. Тепломассообмен (Справочник) М.: Энергия, 1978. – 480 с.
66. Объемные изменения при плавлении и нагреве расплавов кремния и германия / В.М. Глазов, О.Д. Щеликов. // Теплофизика высоких температур. - 2000, том 38, №3, - с.429-436.
67. Matthew A Hopcroft, W.D. Nix What is the Young's Modulus of Silicon. //IEEE Xplore Journal of Microelectromechanical Systems 2010. Vol.19(2). Pp. 229 – 238
68. <http://paduaresearch.cab.unipd.it/5745/> Doni, Angelo (2013) Processes and technologies for crystalline silicon production for photovoltaic applications. [Ph.D. thesis] 08.11.2021
69. Лурье А.И. Теория упругости. – М.: Наука, 1970. – 940 с.
70. Тимошенко С.П., Гудьер Дж. Теория упругости. – М.: Наука, 1979. – 560.
71. Сарапулов Ф.Н., Фризен В.Э., Сокунов Б.А., Урманов Ю.Р. Снижение энергозатрат в металлургическом производстве за счет применения МГД-

технологий / Промышленная энергетика. Издательство: Научно-техническая фирма "Энергопрогресс" (Москва). 2016. № 12. С. 21-27.

72. Моделирование и исследование технологии получения мультикристаллического кремния в индукционной печи с холодным тиглем автореферат диссертации на соискание степени кандидата технических наук Кичигин В.В. Санкт-Петербург СПб ГЭУ ЛЭТИ 2011 05.09.10 с.211.

73. Базаров А.А., Навасардян А.А. Система индукционного нагрева в производстве технического кремния / Вестник СамГТУ. Технические науки №1, 2016. с.87-95

74. А.А. Базаров, Е.П. Иванова, А.А.Навасардян. Индукционный нагрев с ограничением термонапряжений / Радиоэлектроника, электротехника и энергетика: Двадцать третья Международная науч.-техн. Конф. Студентов и аспирантов (2 – 3 марта 2017 г., Москва): Тез. Докл. В 3 т. Т.2. М.: Издательский дом МЭИ, 2017. 404 с. т.2, с. 128

75. А.А. Базаров, Навасардян А.А. Моделирование электромагнитных и тепловых процессов в индукционном кристаллизаторе кремния / Вестник СамГТУ. «Технические науки». Выпуск №3(55), 2019 - С. 105-119

76. Н.В. Бондарева, А.А. Навасардян. Моделирование процессов деформации в задвижке / «EurasiaScience» XXV Международная научно-практическая конференция. 15 ноября 2019. Научно-издательский центр «Актуальность.РФ». Сборник статей. Часть I. 2019, с.69-72.

77. А.А. Навасардян, Н.В. Бондарева. Моделирование процесса кристаллизации кремния с дискретным изменением объема / «EurasiaScience» XXV Международная научно-практическая конференция. 15 ноября 2019. Научно-издательский центр «Актуальность.РФ». Сборник статей. Часть I. 2019, с.64-68.

78. A. A. Bazarov, N. V. Bondareva, A. A. Navasardyan Heat System for Rigid Wedge Valves / Proceedings of the 6th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2020) Volume II 2021 Pp. 1277-1287 doi : 10.1007/978-3-030-54817-9_149

79. Навасардян А.А., Бондарева Н.В. Электромагнитный кристаллизатор кремния периодического действия / *Фундаментальные и прикладные научные исследования: актуальные вопросы; достижения и инновации: сборник статей XLIV Международной научно-практической конференции.* – Пенза: МЦНС «Наука и Просвещение». – 2021. – с. 238 . с.74-80.
80. А.А. Базаров, А.А. Навасардян, Н.В. Бондарева Конструкция электромагнитного кристаллизатора алюминия периодического действия / *Вестник СамГТУ. «Технические науки».* Выпуск 29 №3 2021 с.100-116
81. Навасардян А.А., Бондарева Н.В. Опыт применения высокочастотного индуктора с автоматической подстройкой частоты / *СОВРЕМЕННАЯ НАУКА: АКТУАЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ, ДОСТИЖЕНИЯ И ИННОВАЦИИ: сборник статей XIX Международной научно-практической конференции.* В 2 ч. Ч. 1. – Пенза: МЦНС «Наука и Просвещение». – 2021. – 268 с. С.34-39.
82. Bazarov, A.A., Navasardian, A.A., Bondareva, N.V. Processes Modeling in a Silicon Induction Crystallizer /*Lecture Notes in Mechanical Engineering 2022 vol 2* с. 657-667 Doi: <https://doi.org/10.1007/978-3-030-85230-6>

ПРИЛОЖЕНИЕ П.1

Расчет тепловых процессов в расплаве при разных параметрах
теплоизоляции

1. Расчет мощности для моделирования процесса кристаллизации

Для исследования принята загрузка радиусом 0,15 м высотой 0,15 м.

Для варианта загрузки радиусом 0,15 м и высотой 0,15 м и подложки с электропроводностью $\sigma = 10^6$ См/м определены значения боковых сил, давления и мощности тепловыделения для каждого слоя, которые представлены в табл.П.1.1,П.1.2.

Таблица П.1.1.

Расчетные значений гидростатического давления и боковой силы в слоях расплава

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
H_n , м	0.15	0.135	0.12	0.105	0.09	0.075	0.06	0.045	0.03	0.015
P , Па	3768	3425	3083	2740	2398	2055	1370	1028	685	342
$F_n^{эм}$, Н	53,9	49	44,1	39,2	34,3	29,4	19,6	14,7	9,8	4,9

Таблица П.1.2

Расчетные значения силы и мощности тепловыделения в расплаве в слоях загрузки

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$F_n^{эм}$, Н	59,6	59,3	55,5	50	43,5	36,9	30,6	24,7	19,2	14,1
P , кПа	4,2	4,1	3,9	3,5	3	2,6	2,1	1,7	1,3	1
$P_{эм}$, кВт	2,5	2,27	2	1,75	1,49	1,26	1,1	0,9	0,75	0,63
W , Вт/м ³ $\times 10^6$	4.24	3.85	3.39	2.97	2.53	2.14	1.86	1.53	1.27	1.07

Суммарная мощность тепловыделения в загрузке составляет 14,65 кВт, суммарная сила - 393,4 Н.

2. Вариант 1.

Расчет тепловых процессов в загрузке:

радиус 0,15 м;

высота 0,15 м;

боковая футеровка принудительно охлаждается с коэффициентом конвективного теплообмена, равным $100 \text{ Вт} / (\text{м}^2 \cdot \text{град})$;

отвод тепла снизу осуществляется при коэффициенте конвективного теплообмена, равном $1000 \text{ Вт} / (\text{м}^2 \cdot \text{град})$.

Теплообмен в верхней части происходит с открытым пространством: излучение в окружающую среду, имеющую температуру 20 С

Боковая поверхность слитка обменивается теплом с футеровкой, от которой отводится тепло к водоохлаждаемой катушке индуктора.

В основании футеровки (тигель) расположена водоохлаждаемая трубка, что обеспечивает максимальный тепловой поток.

В результате расчета получены распределения температуры для различных моментов времени (рис.П.1.1). Градиент температуры в загрузке сложно определить ввиду значительного преобладания коэффициента теплопроводности кремния по сравнению с футеровкой.

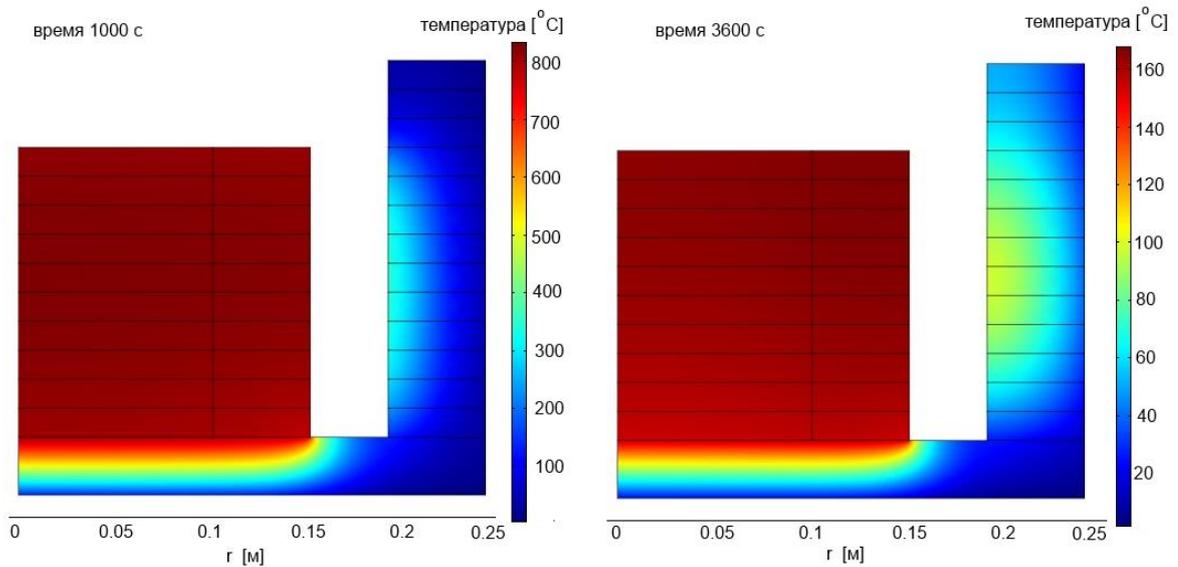


Рис.П.1.1 Распределение температуры в тигле и слитке в моменты времени 1000 с и 3600 с

Мощность тепловыделения, обусловленная вихревыми токами, взята из предыдущего расчета из табл. П.1.2.

Тепловые потоки определяются на верхней и боковой поверхностях слитка, а также на нижней поверхности основания футеровки. Последнее

значение позволяет определить необходимую мощность охладителя в каждый момент времени.

Максимальное значение теплового потока $Q=43,2$ кВт.

Мощность тепловыделения равна $12,2$ кВт.

Баланс мощностей получен отрицательный, то есть потери тепла больше, чем мощность тепловыделения во всей загрузке. Загрузка охлаждается. Мощность тепловыделения в процессе кристаллизации снижается (табл.П.1.4).

Таблица П.1.3.

Расчетные значения мощности и потоков

время	0	300	600	900	1200	1500	1800	2400	3000	3600
$Q_{\text{верх}}$, кВт	27,7	18,5	18,5	5,9	2,4	1,2	0,7	0,3	0,2	0,15
$Q_{\text{бок}}$, кВт	10,9	9,5	8,6	2,8	1,3	0,8	0,5	0,3	0,2	0,18
$Q_{\text{низ}}$, кВт	3,7	15,2	16	13,5	9,5	7,1	5,6	3,7	2,7	2,2
$Q_{\text{сум}}$, кВт	42,3	43,2	43,1	22,2	13,2	9,1	6,8	4,3	3,1	2,53
P , кВт	12,2	8	3,9	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5

Таблица П.1.4.

Расчетные значения мощности и энергии на интервале работы индуктора

время	0	100	200	300	400	500	600	650	700
P , кВт	12,2	10,6	9,5	8	6,9	5,5	3,9	1,9	1,5
W , кДж		1140	1005	875	745	620	470	290	170

Суммарные энергозатраты, обусловленные тепловыделением в расплаве от наведенных токов, составляют $W=5315$ кДж.

При массе загрузки $M=24,4$ кг удельные энергозатраты составляют $W/M=217,8$ кДж/кг.

Снижение температуры в расплаве показано на рис.3.21, где представлены диаграммы температуры в нескольких точках на боковой поверхности загрузки. Градиент температуры наблюдается до тех пор, пока не закончится процесс кристаллизации.

Охлаждение слитка происходит в два этапа: до момента времени 700 с осуществляется кристаллизация, затем дальнейшее более быстрое охлаждение. На первом этапе наблюдается медленное снижение температуры

в слоях (рис.П.1.3, П.1.4). Причиной является наличие скрытой теплоты, на отвод которой требуется значительный охлаждающий поток. Дополнительно, необходимо отводить тепло, выделяющееся при протекании индуцированных токов. Только после кристаллизации первая причина устраняется полностью, а вторая снижается существенно. Благодаря этому на втором этапе скорость охлаждения при одинаковом интервале времени (от 0 до 700 с и от 700 до 1400 с) увеличивается почти в 7 раз.

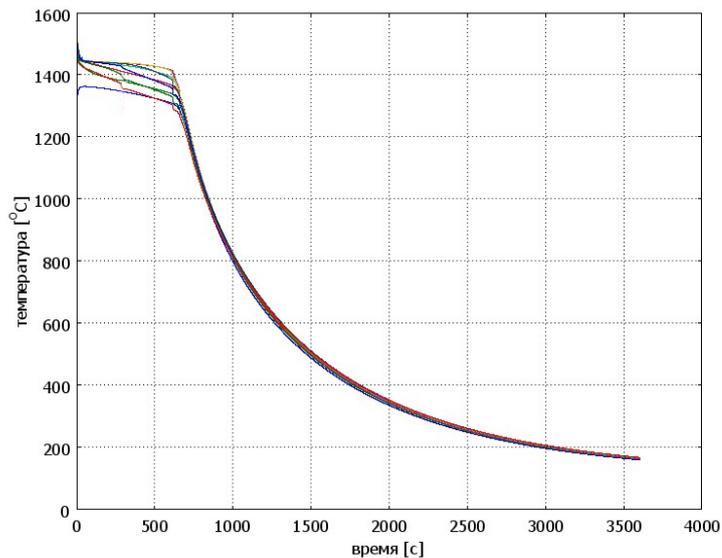


Рис.П.1.2 Диаграммы температуры в слоях на боковой поверхности загрузки

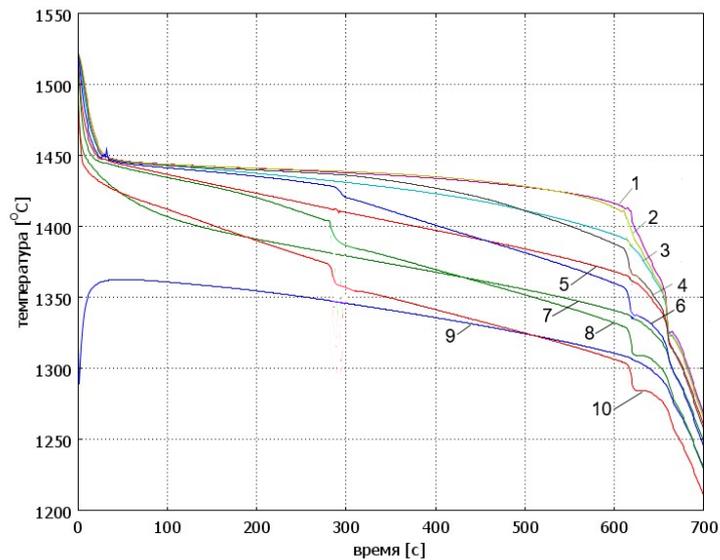


Рис.П.1.3 Диаграммы температуры на боковой поверхности в точках загрузки: 1 – $h=0,105$ м; 2 – $h=0,09$ м; 3 – $h=0,12$ м. 4 – $h=0,075$ м; 5 – $h=0,135$ м; 6 – $h=0,06$ м; 7 – $h=0,045$ м; 8 – $h=0,03$ м; 9 – $h=0$; 10 – $h=0,015$ м;

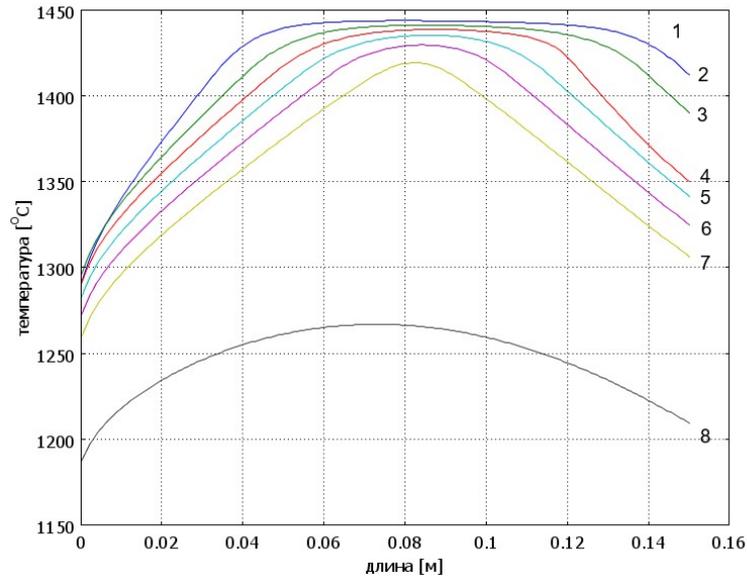


Рис.П.1.4 Диаграммы температуры на боковой поверхности загрузки в моменты времени:
1 – 100 с; 2 – 200 с; 3 – 300 с; 4 – 400 с; 5 – 500 с; 6 – 600 с; 7 – 700 с.

На диаграммах температуры на боковой поверхности слитка, видно, что кристаллизация идет одновременно снизу и сверху (рис.П.1.5).

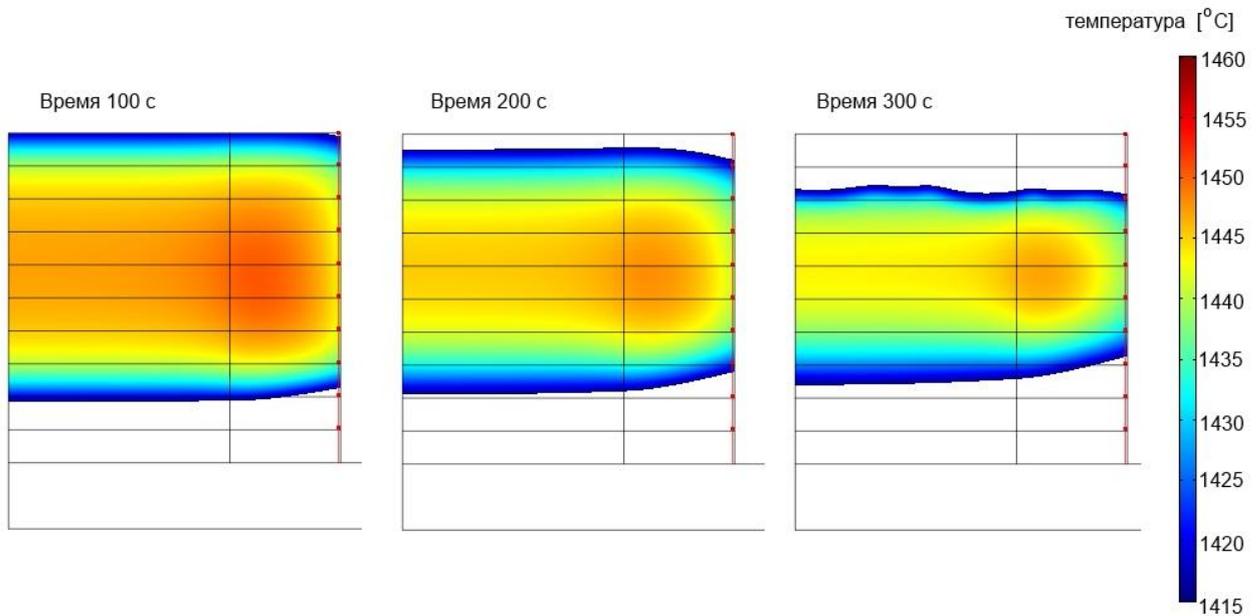


Рис.П.1.5 Распределение температуры в расплавленной части загрузки в момент времени
100, 200, 300 с.

Для более наглядного представления показаны распределения температуры, на которых области со значениями температуры ниже точки кристаллизации закрашены белым цветом (рис.П.1.5, П.1.6). Несмотря на то, что самая большая мощность тепловыделения имеет место в нижней части

слитка, процесс кристаллизации начинается именно в этом месте. Подложка из кремния толщиной 15 мм после заливки основной массы быстро прогревается, но не плавится. Отвод тепла к основанию обеспечивает устойчивый процесс кристаллизации.

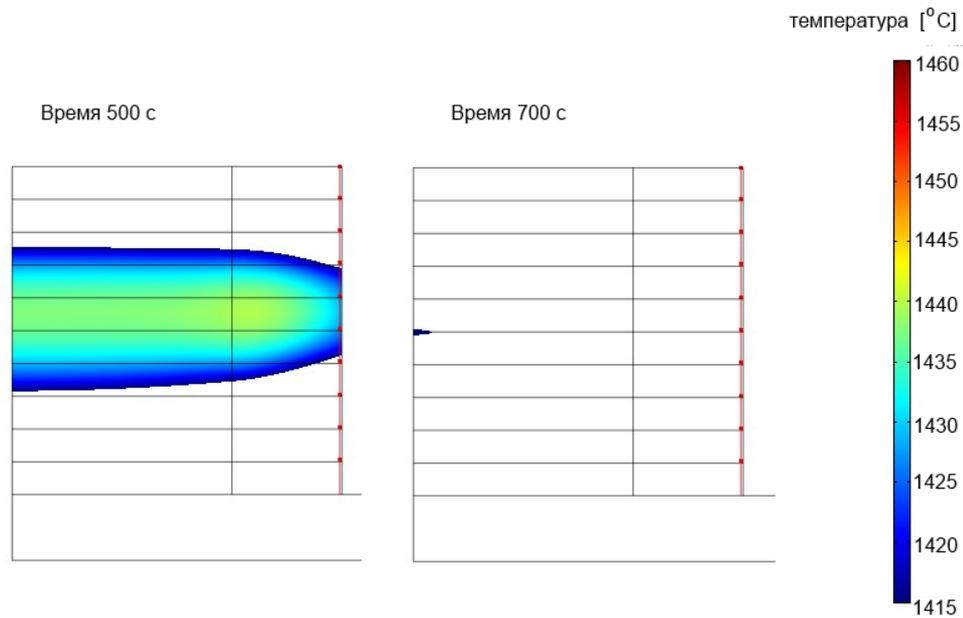


Рис.П.1.6 Распределение температуры в расплавленной части загрузки в момент времени 500, 700 с.

Согласно рис.П.1.6 кристаллизация слитка завершается в момент времени 700 с. После этого происходит дальнейшее остывание. Особенностью процесса является завершение кристаллизации в промежуточной по высоте области. Если в момент времени 500 с наблюдается прослойка жидкости между верхней и нижней твердыми областями, то далее жидкая фаза отступает к осевой линии. Такой ход процесса приводит к деформациям и напряжениям внутри затвердевшего кремния.

Процесс кристаллизации сопровождается увеличением электрического сопротивления и снижением выделяющейся в кремнии мощности. Начальное и конечное распределения удельной мощности тепловыделения представлены на рис.П.1.7.

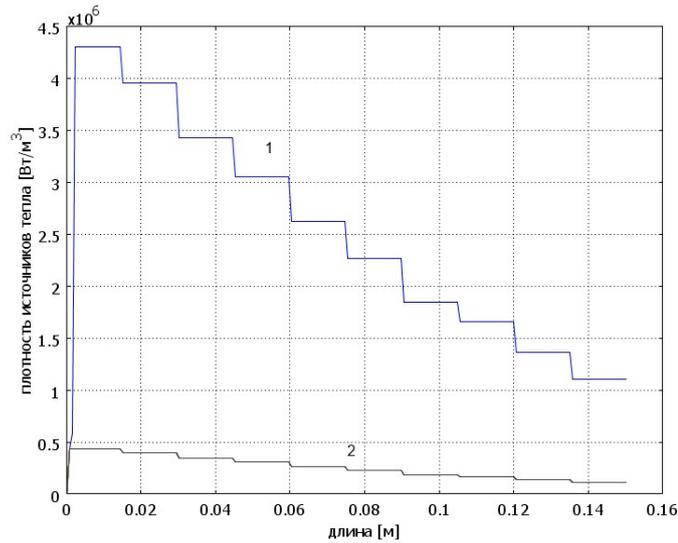


Рис.П.1.7 Диаграммы мощности тепловыделения по высоте боковой поверхности загрузки в моменты времени: 1 – 300 с; 2 – 3600 с.

По мере охлаждения загрузки и снижения температуры происходит быстрое уменьшение мощности тепловыделения в кремнии, как показано на рис.П.1.8 (линия 2). Более длительным является процесс снижения тепловых потоков в окружающую среду и системы охлаждения – боковой индуктор и нижний охладитель.

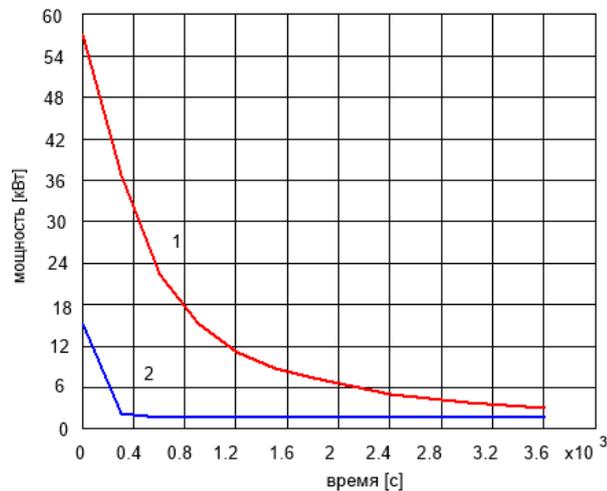


Рис.П.1.8 Временные диаграммы суммарного теплового потока и мощности тепловыделения в загрузке: 1 – суммарный тепловой поток с поверхности; 2 – мощность тепловыделения.

Диаграммы на рис.П.1.8 позволяют судить о динамике процесса и эффективности системы охлаждения.

В результате расчетов получено максимальное значение теплового потока $Q=43,2$ кВт, и мощность тепловыделения 12,2 кВт. Баланс остается отрицательным, что приводит к устойчивому охлаждению загрузки.

Результаты расчета энергозатрат на кристаллизацию кремния представлены в табл.П.1.6.

Таблица П.1.6.

Расчетные значения мощности и энергии на интервале работы индуктора

время	0	100	200	300	400	500	600	690	700
P, кВт	12,2	10,8	10,1	9,2	7,6	6,3	4,9	1,6	1,5
W, кДж		1150	1045	965	840	695	560	325	155

Суммарные энергозатраты составляют $W= 5735$ кДж, что при массе $M=24,4$ кг дает значение удельных энергозатрат $W/M=235$ кДж/кг

Охлаждение слитка происходит в два этапа: до момента времени 750 с происходит кристаллизация, затем дальнейшее охлаждение. Вначале наблюдается медленное снижение температуры в слоях (рис.П.1.9, П.1.10).

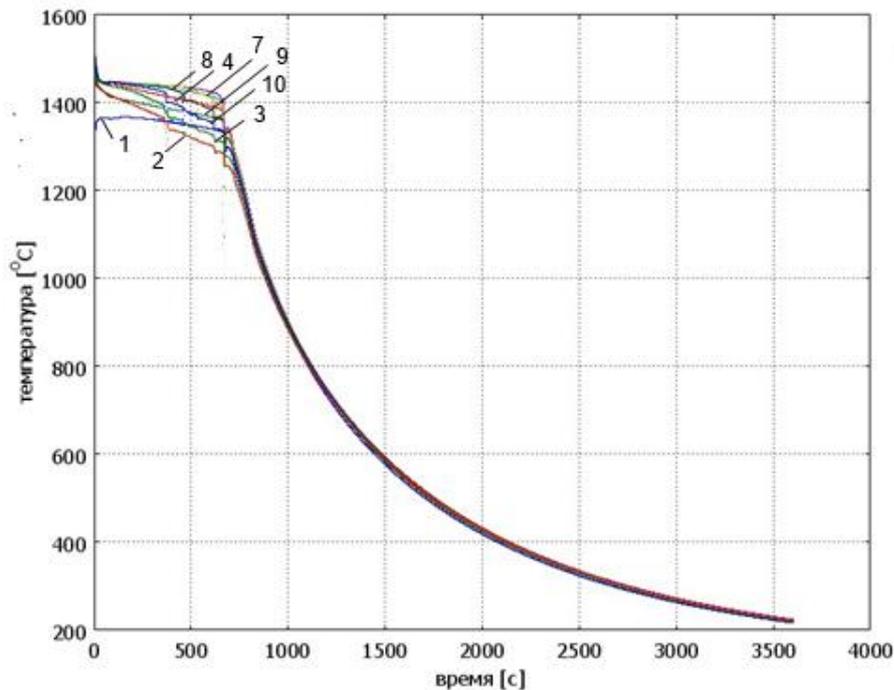


Рис.П.1.9 Диаграммы температуры на боковой поверхности в точках загрузки: 1 – $h=0$ м; 2 – $h=0,015$ м; 3 – $h=0,03$ м. 4 – $h=0,045$ м; 5 – $h=0,06$ м; 6 – $h=0,075$ м; 7 – $h=0,09$ м; 8 – $h=0,105$ м; 9 – $h=0,12$; 10 – $h=0,135$ м;

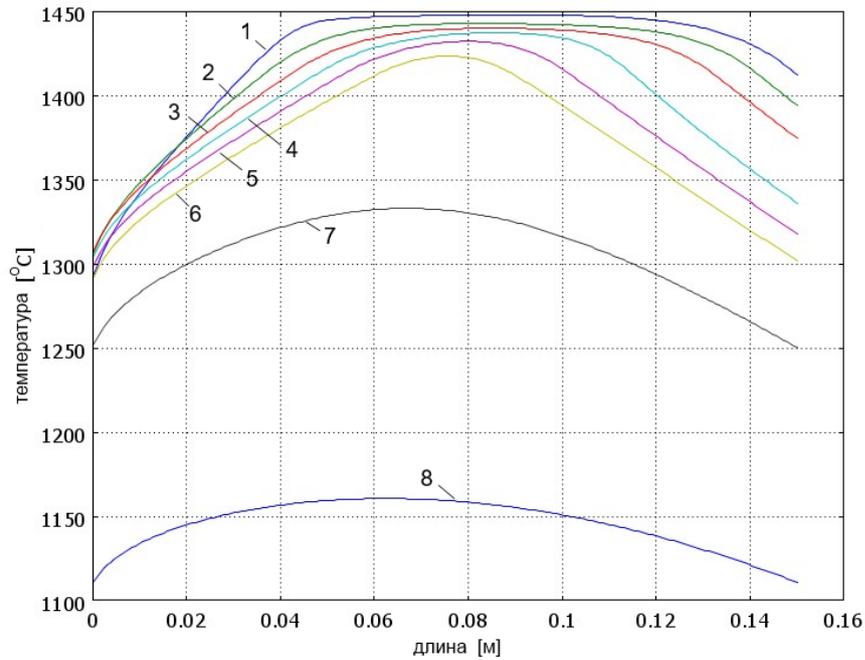


Рис.П.1.10 Диаграммы температуры на боковой поверхности загрузки в моменты времени:
1 – 100 с; 2 – 200 с; 3 – 300 с; 4 – 400 с; 5 – 500 с; 6 – 600 с; 7 – 700 с; 8 – 800 с.

Процедура кристаллизации иллюстрируется распределениями температуры, представленными на рис.П.1.11, П.1.12. Как и в предыдущем случае, на финише процесса образуется внутренняя изолированная от окружающей среды полость жидкого кремния, затвердевание которой приводит к появлению термонапряжений. Снижение потерь тепла через боковую стенку ослабило охлаждение, но проблему не решило.

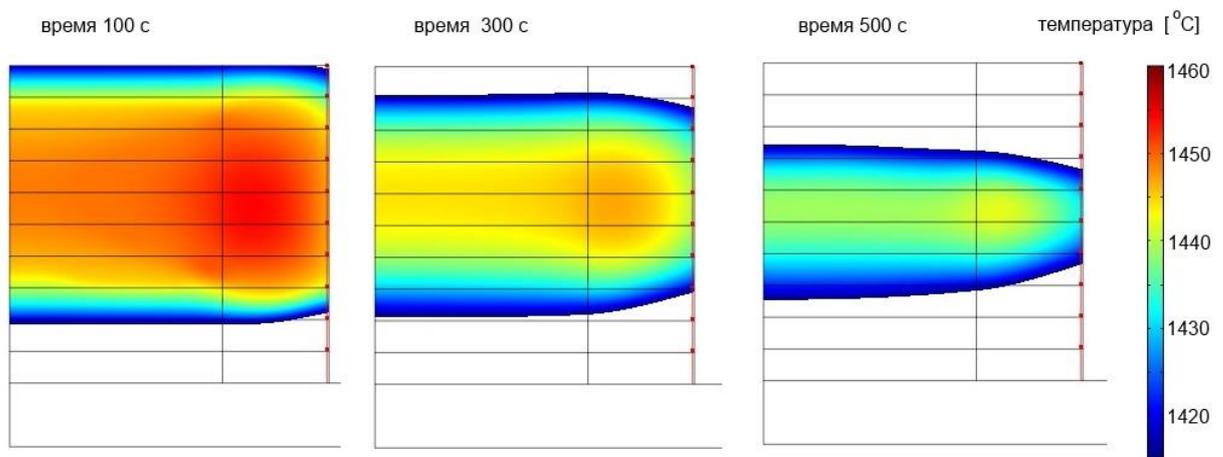


Рис.П.1.11 Распределение температуры в расплавленной части загрузки в момент времени 100, 300, 500 с.

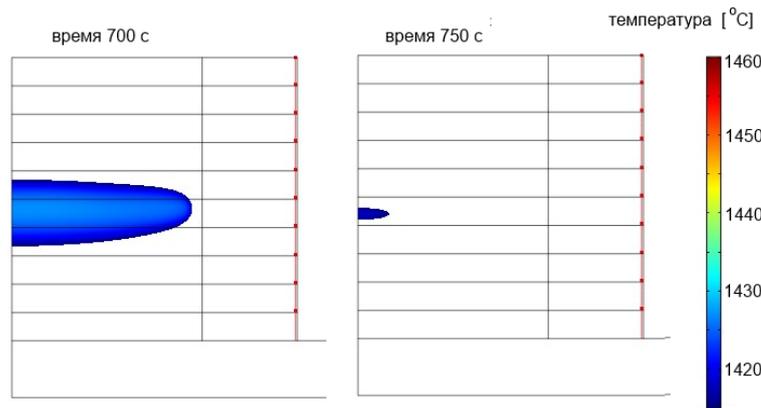


Рис.П.1.12 Распределение температуры в расплавленной части загрузки в момент времени 700, 750 с.

4. Вариант 3.

Расчет тепловых процессов в загрузке:

радиус 0,15 м;

высота 0,15 м;

верхняя часть футеровки (крышка) и боковая стенка футеровки охлаждаются с коэффициентом конвективного теплообмена, равным $5 \text{ Вт} / (\text{м}^2 \cdot \text{град})$;

отвод тепла снизу осуществляется при коэффициенте конвективного теплообмена, равном $1000 \text{ Вт} / (\text{м}^2 \cdot \text{град})$.

Коэффициент теплопроводности боковой и верхней частей футеровки принят равным $2 \text{ Вт/м} \cdot \text{град}$

В верхней части добавлена футеровка (крышка). Теплообмен слитка с окружающей средой сбоку и сверху происходит через футеровку, но с переносом тепла посредством излучения.

В данном расчете целью является снижение тепловых потоков через верхнюю и боковую поверхности, чтобы процесс кристаллизации распространялся снизу, а отвод тепла от футеровки задан только в виде конвективного потока.

Диаграммы температуры по высоте боковой поверхности в начале процесса показывают отставание процесс кристаллизации в средней по высоте части – кривые 1 – 6 на рис.П.1.13.

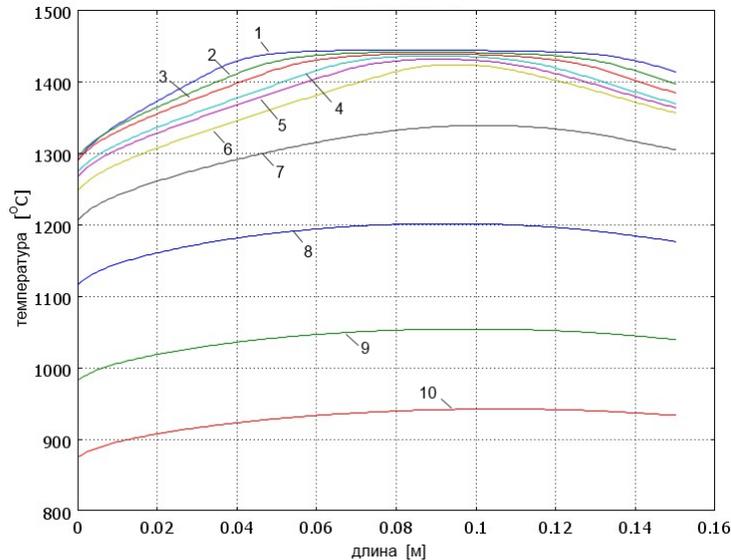


Рис.П.1.13 Диаграммы температуры на боковой поверхности загрузки в моменты времени:
1 – 100 с; 2 – 200 с; 3 – 300 с; 4 – 400 с; 5 – 500 с; 6 – 600 с; 7 – 700 с;
8 – 800 с; 9 – 900 с; 10 – 1000 с.

Распределения температуры, показанные на рис.3.33, 3.34, отличаются от предыдущих (рис.П.1.14,П.1.15) тем, что фронт кристаллизации в верхней области переместился выше. Однако, отвод тепла через верхний слой футеровки является достаточно большим, и процесс формирования внутренней полости с жидкостью не предотвращен.

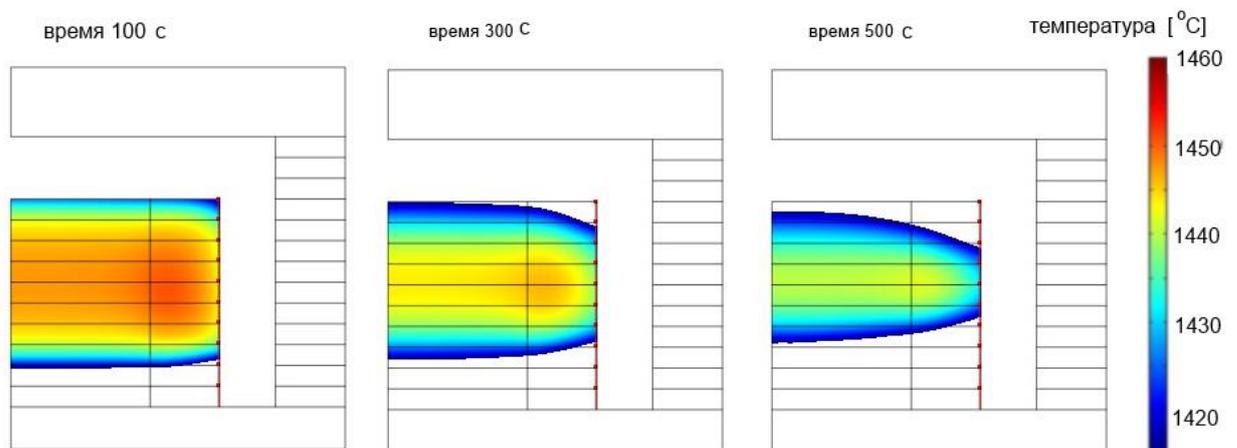


Рис.П.1.14 Распределение температуры в расплавленной части загрузки в моменты времени 100, 300, 500 с

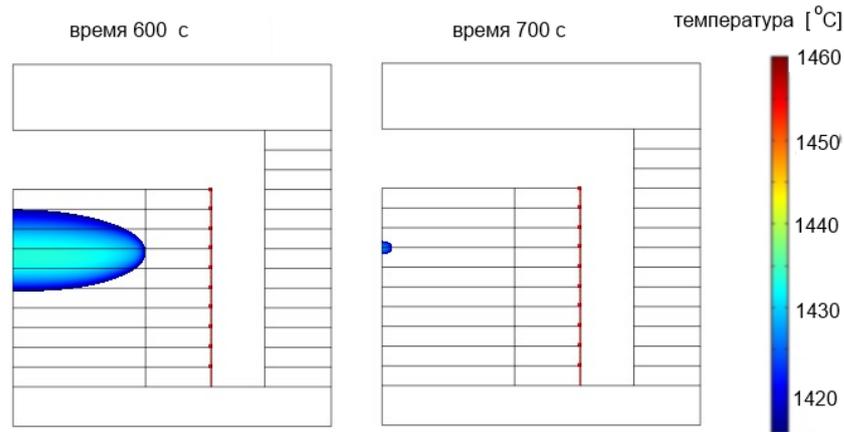


Рис.П.1.15 Распределение температуры в расплавленной части загрузки в моменты времени 600 с, 700 с

Результаты расчета тепловых потерь и мощности в процессе охлаждения представлены в табл.П.1.7. На основании полученных данных определены энергозатраты, обусловленные работой индуктора (табл.П.1.8).

Таблица П.1.7.

Расчетные значения мощности и потоков

время	0	300	600	900	1200	1500	1800	2400	3000	3600
$Q_{\text{верх}}$, кВт	13,4	8,7	7,2	2,5	0,9	0,3	0,1	0	0	0
$Q_{\text{бок}}$, кВт	12,1	10,2	9,3	4	1,9	1,1	0,7	0,4	0,3	0,2
$Q_{\text{низ}}$, кВт	3,7	15,2	15,9	14,6	10,8	8,4	6,7	4,7	3,6	2,9
$Q_{\text{сум}}$, кВт	29,2	34,1	32,4	21,1	13,6	9,8	7,5	5,1	3,9	3,1
P , кВт	12,2	8,7	4,6	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5

В результате расчетов максимальное значение теплового потока составляет $Q=34,1$ кВт. Мощность тепловыделения в начале кристаллизации равна 12,2 кВт. Баланс мощности отрицательный, загрузка охлаждается.

Таблица П.1.8.

Расчетные значения мощности и энергии на интервале работы индуктора

время	0	100	200	300	400	500	600	700
P , кВт	12,2	10,6	9,7	8,7	7,1	6,2	4,6	1,5
W , кДж		1140	1015	920	790	665	540	300

Суммарные энергозатраты $W=5370$ кДж.

При массе $M=24,4$ кг удельные энергозатраты составляют

$$W/M=220,1 \text{ кДж/кг.}$$

Несмотря на ухудшение условий охлаждения в верхней части футеровки энергозатраты не увеличились.

5. Вариант 4

Расчет тепловых процессов в загрузке:

радиус 0,15 м;

высота 0,15 м;

верхняя часть футеровки (крышка) и боковая стенка футеровки охлаждаются с коэффициентом конвективного теплообмена, равным $5 \text{ Вт} / (\text{м}^2 \cdot \text{град})$;

отвод тепла снизу осуществляется при коэффициенте конвективного теплообмена, равном $1000 \text{ Вт} / (\text{м}^2 \cdot \text{град})$.

Коэффициент теплопроводности боковой и верхней частей футеровки принят равным $1 \text{ Вт/м} \cdot \text{град}$

Теплообмен слитка с окружающей средой сбоку и сверху происходит через футеровку, с переносом тепла между поверхностями посредством излучения.

В данном расчете целью является снижение тепловых потоков через верхнюю и боковую поверхности, чтобы процесс кристаллизации распространялся снизу.

Распределения температуры в загрузке и футеровке показывают значительный разогрев теплоизоляции (рис.П.1.15). Снижение теплового потока через крышку и боковую стенку приводит к росту температуры поверхности. В момент времени 3600 с наблюдается обратный перепад температуры: футеровка имеет более высокую температуру, чем загрузка. Расчет тепловых потоков со всех поверхностей показывает, что максимальное значение возросло несмотря на то, что теплоизоляция стала более качественной. Расчетные значения приведены в табл.П.1.9.

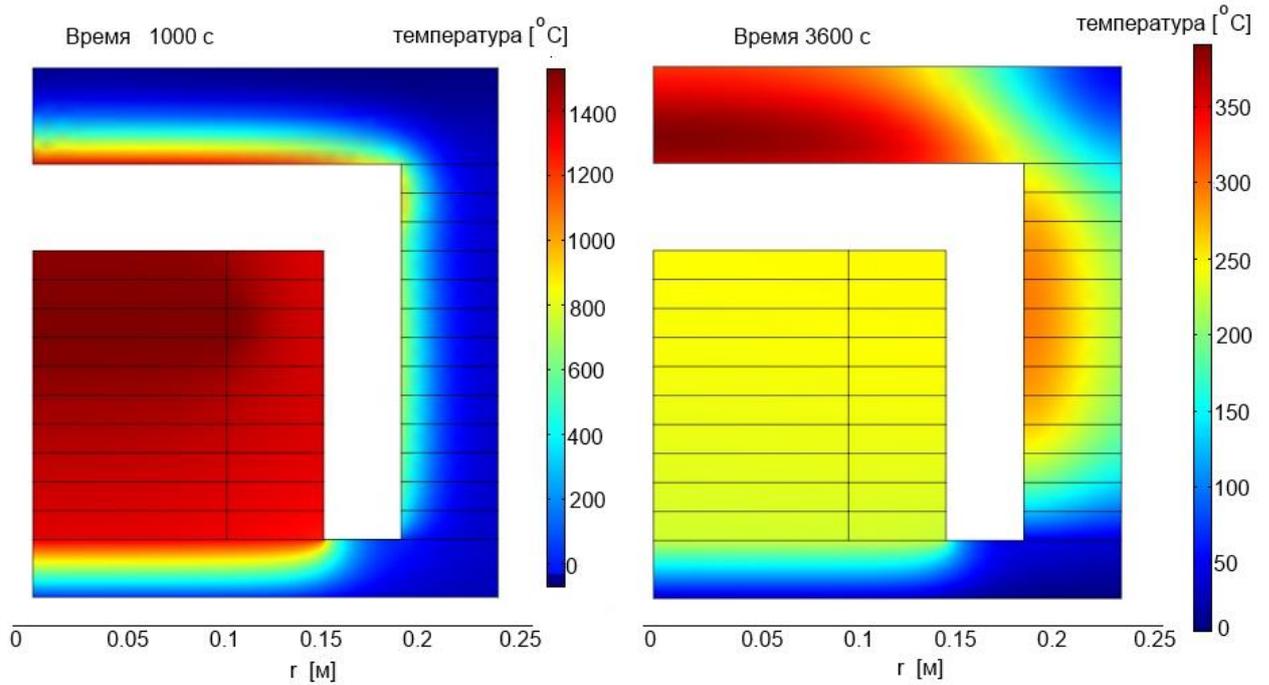


Рис.П.1.15 Распределение температуры в загрузке и футеровке в моменты времени 1000 с и 3600 с

Таблица П.1.9

Расчетные значения мощности и потоков

время	0	300	600	900	1200	1500	1800	2400	3000	3600
$Q_{\text{верх}}$, кВт	23,5	12,8	10,6	9,2	3,2	1	0,3	0	0	0
$Q_{\text{бок}}$, кВт	12	10,3	9,6	8,5	4,3	1,9	1,1	0,5	0,3	0,2
$Q_{\text{низ}}$, кВт	3,7	15,2	16,2	16	14,8	11,4	8,9	5,9	4,3	3,3
$Q_{\text{сум}}$, кВт	39,2	38,3	36,4	33,7	22,3	14,3	10,3	6,4	4,6	3,5
P , кВт	12,2	9,9	8,2	4,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5

Максимальное значение теплового потока равно $Q=39,2$ кВт.

Мощность тепловыделения равна 12,2 кВт.

Сохраняется отрицательный баланс, что позволяет загрузке охлаждаться. Результаты расчета энергозатрат на кристаллизацию кремния приведены в табл.П.1.10.

Таблица П.1.10.

Расчетные значения мощности и энергии на интервале работы индуктора

время	0	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1030
P , кВт	12	11,2	10,5	9,9	9,5	8,8	8,2	7,5	5,5	4,5	1,5
W , кДж		1160	1085	1020	970	915	850	785	650	500	390

Суммарные энергозатраты составляют $W=8325$ кДж.

При массе $M=24,4$ кг удельные энергозатраты составляют $W/M=341,2$ кДж/кг. Увеличение длительности процесса кристаллизации сказалось на удельных энергозатратах – по сравнению с предыдущими вариантами расход энергии возрос в 1,5 раза.

Диаграммы температуры на боковой поверхности для разных моментов времени (рис.П1.16) и распределения температуры (рис.П.1.17, П.1.18) показали, что верхний фронт кристаллизации продолжает смещаться к верхней торцевой поверхности.

Диаграммы температуры на рисунке П.1.16 отличаются от аналогичных для предыдущей конструкции кристаллизатора (рис.П.1.13). Однако, для определения более явного порядка продвижения фронта кристаллизации удобнее использовать распределение температуры с выделением области, остывшей ниже точки кристаллизации.

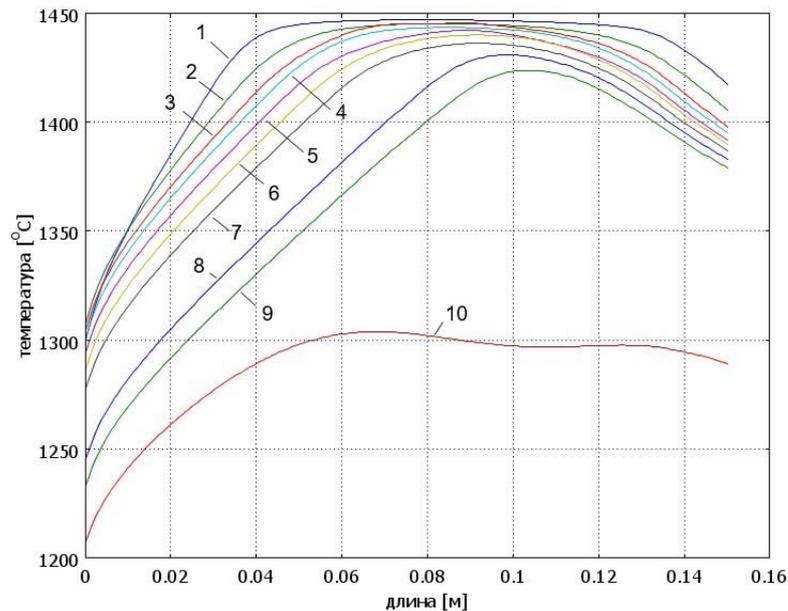


Рис.П.1.16 Диаграммы температуры на боковой поверхности загрузки в моменты времени: 1 – 100 с; 2 – 200 с; 3 – 300 с; 4 – 400 с; 5 – 500 с; 6 – 600 с; 7 – 700 с; 8 – 800 с; 9 – 900 с; 10 – 1000 с.

На рис.П.1.17, П.1.18 показаны распределения температуры, из которых следует, что кристаллизация, в основном, идет от основания вверх. Исключение составляет верхний угол, где мощность подогрева минимальна, а тепловые потери максимальны.

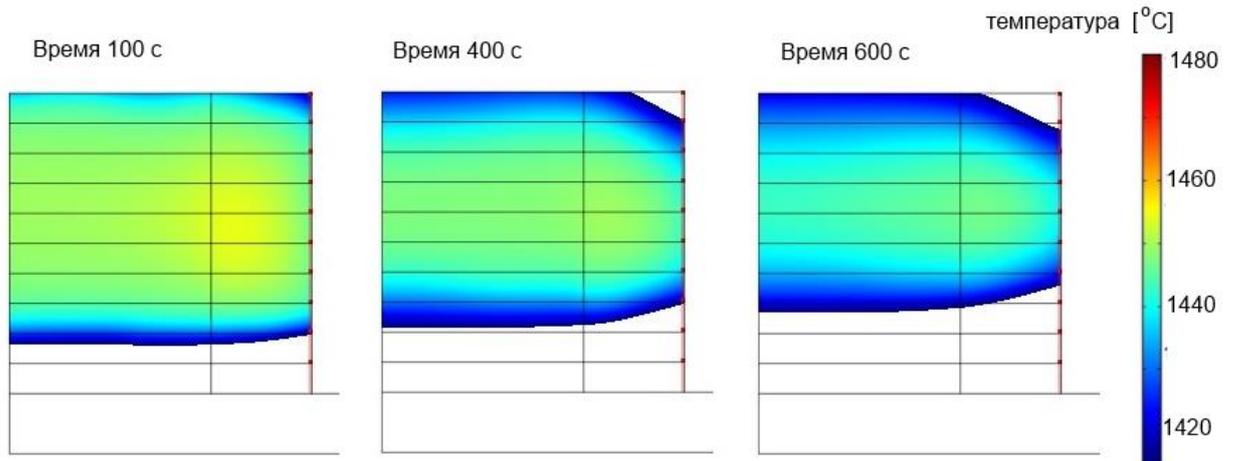


Рис.П.1.17 Распределение температуры в расплавленной части загрузки в момент времени 100, 400, 600 с.

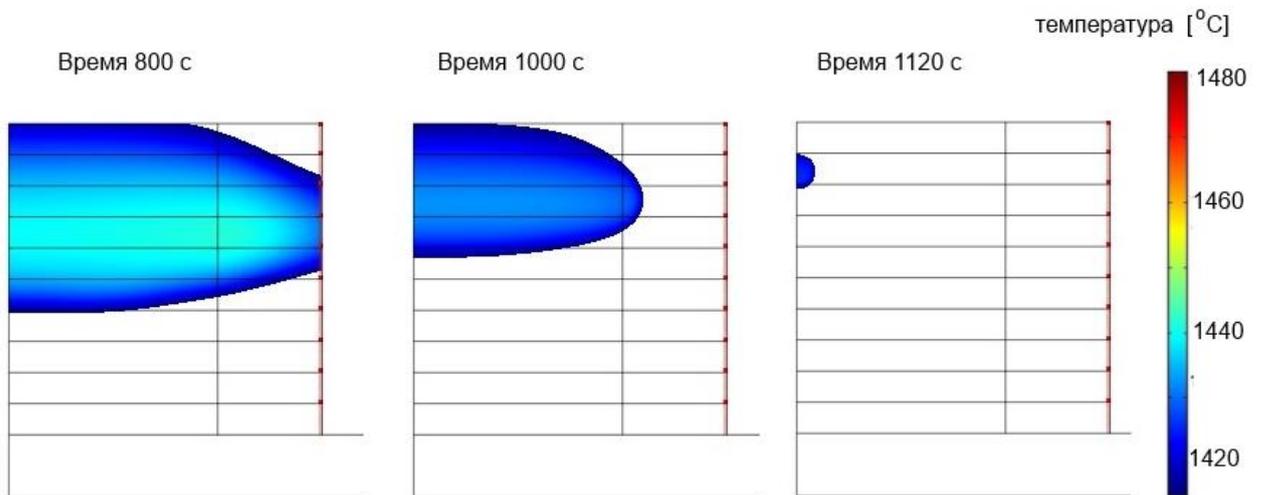


Рис.П.1.18 Распределение температуры в расплавленной части загрузки в момент времени 800, 1000, 1120 с.

6. Вариант 5.

Расчет тепловых процессов в загрузке:

радиус 0,15 м;

высота 0,15 м;

верхняя часть футеровки (крышка) и боковая стенка футеровки охлаждаются с коэффициентом конвективного теплообмена, равным $5 \text{ Вт} / (\text{м}^2 \cdot \text{град})$;

отвод тепла снизу осуществляется при коэффициенте конвективного теплообмена, равном $1000 \text{ Вт} / (\text{м}^2 \cdot \text{град})$.

Коэффициент теплопроводности боковой и верхней частей футеровки принят равным $0,5 \text{ Вт/м} \cdot \text{град}$

Дальнейшее уменьшение тепловых потерь с верхней и боковой поверхностей слитка приводит практически к одному фронту кристаллизации – снизу. Диаграммы температуры на боковой поверхности (рис.П.1.19) показывают, что на всем протяжении процесса наблюдается жидкое состояние кремния в верхней части.

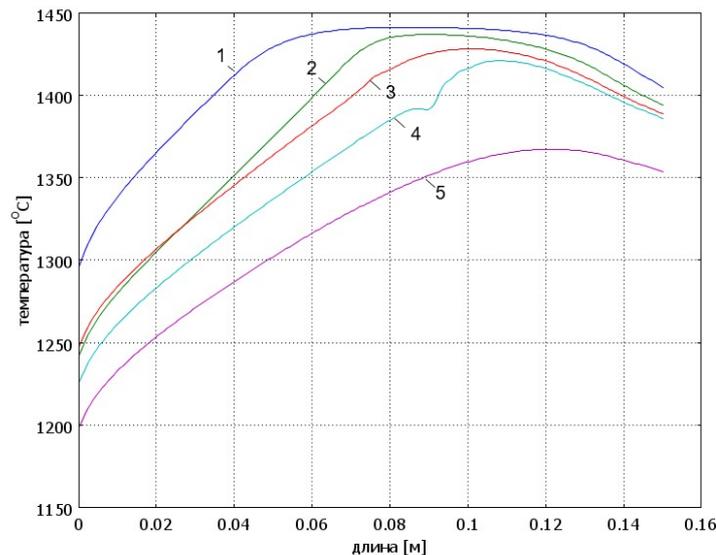


Рис.П.1.19 Диаграммы температуры на боковой поверхности загрузки в моменты времени: 1 – 200 с; 2 – 400 с; 3 – 600 с; 4 – 700 с; 5 – 800 с.

Распределения температуры в расплаве (рис.П.1.20, П.1.21) подтверждают, что в верхней части процесс кристаллизации заканчивается в области, максимально приближенной к поверхности.

В существующих электромагнитных кристаллизаторах кремния [25,72] управление фронтом кристаллизации производится с помощью подогрева верхней и боковых поверхностей корпуса прямоугольной формы. В нашем случае достаточно подогрева верхней части футеровки, или даже предварительного ее разогрева перед заливкой расплава.

При определении тепловых потоков в окружающую среду и мощности тепловыделения в расплаве наблюдается неизменная картина: в начале процесса тепловой поток через верхнюю поверхность в течение первых пяти минут является довольно значительным, так как происходит разогрев крышки

футеровки со значительным поглощением теплоты (табл.П.1.11). В дальнейшем тепловой поток уменьшается, и это снижает скорость процесса кристаллизации в верхней зоне.

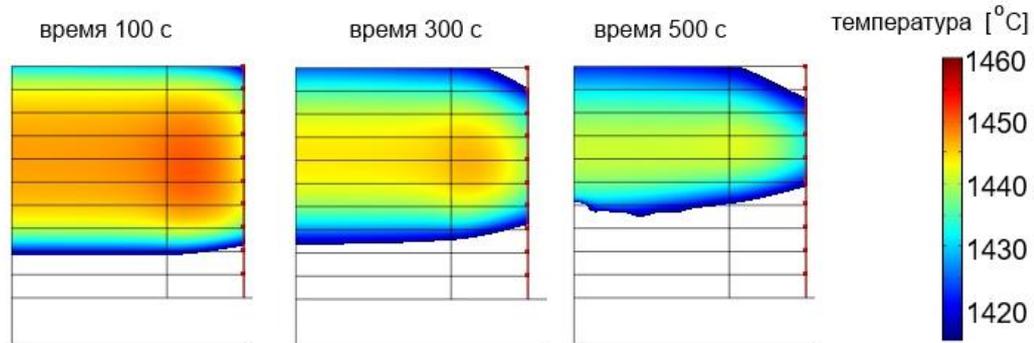


Рис.П.1.20 Распределение температуры в расплавленной части загрузки в момент времени 100, 300, 500 с.

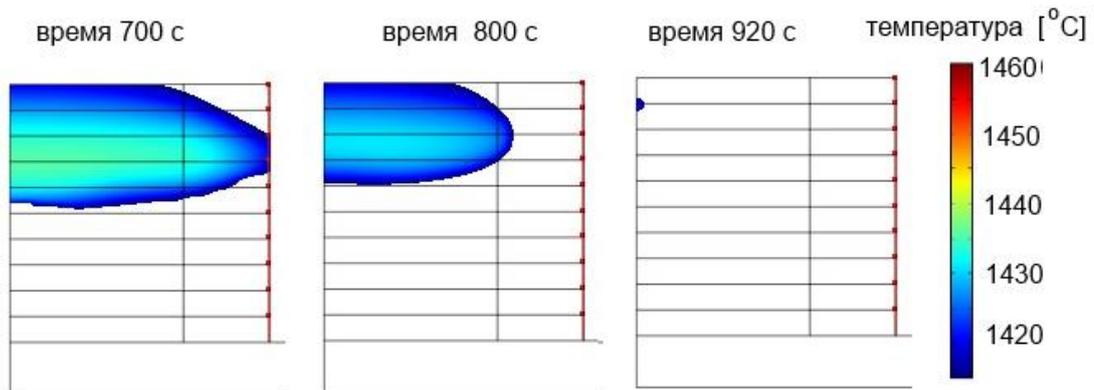


Рис.П.1.21 Распределение температуры в расплавленной части загрузки в момент времени 700, 800, 920 с.

Таблица П.1.11.

Расчетные значения мощности и потоков

время	0	300	600	900	1200	1500	1800	2400	3000	3600
$Q_{\text{верх}}$, кВт	23,5	10,4	8,1	4,6	1	0,2	0	-0,2	-0,2	-0,2
$Q_{\text{бок}}$, кВт	12,2	9,8	8,6	5,7	2,4	1,3	0,8	0,4	0,3	0,2
$Q_{\text{низ}}$, кВт	3,7	15,1	15,8	15,3	12,4	9,7	7,8	5,3	3,9	3,1
$Q_{\text{сум}}$, кВт	39,4	35,3	32,5	25,6	15,8	11,2	8,6	5,7	4,2	3,3
P , кВт	12,2	9	5,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5

Максимальное значение теплового потока $Q=39,2$ кВт. Мощность тепловыделения 12,2 кВт. Баланс мощностей является отрицательным, и загрузка охлаждается.

Определение энергозатрат, связанных с индукционным нагревом, показывает, что к моменту времени 800 с мощность снизилась до минимального значения, соответствующего переходу поверхностного слоя в твердое состояние (табл.П.1.12).

Таблица П.1.12.

Расчетные значения мощности и энергии на интервале работы индуктора

время	0	100	200	300	400	500	600	700	800	810
P, кВт	12,2	10,7	9,8	9	6,7	6,3	5,5	3,9	1,7	1,5
W, кДж		1145	1025	940	785	650	590	470	280	16

Суммарные энергозатраты составляют $W = 5901$ кДж. При массе $M = 24,4$ кг удельные энергозатраты равны $W/M = 241,8$ кДж/кг. Таким образом, небольшой рост энергозатрат сопровождается исключением внутреннего фронта кристаллизации.

7. Вариант 6

Расчет тепловых процессов в загрузке:

радиус 0,15 м;

высота 0,3 м;

боковая стенка футеровки охлаждаются с коэффициентом конвективного теплообмена, равным $100 \text{ Вт} / (\text{м}^2 \cdot \text{град})$;

отвод тепла снизу осуществляется при коэффициенте конвективного теплообмена, равном $1000 \text{ Вт} / (\text{м}^2 \cdot \text{град})$.

Коэффициент теплопроводности боковой футеровки принят равным 0,5 Вт/м*град

Исследование возможности кристаллизации слитка с увеличенной высотой при максимальных значениях тепловых потоков показало, что температура возрастает из-за преобладания мощности тепловыделения над охлаждающими потоками (рис.П.1.22, табл.П.1.13).

Мощность тепловыделения в нижней и средней областях очень велика по сравнению с охлаждающими тепловыми потоками. Температура в этих областях сразу начинает увеличиваться. Особенно заметен рост в основании (диаграммы 3 и 4), когда после заливки расплава температура резко падает из-за контакта с холодным основанием. Сразу после этого температура поднимается до значения, близкого к температуре плавления. В момент времени 1100 с происходит повторное расплавление в нижней точке на поверхности слитка, а в момент времени 1250 с происходит расплавление в нижней точке на осевой линии. После этого момента времени происходит дальнейший разогрев всего слитка.

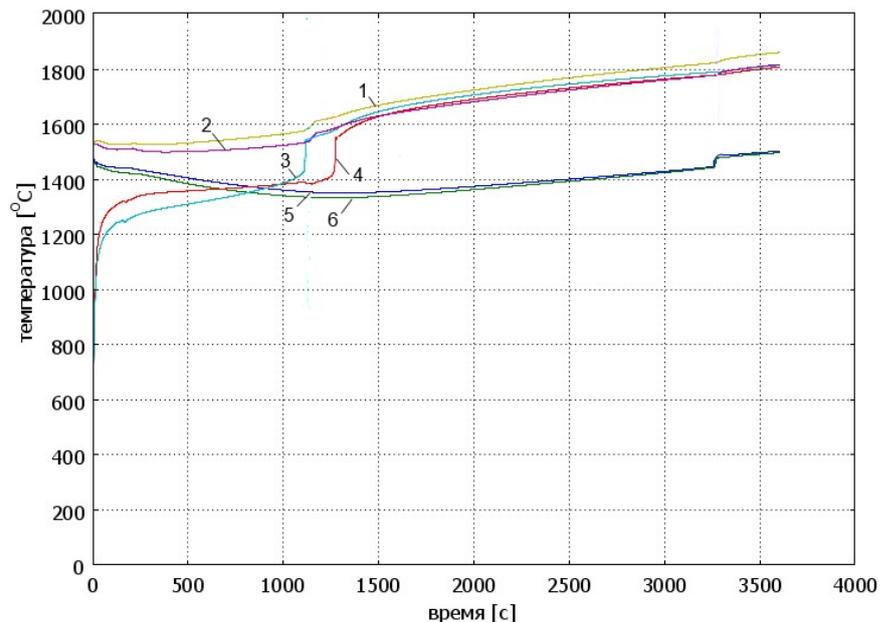


Рис.П.1.22. Временные диаграммы температуры: : 1 – $r=0,15$ м; $h=0,15$ м; 2 – $r=0$; $h=0,15$ м; 3 – $r=0,15$ м; $h=0$; 4 – $r=0$; $h=0$; 5 – $r=0,3$ м; $h=0,3$ м; 6 – $r=0$; $h=0,3$ м.

На верхней поверхности в начале процесса температура снижается ниже точки кристаллизации, но затем за счет тепловых потоков с нижней части слитка происходит подогрев до температуры плавления, и в момент времени 3250 с кремний снова плавится (диаграммы 5,6).

Таким образом, при данном соотношении высоты и радиуса слитка мощность тепловыделения превосходит тепловые потоки с поверхности, и кристаллизация не происходит.

Расчетные значений мощности и потоков

время	0	300	600	900	1200	1500	1800	2400	3000	3600
$Q_{\text{верх}}$, кВт	27,7	22,7	20,7	19,5	18,8	18,9	19,5	21,1	22,8	26,8
$Q_{\text{бок}}$, кВт	34,2	33,3	31,3	30	33,3	33,9	33,4	32,9	33	34,4
$Q_{\text{низ}}$, кВт	2,6	14,2	17,2	18,4	20	22,9	24,6	26,3	27,4	28,2
$Q_{\text{сум}}$, кВт	64,5	70,2	69,2	67,9	72,1	75,7	77,5	80,3	83,2	89,4
P, кВт	67,2	63,5	68,2	76,3	80,2	80,4	81	82,2	83,3	83,5

Максимальное значение теплового потока равно 89,4 кВт. Мощность тепловыделения составляет 83,5 кВт. Таким образом баланс положительный, и загрузка нагревается вместо охлаждения.

В момент времени 3600 с тепловые потери превысили мощность тепловыделения. После этого наступает процесс выравнивания температуры по объему. Во всем объеме слитка температура превышает температуру плавления.

8. Вариант 7

Расчет тепловых процессов в загрузке:

радиус 0,3 м;

высота 0,3 м;

боковая стенка футеровки охлаждаются с коэффициентом конвективного теплообмена, равным $100 \text{ Вт} / (\text{м}^2 \cdot \text{град})$;

отвод тепла снизу осуществляется при коэффициенте конвективного теплообмена, равном $1000 \text{ Вт} / (\text{м}^2 \cdot \text{град})$.

Коэффициент теплопроводности боковой футеровки принят равным $2 \text{ Вт} / (\text{м} \cdot \text{град})$.

Увеличение радиуса загрузки и одновременно теплового потока через боковую стенку футеровки показало возможность охлаждения и кристаллизации расплава. Диаграммы температуры в точках на боковой поверхности слитка отражают снижение температуры (рис.П.1.23).

Завершение перехода в твердое состояние происходит в момент времени 2400 с, что значительно больше, чем в предыдущих случаях.

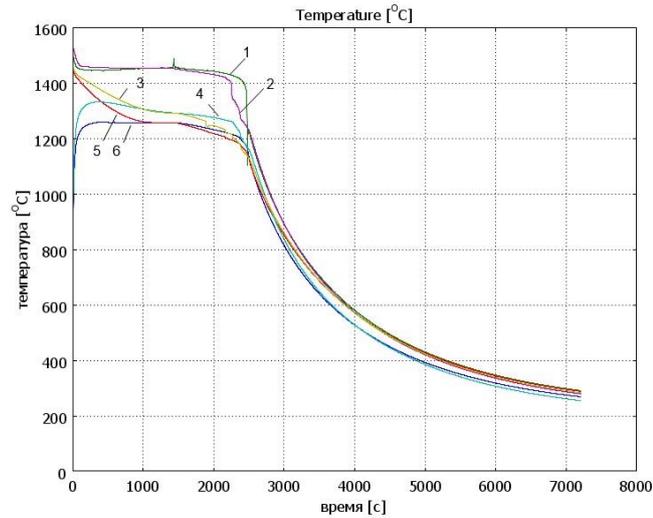


Рис.П.1.23 Диаграммы температуры в точках загрузки: 1 – $r=0,3$ м; $h=0,15$ м; 2 – $r=0$; $h=0,15$ м; 3 – $r=0,3$ м; $h=0,3$ м; 4 – $r=0$; $h=0,3$ м; 5 – $r=0,3$ м; $h=0$ м; 6 – $r=0$; $h=0$ м.

Исследование распределений температуры в различные моменты времени показало наличие двух фронтов кристаллизации, движущихся к средней почти плоской области (рис.П.1.24, П.1.25). Интересен тот факт, что последняя область жидкого кремния находится на боковой поверхности. Такой вариант исключает возникновение термонапряжений. Возможно только искажение формы цилиндра в виде впадины.

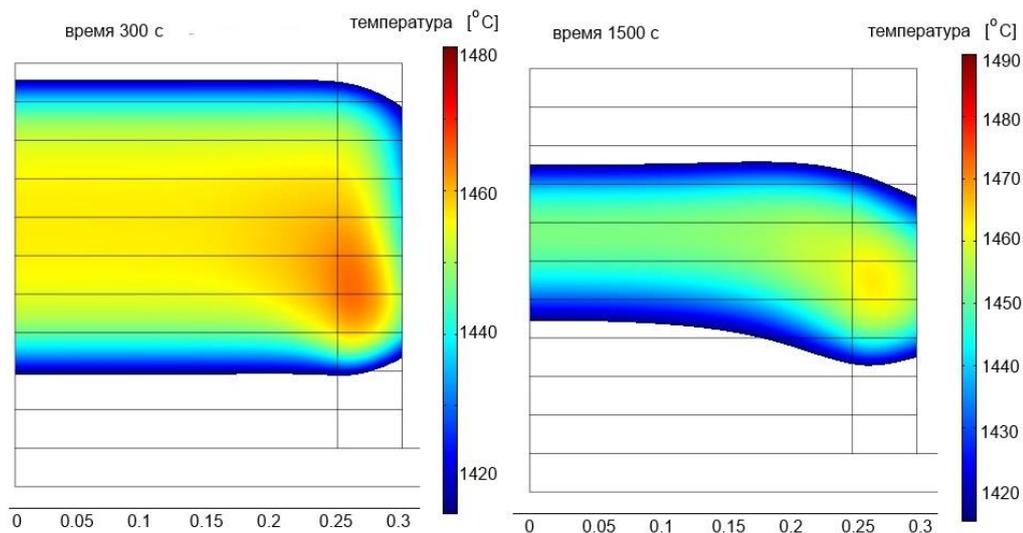


Рис.П.1.24 Распределение температуры в расплавленной части загрузки в момент времени 300, 1500 с.

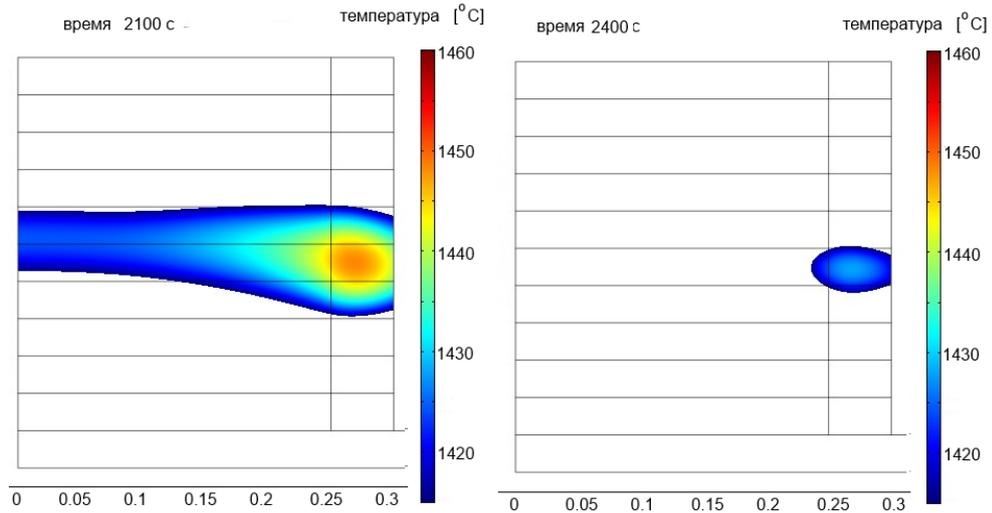


Рис.П.1.25 Распределение температуры в расплавленной части загрузки в моменты времени 2100 с, 2400 с.

Результаты расчета тепловых потоков и мощности тепловыделения, представленные в табл.П.1.14, показали общее увеличение значений тепловых потоков, а также длительность процесса кристаллизации.

Таблица П.1.14.

Расчетные значений мощности и потоков

время	0	600	1200	2400	3600	4800	6000	7200
$Q_{\text{верх}}$, кВт	97,4	83,8	69,3	58,2	47,7	23	5,6	2,5
$Q_{\text{бок}}$, кВт	107,7	63,8	52	46,2	42,8	14,8	5,4	3,1
$Q_{\text{низ}}$, кВт	0	62,7	64,1	64,1	62,8	47,1	24	16,3
$Q_{\text{сум}}$, кВт	205,1	210,3	185,4	168,5	153,3	84,9	35	21,9
P , кВт	109	106	104,6	99,1	85,6	11,3	11,3	11,3

Максимальное значение теплового потока составляет 210,3 кВт. Мощность тепловыделения равна 109 кВт. Баланс мощностей отрицательный, что приводит к охлаждению загрузки.

Проведенные расчеты энергозатрат, представленные в табл.П.1.15, показали значительное увеличение удельных энергозатрат по сравнению с вариантами, в которых загрузка имеет радиус 0,15 м.

При массе загрузки, равной 185 кг, удельные энергозатраты составляют $W/M=555/185=6,5$ МДж/кг.

Расчетные значения мощности на интервале работы индуктора

время	0	1000	2000	3000	3500	4000	4400	4500	
P, кВт	112	106	102	93,6	89,3	77,6	45,4	11,3	
W, МДж		109	104	97,8	91,45	83,45	61,5	28,5	555

9. Вариант 8

Расчет тепловых процессов в загрузке:

радиус 0,15 м;

высота 0,15 м;

боковая стенка футеровки охлаждаются с коэффициентом конвективного теплообмена, равным $5 \text{ Вт} / (\text{м}^2 \cdot \text{град})$;

верхняя стенка футеровки (крышка) подогревается – задан постоянный тепловой поток 2,5 кВт в виде плотности теплового потока $12800 \text{ Вт} / \text{м}^2$;

отвод тепла снизу осуществляется при коэффициенте конвективного теплообмена, равном $1000 \text{ Вт} / (\text{м}^2 \cdot \text{град})$.

Коэффициент теплопроводности боковой футеровки принят равным $2 \text{ Вт} / (\text{м} \cdot \text{град})$.

Исследование распределений температуры в различные моменты времени показало наличие двух фронтов кристаллизации, движущихся к средней почти плоской области (рис.П.1.26). Однако затвердевание, движущееся от боковой стенки, не привело к смыканию в виде верхней корки. Таким образом, процесс кристаллизации завершился в центре верхней поверхности. Такой вариант исключает возникновение термонапряжений. Возможно только искажение формы цилиндра в виде впадины.

Результаты расчета тепловых потоков и мощности тепловыделения, представленные в табл.П.1.16, показали общее увеличение значений тепловых потоков, а также длительность процесса кристаллизации.

Верхняя крышка взята уменьшенной толщины (0,01 м) для ускорения прогрева и повышения температуры, чтобы снизить тепловой поток с верхней поверхности слитка.

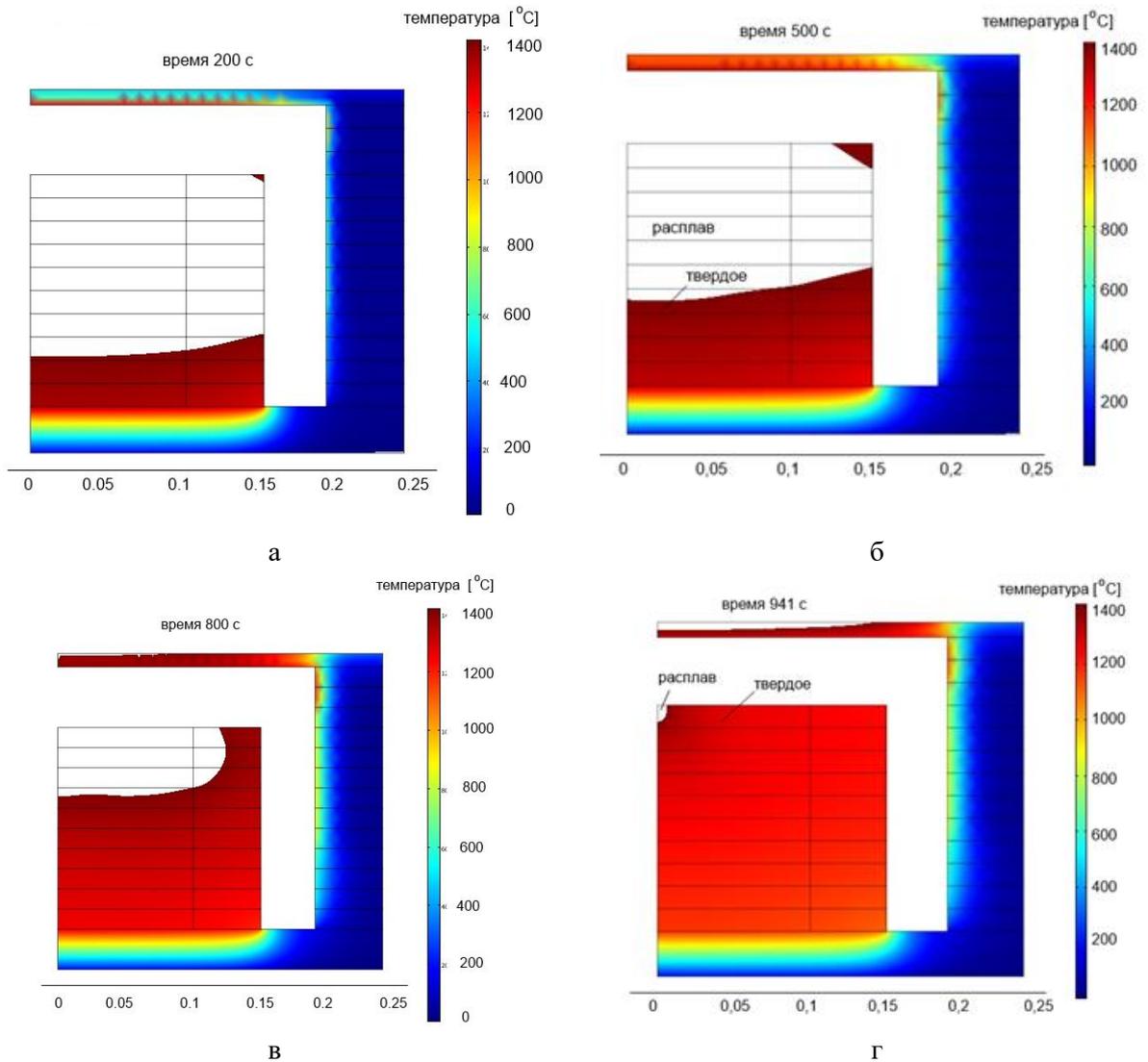


Рис.П.1.26 Распределение температуры в расплавленной части загрузки в моменты времени: а – 200 с; б - 500 с; в – 800 с; г - 941 с.

Таблица П.1.16.

Расчетные значений мощности и потоков

время	0	600	1200	2400	3600
$Q_{\text{верх}}$, кВт	21,1	5,2	-1,9	-2,1	-1,8
$Q_{\text{бок}}$, кВт	13	9,6	3,1	0,8	0,4
$Q_{\text{низ}}$, кВт	2,8	15,9	12,9	6,7	4,6
$Q_{\text{сум}}$, кВт	36,9	30,7	14,1	5,4	3,2
P, кВт	12,2	5,7	1,5	1,5	1,5

Как и в предыдущих расчетах тепловой поток через нижнюю поверхность определялся на границе с охладителем

Максимальное значение теплового потока составляет 36,9 кВт. Мощность тепловыделения равна 12,2 кВт. Кроме того, мощность нагревателя верхней крышки равна 2,5 кВт. Баланс мощностей отрицательный, что приводит к охлаждению загрузки.

Результаты расчета энергозатрат представлены в табл.П.1.17.

Таблица П.1.17.

Расчетные значения мощности на интервале работы индуктора

время	0	600	1200	2400	3600
P, кВт	14,7	8,2	1,5	1,5	1,5
W, МДж		8,82	4,92	-	-

При массе загрузки, равной 24 кг, удельные энергозатраты составляют $W/M=13,74/24=0,575$ МДж/кг.

Предыдущее значение удельных энергозатрат, приведенное для загрузки радиусом 0,15 м в табл.3.39, составляет 249 кДж/кг. Таким образом, для предотвращения образования корки из твердого кремния вокруг жидкости требуется увеличения расхода энергии в два раза.

ПРИЛОЖЕНИЕ П.2

РАСЧЕТ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ИНДУКТОРОВ ДЛЯ
КРИСТАЛЛИЗАТОРА МЕТОДИЧЕСКОГО ДЕЙСТВИЯ

Расчет параметров индуктора для загрузки диаметром 0,3 м и 0,6 м высотой
0,15 при частоте напряжения 50 Гц и 500 Гц

Вариант 1

Расчет параметров индуктора для загрузки диаметром 0,3 м высотой
0,15 м при заданном токе

Исходными данными для определения параметров индуктора являются значения, найденные в предыдущих разделах. Они соответствуют соблюдению теплового режима и выполнению требования о необходимой величине электромагнитной силы отталкивания.

Обеспечение отталкивающей сила 5 Н в одновитковом индукторе достигается при задании тока $I_{инд}^1 = 5760$ А. При этом мощность в загрузке (слой расплава) должна быть равна 1007 Вт. Распределение силы Лоренца по толщине имеет большую плотность в поверхностном слое, как показано на рис.П-2.1. Это обеспечивается при использовании напряжения частотой 500 Гц.

Для расчета в программном комплексе Elcut создана модель индуктора, содержащая катушку с числом витков $w=16$. Ширина витка равна 16 мм, общая длина индуктора $L=16*16=256$ мм. При переходе к многовитковому индуктору скорректированный расчетный ток принимает немного меньшее значение, чем соответствующее предварительно найденному, и равен $I=336$ А вместо 360 А.

Результаты выполненных расчетов представлены в таблице П.2.1.

В приведенных ниже таблицах введены обозначения: N1 – число слоев без кремния; N2 – число слоев с расплавленным кремнием; N3 – число слоев с затвердевшим кремнием. В моделях тепловых процессов задач для ускорения

процесса подготовки исходных данных и решения используется одна геометрическая модель с разными свойствами слоев. В пустом слое задается удельная электропроводность равная нулю $\sigma = 0$, в слое с расплавом кремния задается удельная электропроводность $\sigma = 10^6$ См/м, в слое с твердым кремнием задается удельная электропроводность $\sigma = 10^5$ См/м.

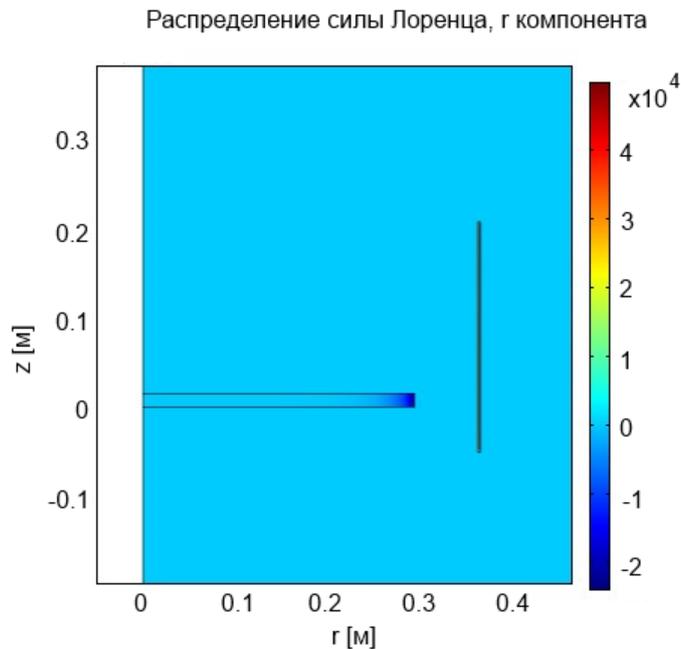


Рис.П.2.1 Распределение r-компоненты силы Лоренца в одном слое жидкого кремния высотой 15 мм

В таблице значение N1 соответствует номеру слоя, для которого производится расчет. Отсчет идет снизу.

Значение N2 означает состояние кремния в рассматриваемом слое: при $N2=0$ жидкое состояние, а при $N2=1$ твердое.

Значение N3 соответствует количеству слоев твердого кремния при общем числе залитых слоев на данный момент.

Из приведенных в таблице значений следует, что по мере роста числа слоев происходит увеличение мощности в нагрузке и снижение импеданса индуктора.

При неизменном токе индуктора мощность в слое жидкого кремния уменьшается за счет того, что все большее число слоев твердого кремния

участвует в расчете и возрастает их доля в общем значении. Кроме того, изменяется соотношение сопротивлений катушки индуктора и загрузки.

Переход кремния из жидкого в твердое состояние для каждого слоя приводит к циклическому ступенчатом изменению параметров. Приведенные на рис.П.2.2, П.2.3 диаграммы иллюстрируют для каждого слоя изменение активной и реактивной мощности индуктора.

Таблица П.2.1

Мощность и импеданс индуктора при послойном заполнении расплавом

№	N1	N2	N3	U, В	$P_{верх}$, Вт	$P_{инд}$, Вт	Z, Ом	R, Ом	X, Ом	L, Гн
1	10	0	0	120	0	713	0,336	0,0111	0,335	$10,65 \cdot 10^{-5}$
2	9	1	0	113	1024	1718	0,314	0,0267	0,313	$9,966 \cdot 10^{-5}$
3	9	0	1	120	303	1016	0,334	0,0158	0,333	$10,62 \cdot 10^{-5}$
4	8	1	1	112	1007	1787	0,311	0,0278	0,31	$9,874 \cdot 10^{-5}$
5	8	0	2	120	307	1303	0,332	0,0202	0,332	$10,56 \cdot 10^{-5}$
6	7	1	2	111	994	1874	0,309	0,0292	0,308	$9,789 \cdot 10^{-5}$
7	7	0	3	119	301	1562	0,33	0,0243	0,329	$10,48 \cdot 10^{-5}$
8	6	1	3	110	976	1970	0,307	0,0306	0,305	$9,712 \cdot 10^{-5}$
9	6	0	4	118	290	1789	0,327	0,0278	0,326	$10,39 \cdot 10^{-5}$
10	5	1	4	110	947	2071	0,305	0,0322	0,303	$9,642 \cdot 10^{-5}$
11	5	0	5	117	276	1987	0,325	0,0308	0,323	$10,29 \cdot 10^{-5}$
12	4	1	5	109	906	2172	0,303	0,0338	0,301	$9,58 \cdot 10^{-5}$
13	4	0	6	116	260	2159	0,322	0,0335	0,32	$10,2 \cdot 10^{-5}$
14	3	1	6	109	854	2271	0,301	0,0353	0,299	$9,53 \cdot 10^{-5}$
15	3	0	7	115	242	2309	0,319	0,0358	0,317	$10,1 \cdot 10^{-5}$
16	2	1	7	108	793	2364	0,3	0,0367	0,298	$9,49 \cdot 10^{-5}$
17	2	0	8	114	222	2439	0,317	0,0379	0,314	$10,01 \cdot 10^{-5}$
18	1	1	8	108	724	2448	0,3	0,038	0,0297	$9,457 \cdot 10^{-5}$
19	1	0	9	113	201	1869	0,314	0,0396	0,311	$9,925 \cdot 10^{-5}$
20	0	1	9	108	649	2524	0,299	0,0392	0,296	$9,435 \cdot 10^{-5}$
21	0	0	10	112	179	2642	0,312	0,041	0,309	$9,849 \cdot 10^{-5}$

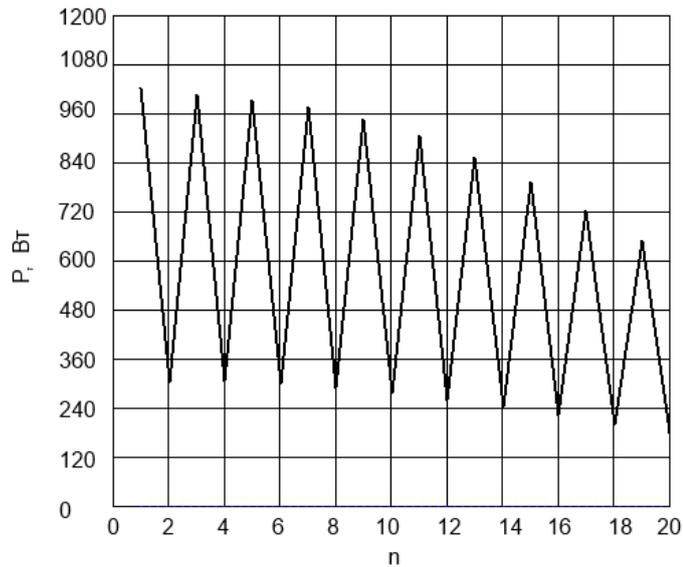


Рис.П.2.2. Зависимость активной мощности от числа слоев кремния

Большие колебания активной мощности не так опасны, как сравнительно небольшие отклонения для реактивной мощности. Согласно расчетам коэффициент мощности составляет около 0,05. Изменение реактивной мощности на 5% приводит к значительному изменению тока, потребляемого контуром «индуктор – конденсаторная батарея» при условии неизменной емкости батареи. Практически ток контура изменяется на 100% относительно уровня активной составляющей тока индуктора, то есть увеличивается в два раза.

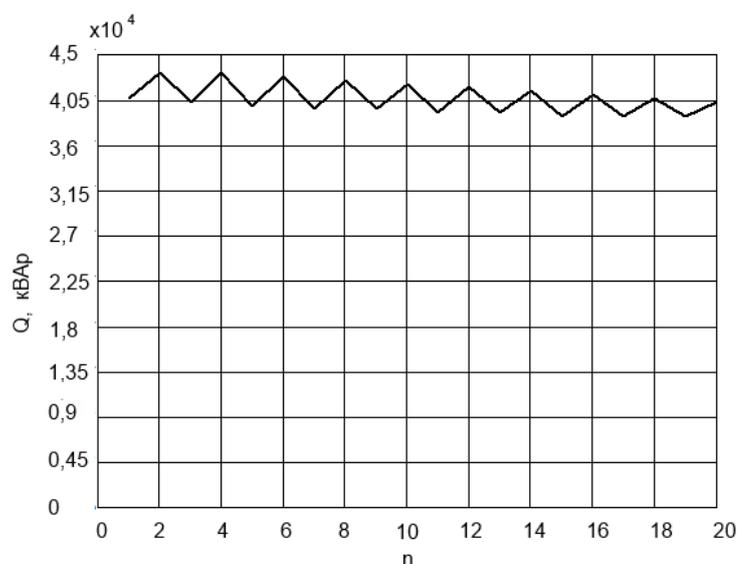


Рис.П.2.3. Зависимость реактивной мощности от числа слоев кремния

Питание индуктора неизменным по величине током по мере увеличения общей высоты цилиндра приводит к снижению мощности в слое с жидким кремнием. Начальное значение мощности, равное 1 кВт, в слое с расплавом обеспечивает достаточное усилие для отталкивания. При общей высоте 0,15 м мощность в верхнем слое снижается до 649 Вт, соответственно усилие становится на 35% меньше. Для исследования этой проблемы рассмотрена система питания при неизменном напряжении, равном 120 В.

Вариант 2

Расчет параметров индуктора для загрузки диаметром 0,3 м высотой 0,15 м при смещении загрузки на 0,053 м вверх от основания индуктора при заданном напряжении

Число слоев 10; высота слоя 0,015 м; высота всей загрузки 0,15 м; высота индуктора 0,256 м; расстояние основания загрузки от основания индуктора 0,053 м.

Напряжение задается, исходя из возможностей источника питания. Уровень напряжения ограничивается при достижении требуемой мощности в верхнем слое расплава.

Загрузка расположена симметрично по высоте относительно индуктора: при полностью заполненном тигле ($H=0,15$ м) смещение относительно нижнего края индуктора $\Delta H = (L_{\text{инд}} - L_{\text{загр}}) / 2 = 0,053$ м.

Результаты расчета приведены в табл.П.2.2.

Разность между максимальным и минимальным значениями мощности составляет 354 Вт или 30%.

Из таблицы следует, что значения мощности в последних двух слоях малы и выходят за допустимые отклонения, и желательно уменьшить общую высоту цилиндра на 0,03 м. Для стабилизации мощности и силы, действующей на слой жидкого кремния, нужна система управления. В качестве альтернативы можно использовать вариант со ступенчатым перемещением всей загрузки вниз.

Мощность и импеданс индуктора при послойном заполнении расплавом

№	N1	N2	N3	$I_{инд}$, А	U, В	$P_{верх}$, Вт	$P_{инд}$, Вт	Z, Ом	R, Ом	X, Ом	L, Гн
1	10	0	0	358	120	0	702	0,336	0,0111	0,335	$10,65 \cdot 10^{-5}$
2	9	1	0	381		1155	1928	0,314	0,0267	0,313	$9,966 \cdot 10^{-5}$
3	9	0	1	358		302	1006	0,334	0,0158	0,333	$10,62 \cdot 10^{-5}$
4	8	1	1	385	120	1152	2042	0,311	0,0278	0,31	$9,874 \cdot 10^{-5}$
5	8	0	2	361		308	1306	0,332	0,0202	0,332	$10,56 \cdot 10^{-5}$
6	7	1	2	388		1156	2176	0,309	0,0292	0,308	$9,789 \cdot 10^{-5}$
7	7	0	3	363		307	1587	0,33	0,0243	0,329	$10,48 \cdot 10^{-5}$
8	6	1	3	391		1151	2323	0,307	0,0306	0,305	$9,712 \cdot 10^{-5}$
9	6	0	4	366		300	1848	0,327	0,0278	0,326	$10,39 \cdot 10^{-5}$
10	5	1	4	394		1131	2474	0,305	0,0322	0,303	$9,642 \cdot 10^{-5}$
11	5	0	5	369		290	2089	0,325	0,0308	0,323	$10,29 \cdot 10^{-5}$
12	4	1	5	396		1095	2626	0,303	0,0338	0,301	$9,58 \cdot 10^{-5}$
13	4	0	6	372		278	2310	0,322	0,0335	0,32	$10,2 \cdot 10^{-5}$
14	3	1	6	398		1042	2771	0,301	0,0353	0,299	$9,53 \cdot 10^{-5}$
15	3	0	7	376		263	2513	0,319	0,0358	0,317	$10,1 \cdot 10^{-5}$
16	2	1	7	399	120	976	2906	0,3	0,0367	0,298	$9,49 \cdot 10^{-5}$
17	2	0	8	379		245	2697	0,317	0,0379	0,314	$10,01 \cdot 10^{-5}$
18	1	1	8	400		896	3027	0,3	0,038	0,0297	$9,457 \cdot 10^{-5}$
19	1	0	9	381		226	2863	0,314	0,0396	0,311	$9,925 \cdot 10^{-5}$
20	0	1	9	401	120	806	3132	0,299	0,0392	0,296	$9,435 \cdot 10^{-5}$
21	0	0	10	384		204	3008	0,312	0,041	0,309	$9,849 \cdot 10^{-5}$

Вариант 3

Расчет параметров индуктора для загрузки диаметром 0,3 м высотой 0,15 м при смещении загрузки на 0,04 м вверх от основания индуктора при неизменном напряжении

Напряжение 120 В. Число слоев 10; высота слоя 0,015 м; высота всей загрузки 0,15 м; высота индуктора 0,256 м; расстояние основания загрузки от основания индуктора 0,04 м. Результаты расчета приведены в табл.П.2.3.

Мощность индуктора при послойном заполнении расплавом

№	N1	N2	N3	$I_{инд}$, А	$P_{верх}$, Вт	$P_{инд}$, Вт
1	10	0	0	358	0	702
2	9	1	0	380	1051	1828
3	9	0	1	359	278	984
4	8	1	1	383	1070	1951
5	8	0	2	360	289	1265
6	7	1	2	387	1095	2097
7	7	0	3	363	292	1535
8	6	1	3	390	1113	2255
9	6	0	4	366	291	1789
10	5	1	4	393	1116	2419
11	5	0	5	369	287	2028
12	4	1	5	395	1102	2585
13	4	0	6	372	279	2252
14	3	1	6	398	1071	2747
15	3	0	7	375	269	2463
16	2	1	7	400	1024	2900
17	2	0	8	378	256	2658
18	1	1	8	401	961	3040
19	1	0	9	381	241	2838
20	0	1	9	403	886	3165
21	0	0	10	384	222	3001

Разность между максимальным и минимальным значениями мощности составляет 330 Вт или 29%. Разность между максимальным значением мощности (1116 Вт) и значением в восьмом слое (1024) составляет 92 Вт или 8,2%.

Вариант 4

Расчет параметров индуктора для загрузки диаметром 0,3 м высотой 0,15 м при смещении загрузки на 0,04 м вверх от основания индуктора и увеличенном напряжении

Исходные данные для расчета:

напряжение 145 В;

число слоев 10;

высота слоя 0,015 м;

высота всей загрузки 0,15 м;

высота индуктора 0,304 м;

расстояние от основания загрузки от основания индуктора 0,04 м.

Результаты расчета приведены в табл.П-2.4.

Таблица П.2.4.

Мощность индуктора при послойном заполнении расплавом

№	N1	N2	N3	$I_{инд}$, А	$P_{верх}$, Вт	$P_{инд}$, Вт
1	10	0	0			
2	9	1	0	357	1061	1860
3	9	0	1	339	285	1016
4	8	1	1	360	1087	1993
5	8	0	2	341	298	1306
6	7	1	2	363	1123	2151
7	7	0	3	343	305	1586
8	6	1	3	366	1156	2325
9	6	0	4	345	307	1853
10	5	1	4	369	1178	2511
11	5	0	5	348	307	2108
12	4	1	5	372	1188	2705
13	4	0	6	351	304	2353
14	3	1	6	375	1184	2901
15	3	0	7	354	300	2588
16	2	1	7	377	1167	3096
17	2	0	8	357	294	2662
18	1	1	8	379	1137	3286
19	1	0	9	359	285	3030
20	0	1	9	381	1094	3466
21	0	0	10	362	274	3235

Разность между максимальным и минимальным значениями мощности составляет 123 Вт или 10,3%.

Диаграммы изменения реактивной мощности индуктора при разных длинах индуктора представлены на рис.П.2.4. Диаграммы проходят параллельно, размах колебаний реактивной мощности при заливке нового

слоя и его кристаллизации совпадает. По мере увеличения общей высоты загрузки реактивная мощность возрастает.

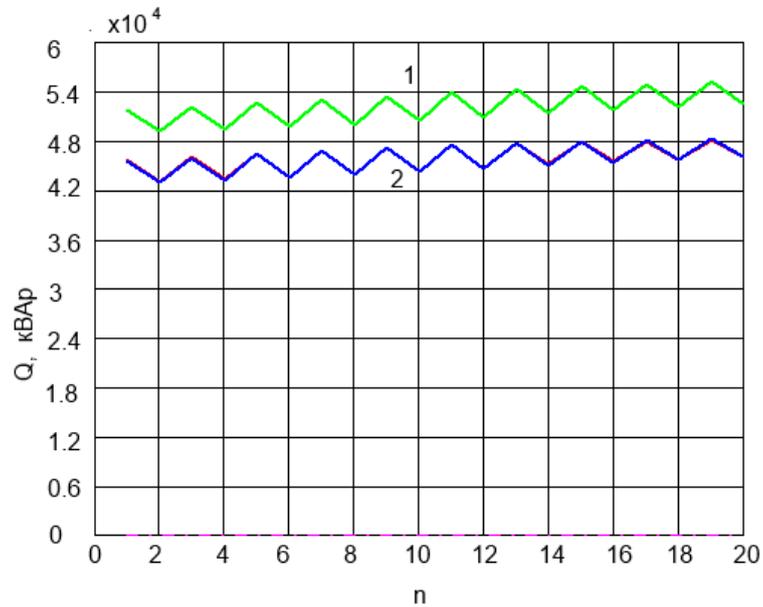


Рис.П.2.4. Зависимости реактивной мощности при заполнении тигля расплавом кремния: 1 – индуктор длиной 0,3 м; 2 – индуктор длиной 0,25 м.

Для иллюстрации влияния смещения индуктора при разных длинах на изменение реактивной мощности по мере увеличения числа слоев построены диаграммы, представленные на рис.П.2.5.

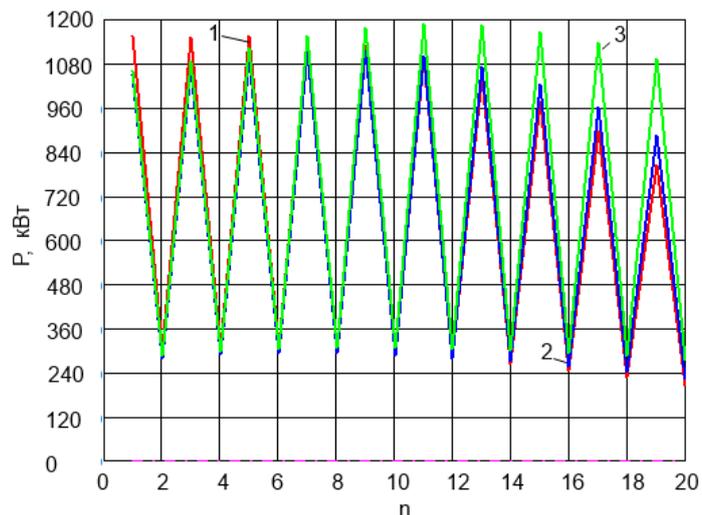


Рис.П.2.5. Зависимости реактивной мощности при заполнении тигля расплавом кремния: 1 – индуктор длиной 0,25 м смещение загрузки по высоте 0,05 м; 2 – индуктор длиной 0,25 м смещение загрузки по высоте на 0,04 м; 3 – индуктор длиной 0,3 м смещение загрузки по высоте на 0,04 м.

Характер зависимостей несколько отличается: для индуктора длиной 0,3 м со смещением на 0,04 м наблюдается небольшое увеличение реактивной

мощности в середине зависимости (число слоев от 3 до 8). Дальнейшее снижение мощности происходит более плавно, чем для индуктора длиной 0,25 м.

Размах колебаний реактивной мощности составляет 3,9 кВАр.

При номинальном напряжении 120 В при условии равенства реактивных мощностей индуктора и конденсаторной батареи ток индуктора является активным и равен

$$I_a = P / U = 1300 / 120 = 10,83 \text{ А.}$$

Ток в колебательном контуре определяется выражением

$$I = S / U .$$

Отклонение реактивной мощности индуктора от резонансного значения приводит к увеличению мощности, потребляемой контуров

$$S = (\Delta Q^2 + P^2)^{0,5} = (3,9^2 + 1,3^2)^{0,5} = 4,11 \text{ кВА}$$

Расчетный ток составляет

$$I = S / U = 4110 / 120 = 34,25 \text{ А.}$$

Полученное значение превышает величину активной составляющей тока в 3 раза. Так как обычно контур настраивается на резонанс и потребляет от источника только активную составляющую, то при увеличении реактивной составляющей источник питания должен иметь завышенную мощность или уметь подстраивать частоту.

Вариант 5

Расчет параметров индуктора для загрузки радиусом 0,3 м высотой 0,15 м при увеличенной длине индуктора и смещении загрузки на 0,12 м вверх от основания индуктора при частоте 500 Гц

Расчет выполнен в программе Elcut.

Исходные данные:

$$U=200 \text{ А}$$

Число витков $w=24$;

частота напряжения 500 Гц;

ширина витка 16 мм;

радиус индуктора 0,370 м;

длина индуктора $L_{инд} = a \cdot w = 0,016 \cdot 24 = 0,384$ м;

радиус загрузки 0,3 м;

разность между основанием и индуктора и первым слоем 0,120 м;

ток одновиткового индуктора $I^1 = I_{инд} \cdot w = 288 \cdot 24 = 6912$ А.

В результате расчетов получены значения мощности в верхнем слое загрузки и подведенная мощность индуктора, представленные в табл.П.2.6.

Таблица П.2.6.

Мощность и импеданс индуктора при послойном заполнении расплавом

№	N1	N2	N3	$I_{инд} I$, А	$P_{верх}$, Вт	$P_{инд}$, Вт	Z, Ом	R, Ом	X, Ом	L, Гн
1	10	0	0							
2	9	1	0	177	1499	1886	1,129	0,12	1,122	$3,57 \cdot 10^{-4}$
3	9	0	1	150	784	1089	1,33	0,0966	1,327	$4,22 \cdot 10^{-4}$
4	8	1	1	179	1406	1941	1,115	0,121	1,108	$3,528 \cdot 10^{-4}$
5	8	0	2	155	694	1686	1,29	0,14	1,282	$4,081 \cdot 10^{-4}$
6	7	1	2	181	1341	2036	1,101	0,124	1,094	$3,483 \cdot 10^{-4}$
7	7	0	3	160	598	2085	1,248	0,164	1,237	$3,937 \cdot 10^{-4}$
8	6	1	3	183	1281	2161	1,088	0,128	1,08	$3,439 \cdot 10^{-4}$
9	6	0	4	165	519	2358	2,211	0,173	1,2	$3,815 \cdot 10^{-4}$
10	5	1	4	186	1219	2304	1,075	0,133	1,067	$3,396 \cdot 10^{-4}$
11	5	0	5	169	458	2562	1,18	0,178	1,167	$3,714 \cdot 10^{-4}$
12	4	1	5	188	1152	2459	1,063	0,139	1,054	$3,354 \cdot 10^{-4}$
13	4	0	6	173	410	2729	1,154	0,182	1,14	$3,628 \cdot 10^{-4}$
14	3	1	6	190	1085	2617	1,052	0,145	1,041	$3,314 \cdot 10^{-4}$
15	3	0	7	176	372	2875	1,132	0,184	1,117	$3,554 \cdot 10^{-4}$
16	2	1	7	192	1016	2772	1,04	0,15	1,029	$3,276 \cdot 10^{-4}$
17	2	0	8	180	341	3008	1,112	0,186	1,096	$3,489 \cdot 10^{-4}$
18	1	1	8	194	947	2921	1,03	0,155	1,018	$3,241 \cdot 10^{-4}$
19	1	0	9	183	313	3130	1,094	0,188	1,078	$3,432 \cdot 10^{-4}$
20	0	1	9	196	874	3059	1,02	0,16	1,008	$3,209 \cdot 10^{-4}$
21	0	0	10	185	288	3244	1,079	0,189	1,062	$3,381 \cdot 10^{-4}$

По мере увеличения слоев активная мощность индуктора увеличивается с 1886 Вт до 3244 Вт.

Сила, действующая на слой расплава и равная 10 Н, достигается при мощности тепловыделения в слое 1500 Вт.

Разность максимального и минимального значений мощности равна 626 Вт или 41,7%. Отклонение от максимального значения на 10% наблюдается у третьего слоя. Выравнивание распределения мощности за счет увеличения длины индуктора не произошло.

Вариант 6

Расчет параметров индуктора для загрузки радиусом 0,3 м высотой 0,15 м при смещении загрузки на 0,053 м вверх от основания индуктора при частоте
500 Гц

Из расчета индуктора для загрузки радиусом 0,3 м и высоте слоя 0,015 м получено:

Из расчета в Comsol:

Сила $F=10$ Н;

ток одновиткового индуктора $I_{инд}^1=4610$ А;

мощность в загрузке $P=1007$ Вт.

Из расчета в Elcut:

Число витков 16;

Ток индуктора $I_{инд}=288$ А;

ширина витка $a=0,016$ м;

длина индуктора $L_{инд} = a \cdot w = 0,016 \cdot 16 = 0,256$ м;

ток одновиткового индуктора $I_{инд}^1 = I_{инд} w = 288 \cdot 16 = 4610$ А.

Загрузка расположена симметрично по высоте относительно индуктора: при полностью заполненном тигле ($H=0,15$ м) смещение относительно нижнего края индуктора $\Delta H = (L_{инд} - L_{загр}) / 2 = 0,053$ м.

Значения мощности для каждого участка пересчитаны для неизменного напряжения. Варианты расчетов при напряжениях 210 В и 220 В проиллюстрированы в виде зависимостей на рис.П.2.6. Максимальные значения соответствуют расплавленному состоянию кремния, а минимальные значения – твердому состоянию. Из рисунка видно, что при увеличении числа слоев кремния до 10, что соответствует высоте 0,15 м, мощность в слое расплавленного кремния снижается с 3 кВт до 1,8 кВт. Аналогичное уменьшение электромагнитной силы плохо сказывается на форме слитка.

Таблица П.2.5.

Мощность и импеданс индуктора при послойном заполнении расплавом

№	N1	N2	N3	U, В	$P_{\text{верх}}$, Вт	$P_{\text{инд}}$, Вт	Z, Ом	R, Ом	X, Ом	L, Гн
1	10	0	0	211	0	807	0,733	0,0195	0,733	$2,33 \cdot 10^{-4}$
2	9	1	0	177	2142	2891	0,617	0,0701	0,613	$1,95 \cdot 10^{-4}$
3	9	0	1	208	1520	2214	0,723	0,056	0,721	$2,3 \cdot 10^{-4}$
4	8	1	1	175	2009	2941	0,607	0,0713	0,603	$1,919 \cdot 10^{-4}$
5	8	0	2	202	1284	3308	0,702	0,08	0,697	$2,22 \cdot 10^{-4}$
6	7	1	2	172	1906	3031	0,598	0,0735	0,594	$1,89 \cdot 10^{-4}$
7	7	0	3	196	1059	3825	0,679	0,0925	0,673	$2,14 \cdot 10^{-4}$
8	6	1	3	169	1803	3145	0,59	0,0763	0,585	$1,86 \cdot 10^{-4}$
9	6	0	4	190	878	4092	0,659	0,0989	0,652	$2,075 \cdot 10^{-4}$
10	5	1	4	168	1689	3272	0,582	0,0793	0,577	$1,836 \cdot 10^{-4}$
11	5	0	5	185	742	4241	0,643	0,103	0,634	$2,02 \cdot 10^{-4}$
12	4	1	5	166	1563	3403	0,576	0,0825	0,57	$1,81 \cdot 10^{-4}$
13	4	0	6	181	637	4334	0,628	0,105	0,619	$1,97 \cdot 10^{-4}$
14	3	1	6	164	1429	3531	0,57	0,0855	0,563	$1,79 \cdot 10^{-4}$
15	3	0	7	177	553	4397	0,616	0,106	0,606	$1,93 \cdot 10^{-4}$
16	2	1	7	163	1291	3649	0,565	0,0884	0,558	$1,78 \cdot 10^{-4}$
17	2	0	8	174	482	4442	0,605	0,107	0,595	$1,895 \cdot 10^{-4}$
18	1	1	8	162	1152	3755	0,561	0,0909	0,553	$1,761 \cdot 10^{-4}$
19	1	0	9	172	419	4473	0,596	0,108	0,586	$1,864 \cdot 10^{-4}$
20	0	1	9	161	1014	3847	0,558	0,093	0,55	$1,75 \cdot 10^{-4}$
21	0	0	10	169	363	4492	0,588	0,109	0,577	$1,838 \cdot 10^{-4}$

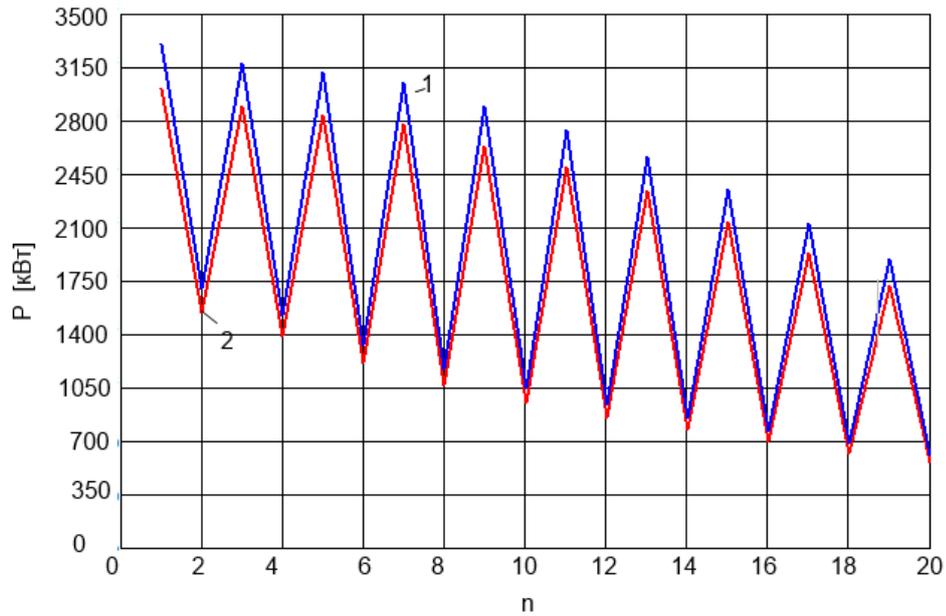


Рис.П.2.6 Зависимости активной мощности от заполнения тигля для загрузки диаметром 0,6 м при напряжении на индукторе: 1 – 220 В; 2 – 210 В.

Вариант 7

Расчет параметров индуктора для загрузки диаметром 0,6 м высотой 0,15 м при увеличенной длине индуктора и смещении загрузки на 0,12 м вверх от основания индуктора при частоте 50 Гц

Исходные данные:

частота напряжения 50 Гц;

ток индуктора $I_{инд} = 288$ А;

число витков $w = 24$;

ширина витка 16 мм;

радиус индуктора 0,370 м

длина индуктора $L_{инд} = a \cdot w = 0,016 \cdot 24 = 0,384$ м;

радиус загрузки 0,3 м;

разность между основанием и индуктора и первым слоем 0,120 м;

ток одновиткового индуктора $I_{инд}^1 = I_{инд} w = 288 \cdot 24 = 6912$ А.

В результате расчетов получены значения мощности в верхнем слое загрузки и подведенная мощность индуктора, представленные в табл.П.2.7. По мере увеличения количества слоев активная мощность индуктора увеличивается с 3498 Вт до 6481 Вт.

Сила, воздействующая на слой расплава и равная 10 Н, достигается при мощности тепловыделения в слое, равной 1500 Вт.

Разность максимального и минимального значений мощности составляет 169 Вт или 11,2 %.

Таблица П.2.7.

Мощность и импеданс индуктора при послойном заполнении расплавом

№	N1	N2	N3	$I_{инд}$, А	$P_{верх}$, Вт	$P_{инд}$, Вт	Z, Ом	R, Ом	X, Ом	L, Ом
1	10	0	0	659	-	3498	0,136	0,0161	0,1356	$4,317 \cdot 10^{-4}$
2	9	1	0	664	1548	5100	0,134	0,023	0,133	$4,247 \cdot 10^{-4}$
3	8	1	1	666	1572	5297	0,135	0,024	0,133	$4,23 \cdot 10^{-4}$
4	7	1	2	667	1588	5482	0,135	0,0246	0,133	$4,22 \cdot 10^{-4}$
5	6	1	3	669	1594	5659	0,135	0,0253	0,132	$4,207 \cdot 10^{-4}$
6	5	1	4	670	1590	5826	0,134	0,0259	0,132	$4,195 \cdot 10^{-4}$
7	4	1	5	671	1577	5982	0,134	0,0266	0,131	$4,184 \cdot 10^{-4}$
8	3	1	6	672	1554	6126	0,134	0,0271	0,131	$4,174 \cdot 10^{-4}$
9	2	1	7	673	1521	6258	0,134	0,0276	0,131	$4,164 \cdot 10^{-4}$
10	1	1	8	674	1478	6376	0,133	0,0281	0,1305	$4,156 \cdot 10^{-4}$
11	0	1	9	675	1425	6481	0,133	0,0285	0,1303	$4,148 \cdot 10^{-4}$

Снижение мощности с увеличением высоты расплава происходит быстрее, чем для загрузки диаметром 0,3 м. Нужно корректировать напряжение на каждом этапе: при добавлении порции расплава требуется увеличение напряжения или другие меры, например, подъем катушки индуктора.

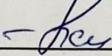
ПРИЛОЖЕНИЕ П.3

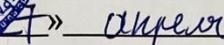
Документы о внедрении результатов диссертационной работы



«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор по учебной работе СамГТУ


 О.В. Юсупова


 2022 г.

АКТ

внедрения результатов диссертационной работы Навасардяна А.А.
 «Электромагнитный кристаллизатор кремния для получения
 цилиндрической формы» в учебный процесс

Настоящий акт составили представители Самарского государственного
 технического университета:

- и.о. зав. кафедрой «Электроснабжение промышленных предприятий»
Клочкова Н.Н.,
- профессор кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий»
Данилушкин А.И.,
- доцент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий»
Проценко А.Н.

о том, что результаты диссертационной работы Навасардяна А.А.:

- математическая модель электромагнитных и тепловых процессов в
загрузке кристаллизатора;

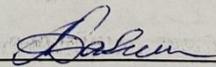
- методика расчета электромагнитного кристаллизатора
периодического действия;

использованы в учебном процессе Самарского государственного
 технического университета при подготовке бакалавров по направлению
 130302 и магистров по направлению 130402 «Электротехника и
 электроэнергетика».

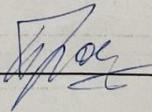
и.о. зав. кафедрой «Электроснабжение
 промышленных предприятий»

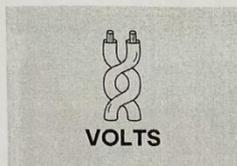

 Н.Н. Клочкова

профессор кафедры «Электроснабжение
 промышленных предприятий»


 А.И. Данилушкин

доцент кафедры «Электроснабжение
 промышленных предприятий»


 А.Н. Проценко



Общество с ограниченной ответственностью «ВОЛЬТС»
ИНН 6316252125
КПП 631601001
Р/с 40702810254400047016 БИК 043601607
ПОВОЛЖСКИЙ БАНК ПАО СБЕРБАНК

Компенсаторы мощности | устройства для зарядки электромобилей | монтаж электрооборудования | монтаж промышленной вентиляции

Юридический адрес: 443096, г. Самара, ул. Проспект Ленина, дом 1, к 850
Тел.: +7 (927) 201-16-16
e-mail: info.volts@mail.ru
<https://volts-energy.store>

СПРАВКА

Об использовании результатов научно-исследовательской (диссертационной) работы Навасардяна А.А., представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук

25 ноября 2021 № 24/2021

Результаты научных исследований аспиранта кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» ФГБОУ ВО Самарского государственного технического университета Навасардяна Ашота Александровича, выполненных в рамках диссертационной работы использованы на предприятии ООО «ВОЛЬТС» в качестве методики расчета индукционных систем для технологического подогрева составных изделий при монтаже оборудования.

Генеральный директор _____

Р.Е. Синельников

М. _____



