

На правах рукописи

ДЕМИН АНТОН ВЯЧЕСЛАВОВИЧ

РЕЖИМЫ РАБОТЫ ИНДУКЦИОННОГО ПЛАВИТЕЛЯ С  
ХОЛОДНЫМ ТИГЛЕМ ДЛЯ ОСТЕКЛЫВАНИЯ  
РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ

Специальность 01.04.13 – электрофизика, электрофизические установки.

АВТОРЕФЕРАТ

диссертация на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Автор:



Москва – 2012

Работа выполнена в Национальном исследовательском ядерном университете «МИФИ», Москва

Научный руководитель      доктор физико-математических наук,  
профессор  
Школьников Эдуард Яковлевич

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,  
профессор,  
ИПМ им. М.В. Келдыша РАН,  
заведующий отделом  
Галанин Михаил Павлович

кандидат физико-математических наук,  
ФГУП «НПП «Торий»,  
начальник лаборатории  
Комаров Дмитрий Александрович

Ведущая организация:      ФГУП Всероссийский электротехнический  
институт имени  
В.И. Ленина, г. Москва

Защита состоится “26” сентября 2012 г. в 14 час. 30 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.130.01 при НИЯУ МИФИ по адресу: 115409, г. Москва, Каширское шоссе, 31, тел. +7 499 323-95-26, 324-84-98.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НИЯУ МИФИ.

Просим Вас принять участие в обсуждении диссертации или прислать отзыв в 2-х экземплярах, заверенный печатью Вашей организации.

Автореферат разослан “\_\_\_” \_\_\_\_\_ 2012 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
к.т.н., доцент

 И.С. Щедрин

## **Общая характеристика работы**

Проблема кондиционирования, т.е. перевода в безопасную форму, радиоактивных отходов (РАО) является одной из важнейших экологических проблем.

В настоящее время общепризнано, что наиболее эффективным способом утилизации РАО является их остекловывание, т.к. оно представляет из себя наиболее перспективный и безопасный способ долговременной консервации радиоактивных отходов в форме, которая не будет вступать в реакции и разрушаться на протяжении длительного периода времени.

Остекловывание отходов всех уровней активности имеет довольно много технологических решений. Из них одним из наиболее эффективных способов переработки РАО является индукционное плавление в холодном тигле (ИПХТ). Основу подобной технологии составляет плавка в т.н. гарнисаже, т.е. с температурной изоляцией расплава закристаллизовавшимся слоем, образующимся при контакте расплава с холодной стенкой тигля. Водоохлаждаемые тигли, получившие название холодных тиглей, являются наиболее существенным конструктивным признаком таких установок, поэтому плавку в гарнисаже часто называют «плавкой в холодном тигле».

Модернизация и разработка новых устройств ИПХТ, связанных с получением высококачественных материалов, а также повышение их производительности и надежности, достижение высокой степени ресурсосбережения и безопасности нового поколения этих установок, требуют всестороннего понимания физических процессов, происходящих при их работе. Между тем, экспериментальное определение характеристик подобных процессов достаточно сложно из-за высоких температур и электрических напряжений. В этой связи становится весьма актуальным изучение и анализ процессов, протекающих при работе установок ИПХТ, на основе их физических моделей. Однако, несмотря на длительное время развития рассматриваемой технологии, описание многих ее процессов носит во многих случаях весьма приближенный характер. Это касается и работы ВЧ-генератора, и процессов собственно плавления в тигле, и тем более рассмотрения работы всей системы генератор-индуктор-тигель. Подобное обстоятельство объясняется большим количеством физических процессов, сопровождающих работу всей системы, которые требуют для описания электродинамических, теплофизических, электрических, радиочастотных и, наконец, гидродинамических подходов. Положение также усугубляется принципиальной нелинейностью данных процессов. Нельзя также не принимать во внимание довольно сложную геомет-

рическую конфигурацию системы индуктор-тигель, что значительно усложняет ее моделирование.

Целью настоящей работы является исследование и анализ физических явлений, происходящих в установках ИПХТ, которые сопровождаются как процессами варки стекломассы в тигле, так и работой генератора с самовозбуждением на нелинейную нагрузку, которой является т.н. нагрузочный контур, включающий индуктор и тигель с расплавом. Эти исследования проводятся на основе разработанных физических моделей установки ИПХТ, чья численная реализация осуществляется с помощью таких пакетов, как Ansoft Maxwell, Comsol Multiphysics, Microcap. Для того чтобы иметь возможность использовать экспериментальный материал, соответствующие расчеты ориентированы на экспериментальную установку ВЧИ11-60/1,76, расположенную на экспериментальной площадке МосНПО «Радон».

Научная новизна работы заключается в следующем.

1. С использованием построенных 2D и 3D физических моделей получены пространственные распределения индукции магнитного поля, плотности вихревых токов, объемной плотности мощности омических потерь, температуры и мощности тепловых потоков для реальной геометрии действующей системы индуктор-тигель с расплавом, включая т.н. «мертвую зону», в линейном и нелинейном режиме. На основе обработки экспериментальных осциллограмм токов и напряжений с помощью разработанных и установленных на установку ИПХТ датчиков обосновано проведение анализа процессов с учетом только первых гармоник.
2. Построена физическая модель установки ИПХТ, включающая генератор с самовозбуждением и т.н. нагрузочный контур, в состав которого входят индуктор и тигель с расплавом, при этом моделирование установки осуществляется на основе ее представления в виде эквивалентных схем, чьи элементы определяются непосредственно из экспериментального устройства, либо получаются в результате моделирования теплофизических процессов в тигле с расплавом.
3. Проведен анализ работы системы генератор-индуктор-тигель по повышению ее энергоэффективности, выработки генератором максимально возможной активной мощности и передачи ее в расплав, по влиянию диаметра, высоты тигля и числа витков индуктора на энергоэффективность работы генератора.

4. Проведен анализ влияния гидродинамических течений в расплаве на его характеристики с использованием построенной модели, содержащей электродинамический, теплофизический и гидродинамический блоки, для реальной геометрии тигля с мертвой зоной, выявлены динамика прогрева стекломассы, наличие локальных вихрей, приводящих к перераспределению температур по объему расплава.

Практическая ценность. Проведенный в работе анализ пространственного распределения электро- и теплофизических характеристик расплава позволяет провести модернизацию существующих и создать новые системы установок ИПХТ, отличающиеся более равномерным нагревом расплава, реализовать эффективные режимы слива в присутствии мертвой зоны в тигле. Создание модели полной системы генератор-индуктор-тигель и осуществленный на ее основе анализ работы системы дают возможность реализовать энергоэффективные режимы, что является немаловажным, учитывая весьма высокие значения энергопотребления установок ИПХТ. Построение моделей, позволяющих исследовать динамику нагрева стекломассы во время поступления новой порции шихты, дают возможность оперативно принимать решения о режимах плавки операторам, а также эффективно планировать технологические процессы.

На защиту выносятся

1. 3D нестационарная, нелинейная модель системы индуктор-тигель с расплавом для реальной геометрии экспериментальной установки ИПХТ, реализуемая с помощью пакетов Ansoft Maxwell и Comsol Multiphysics.
2. Результаты анализа пространственного распределения электродинамических и теплофизических характеристик системы индуктор-тигель с расплавом в линейном и нелинейном режимах, результаты экспериментального определения температуры расплава и сравнения с расчетными данными.
3. Физическая модель установки ИПХТ на основе ее представления в виде эквивалентных схем, которые определяются с использованием номиналов ее электрических цепей или за счет моделирования электрофизических процессов в тигле.
4. Результаты анализа с помощью этой модели энергоэффективности работы установки ИПХТ, которая зависит от величины максимально возможной активной мощности, вырабатываемой и передаваемой в расплав генератором.
5. Результаты анализа влияния диаметра и высоты тигля, количества витков индуктора на электро- и теплофизические характеристики расплава, а также

влияние этих параметров на энергоэффективность работы генератора.

6. Результаты исследования динамики нагрева стекломассы в процессе поступления в тигель шихты, в том числе влияния скорости поступления и водяной компоненты шихты с помощью физической модели нагрева стекломассы на основе определения активных потерь в узлах и элементах установки ИПХТ и показаний ее штатных датчиков для составления программы-советчика оператору установки.
7. Результаты анализа электро- и теплофизических характеристик расплава с учетом гидродинамических течений, включая динамику прогрева стекломассы в объеме тигля с мертвой зоны, поле скоростей течений стекломассы с зонами локальных вихрей, перераспределение температуры по объему расплава, проведенного с помощью соответствующей 3D нестационарной нелинейной модели системы индуктор-тигель с расплавом для реальной геометрии тигля, содержащего т.н. «мертвую зону». При этом моделирование осуществляется с использованием пакета Comsol Multiphysics.

Достоверность научных результатов исследований, изложенных в работе, обеспечивается корректностью постановки задач теоретических исследований, использованием апробированных методов математической физики, подтверждается сравнением результатов моделирования с аналитическим расчетом тестовых задач и экспериментальными исследованиями на действующей экспериментальной установке ИПХТ.

Апробация работы. Основные результаты и положения диссертации были представлены на следующих конференциях: IV Международная конференция и выставка «Атомэко-2010», Москва, 28-29 октября 2010 г.; V Международная конференция и выставка «Атомэко-2011», Москва, 31 октября – 1 ноября 2011 г.; Научная сессия НИЯУ МИФИ 2010 г.; Научная сессия НИЯУ МИФИ 2011 г.; Научная сессия НИЯУ МИФИ 2012 г.

Публикации. Основные положения и результаты диссертации опубликованы в 3 работах.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы, включающего 97 источников. Общий объем диссертации – 112 страниц, включая 54 рисунка и 15 таблиц.

## Содержание работы

**Первая глава** посвящена моделированию стационарного режима работы системы индуктор-тигель.

Геометрия модели индуктор-тигель соответствует реальной технологической установке ВЧИ1-60/1,76 на мощность 60 кВт, размещенной на экспериментальной площадке МосНПО «Радон» (рис.1). Спиральный индуктор содержит четыре медных витка, по которым течет синусоидальный ток с частотой 1,76 МГц, вырабатываемый ламповым триодным генератором. Тигель содержит т.н. «мертвую зону» – нижнюю часть расплава, лежащую вне области, охватываемой индуктором.

Разработанная модель системы индуктор-тигель с расплавом содержит два блока: блок электромагнитных и блок теплофизических вычислений. Первый блок позволяет определить распределение магнитных полей в пространстве, а также вихревые токи в области расплава по заданным значениям тока в обмотке индуктора. Второй блок позволяет определить распределение температур и динамики нагрева расплава источниками энерговыделения – вихревыми токами. Граничные условия тепловой задачи сводятся к определению коэффициентов конвективного теплообмена на основе методов гидродинамического подобия. Температура на поверхности индуктора, чьи обмотки охлаждаются проточной водой, принята равной 20°C. При проведении расчетов предполагалось, что материалом расплава является боросиликатное стекло. Расчеты были проведены с использованием пакетов Ansoft Maxwell и Comsol Multiphysics. Оба этих пакета дали практически идентичный результат.

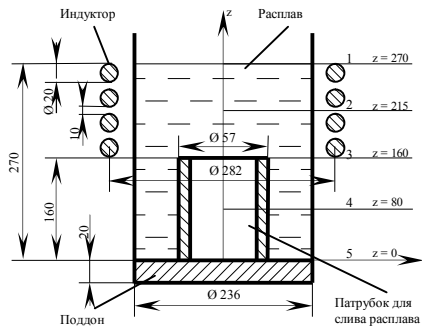


Рис.1. Геометрия модели (все размеры даны в мм).

Расчеты были проведены для двух режимов: линейного и нелинейного. В

последнем случае  $\lambda$  и  $\rho$  зависели от температуры расплава. Для расчетов использовались два пакета Ansoft Maxwell и Comsol Multiphysics. Некоторые результаты расчетов представлены на рис.2 и 3.

Здесь изображены распределения стационарных (установившихся) значений  $j$ ,  $Q$  и  $T$  расплава для значения тока в индукторе равного 71 А. Как следует из рис.3, учет отмеченных выше нелинейных характеристик задачи привел к некоторым качественным изменениям в их распределении. Прежде всего это относится к зависимостям плотностей тока и мощности омических потерь. В отличие от рис.2, где имеет место монотонный рост этих величин, в данном случае наблюдается наличие явно выраженных максимумов в их распределениях. Такое поведение величин  $j$  и  $Q$  объясняется не только распределением магнитного поля (как в линейной задаче), которое практически не меняется в данном случае, но и распределением удельного электрического сопротивления  $\rho$ .

Что же касается распределения температуры расплава по его объему, то здесь можно отметить следующее. Кольцевая область наибольшего прогрева расплава несколько смещается в сторону боковых стенок тигля. Помимо этого градиент температуры по радиусу в районе гарнисажа (внешней боковой поверхности расплава) также несколько увеличился, что лучше соответствует экспериментальным данным.

В процессе экспериментальной плавки проводились измерения температуры расплава. В качестве первичных преобразователей использовались три типа датчиков: термопара, пирометрический преобразователь полного излучения ППТ121 и инфракрасный термометр «Кельвин». Анализ экспериментальных данных дает основание говорить о соответствии расчетных и экспериментальных значений температур.

Геометрические параметры индуктора являются причиной неравномерности распределения магнитного поля по объему тигля. Данное обстоятельство приводит к неравномерности нагрева всего объема шихты, что является причиной уменьшения эффективности всей системы.

Для устранения этого явления были предложены некоторые способы изменения распределения магнитной индукции по оси тигля. Один из них заключался во введении магнитного экрана, помещаемого на внешнюю поверхность тигля. В результате происходит небольшое выравнивание магнитного поля и увеличение его величины, которое приводит к увеличению плотности магнитной энергии и, как следствие, повышению температуры шихты. Таким обра-



зом, прежние значения температур шихты достигаются теперь при меньших токах в витках индуктора.

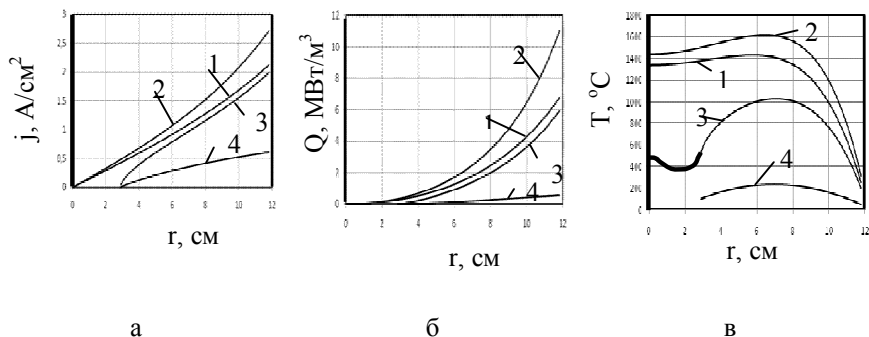


Рис.2. Распределение модуля вектора плотности вихревых токов  $j$  (а), объемной плотности мощности омических потерь в расплаве  $Q$  (б) и температуры (в) в поперечных сечениях к оси тигля в случае линейной задачи.

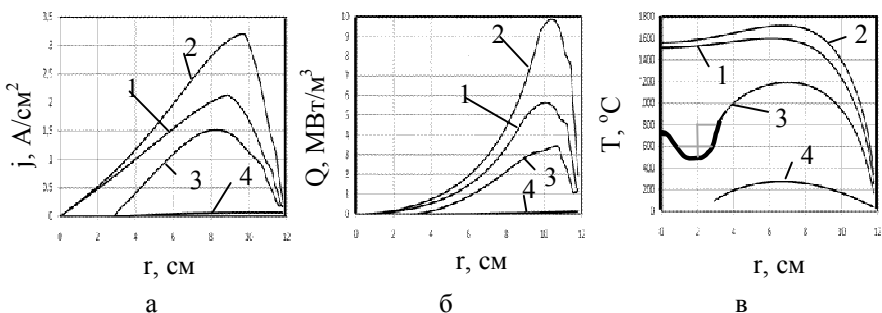


Рис.3. Распределение модуля вектора плотности вихревых токов  $j$  (а), объемной плотности мощности омических потерь в расплаве  $Q$  (б) и температуры (в) в поперечных сечениях к оси тигля в случае нелинейной задачи.

Был проведен Фурье-анализ экспериментальных сигналов токов и напряжений в нагрузочном контуре экспериментальной установки ИПХТ, который показал, что характерной особенностью экспериментальных сигналов является наличие гармонических составляющих. Этот анализ также показал, что мощность активных потерь в нагрузочном контуре определяется гармоническими составляющими на основной частоте.

**Во второй главе** проводится анализ работы полной системы ВЧ-плавителя, включающей генератор с самовозбуждением, индуктор и тигель с расплавом.

На рис.4 представлена эквивалентная схема системы генератор-индуктор-тигель с питанием индуктора от генератора ВЧИ11-60/1,76. Функционально схема состоит из трёх блоков А, В и С (рис.4). В блоке А находится первичный высоковольтный источник питания  $U_a$  и элементы электрического фильтра ( $L_3$ ,  $C_{19}$ ). В блоке В содержится ВЧ-генератор на базе лампового триода типа ГУ66-А, работающий в режиме самовозбуждения ( $C_{46}$ ,  $C_{47}$ ,  $L_9$ ). В блок С входят передающая линия (ТЛ) и нагрузочный контур (Снк,  $L_{14}$ ,  $L_{15}$ ,  $L_{11}$ ,  $L_{12}$ ).

Для численной реализации модели и анализа численных данных был использован пакет прикладных программ Мисосар 8. Для применения данного пакета была составлена нестандартная модель (Macros) лампового триода, включающая, в частности, внутреннее сопротивление лампы  $R_i$  и сеточное сопротивление  $R_g$ . Емкостные элементы, показанные на схеме, также являются подсхемой Macros, содержащие помимо собственно емкостных элементов и резистивные, которые отражают потери в конденсаторах.

Параметры элементов, изображенных на рис.4, были взяты из технического описания экспериментальной установки. Что же касается параметров элементов нагрузочного контура, они определялись на основе эквивалентной схемы системы индуктор-тигель, изображенной на рис.5. Особенностью включения индуктора является то, что для уменьшения величины напряжения индуктор включен в схему генератора с заземлением средней точки. Поэтому в эквивалентной схеме индуктор представлен в виде двух индуктивных плеч  $L_1$  и  $L_2$ , которые связаны магнитной связью между собой ( $M_{12}$ ) и с эквивалентной индуктивностью расплава  $L_p$  ( $M_{1p}$  и  $M_{2p}$ ). Нелинейное сопротивление  $R_p$  отображает активные потери энергии в расплаве.

Анализ функционирования модели системы генератор-индуктор-тигель с расплавом и сравнение экспериментальных и расчетных значений энергетических характеристик установки показали, что энергетические характеристики установки, полученные на экспериментальной установке и рассчитанные с помощью описанной выше модели удовлетворительно соответствуют друг другу. Эти же данные свидетельствуют также о недостаточно высокой энергетической эффективности работы установки.

Проведенный анализ показал, что величина мощности потерь в анодной цепи лампы достаточно сильно зависит от параметра индуктивности разрядного анодного контура  $L_6$ . Так при её увеличении с 2 мкГн до 3 мкГн мощность

потерь в лампе Рл снижается до значения 10,9 кВт, что заметно повышает энергетическую эффективность установки. Подобную сильную зависимость величины Рл от параметра L6 можно объяснить следующим образом. Величину действующего значения анодного тока  $I_A$  можно представить через среднее значение  $I_a$  следующим образом:  $I_A = k_f \cdot S^{1/2} \cdot I_a$ . Здесь  $k_f$  – коэффициент формы импульса тока,  $S$  – скважность:  $S = T / t_{и}$ , где  $T$  – период следования импульсов тока,  $t_{и}$  – их длительность по основанию. При увеличении величины L6 величина  $I_a$ , а следовательно, и мощность источника остаются неизменными, а в то же время длительность импульса  $t_{и}$  увеличивается, что и приводит к снижению  $I_A$ , а следовательно и мощности потерь в анодной цепи лампы.

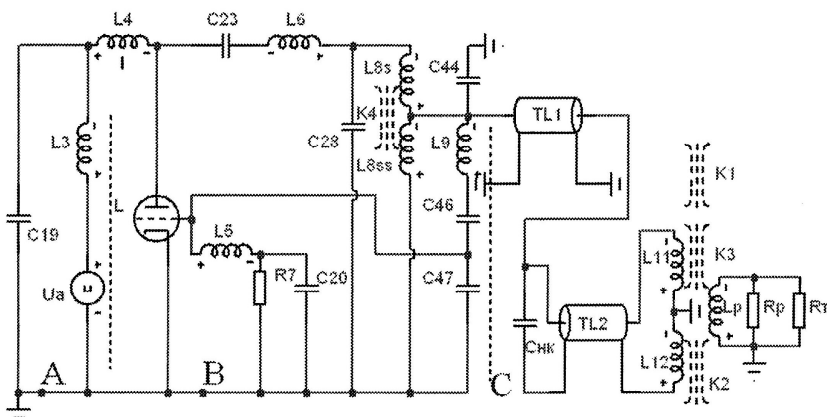


Рис.4. Эквивалентная схема системы генератор-индуктор-тигель плавильной установки.

При уменьшении емкости  $C_{нк}$  значение мощности в расплаве несколько снижается, но в то же время, как показали расчеты, происходит значительное выравнивание токов в секциях индуктора. Таким образом выбор значения  $C_{нк}$  должен осуществляться из разумного компромисса. В то же время следует особо подчеркнуть, что чрезмерное увеличение емкости нагрузочного контура может привести к срыву ВЧ-колебаний генератора.

Анализ энергоэффективных режимов работы установки ИПХТ показал, что решение данной задачи связано с согласованием генератора с нагрузкой (нагрузочный контур), которое заключается в реализации условий, позволяющих генератору вырабатывать максимальную активную мощность и максимально

увеличивать энергопоток в нагрузочный контур, а, следовательно, и в расплав. Для увеличения отбора мощности от источника необходимо осуществить изменение режима работы установки путем изменения ее параметров. Этого можно достичь за счет увеличения добротности нагрузочного контура.

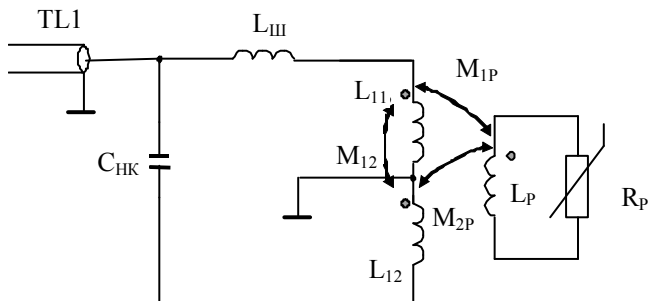


Рис.5. Эквивалентная схема нагрузочного контура с индуктором, заполненным расплавом: TL1 – кабельный тракт силового ВЧ-питания; CНК – емкость конденсаторной батареи нагрузочного контура; LШ – индуктивность токовых шин индуктора.

Одним из путей решения этой проблемы является уменьшение индуктивности линии связи конденсаторной батареи Cнк с секциями индуктора L11 и L12 за счет замены проводного подключения (имеющего место на экспериментальной установке) отрезком кабеля TL2 (рис.4), что приводит к снижению индуктивности подводящих проводов.

**Третья глава** посвящена оптимизации геометрической конфигурации системы индуктор-тигель установки ИПХТ. Проведение расчетов, связанных с изменением геометрической конфигурации тигля, было вызвано необходимостью исследования изменений соответствующих электро- и теплофизических характеристик расплава, а также особенностями режимов работы ВЧ-генератора с целью увеличения его энергетической эффективности. При этом решение задачи было разбито на два этапа. На первом этапе рассматривалась только система индуктор-тигель (с расплавом), а значение тока в индукторе считалось заданным. Средняя температура расплава определялась в области тигля, охватываемой индуктором, ток в обмотках индуктора подбирался из условия примерного равенства этих величин для всех конфигураций. На втором этапе, используя полученные ранее характеристики расплава, рассматривалась вся система целиком: генератор-индуктор-тигель. Задача первого этапа

решалась с помощью пакета Ansoft Maxwell, а второго этапа с помощью модели установки, основанной на номиналах ее элементов. При данных расчетах рассматривался стационарный линейный режим.

Расчеты показали (рис.6, 7), что с ростом диаметра тигля растет величина активной мощности, поступающей в расплав. Это объясняется увеличением объема расплава и увеличением общего оттока энергии в охлаждаемые стенки тигля из-за сохранения теплосъема с единицы поверхности. Поэтому для достижения той же температуры расплава  $T_{ср}$  в стационаре требуется большее выделение в расплаве активной мощности. Отметим, что с ростом диаметра тигля увеличивается и сопротивление расплава. Это происходит благодаря увеличению длины токовых линий при сохранении площади поперечного сечения токового слоя в расплаве из-за неизменности глубины скин-слоя. Помимо этого увеличение диаметра тигля сопровождается уменьшением значения тока в индукторе, так что для достижения одного и того же значения средней температуры расплава с ростом диаметра тигля требуется меньшее значение тока. Благодаря тому, что уменьшение квадрата тока с ростом диаметра тигля происходит в большей степени, чем возрастание индуктивности расплава, наблюдается некоторое снижение реактивной мощности в расплаве.

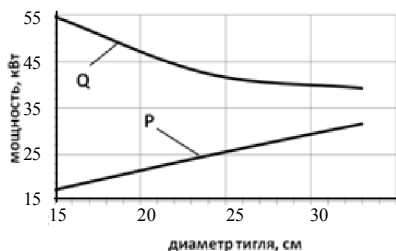


Рис.6. Зависимость активной P и реактивной Q мощности от диаметра тигля.

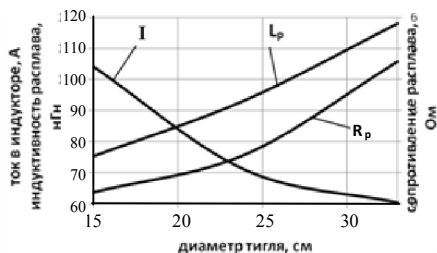


Рис.7. Зависимость сопротивления расплава  $R_p$ , индуктивности расплава  $L_p$  и тока в индукторе I от диаметра тигля.

Для анализа характеристик системы генератор-индуктор-тигель использовалась модель установки, основанной на номиналах её элементов. В таблице 1 представлены результаты расчета.

В таблице 1 введены следующие обозначения:  $d$  – внутренний диаметр тигля,  $I$  – амплитуда тока в индукторе,  $P_p$  – активная мощность в расплаве,  $P_{нк}$  – мощность нагрузочного контура,  $P_{и}$  – активная мощность источника,  $f_{рез}$  – частота источника в резонансном режиме,  $U_{нк}$  – амплитудное значение напряжения в нагрузочном контуре,  $R_p$  – сопротивление расплава,  $C_{к(рез.)}$  – значение емкости нагрузочного контура в резонансном режиме. Как следует из таблицы 1, с увеличением диаметра тигля значение активной мощности в расплаве уменьшается, что противоречит результатам, полученным выше, где аналогичная величина возрастает. Причина этого противоречия заключается в принципиально различных условиях нахождения активной мощности, поступающей в расплав. В приведенных выше данных полагалось, что питание индуктора осуществлялось от идеального источника тока – ток в обмотках индуктора задавался. В данном же случае рассматривается вся система: генератор с самовозбуждением - нагрузочный контур, включающий индуктор и тигель с расплавом. В этой связи режим работы генератора, а следовательно, и поступление активной мощности в расплав зависит от параметров нагрузки. Эта величина, как видно из таблицы 1, с увеличением диаметра тигля значительно возрастает, что приводит к возрастанию степени рассогласования нагрузки с генератором и, как следствие, к падению активной мощности вырабатываемой генератором и передающейся в расплав.

Таблица 1

| $d, \text{ см}$ | $I, \text{ А}$ | $P_p, \text{ кВт}$ | $P_{нк}, \text{ кВт}$ | $P_{и}, \text{ кВт}$ | $f_{рез}, \text{ МГц}$ | $U_{нк}, \text{ кВ}$ | $R_p, \text{ Ом}$<br>$C_{к(рез.)}, \text{ нФ}$ |
|-----------------|----------------|--------------------|-----------------------|----------------------|------------------------|----------------------|------------------------------------------------|
| 15              | 117,5          | 30,9               | 33,4                  | 64,7                 | 1,82                   | 2,7                  | 0,364<br>1,9                                   |
| 24              | 76,4           | 25,4               | 27,2                  | 51                   | 1,79                   | 2,96                 | 1,576<br>1,15                                  |
| 33              | 63,3           | 12,9               | 14,7                  | 33,8                 | 1,8                    | 3,55                 | 4,567<br>0,8                                   |

Геометрическая конфигурация системы индуктор-тигель с расплавом с изменением высоты тигля менялась следующим образом: по мере увеличения высоты тигля высота индуктора также увеличивалась, но количество витков при этом не менялось, так что его верхний виток оставался на уровне верхнего торца тигля, а нижний – на уровне отверстия для слива расплава. Некоторые полученные в ходе анализа зависимости изображены на рис.8, 9. С увеличени-

ем высоты тигля растет активная мощность, передаваемая в расплав, что связано с увеличением площади охлаждаемой поверхности тигля при тех же значениях удельных характеристик охлаждения (коэффициента конвективного теплообмена) и при сохранении того же значения средней температуры расплава.

Напротив, с увеличением высоты тигля сопротивление расплава снижается. Это связано с тем, что увеличение высоты расплава сопровождается увеличением площади поперечного сечения токового слоя (при сохранении глубины скин-слоя), в то время как длина линий тока остается неизменной. Необходимое увеличение активной мощности в расплаве и снижение активного сопротивления расплава приводят к некоторому росту тока в обмотках. Несмотря на снижение значения индуктивности расплава, увеличение тока в обмотках индуктора приводит к возрастанию реактивной мощности в расплаве.

Результаты расчета характеристик системы генератор-индуктор-тигель с изменением высоты тигля представлены в таблице 2.

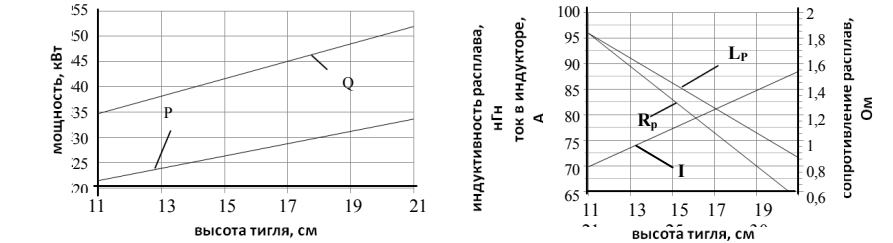


Рис.8. Зависимость активной P и реак- Рис.9. Зависимость сопротивления рас- тивной Q мощности от высоты тигля. плава  $R_p$ , индуктивности расплава  $L_p$  и тока в индукторе I от высоты тигля.

Таблица 2

| $h, \text{ см}$ | $I, \text{ А}$ | $P, \text{ кВт}$ | $Q, \text{ кВт}$ | $P_{\text{из}}, \text{ кВт}$ | $f_{\text{рез}}, \text{ МГц}$ | $U, \text{ кВ}$ | $R_p, \text{ Ом} / C_k (p_{\text{рез}}), \text{ нФ}$ |
|-----------------|----------------|------------------|------------------|------------------------------|-------------------------------|-----------------|------------------------------------------------------|
| 11              | 80,25          | 26,1             | 27,9             | 52,9                         | 1,807                         | 3,05            | 1,8 / 1,15                                           |
| 16              | 86,9           | 30,1             | 31,8             | 60,2                         | 1,805                         | 2,65            | 1,2 / 1,35                                           |
| 21              | 92             | 32,2             | 34               | 66,2                         | 1,82                          | 2,55            | 0,9 / 1,5                                            |

Как следует из приведенных зависимостей, с увеличением высоты тигля возрастает как активная мощность, вырабатываемая генератором, так и активная мощность, поступающая в расплав. В отличие от предыдущего случая (возрастание диаметра тигля) здесь происходит падение сопротивления расплава, что приводит к увеличению степени согласования генератора с нагруз-

зочным контуром. Это обстоятельство и объясняет рост вырабатываемой и поступающей в расплав активной мощности. С ростом высоты тигля происходит и рост тока в индукторе. Это связано с тем, что для увеличения активной мощности в расплаве при уменьшении его сопротивления необходимо соответствующее возрастание тока.

При изменении числа витков индуктора рассматривалось три конфигурации индуктора, содержащего два, четыре и шесть витков. В данном случае высота области индуктора составила 16 см, при этом во всех вариантах конфигурация индуктора была такова, что нижний его виток располагался на плоскости сливного отверстия, а верхний – на верхнем торце расплава.

Несмотря на значительное увеличение индуктивности индуктора с ростом числа витков из-за резкого уменьшения тока величина реактивной мощности уменьшается, однако это уменьшение весьма незначительно. В то же время активная мощность в расплаве практически не меняется, как и сопротивление расплава

Результаты расчета характеристик системы генератор-индуктор-тигель с расплавом при изменении числа витков индуктора показывают, что наибольшее значение мощности, передаваемой в расплав, оказывается при числе витков, равном 4, как и для штатной конфигурации системы индуктор-тигель.

В случае количества витков индуктора, равного 6, мощность, передаваемая в расплав, принимает наименьшее из трех случаев значение. Подобное обстоятельство связано с уменьшением добротности нагрузочного контура из-за значительного увеличения индуктивности индуктора.

**Четвертая глава** посвящена исследованию динамики нагрева стекломассы при поступлении в тигель шихты в процессе плавления. Предметом исследования является система индуктор-тигель с расплавом, в который подается шихта с массовой скоростью  $dm/dt$  и начальной температурой  $T_0$ , при этом материалом шихты является боросиликатное стекло (аналогично материалу расплава), поступающее в тигель в водяной среде.

Основным уравнением задачи является уравнение баланса мощностей:

$$P = P_0 - c \frac{dm}{dt} (T_{cp} - T_0) (1 - \alpha) - \alpha \left( c_s \frac{dm}{dt} \Delta T + e_{ucn} \frac{dm}{dt} \right). \quad (1)$$

Здесь  $P_0$  – мощность, поступающая из индуктора в расплав, которая расходуется на нагрев стекломассы и компенсацию энергетических потерь на



охлаждение;  $c$ ,  $c_v$  – теплоемкости расплава и воды соответственно;  $\Delta T = T_{\text{исп}} - T_0$  – разность температуры испарения и начальной температуры для воды;  $e_{\text{исп}}$  – энтальпия испарения для воды;  $\alpha$  – массовая доля воды в поступающей шихте. Как видно из выражения (1), второй и третий члены в правой части представляют собой энергетические потери генератора на нагрев поступающей шихты в водяной среде. Отметим, что в отсутствие поступления массы в расплав,  $P = P_0$ . Предполагается, что амплитуда тока, питающего индуктор, в течение всего процесса нагрева остается постоянной. Вместе с тем величина  $P_0$  при тех же условиях непрерывно меняется. Это объясняется тем обстоятельством, что происходит непрерывное возрастание объема расплава, которое приводит к тому, что по мере заполнения активной зоны тигля поступающей шихтой магнитное поле, ранее находившееся в объеме тигля, но вне расплава, постепенно проникает в расплав, что приводит к увеличению диссипации энергии от вихревых токов в объеме расплава. Степень загрузки тигля расплавом  $\eta(t)$  можно определить следующим образом:

$$\eta(t) = \frac{m(t)}{\rho V_{\text{инд}}} + \eta_0. \quad (2)$$

Здесь  $\rho$  – массовая плотность расплава,  $V_{\text{инд}}$  – объем области тигля, находящейся в зоне, охватываемой индуктором (полный рабочий объем тигля);  $\eta_0$  – начальное (стартовое) значение степени загрузки;  $m(t)$  – масса поступившей за время  $t$  шихты.

Для проведения анализа был использован пакет Ansoft Maxwell, с помощью которого были определены базы данных, которые можно представить в виде следующих зависимостей:

$$T_{\text{ср}} = F_1(P, \eta); \quad P_0 = F_2[\eta(t)]. \quad (3)$$

Уравнения (1), (2), (3) образуют искомую систему уравнений для получения соответствующих решений.

На рис.10 представлены результаты расчета средней температуры расплава  $T_{\text{ср}}$  в зависимости от времени его нагрева. Начало поступления шихты в объем расплава сопровождается резким падением его средней температуры. Подобное остывание расплава именно в начальный момент времени хорошо объяснимо физически: в силу малости массы поступающей шихты в начальный момент времени практически не происходит изменения объема расплава, а следовательно энерговклад в расплав остается прежним. Т.о., как следует из уравне-

ния (1), первый член в правой части  $P_0$  остается примерно постоянным, а два следующих члена растут, в результате величина  $P$  уменьшается, что и приводит к уменьшению температуры расплава. Однако в следующие моменты времени картина меняется. Увеличение объема расплава из-за поступления в его объем шихты приводит к увеличению диссипации энергии от вихревых токов в этом объеме. В силу этого величина  $P_0$  в уравнении (1) начинает возрастать. Это влечет за собой нагревание расплава, что и отражает возрастающий характер зависимости величины  $T_{ср}$  от времени. Эффект мгновенного остывания расплава в момент времени  $t = 0$  является следствием принятых ранее предположений, а именно мгновенного выравнивания температуры поступающей порции шихты и исходного объема расплава за один дискретный временной шаг. Разумеется, в реальном процессе начальное остывание расплава в связи с поступлением в него шихты будет продолжаться определенное время, которое, по оценке, приведенной в работе, составляет величину, равную 1 с.

Из рис.11 следует, что температура после достижения стационарного значения скачком увеличивается, причём это происходит до одной и той же величины в обоих рассматриваемых случаях. Процесс дальнейшего нагрева расплава после его заполнения тигля может быть смоделирован с помощью пакета Ansoft Maxwell с учётом нестационарности процесса. На рис.12 результат этого расчёта показан участком кривой, изображённой пунктиром на соответствующих графиках.

В реальной установке типа ВЧИ11-60/1,76 принятие решения оператором и управление им технологическим процессом происходит на основании показаний штатных датчиков, которыми оснащена установка. Т.к. в установке ток в обмотке индуктора не регистрируется, то применение описанной выше модели вызывает определённые неудобства. Для исправления подобной ситуации было решено объединить разработанную ранее модель системы генератор-индуктор-тигель, основанную на балансе активных потерь, и модель, рассмотренную выше. Модель баланса активных потерь позволяет определить потери мощности в элементах установки.

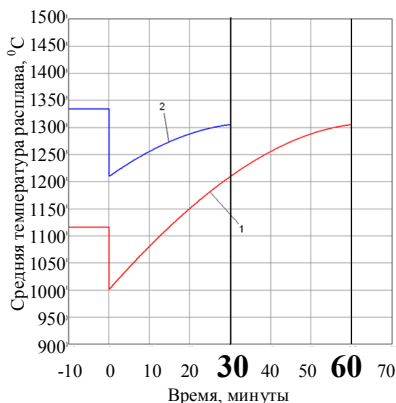


Рис.10. Динамика нагрева расплава и поступающей шихты (без водяной компоненты): 1 –  $\eta_0 = 0,5$ ; 2 –  $\eta_0 = 0,75$ .

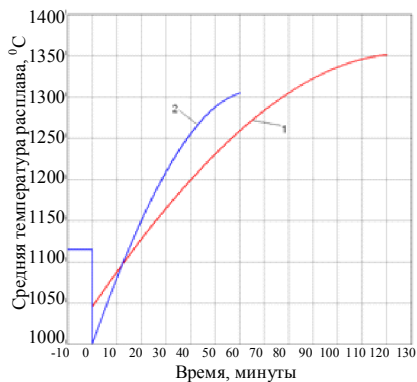


Рис.11. Динамика нагрева расплава и поступающей шихты (без водяной компоненты) при  $\eta_0 = 0,5$ :

$$1 - \frac{dm}{dt} = 0,8 \cdot 10^{-3} \text{ кг / с};$$

$$2 - \frac{dm}{dt} = 1,7 \cdot 10^{-3} \text{ кг / с}.$$

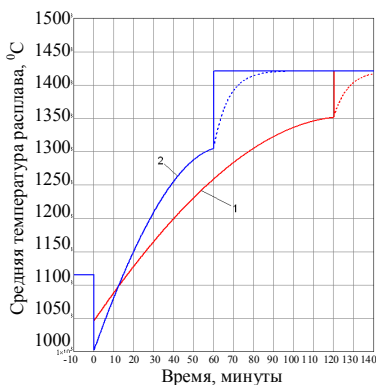


Рис.12. Динамика нагрева расплава и поступающей шихты (без водяной компоненты) при  $\eta_0 = 0,5$  с учётом дальнейшего нагрева расплава:

$$1 - \frac{dm}{dt} = 0,8 \cdot 10^{-3} \text{ кг / с}; 2 - \frac{dm}{dt} = 1,7 \cdot 10^{-3} \text{ кг / с}.$$

**Пятая глава** посвящена анализу режимов работы установки ИПХТ с учётом гидродинамических течений в тигле с расплавом.

Структурно модель, описывающая данные процессы, системы состоит из трех взаимосвязанных частей (блоков): электромагнитной, термодинамической и гидродинамической.

Электромагнитный расчет основан на решении уравнений Максвелла для векторного потенциала. В основе термодинамического расчета лежит стационарное уравнение теплопроводности с внутренними источниками тепла.

Движение среды (расплава) описывается стационарным уравнением Навье-Стокса для слабосжимаемой жидкости с коэффициентом вязкости  $\eta$

$$\rho(\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v} = -\nabla p + \eta \left( \nabla^2 \mathbf{v} + \frac{1}{3} \nabla (\nabla \cdot \mathbf{v}) \right) + (\nabla \eta \cdot \nabla) \mathbf{v} + \nabla (\nabla \eta \cdot \mathbf{v}) - \frac{2}{3} (\nabla \cdot \mathbf{v}) \nabla \eta + \mathbf{f}, \quad (4)$$

стационарным уравнением непрерывности

$$\nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = 0 \quad (5)$$

и уравнением состояния расплава

$$\rho = \rho(p, T). \quad (6)$$

Здесь  $p$  – давление в среде,  $\mathbf{f}$  – плотность объемных сил, действующих на среду.

Уравнение состояния – зависимость плотности расплава от давления и температуры (6) – является важной составляющей модели. Именно зависимость плотности от температуры приводит к возникновению конвекции при неравномерном нагреве жидкости. Так как давление внутри расплава в процессе индукционной плавки меняется незначительно, ограничимся заданием зависимости плотности расплава только от температуры:

$$\rho = \rho(T). \quad (6')$$

Отметим также, что в модели учитывается существенная для расплавов стекол зависимость вязкости от температуры:

$$\eta = \eta(T). \quad (7)$$

Соотношения (6') и (7) связывают гидродинамическую часть модели с тепловой: температура явно не входит в уравнения (4)-(5), но влияет на характеристики расплава  $\rho$ ,  $\eta$ .

Влияние поля тяжести учитывается при задании плотности объемной силы, действующей на расплав:

$$\mathbf{f} = \rho \mathbf{g}, \quad (8)$$

где  $\mathbf{g}$  - ускорение свободного падения.

Построение и численная реализация модели проведена с использованием пакета Comsol Multiphysics. На рис.13 ÷ 14 представлены некоторые результаты расчетов. Все они относятся к системе индуктор-тигель с расплавом, геометрическая конфигурация которой изображена на рис.1. Во всех случаях амплитуда синусоидального тока в четырех витках индуктора составляет 71 А. На рис.13 представлена картина, иллюстрирующая динамику нагрева стекломассы в объеме тигля. В силу симметрии задачи на рис.13 изображена только половина объема тигля. Как и следовало ожидать, прогрев начинается в области наибольшего энерговыделения, расположенной в середине зоны индуктора ближе к боковой поверхности тигля. С течением времени температура в этой области повышается, что сопровождается в этой же области увеличением давления и уменьшением плотности стекломассы. Данный процесс приводит к возникновению течения стекломассы в расплаве, направленного от этой прогретой области в область т.н. «мертвой зоны» тигля, заполненной непрогретой шихтой. По мере дальнейшего прогрева и увеличения температуры стекломассы данное течение интенсифицируется, и под его воздействием прогретая зона постепенно распространяется в нижнюю часть тигля. Процесс достигает стационара примерно к 3000 с. Стационарная картина поля скоростей течений в расплаве представлена на рис.14. В соответствии с этой картиной можно выделить уже упомянутое выше центральное течение, направленное от области индуктора к нижней части тигля. Это течение вытесняет стекломассу из «мертвой зоны», которая вовлекается в движение, образуя еще одно течение, направленное к верхней части тигля. Отметим, что данное течение создает условия для выполнения требования неразрывности течения, описываемого уравнением непрерывности (5).

Абсолютные значения скоростей в расплаве заметно меняются по объему тигля. Отметим также наличие двух локальных вихрей течений, выделенных пунктиром на рис.14.

Наличие в объеме тигля отмеченных гидродинамических течений расплава приводит к изменениям в распределении таких характеристик, как плотность вихревых токов, объемная плотность омических потерь и температура. Так, гидродинамические течения приводят к выравниванию температуры стекломассы по всему объему тигля, включая и «мертвую зону». В то же

время за счет перераспределения стекломассы средняя температура ее нагрева в области индуктора уменьшается. Из-за снижения температуры и, следовательно, увеличения удельного электрического сопротивления происходит уменьшение плотности вихревых токов в объеме индуктора и, напротив, ее увеличение в нижней части тигля из-за дополнительного разогрева стекломассы в этом объеме. Что же касается баланса активных потерь в объеме тигля, то отметим заметное увеличение доли активных потерь на нижней торцевой поверхности расплава из-за дополнительного его разогрева под влиянием гидродинамических течений. В остальном отличия незначительны.

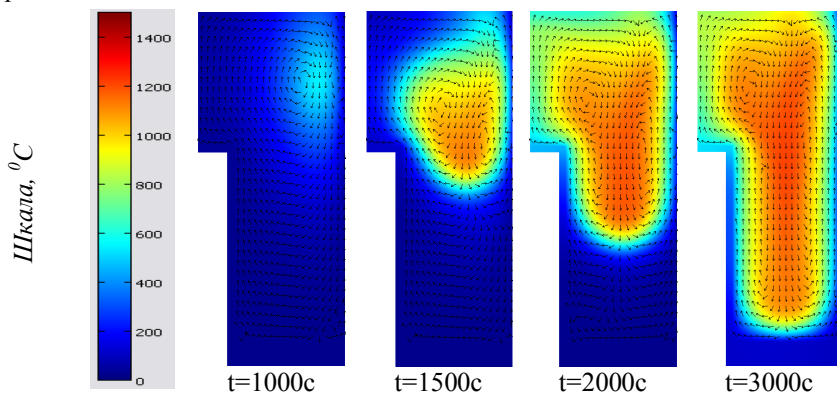


Рис.13. Динамика прогрева стекломассы в объеме тигля. Стрелками указаны векторы скоростей течений, цветовая линейка относится к температуре расплава.

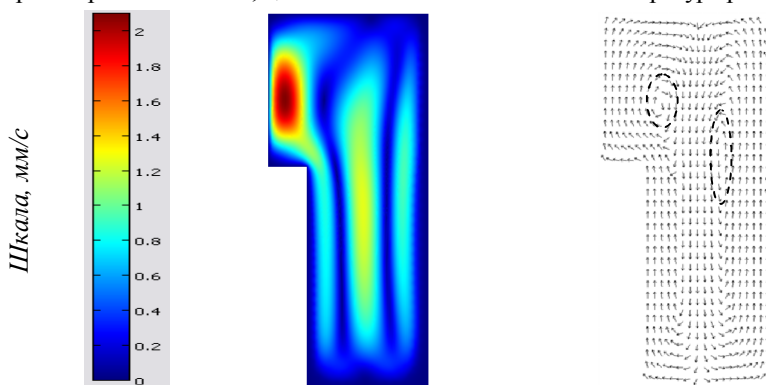


Рис.14. Поле скоростей течений стекломассы для стационарного режима. Пунктиром обозначены зоны локальных вихрей.

Основные результаты диссертации сводятся к следующему:

1. Построена 3D нестационарная нелинейная модель системы индуктор-тигель с расплавом для реальной геометрии экспериментальной установки ИПХТ. С помощью построенной модели получены пространственные распределения индукции магнитного поля, плотности вихревых токов, объемной плотности мощности омических потерь, температуры и мощности тепловых потоков для реальной геометрии действующей системы индуктор-тигель с расплавом, включая т.н. мертвую зону, в линейном и нелинейном режиме.
2. Проведены измерения температуры расплава на его поверхности и в глубине с использованием трех датчиков различных типов. В целом можно констатировать удовлетворительное совпадение расчетных и экспериментальных данных.
3. Построена физическая модель системы генератор-индуктор-тигель, включающая в себя первичный высоковольтный источник питания, электрический фильтр, ВЧ-генератор с самовозбуждением на базе лампового триода, работающий в режиме самовозбуждения, передающая линия и нагрузочный контур, в состав которого входят индуктор и тигель с расплавом.
4. С помощью построенной модели проведен анализ работы полной системы ВЧ-плавителя. Для определения динамики изменения сопротивления стекла в процессе его нагрева была разработана энергетическая (эмпирическая) модель, согласно которой на начальном этапе плавления удельное сопротивление стекла на два порядка выше, чем в расплаве. С помощью данной модели получена зависимость сопротивления стекла от времени и от суммарной энергии, переданной от индуктора в тигель, рассчитаны некоторые энергетические характеристики установки. Из сопоставления расчетных данных и данных, полученных на экспериментальной установке, видно, что они удовлетворительно соответствуют друг другу.
5. Проведена оптимизация геометрической конфигурации системы индуктор-тигель для увеличения энергоэффективности установки. Рассматривались различные электрические и энергетические характеристики: мощности источника, нагрузочного контура, расплава, его сопротивление.
6. Проведено исследование динамики нагрева стекломассы при поступлении в тигель шихты в процессе плавления. Изменяемыми величинами являлись скорость поступления шихты, начальная степень загрузки тигля расплавом и массовая доля воды в поступающей шихте. Построена модель

системы генератор-индуктор-тигель с поступлением шихты во время плавки, которая может быть использована оператором установки для остекловывания РАО как для принятия оперативных решений, так и для планирования технологического режима плавки.

7. Разработана физическая модель системы индуктор-тигель с расплавом, где реализовано ее гидродинамическое описание. Численная реализация модели проведена на базе пакета Comsol Multiphysics. С помощью построенной модели проанализирована динамика нагрева расплава. Получены распределения скоростей течений, температуры расплава в разные моменты времени, получена стационарная картина поля скоростей течений в расплаве. В соответствии с этой картиной можно выделить центральное течение, направленное от области индуктора к нижней части тигля. Наличие в объеме тигля данных гидродинамических течений расплава приводит к изменениям в распределении таких характеристик, как плотность вихревых токов, объемная плотность омических потерь и температура.

#### **Список опубликованных работ по теме диссертации.**

1. Демин А.В., Гаркуша О.В., Львов Е.И., Масленников С.П., Макеев А.Э., Коротеев В.И., Сурков А.С., Школьников Э.Я. Моделирование электро- и теплофизических процессов в установке для остекловывания РАО. // Ядерная физика и инжиниринг. 2011. Т. 2. №2. С. 1-7.
2. Гаркуша О.В., Демин А.В., Львов Е.И., Львов Н.Е., Масленников С.П., Новожилов А.Е., Павловский В.А., Школьников Э.Я. Энергоэффективные режимы работы установки индукционного плавления в холодном тигле для утилизации РАО. // Ядерная физика и инжиниринг. 2011. Т. 2. №5. С. 1-5.
3. Демин А.В., Кобелев А.П., Лебедев В.В. Исследование электрофизических и теплофизических процессов в индукционном плавителе холодный тигель. // Научная сессия МИФИ-2010, сборник научных трудов. 2010. Т. 1. С. 199.