

МИНИСТЕРСТВО ЭНЕРГЕТИКИ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН
Республиканское государственное предприятие на праве хозяйственного ведения
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ЯДЕРНЫЙ ЦЕНТР РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН»
Филиал «Институт атомной энергии»
(Филиал «ИАЭ» РГП «НЯЦ РК»)

УДК 621.039.587

Толеубеков Куанышбек Оразбекович

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМЫ ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА ДЛЯ ИМИТАЦИИ
ОСТАТОЧНОГО ЭНЕРГОВЫДЕЛЕНИЯ В КОРИУМЕ ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ С ЖАРОПРОЧНЫМИ
МАТЕРИАЛАМИ**

Работа, представленная на XIX конференцию-конкурс НИОКР
молодых ученых и специалистов
Национального ядерного центра Республики Казахстан
(инженерно-техническая)

Руководитель: Акаев А.С.,
начальник отдела вне реакторных испытаний

г. Курчатов, 2020 г.

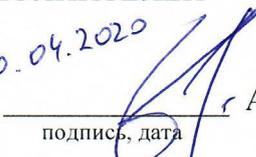
АВТОР

Толеубеков Куанышбек Оразбекович,

инженер лаборатории экспериментальной теплофизики
Филиала «Институт атомной энергии» РГП «НЯЦ РК»,
1997 года рождения,
образование: (Казахский национальный университет имени аль-Фараби, 2019 г.),
специальность – Техническая физика,
квалификация по диплому – бакалавр техники и технологий.
работает в Филиале «ИАЭ» РГП «НЯЦ РК» с 2019 г.,
общий стаж работы 0.5 года

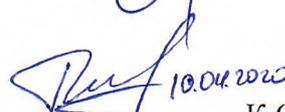
СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Руководитель работы,
начальник отдела внереакторных испытаний

10.04.2020

подпись, дата

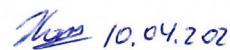
А.С. Акаев

Исполнитель работы,
инженер лаборатории
теплофизики реакторных установок


10.04.2020
подпись, дата

К.О. Толеубеков

Соисполнитель работы, начальник группы
лаборатории экспериментальной
теплофизики


10.04.2020
подпись, дата

А.С. Хажидинов

ТОЛЕУБЕКОВ К.О.

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМЫ ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА ДЛЯ ИМИТАЦИИ
ОСТАТОЧНОГО ЭНЕРГОВЫДЕЛЕНИЯ В КОРИУМЕ ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ С ЖАРОПРОЧНЫМИ
МАТЕРИАЛАМИ**

Работа, представляемая на конференцию-конкурс НИОКР молодых ученых и специалистов
Национального ядерного центра Республики Казахстан
от Филиала «ИАЭ» РГП «НЯЦ РК»

071100, г. Курчатов, ул. Бейбіт атом, 10,
E-mail: toleubekov@nnc.kz

РЕФЕРАТ

Конкурсная работа содержит 21 страниц, 12 рисунков, 3 таблицы, 8 источников.

УСТАНОВКА ЛАВА-Б, КОРИУМ, ТЕМПЕРАТУРНОЕ ПОЛЕ КОРИУМА И ОГНЕУПОРНЫХ БЛОКОВ, БЕТОННАЯ ЛОВУШКА, ИНДУКТОР, РАСПЛАВ

Объект исследования: индукционный нагрев расплава шихты в бетонной ловушке расплава

Цель работы: Получение теоретических данных о зависимости мощности индуктора от различных параметров и определение оптимальных условий для увеличения мощности и эффективности индукционного нагрева.

Задачи исследования:

- Определение зависимости мощности индуктора от различных параметров (конструкция ловушки, емкость конденсаторных батарей, напряжения и тд.);
- Разработка теплофизической модели ловушки расплава установки «Лав-Б»;
- Оптимизация модели ловушки;
- Валидация расчетной модели;
- Моделирование индукционного нагрева исходной и оптимизированной модели и произвести сравнение расчетных значений.

Методика исследований: Для исследования индукционного нагрева расплава кориума в бетонной ловушке установки ЛАВА-Б использовались методы математического и компьютерного моделирования, экспериментального анализа. Моделирование нагрева расплава проводилось с помощью расчетных программ ANSYS.

Результаты выполнения работы: Проведен анализ параметров, оказывающих наибольшее влияние на эффективность индукционного нагрева. Разработана расчетная теплофизическая модель ловушки расплава установки Лав-Б, имитирующая остаточное тепловыделение в кориуме; выполнена серия расчетов распределения температуры в расплаве кориума, материалах бетонной ловушки и исследуемых огнеупорных блоках ловушки расплава; Результаты работы могут быть использованы при проектировании систем имитации остаточного энерговыделения методом индукционного нагрева.

Актуальность: Повышение эффективности индукционного нагрева позволит получить наиболее полную информацию о поведении огнеупорного материала при взаимодействии с кориумом, увеличить технические возможности установки ЛАВА-Б.

Научная новизна: Создана расчетная теплофизическая модель ловушки расплава для изучения воздействия кориума на исследуемые огнеупорные материалы ловушки, при имитации остаточного тепловыделения в кориуме. Получены зависимости коэффициента полезного действия индуктора от различных параметров системы «индуктор-расплав».

Практическая ценность: Полученные зависимости КПД индуктора от различных параметров позволяет подобрать наиболее оптимальные характеристики системы «индуктор-расплав» в зависимости от технологических рамок эксперимента.

Личный вклад автора: Проведение теплофизических расчетов, обработка и анализ расчетных и экспериментальных результатов.

Степень завершенности: завершено

Уровень технических решений: Полученные результаты позволят повысить эффективность имитации остаточного энерговыделения в корнуме методом индукционного нагрева.

Публикации: На данную тему отсутствуют.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	6
1. ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ	7
2. ОПТИМИЗАЦИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПАРАМЕТРОВ СИСТЕМЫ «ИНДУКТОР-ЗАГРУЗКА».....	8
3. МОДЕЛИРОВАНИЕ ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА КОРИУМА ИСХОДНОЙ И ОПТИМИЗИРОВАННОЙ МОДЕЛИ ЛОВУШКИ РАСПЛАВА	14
3.1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ МОДЕЛИРОВАНИЯ.....	14
3.2 РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ.....	17
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	20
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ	21

ВВЕДЕНИЕ

В процессе развития тяжелой аварии с плавлением активной зоны происходит образование кориума. Под кориумом понимается расплавленная смесь из составных элементов активной зоны. Кориум состоит из компонентов ядерного топлива, продуктов деления, компонентов управляющих стержней, конструкционных материалов из поврежденных участков реактора, продуктов их химической реакции с воздухом, водой и паром, а в случае повреждения корпуса реактора, и с компонентами расплавленного бетона (основанием шахты реактора).

В настоящее время становятся актуальными исследования по изучению взаимодействию кориума с жаростойкими материалами, которые могут быть использованы для защитного покрытия подреакторной ловушки расплава. Экспериментальные и теоретические исследования позволят провести обоснованный выбор оптимального жаростойкого материала, предназначенного для повышения безопасности локализации расплава конструкционных элементов активной зоны реактора, в случае тяжелой аварии с расплавлением активной зоны и проплавлением корпуса реактора.

В рамках работ по изучению взаимодействия кориума с жаропрочными материалами необходимо учитывать остаточное энерговыделение, вызванное протеканием реакций распада продуктов деления урана, распада актиноидов, излучения от конструкционных материалов и деления топлива нейтронами.

Установка ЛАВА-Б, эксплуатируемая филиалом «Институт атомной энергии» Республиканского государственного предприятия «Национальный ядерный центр Республики Казахстан», позволяет проводить исследование взаимодействия расплава кориума с огнеупорными материалами с имитацией остаточного энерговыделения с помощью индукционного нагрева расплава в бетонной ловушке.

Поэтому при дальнейших исследованиях взаимодействия кориума с тугоплавкими материалами методом индукционного нагрева необходимо провести анализ факторов, влияющих на эффективность системы «индуктор-расплав». Повышение эффективности индукционного нагрева позволят расширить возможности исследования поведения кориума и его взаимодействия с различными материалами, тем самым повысив уровень безопасности эксплуатации АЭС.

В результате анализа параметров, влияющих на эффективность индукционного нагрева можно провести оптимизацию исходной модели, что позволит повысить эффективность индукционного нагрева кориума.

Данная работа посвящена исследованиям, направленным на эффективное использование индукционного способа нагрева кориума в модели ловушки расплава реактора, а именно увеличение мощности, выделяемой в расплаве, а также повышение общего КПД установки.

Таким образом, данная работа посвящена анализу факторов, влияющих на эффективность установки, проведению нестационарного теплофизического расчета индукционного нагрева расплава кориума в исходной и оптимизированной ловушке расплава и их сравнению.

1. ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

В настоящее время в ИАЭ НЯЦ РК ведутся работы по обоснованию безопасности энергетических реакторов. Для этих целей разработана и создана экспериментальная установка Лава-Б (рисунок 1) по реализации управляемого перемещения расплава материалов активной зоны ядерного реактора и его взаимодействия с конструкционными материалами реакторных установок. Установка находится на территории КИР «Байкал-1» на стенде «Ангара».



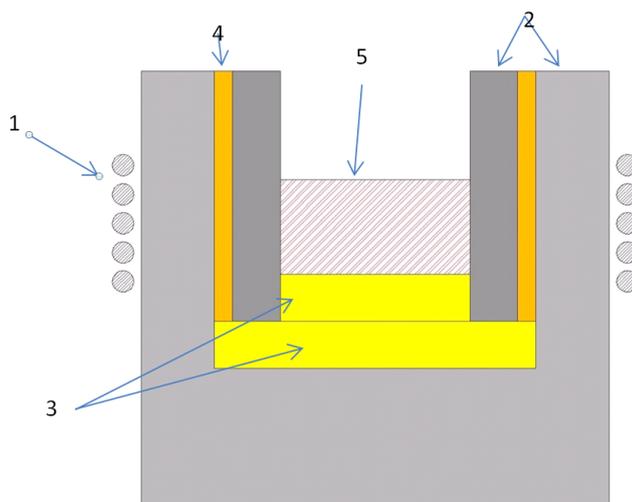
Рисунок 1. Внешний вид установки «ЛАВА-Б»

Экспериментальная установка состоит из двух основных блоков: электроплавильная печь (ЭПП) для плавления прототипа кориума, и устройство приема расплава (УПР), в которую сливается прототип кориума после полного расплавления.

Электроплавильная печь, индукционного типа, предназначена для плавления шихты различных композиций, состоящей из тугоплавких материалов, и слива расплава в экспериментальную секцию (ловушку расплава) УПР.

Устройство приема расплава установки «Лава-Б» изготовлено из нержавеющей стали и представляет собой цилиндрический сосуд с двумя эллиптическими днищами. Одно из этих днищ приварено к цилиндрической части сосуда, а другое соединяется с цилиндрической частью с помощью фланцевого соединения. Ось цилиндрической поверхности сосуда располагается горизонтально. На верхней части цилиндрической поверхности УПР находится горловина с диаметром проходного сечения 200 мм, на которую устанавливается электроплавильная печь.

Кориум, в состав которого входит диоксид урана, двуокись циркония, цирконий и сталь с общей массой до 60 кг, плавится в электроплавильной печи (ЭПП), а затем сливается в ловушку расплава, которая размещена в устройстве приема расплава (УПР). Для имитации остаточного энерговыделения в расплаве, применяется метод индукционного нагрева. Схема нагрева расплава с помощью индуктора приведена на рисунке 2.



1 – индуктор; 2 – бетон; 3 – двуокись циркония; 4 – песок; 5 – расплав кориума

Рисунок 2. Схема нагрева имитатора расплава

Полученная экспериментальная информация используется для выработки и принятия мер, направленных на обеспечение безопасной эксплуатации существующих и вновь создаваемых энергетических реакторных установок.

Целью экспериментов, проводимых на установке Лава-Б, является определение параметров, характеризующих взаимодействие расплава кориума с материалом подреакторной ловушки расплава.

2. ОПТИМИЗАЦИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПАРАМЕТРОВ СИСТЕМЫ «ИНДУКТОР-ЗАГРУЗКА»

Одним из способов повышения электрического КПД индуктора является подбор оптимальных электромагнитных и геометрических параметров в соответствии с теорией индукционных установок [1-3]. Для создания возможности оптимизации конструкции индуктора, необходимо рассмотреть степень влияния различных факторов на эффективность индукционного нагрева.

На величину электрического КПД значительное влияние оказывают частота переменного тока, геометрические размеры индуктора, материал индуктора и загрузки, напряжение, подаваемое на индуктор и т.д., поэтому при проектировании индукционной установки необходимо учитывать множество факторов, часто пересекающиеся между собой, что значительно усложняет получение установки индукционного нагрева высокой эффективности. Для оптимизации электромагнитных и геометрических параметров индуктора был проведен литературный обзор по устройству индукционных нагревательных установок и проблемах повышения их эффективности. Также были проведены некоторые оценочные расчеты для корректирования некоторых зависимостей в условия данной нам задачи.

Расчет параметров индуктора был проведен для различных вариантов индуктора и бетонной ловушки, которые отличаются следующими параметрами: числом витков, высотой индуктора, частотой источника питания, а так же напряжением на индукторе.

Одним из основных параметров, характеризующим режим работы индукционной установки является частота тока. Вне зависимости от конкретных целей экспериментов обязательной процедурой является поддержание расплава кориума при определенной температуре, что требует правильного подбора частоты и мощности источника. Для достижения этой цели необходимо знать значения удельной электропроводимости кориума и ее температурную зависи-

мость, которая может очень сильно зависеть от ее состава. Кроме того, при исследовании взаимодействия кориума с материалами конструктивных элементов реактора, ловушки расплава и тд. важно определять температурное поле расплава, которая является функцией в том числе и удельной электропроводности кориума.

При малых частотах происходит глубинный нагрев расплава. Глубина проникновения электромагнитных волн в расплав определяется частотой и удельным электрическим сопротивлением кориума. На рисунке 3 показана зависимость глубины проникновения тока в расплав кориума от частоты источника тока. Величина электропроводности является важным параметром, определяющей точность расчетов индукционного нагрева.

Удельное электрическое сопротивление кориума принималось равным 5×10^{-6} ом \times м [4].

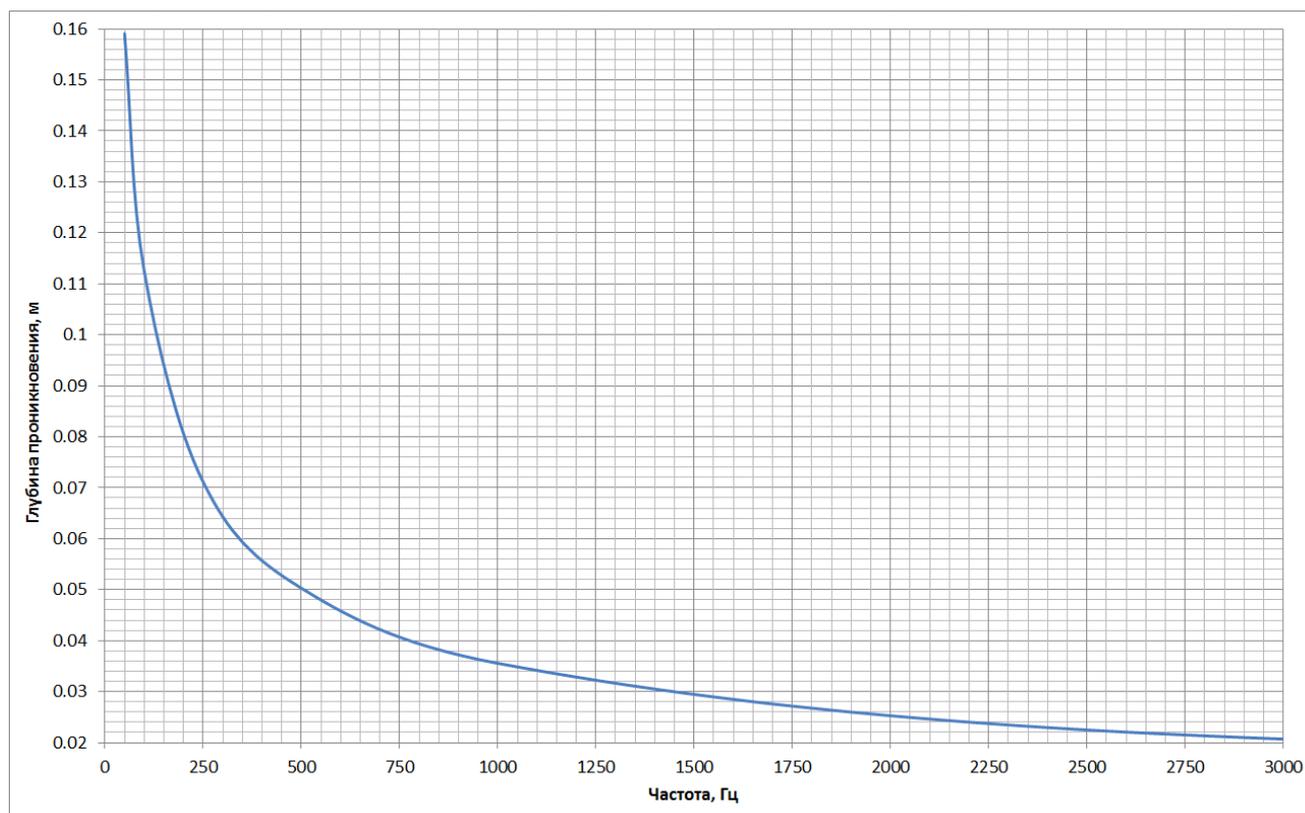


Рисунок 3. Зависимость глубины проникновения тока в расплав кориума от частоты источника тока.

Из рисунка 3 видно, что наиболее предпочтительная частота тока для нагрева расплава кориума, учитывающие геометрические параметры ловушки расплава из эксперимента, лежит в пределах 50-250 Гц. При этом диапазоне происходит сквозной нагрев расплава, тем самым обеспечивая прогрев расплава по всему объему. Однако, нагрев расплава токами низкой частоты требует использования генераторов большой мощности, а также увеличивается влияние некоторых параметров системы «индуктор-расплав» на общий КПД установки, что в свою очередь затрудняет использование низких частот.

В таблице 1 приведены результаты расчета параметров системы «индуктор-расплав» для различных вариантов индуктора, которые отличаются следующими параметрами: числом витков, высотой индуктора, частотой источника питания, а так же напряжением на индукторе. Расчет проводился на основе литературных источников [3,7].

Таблица 1. Параметры индукционной установки

Вариант №	I	II	III	IV	V	VI
Частота источника питания, Гц	50	250	1000	1000	2400	2400

Глубина проникновения тока в расплав, мм	159	71	36	36	23	23
Число витков, шт	12	12	10	8	10	8
Высота индуктора, м	0,45	0,45	0,4	0,32	0,4	0,32
Плотность тока, А/мм ²	16	15	13,65	18,72	10,49	14,82
Электрический КПД индуктора, %	8	28	41	42	44	44
Коэффициент мощности установки	0,075	0,045	0,032	0,036	0,021	0,024
Мощность, потребляемая от сети, кВт	181	157	118	138	109	114
Емкость конденсаторной батареи, мкФ	86000	4696	784	704	359	320
Общий КПД установки, %	3,4	15	30	20	35	32
Напряжение на индукторе, В	220	550	800	800	1000	1000
Расход воды (подогрев 40°), кг/с	0,919	0,559	0,24	0,362	0,097	0,156

Таблица 2. Параметры индукционной установки (продолжение)

Вариант №	I	II	III	IV
Частота источника питания, Гц	2400	2400	2400	2400
Глубина проникновения тока в расплав, мм	23	23	23	23
Число витков, шт	5	10	8	5
Высота индуктора, м	0,24	0,4	0,32	0,24
Плотность тока, А/мм ²	29,78	13,95	17,022	43
Электрический КПД индуктора, %	44	45	43	40
Коэффициент мощности установки	0,03	0,021	0,024	0,03
Мощность, потребляемая от сети, кВт	151	124	140	232
Емкость конденсаторной батареи, мкФ	223	197	176	121
Общий КПД установки, %	25	31	26	15
Напряжение на индукторе, В	1000	1350	1350	1350
Расход воды (подогрев 40°), кг/с	0,39	0,171	0,224	0,837

Данные таблицы 1 показывают, что при использовании частоты генератора 50 Гц будет наибольшая глубина проникновения тока в материал загрузки, но в тоже время, значения емкости компенсирующих конденсаторных батарей составляет 0,094 Ф. Это означает, что в цепи тока возникает большая реактивная мощность на компенсацию которой необходимо значительная емкость конденсаторов, что значительно выше имеющихся технологических возможностей. Также выбор этой частоты не рекомендуется вследствие крайне низкого значения электрического КПД индуктора.

При рассмотрении варианта с частотой 250 Гц, возникают схожие проблемы связанные с низким КПД и большими затратами на компенсации реактивной мощности.

Таким образом, для эффективного индукционного нагрева, в зависимости от технологических возможностей, рекомендуется использовать повышенные частоты источника тока от 1000 Гц и выше. При этом при выборе частоты источника тока выбор наименьшей средней частоты предпочтителен. На стенде «Ангара» имеется генератор, который выдает переменный ток частотой 2400 Гц.

На рисунке 4 представлена зависимость общего КПД установки от напряжения, подаваемого на индуктор, при частоте источника 2400 Гц для нескольких вариантов индуктора. Зависимость инд.1 соответствует варианту индуктора высотой 0,4 м. Зависимости инд.2 и инд.3 относятся к индукторам с высотой 0,32 м и 0,24 м соответственно. Для сравнения приведена зависимость инд.4, которая относится к модели индуктора из эксперимента.

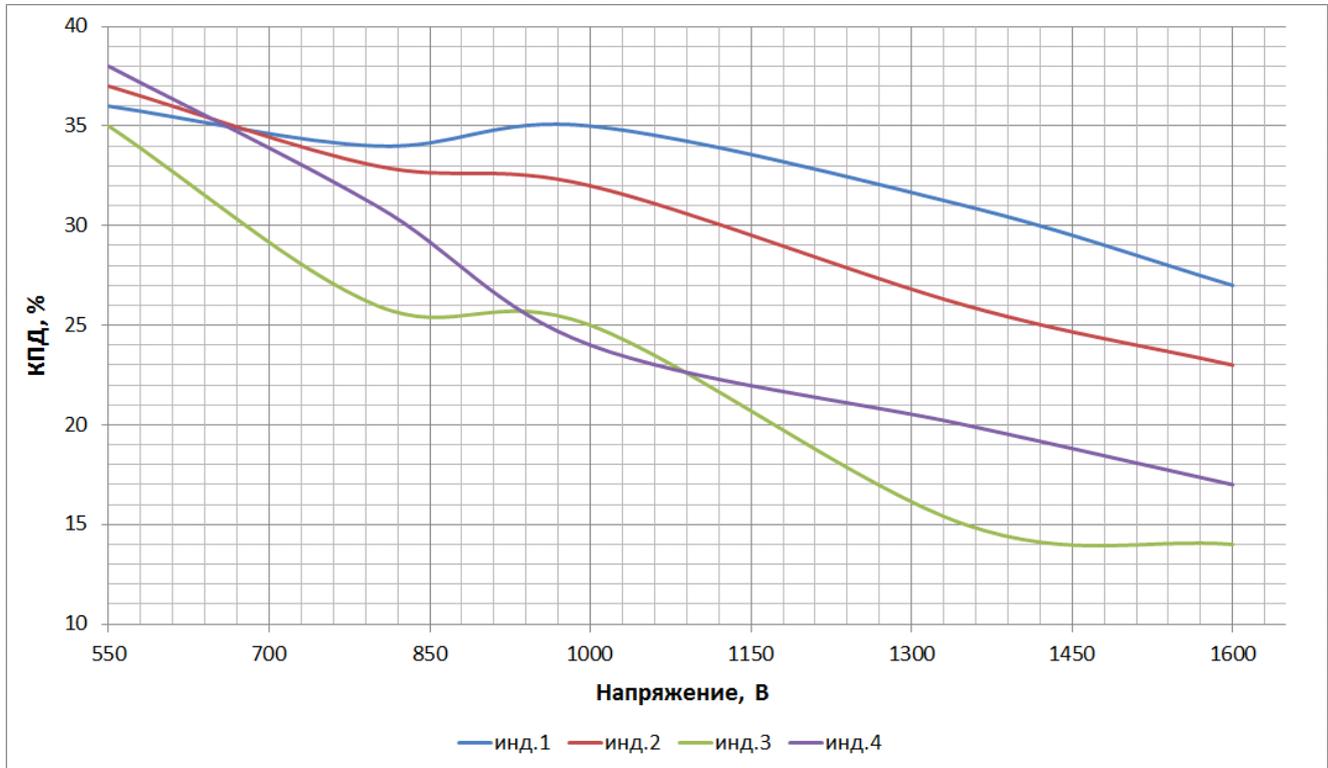


Рисунок 4. Зависимость КПД установки от напряжения индуктора

Из результатов, представленных в таблице 1 и 2, видно, что значения напряжения практически не влияют на электрический КПД индуктора, но оказывают значительное влияние на общий КПД установки. На рисунке 4 видно, что общий КПД установки уменьшается при увеличении напряжения индуктора. Также можно заметить, что индукторы с большей высотой относительно высоты корнума и количеством витков имеют больший КПД. Так для инд.1 с $\frac{h_1}{h_2} = 2,85$ коэффициент полезного действия равен 34 % при напряжении 800 В, а для инд.3 с $\frac{h_1}{h_2} = 1,71$ коэффициент полезного действия равен 26 % при напряжении 800 В. Отсюда следует, что выгоднее всего использовать более низкие напряжения и использовать индукторы с большим значением $\frac{h_1}{h_2}$ для более эффективного индукционного нагрева. Однако также необходимо учитывать реактивную мощность, возникающую в индукторе. Компенсация реактивной мощности существенно сужает технологические возможности эксперимента по причине ограниченного запаса емкости конденсаторных батарей.

Ограничением выбора напряжения и индуктора является зависимость величины емкости конденсаторных батарей, необходимые для компенсации реактивной мощности. На рисунке 5 показана зависимость величины емкости конденсаторных батарей от напряжения.

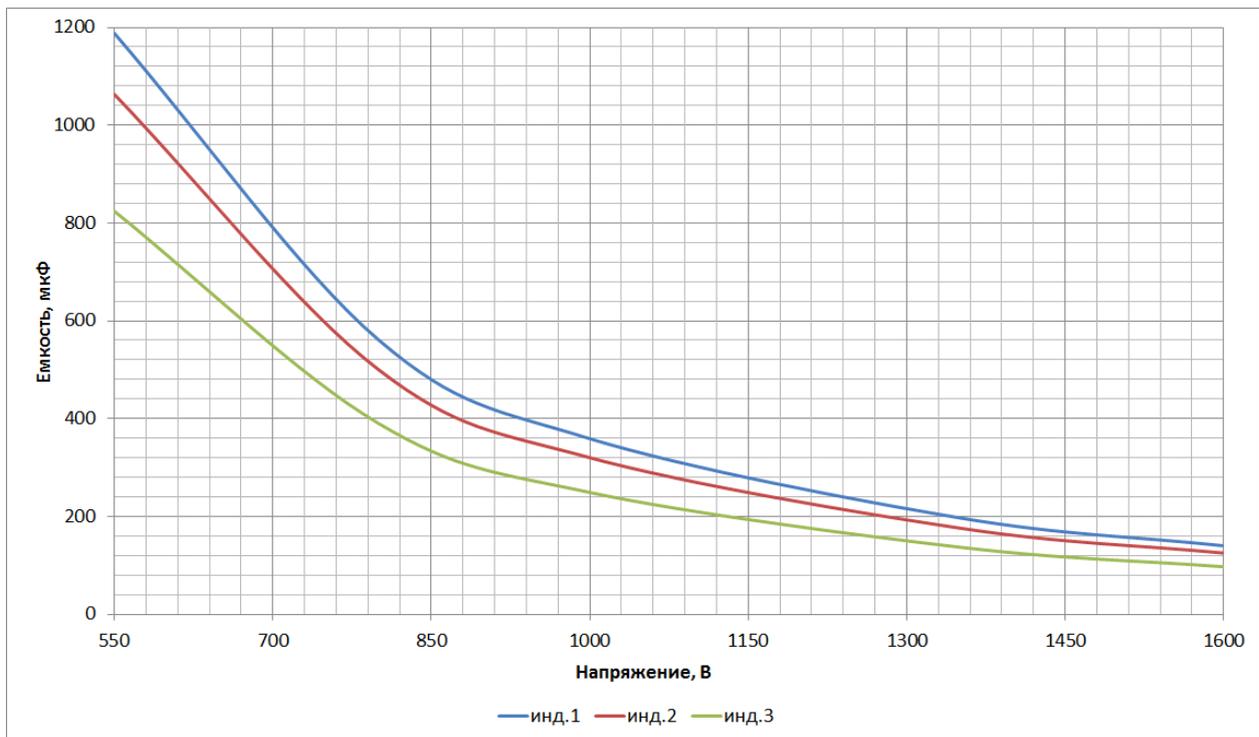


Рисунок 5. Зависимость емкости конденсаторов от напряжения индуктора

Из рисунка 5 видно, что с увеличением напряжения индуктора уменьшается емкость конденсаторов, необходимых для компенсации реактивной мощности. Допустимые, в рамках технологических возможностей, значения напряжений лежат в пределах выше 800-1000 В в зависимости от геометрических параметров индуктора. Также можно заметить, что индукторы с большей высотой относительно высоты корнума и количеством витков должны обладать большой емкостью конденсаторных батарей. Так для инд.1 с $\frac{h_1}{h_2} = 2,85$ емкость конденсаторных батарей равна 561 мкФ при напряжении 800 В, а для инд.3 с $\frac{h_1}{h_2} = 1,71$ емкость конденсаторных батарей равна 410 мкФ при напряжении 800 В.

Зачастую при проведении эксперимента необходимо, чтобы в расплаве выделялось определенное количество тепла. Удельная энергосодержание в расплаве зависит от множества факторов. Одним из этих факторов является электрический КПД индуктора. Электрический КПД индуктора зависит от множества параметров: отношение диаметров индуктора и расплава, относительная длина индуктора, относительный радиус загрузки и множество других факторов [2]. Так на рисунке 6 показана зависимость удельного энергосодержания от диаметра расплава ловушки. Индуктор имеет высоту равную 0,4 м с 10 витками. При изменении диаметра расплава происходит изменение вышеперечисленных величин от которых зависит КПД индуктора. Оптимально подобранные геометрические параметры ловушки и индуктора позволят увеличить эффективность индукционного нагрева. Таким образом, можно констатировать тот факт, что индукционный нагрев носит сложный характер, эффективность которого зависит от множества факторов, часто оказывающих влияние друг на друга.

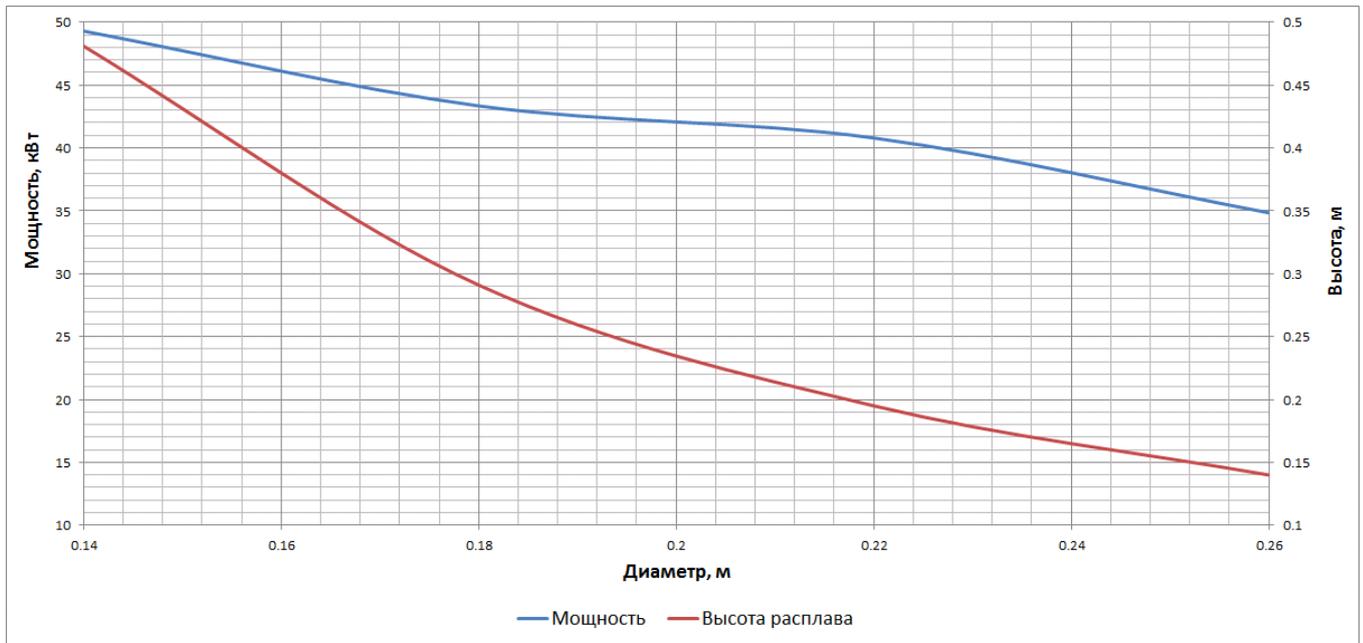


Рисунок 6. Зависимость мощности расплава от диаметра ловушки

Из графика, приведённого на рисунке 6 видно, что с уменьшением размера ловушки расплава в горизонтальном сечении ловушки увеличивается мощность, вкладываемая в расплав. Установлено, что влияние отношения диаметров индуктора и загрузки на эффективность нагрева можно исключить при $\frac{d_1}{d_2} = 1$. Однако подобное соотношение не соответствует большинству практических случаев, в силу наличия, технологического зазора или материалов бетонной ловушки в условиях нашей задачи. При увеличении отношения $\frac{d_1}{d_2}$ происходит увеличение реактивной мощности, что приводит к уменьшению $\cos\varphi$ системы «индуктор-загрузка». Влияние $\frac{d_1}{d_2}$ на эффективность индукционного нагрева крайне велико. Например, при увеличении $\frac{d_1}{d_2}$ от 1 до 2 значения $\cos\varphi$ уменьшается в 10÷15 раз. Рассмотрев данное свойство в условиях эксперимента, было установлено, что при увеличении $\frac{d_1}{d_2}$ от 1 до 2,47 значения $\cos\varphi$ уменьшается в 25÷30 раз.

Также, с уменьшением размера ловушки происходит снижение влияние распределения тока в загрузке. Ток становится более равномерным, что в свою очередь приводит к увеличению КПД установки.

На рисунке 6 также приведено изменение высоты расплава при уменьшении размера ловушки. Высота расплава должна учитываться при выборе геометрических параметрах индуктора, так как для эффективного индукционного нагрева необходимо, чтобы относительные длины, как индуктора, так и загрузки были оптимально подобраны.

Замечено, что эффективность установки возрастает прямо пропорционально относительной длине индуктора. На выбор этой величины большое влияние оказывают технологические условия эксперимента.

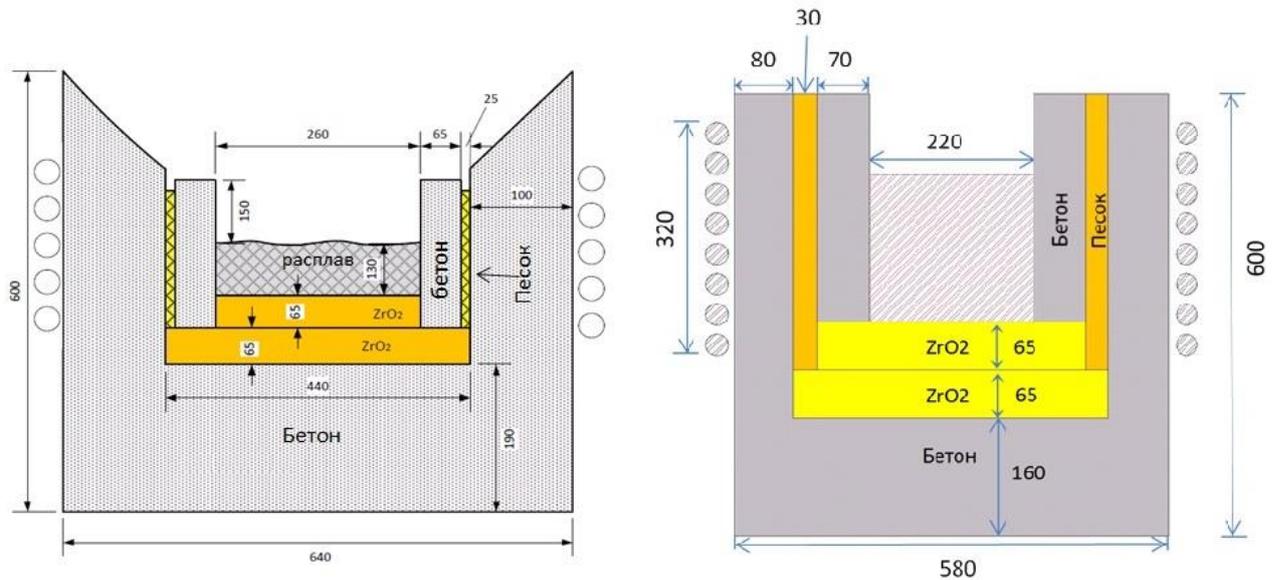
Коэффициент Нагаока k учитывает влияние относительной длины индуктора на КПД и $\cos\varphi$. При $k \rightarrow 1$ происходит увеличение КПД и $\cos\varphi$, поэтому при оптимизации параметров системы «индуктор-загрузка» рекомендуется подбирать параметры исходя из данной величины, согласующиеся с технологическими условиями эксперимента.

3. МОДЕЛИРОВАНИЕ ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА КОРИУМА ИСХОДНОЙ И ОПТИМИЗИРОВАННОЙ МОДЕЛИ ЛОВУШКИ РАСПЛАВА

3.1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Для моделирования теплообмена в бетонной ловушке была выбрана двумерная осесимметричная расчетная область ловушки. Геометрические параметры «индуктор-расплав» исходной модели принимались равными в соответствии с экспериментом. В процессе анализа параметров влияющих на эффективность индукционного нагрева была проведена оптимизация исходной модели, позволяющая повысить эффективность индукционного нагрева кориума. Оптимизация ловушки расплава и индуктора, основывалась на предположении о неизменности характеристик генератора тока и доступных емкостей конденсаторных батарей.

Конструкции исходной и оптимизированной моделей ловушек расплава представлены на рисунке 7.



а) б)

Рисунок 7. Ловушка приема расплава кориума

а) исходная модель; б) оптимизированная модель

Расчет электромагнитных параметров индуктора выполнялись на основе литературного источника [8]. Основные параметры исходной и оптимизированной модели представлены в таблице 2. Основные компоненты шихты и их процентное содержание в расплаве идентично условиям эксперимента.

Исследуемые модели были разработаны с учетом стального вкладыша, размещенного на дне бетонной ловушки. Разработка и расчет теплообмена расчетных моделей проводилась при помощи программного комплекса ANSYS. Расчетные области моделей бетонных ловушек представлены на рисунке 8.

Таблица 2 – Основные параметры

Параметр	Оптимизированная модель	Исходная модель
Высота ловушки	600	
Высота бетонного основания, мм	160	190
Толщина внешней бетонной оболочки, мм	80	100
Толщина слоя песка, мм	30	25
Толщина внутренней бетонной оболочки, мм	70	65
Высота циркониевых кирпичей, мм	65	
Диаметр камеры приема расплава, мм	220	260
Частота источника питания, Гц	2400	
Глубина проникновения тока в расплав, мм	23	
Высота индуктора, м	0,32	0,19
Число витков, шт	8	5
Диаметр трубки, м	0,03	
Толщина стенки трубки, мм	5	
Плотность тока, А/мм ²	13,66	24,63
Активная мощность, кВт	85	
Электрический КПД индуктора, %	43	36
Мощность, выделяемая в расплаве, кВт	37,4	33,15
Напряжение на индукторе, В	1000	1000
Емкость конденсаторной батареи, мкФ	320	268
Расход воды (подогрев 40°), кг/с	0,084	0,293
Общий КПД установки, %	32	23
Состав расплава в ловушке:		
диоксид урана (UO ₂), кг	33,0	
цирконий (Zr), кг	15,0	
диоксид циркония (ZrO ₂), кг	3,0	
стальной вкладыш, кг	9,0	

Особенностью оптимизированной модели является меньшее расстояние между индуктором и расплавом по сравнению с первоначальной моделью. Для снижения вероятности перегрева внешнего слоя бетонной ловушки, увеличена толщина внутренней бетонной стенки и слоя песка. Так как в модели уменьшился объем камеры приема расплава, то уровень, на который поднимется шихта, будет немного выше, чем в первоначальной модели, поэтому необходимо увеличить высоту индуктора для обеспечения эффективного нагрева. Увеличение размера индуктора и количества витков приводит к снижению влияния концевых эффектов и относительного размера индуктора на эффективность индукционного нагрева.

Отношение высот индуктора и расплава оптимизированной модели выше, чем в исходной модели. Эта особенность также положительно влияет на КПД. Большое количество витков позволяет снизить среднюю плотность тока в индукторе, что наряду с использованием меньшего напряжения тока позволяет снизить требуемый расход воды на охлаждение индуктора. В оптимизированной модели отношение d_1/d_2 больше чем в исходной модели, что приводит к уменьшению показателя коэффициента мощности. Это означает, что в оптимизированной модели повышается реактивная мощность индуктора. Отсюда следует, что в оптимизированной модели необходимо более высокое значение емкостей конденсаторных батарей для компенсации потерь активной мощности. На установке имеются 10 конденсаторов емкостью 36,5 мкФ каждый. При напряжении на индукторе до 2000 В конденсаторы в схему включаются по две штуки

последовательно, так как они рассчитаны на напряжение до 1000 В. Ёмкость двух последовательно включенных конденсаторов будет равна 18,25 мкФ. Таким образом, максимальное значение ёмкости 10 конденсаторов при напряжении до 1000 В будет равно 365 мкФ, а при напряжении выше 1000 до 2000 В – 91,25 мкФ.

Эти изменения в конструкции позволяют увеличить КПД индуктора и установки на 7 % и 9 % относительно значений КПД исходной модели. Повышение КПД индуктора позволяет увеличить удельную мощность расплава, что позволяет повысить среднюю температуру кориума в процессе индукционного нагрева, тем самым, давая возможность исследовать взаимодействие кориума с жаропрочными материалами при более высоких температурах.

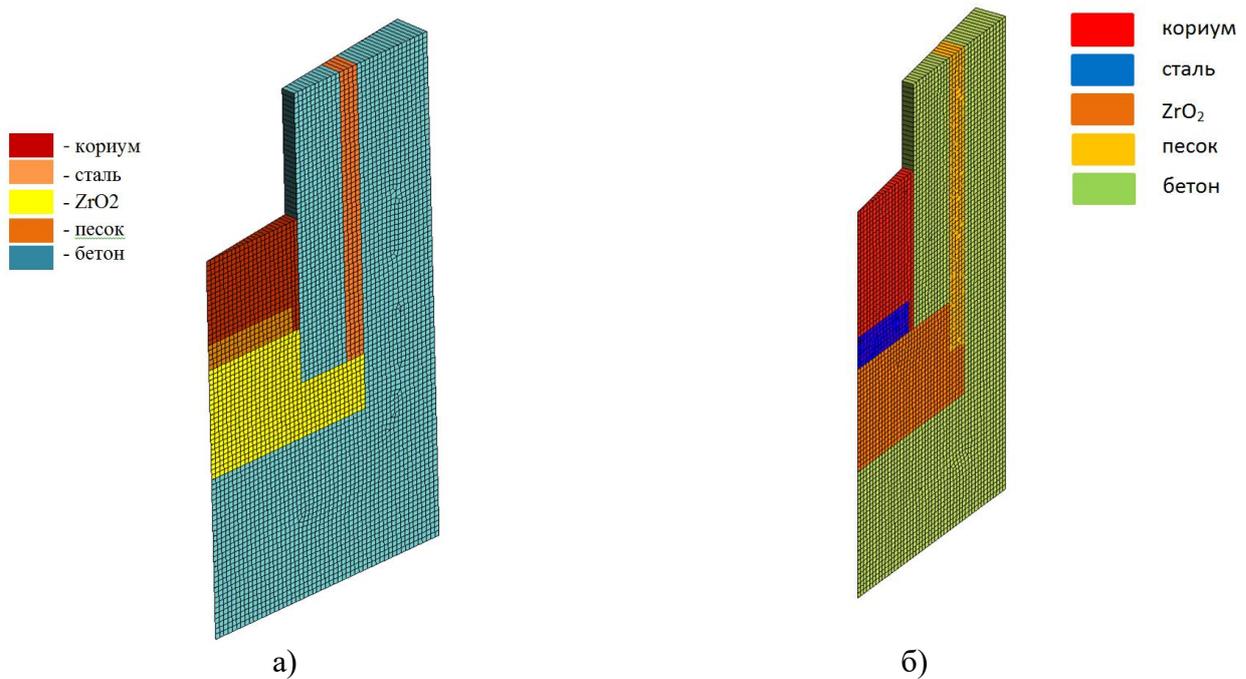


Рисунок 8. Конечно-элементная сетка расчетной модели
а) исходная модель; б) оптимизированная модель

Ввиду того, что в данной задаче имеет место теплообмен с сильно изменяющимися теплофизическими свойствами материалов, необходимо для расчета теплообмена учитывать изменение свойств материалов бетонной ловушки от температуры. Изменение свойств материалов бетонной ловушки путем ввода в программу некоторых эмпирических зависимостей [5-6].

Для проведения нестационарного расчета взята диаграмма мощности индуктора из эксперимента. Мощность задавалась с учетом КПД индуктора, а также поверхностного эффекта проникновения вглубь материалов проводящей среды.

Начальная температура кориума принималась равным 2776 К. Определение теплофизических параметров кориума выполнялись на основе литературного источника [8]. Результаты расчетов представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Теплофизические параметры кориума

Температура, К	Теплопроводность, Вт/(м·К)	Плотность, кг/м ³
373	12,63	5451
573	11,66	5420
773	11,67	5387
1073	12,23	5342
1273	13,5	5299

1573	14,6	5243
------	------	------

Мощность, выделяемая в загрузке, задавалась в зависимости от КПД индуктора и компенсированного значения коэффициента мощности. В расчетной модели учитывается теплообмен излучением между поверхностями бетонной ловушки, а так же конвективный теплообмен между внешними поверхностями модели и окружающей средой. Температура окружающей среды принималась равной 300 К.

Контрольные точки к.т.1, к.т.2, к.т.3, к.т.5, к.т.6 сравниваются с показаниями термопар в эксперименте. Расположение контрольных точек в ловушке расплава представлено на рисунке 9.

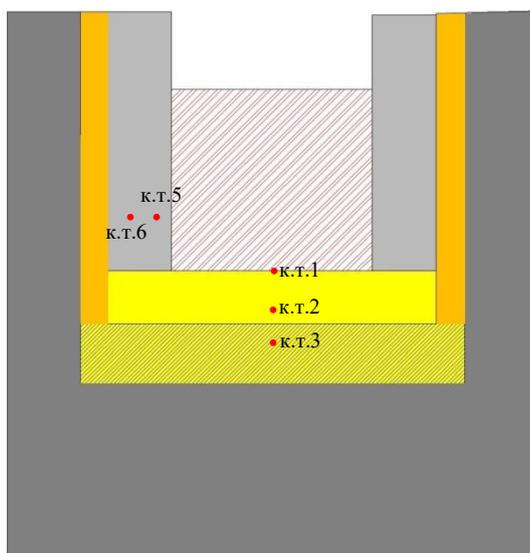


Рисунок 9. Контрольные точки измерения температур

3.2 РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

На рисунке 10 приведено сравнение расчетных значений температуры огнеупорных блоков в контрольных точках исходной и оптимизированной модели с показаниями термопар в эксперименте. Под индексом «м» – приводятся точки оптимизированной модели.

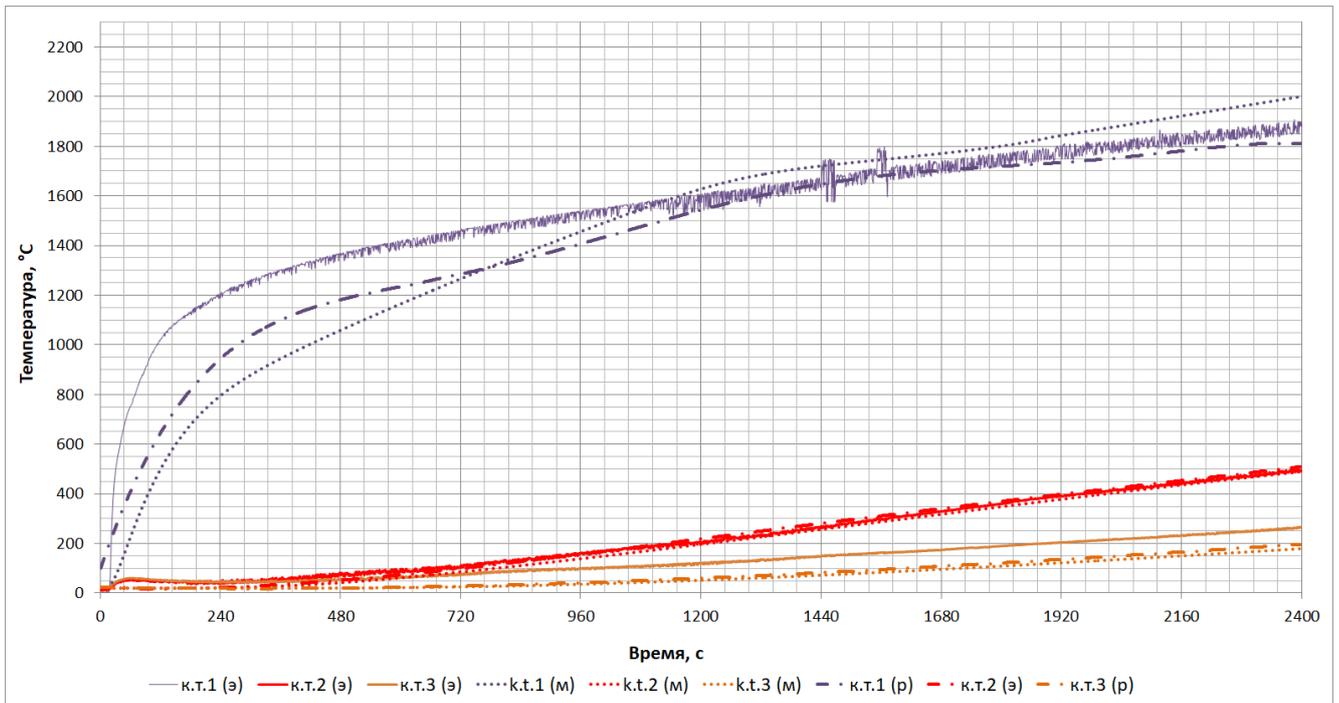


Рисунок 10. Значения температуры в контрольных точках

Незначительные отклонения расчетных значений в контрольных точках огнеупорных материалов объясняются:

- 1) Небольшая интенсивность теплового потока во внутренние слои расплава вследствие низкого коэффициента теплопроводности кориума.
- 2) Относительно низкая интенсивность процесса теплообмена на границе «кориум - ZrO_2 » во внутренней части ловушки вследствие низкого коэффициента теплопроводности ZrO_2 и кориума. Поэтому в течение некоторого промежутка времени отклонения значений для двух моделей не существенны
- 3) Наличие стального вкладыша на дне бетонной ловушки в обеих моделях. На нагрев и последующее плавление затрачивается определенное количество энергии, передаваемое от расплава кориума. Поэтому до полного расплавления стального сердечника процесс теплообмена между расплавом и жаропрочным материалом замедляется.

На рисунке 11 приведено сравнение расчетных значений температуры боковой стенки ловушки в контрольных точках исходной и оптимизированной модели с показаниями термопар в эксперименте. Под индексом «м» – приводится точки оптимизированной модели.

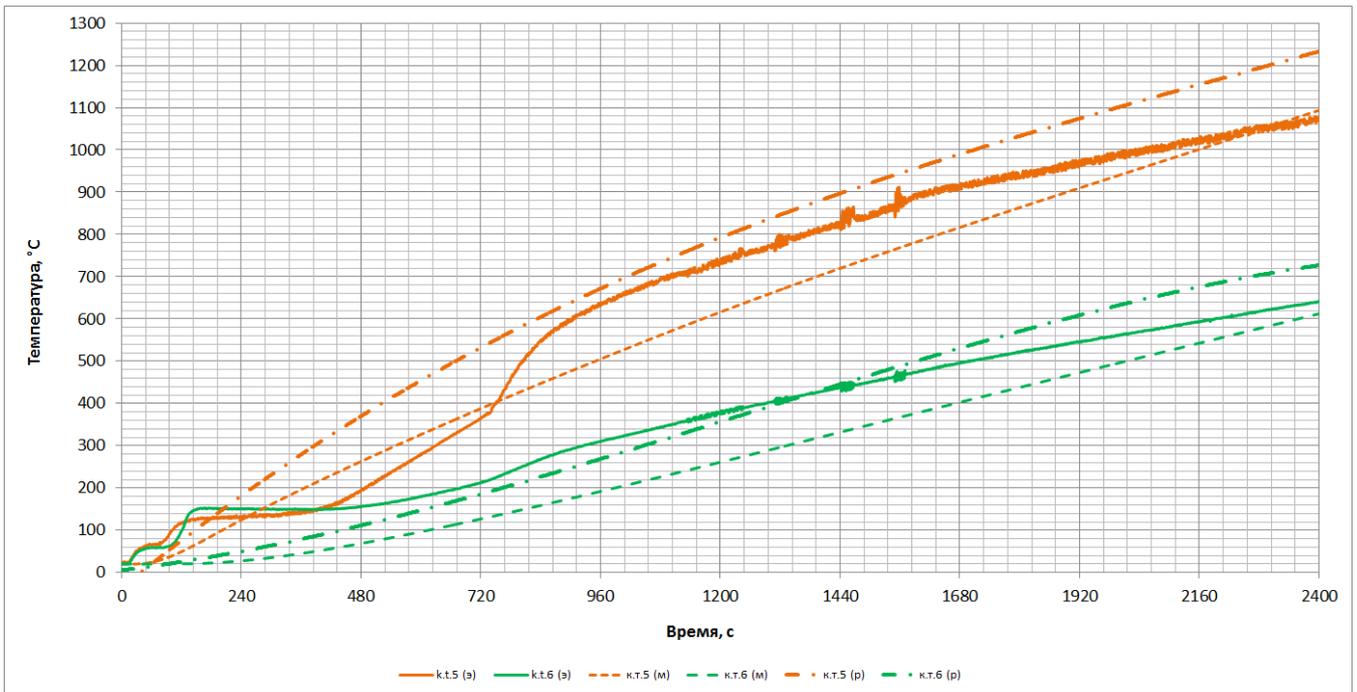
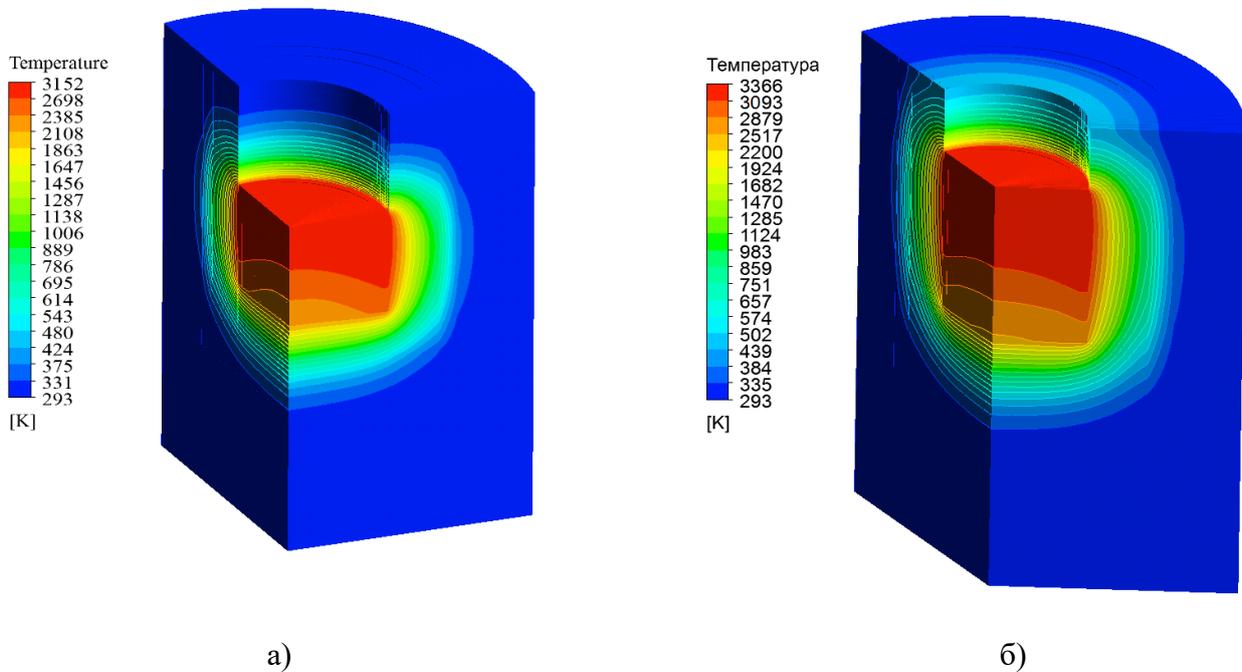


Рисунок 11. Значения температуры в контрольных точках

На рисунке видно, что максимальные температуры боковой стенки ловушки оптимизированной модели ниже, чем в исходной модели. Это связано с изменившейся геометрией камеры приема расплава. Из рисунка 11 можно сделать вывод, что уменьшение диаметра ловушки наряду с оптимизацией индуктора приводит к более равномерному нагреву расплава в ловушке, тем самым снижая температурную напряженность на поверхности материала бетонной ловушки (рисунок 12).



а) исходная модель; б) оптимизированная модель

Рисунок 12. Температурные поле модели ловушки расплава

Из рисунка 12 видно, что средняя температура расплава в оптимизированной модели выше по сравнению с исходной моделью. Это связано с уменьшением диаметра камеры приема расплава, что привело к повышению уровня, на который поднимется расплав после его слива. Таким образом, увеличивается боковая поверхность соприкосновения расплава с боковой стенкой ловушки, которая позволяет уменьшить влияние поверхностного эффекта на индукционный нагрев. В итоге происходит увеличение общей поверхности нагрева, что приводит к более равномерному прогреву всего расплава и увеличению средней температуры расплава.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения работы по данной теме получены следующие результаты:

- определена зависимость работы и мощности индуктора от конструкции ловушки, емкости конденсаторных батарей, подаваемого напряжения и т.д.;
- разработана теплофизическая модель ловушки расплава установки «Лава-Б», соответствующей эксперименту;
- проведена валидация расчетной модели путем сравнения расчетных значений температуры с экспериментальными значениями;
- разработана теплофизическая модель оптимизированной ловушки расплава установки «Лава-Б»;
- выполнено моделирование индукционного нагрева оптимизированной модели и произвести сравнение расчетных значений с исходной моделью.

В процессе анализа параметров, влияющих на эффективность индукционного нагрева, установлено:

1) При малых частотах происходит глубинный нагрев расплава. Глубина проникновения электромагнитных волн в расплав определяется частотой и удельным электрическим сопротивлением кориума. Использование низких частот к появлению большим значениям реактивной мощности в системе на компенсацию которой необходимо значительные затраты.

Так использование частоты 2400 Гц понижает реактивные потери в системе относительно низких частот, но при нагреве расплава преобладает поверхностный эффект, что приводит к выделению большей части тепла на некотором поверхностном слое. Учитывая низкий коэффициент теплопроводности кориума возникает ситуация при которой максимальные температуры наблюдаются на поверхности расплава. Это приводит к снижению эффективности имитации остаточного энерговыделения, так как в действительности тепло выделяется по всему объему расплава в случае образования расплава кориума во время тяжелой аварии на АЭС;

2) Значения напряжения практически не влияют на электрический КПД индуктора, но оказывают значительное влияние на общий КПД установки. Общий КПД установки уменьшается при увеличении напряжения индуктора;

3) Индукторы с большей высотой по отношению к расплаву и количеством витков имеют больший КПД;

4) При увеличении напряжения индуктора и частоты тока уменьшается емкость конденсаторов, необходимых для компенсации реактивной мощности.

5) Электрический КПД индуктора зависит от множества параметров: отношение диаметров индуктора и расплава, относительная длина индуктора, относительный радиус загрузки и множество других факторов

В результате анализа параметров, влияющих на эффективность индукционного нагрева, была проведена оптимизация модели бетонной ловушки и индуктора. В результате оптимизации модели КПД индуктора и установки повысились на 8 % и 9 % соответственно. При моделировании индукционного нагрева и сравнении температур в контрольных точках с исходной моделью получились следующие результаты:

- 1) Температуры в контрольных точках огнеупорного материала оптимизированной модели практически не отличаются от значений температуры в контрольных точках исходной модели;
- 2) Максимальные температуры боковой стенки ловушки оптимизированной модели ниже, чем в исходной модели;
- 3) Температурное поле оптимизированной модели более равномерно по сравнению с исходной моделью;
- 4) Средняя температура расплава оптимизированной модели, выше чем в исходной модели.

В заключение работы можно сделать вывод, что оптимизация геометрических параметров индуктора и ловушки при неизменности характеристик подаваемого электрического тока не дает существенного увеличения эффективности индукционного нагрева. Это связано в первую очередь с ограниченностью технологических возможностей установки «Лава-Б».

Для существенного повышения эффективности индукционного нагрева кориума при имитации остаточного энерговыделения необходимо проведение полной модернизации установки, начиная от оптимизации геометрических параметров ловушки и индуктора, до замены характеристик источника тока, конденсаторных батарей, индуктора и других систем, обеспечивающих работоспособность установки.

Также можно отметить, что для повышения точности расчетов по взаимодействию кориума с различными материалами необходимо проведение исследование теплофизических свойств и электромагнитных свойств кориума: теплопроводности, теплоемкости и электропроводимости.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Злотников И.И., Захаров И.В. Повышение эффективности работы устройств для индукционного нагрева // Электротехника и энергетика. – 2015. – С.53-59.
2. Захаров И.В. Анализ факторов, воздействующих на реактивную мощность цилиндрической системы «индуктор-загрузка» // Наука и техника Казахстана. – 2001. – Вып.2. – С.165-173
3. Л.И.Иванова, Л.С.Грובה, Б.А.Сокунов, С.Ф.Сарапулов Индукционные тигельные печи: Учебное пособие. 2-е изд., перераб. и доп. // Екатеринбург: Изд-во УГТУ - УПИ, 2002. 87 с.
4. Позняк И. В., Шатунов А. Н., Печенков А. Ю. Измерение электропроводности расплава кориума // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». – 2008. – Вып.10. – С.39-45
5. Чиркин В.С., «Теплофизические свойства материалов ядерной техники», М.:АТОМИЗДАТ, 1968 г.
6. Ю.Е.Шелудяк, Л.Я.Кашпоров Теплофизические свойства компонентов горючих систем. Справочник. Москва 1992г
7. «Электро – термическое оборудование», справочник под общей редакцией Альтгаузена А.П., М.: Энергия, 1980 г.
8. Михеев М. А. Основы теплопередачи / М. А. Михеев, И. М. Михеева. – М. : «Энергия», 1977.