

ОТЗЫВ

**официального оппонента, кандидата технических наук, доцента
Хлюпина Павла Александровича на диссертационную работу
Навасардян Ашота Александровича «Электромагнитный кристаллизатор
кремния для получения слитков цилиндрической формы»,
представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук
по специальности 05.09.10 – Электротехнология**

На отзыв представлены

1. Диссертация «Электромагнитный кристаллизатор кремния для получения слитков цилиндрической формы», содержащая введение, пять глав, заключение, список литературы из 81 наименований и приложений. Работа представлена на 230 страницах, содержит 120 рисунков и 85 таблиц.
2. Автореферат диссертации

Актуальность темы исследования

Диссертационная работа Навасардян Ашота Александровича посвящена проблеме производства чистого кремния, который необходим для создания солнечных (фотоэлектрических) панелей для электростанций с помощью индукционных нагревательных систем.

В работе рассмотрены и определены проблемы энергоэффективности функционирования тиглей с индукционным нагревом для кристаллизации кремния, определено наличие неиспользованных резервов для повышения качества и снижения затрат, проблемы управления процессом кристаллизации расплава кремния периодического действия, обеспечивающего достижение нестационарного желаемого распределения электромагнитной силы и распределения температуры в расплаве в условиях изменения импеданса индуктора и формирование цилиндрической формы слитка, определены соотношения геометрических параметров индуктора и системы охлаждения с возможностью динамически контролировать мощность для получения цилиндрической формы слитка, определены конструктивные параметры

кристаллизатора периодического и методического действия, и мощность резистивного нагревателя верхней крышки футеровки, мощность бокового индуктора и тепловой поток охладителя для получения качественного слитка.

Изменяющийся режим при работе системы «индуктор – расплав кремния» от пуска в работу до изменения расплава и перехода в твердое состояние приводит к снижению энергоэффективности процесса нагрева. Решением задачи эффективности является повышение эффективности управления процессом нагрева за счет уточнения математических моделей электромагнитных и тепловых процессов в переходных режимах индукционного нагревателя. Однако решение данной задачи усложняется нелинейной зависимостью распределения удельной мощности нагрева при изменении параметров расплава кремния от жидкого состояния в твердое.

Целью представленной диссертационной работы является 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.

Актуальность темы исследований подтверждается необходимостью повышения энергоэффективности процесса нагрева, необходимостью создания достаточных для удержания расплава сил для производства кремния и получения продукта высокой частоты в тигле с индукционным нагревом при снижении затрат.

Оценка структуры и содержания работы

Работа состоит из введения, пяти глав и заключения. Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цель и основные задачи исследования, характеризуется новизна и практическая значимость полученных результатов, приведены основные положения, выносимые на Защиту. Первая глава посвящена анализу существующих технологий выплавки и кристаллизации кремния. Рассмотрены виды печей, направленных на кристаллизацию и их конфигурации. Особый акцент сделан на совершенствовании показателей технологического процесса направленной

кристаллизации и решению задач численного моделирования для снижения производственных затрат промышленности. Рассмотрено влияние физики процесса кристаллизации кремния при контролируемой принудительной конвекции. Во второй главе рассмотрены вопросы построения математических моделей электромагнитных и тепловых процессов в кристаллизаторе с учетом электромагнитных сил, необходимых для удержания расплава, а также формирование распределения температуры с учетом внутренних источников тепла, тепловых потоков, обусловленных всеми видами теплообмена между расплавом, теплоизоляцией и охладителем, окружающей средой. Построена расчетная модель для определения процессов электромагнитного воздействия от стадии расплава до затвердевания кремния, учитывающая возникающие деформации и напряжения. В третьей главе рассмотрены вопросы моделирования процессов в электромагнитном кристаллизаторе кремния периодического действия. По результатам моделирования произведены исследования и получены параметры индуктора с нагрузкой, проводились исследования процессов при изменяющихся параметрах индуктора по высоте относительно нагрузки. Показана эффективность применения индуктора в сочетании различными конструктивными решениями тигля и применением различного типа стали и выявлена нецелесообразность применения индукторов большой длины. Показано применение программного управления с коррекцией выделяющейся мощности внутри слитка при выходе на установившийся режим. В четвертой главе рассмотрены вопросы моделирования процессов в электромагнитном кристаллизаторе кремния методического действия. Представлены результаты процессов нагрева и кристаллизации расплава, которые показали эффективность технологического процесса при частотах выше 50 Гц и переходе кремния из жидкого состояния в твердое к циклическому ступенчатому изменению параметров. Определены тепловые процессы в кристаллизаторе методического воздействия и минимальная длительность интервала «заливка-охлаждение». Приведены сравнения температур расплавов и длительности теплового воздействия. В пятой главе рассмотрены вопросы реализации индукционной системы электромагнитного кристаллизатора и определены параметры индуктора при пуске при завершении

кристаллизации с применением разработанной системы управления на основе разработанных математических блоков.

Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации

Обоснованность и достоверность теоретических положений, выводов и заключений диссертации не вызывает сомнений и подтверждается тем, что при математическом описании и моделировании тигля с индукционной нагревательной системой использованы общепринятые в электромеханике, теоретической электротехнике и теплотехнике подходы. Основные положения диссертации докладывались и обсуждались на научно-технических конференциях различного уровня и опубликованы в печати, в том числе в изданиях из списка ВАК и индексированных в базе Scopus.

Основные положения диссертационной работы Навасардян А.А. являются научно обоснованными. Выводы и рекомендации, содержащиеся в диссертационной работе, имеют убедительную аргументацию.

Содержание диссертации соответствует специальности 05.09.10 – «Электротехнология».

Диссертация написана в грамотном научном стиле, автореферат диссертации достаточно точно отражает ее содержание.

Основные результаты диссертации апробированы в достаточной мере и отражены в 6 опубликованных печатных работах автора.

Достоверность и новизна полученных результатов

В работе проведены глубокие исследования в области электротермических систем нагрева расплавов кремния с целью получения заготовок высокой частоты. Разработаны алгоритмы управления процессом кристаллизации расплава кремния периодического и методического действия, позволяющий обеспечить желаемое распределение электромагнитной силы и температуры в расплаве с учетом изменения импеданса индуктора и формирования формы слитка. Разработана методика расчета индукционной системы электромагнитного кристаллизатора кремния, позволяющая определить параметры системы, обеспечивающей формирование цилиндрической формы слитка с минимальными термонапряжениями.

Разработаны кристаллизаторы периодического и методического действия, обеспечивающие энергоэффективность процесса за счет автоматической настройки частоты. Достоверность и новизна полученных результатов подтверждается результатами моделирования и экспериментов.

Теоретическая и практическая значимость полученных автором результатов

Научная значимость проведенных исследований подтверждена публикацией трех работ в изданиях, рецензируемых ВАК, а также издании, индексируемых в базе Scopus.

Предложенный алгоритм численного расчет взаимосвязанных электромагнитных и тепловых процессов методом конечных элементов в системе «индуктор – расплав кремния – теплоизоляция», который позволяет учесть изменение электро- и теплофизических свойств кремния, в том числе теплоту плавления, обеспечивающие снижение непроизводительного расхода энергии, могут быть использованы при проектировании и эксплуатации разработанной системы управления мощностью индуктора на базе программируемого логического контроллера позволяет обеспечивать изменение мощности тепловыделения и электромагнитной силы в расплаве, зависящей от средней температуры слитка.

Практическая значимость полученных результатов подтверждается Справкой об использовании результатов диссертационной работы на предприятии ООО «ВОЛЬТС», а также Актами ФГАОУ ВО «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева» и ООО «ПриволжскНИПИнефть».

Замечания по диссертационной работе

1. На С.37 «...Дополнительно, возрастает мощность тепловыделения в металлическом основании (охладитель), что затрудняет теплоотвод и увеличивает тепловые потери». Далее вопрос тепловыделения в охладителе не рассматривался.

2. На С.40 «...Объемная плотность внутренних источников тепла, создаваемых в проводящей неподвижной среде, определяется в соответствии с выражением». Ранее в системе уравнений Максвелла была учтена скорость

движения среды. Получается, что расчетное выражение не соответствует постановке?

3. На С.46 на рис.2.4 изображена геометрическая модель кристаллизатора кремния. Граничные условия для тепловой задачи записаны в виде двух обыкновенных дифференциальных уравнений. Неясно, учитывается ли при расчете тепловых потоков зависимость температуры от координат.

4. На С.68 Интегральное значение силы, приложенной к боковой поверхности расплава, приравнивается к сумме произведений давления на площадь колец. При этом число колец (слоев) согласно выражению (3.3) принято равным 50. Данное значение обеспечивает меньшую погрешность при дискретизации столба кремния, чем при разбиении на 10 слоев, как принято в дальнейших расчетах. При 10 слоях разница интегральных значений составляет более 30%. Пояснений по этому поводу нет.

5. На с.72-81 показанные на рис.3.7-3.13 диаграммы распределения сил и мощности на боковой поверхности загрузки имеют нелинейный вид. Неясно, почему ограничились конической формой индуктора и не исследовали другие, которые могли бы обеспечить нужное распределение.

6. На с.94 приведенные на рис.3.17 диаграммы радиальной и вертикальной составляющих сил, действующих на расплав кремния, свидетельствуют о необходимости учета вектора скорости в тепловой задаче. В разделе расчета тепловых процессов 3.2 этот фактор не учтен.

7. На с.160 «...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». Система регулирования работать будет, но результат будет отрицательным. Необходимо решение указанных задач – управление тепловыми потоками через боковую стенку и основание футеровки. Эти вопросы в работе не рассмотрены.

8. Не рассмотрен вопрос влияния скорости кристаллизации на размер кристаллов, что влияет на характеристики фотоэлементов.

Заключение о соответствии диссертации критериям, установленным положением о присуждении ученых степеней

Отмеченные недостатки и сделанные замечания не влияют на общую оценку диссертации в целом.

Диссертация Навасардян А.А. на соискание ученой степени кандидата технических наук является научно-квалификационной работой, в которой изложены научно обоснованные методики и алгоритмы управления переходными режимами электромагнитного кристаллизатора периодического действия на основе индукционных технологий для формирования цилиндрического кремниевого слитка, имеющие существенное значение для электротехнологии, что соответствует требованиям п. 9 «Положение о присуждении ученых степеней», а ее автор, Навасардян Ашота Александровича, заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.09.10 – Электротехнология.

Официальный оппонент:

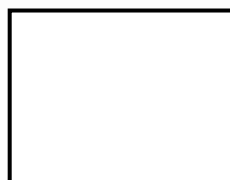
кандидат технических наук,

Хлюпин Павел Александрович,

доцент кафедры «Электротехника и электрооборудование предприятий»

ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический

университет»



18.05.2022

Кандидатская диссертация защищена

по специальности 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

Адрес места основной работы: г.Уфа ул. Космонавтов, 1

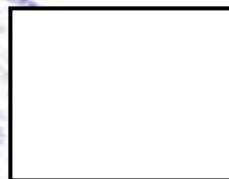
Рабочий телефон: +7(347) 242-07-59

Адрес эл. почты: khilupinpa@mail.ru

Подпись Хлюпина П.А.

заверяю, проректор по научной

и инновационной работе, к.т.н.



Рабаев Руслан Уралович

