

УДК 621.039.587

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

^{1,2)} Толеубеков К.О., ²⁾ Акаев А.С., ²⁾ Бекмулдин М.К.¹⁾ Государственный университет им. Шакарима, Семей, Казахстан²⁾ Филиал «Институт атомной энергии» РГП НЯЦ РК, Курчатов, Казахстан

E-mail: toleubekov@nnc.kz

Одной из особенностей кориума является наличие остаточного энерговыделения. В качестве метода физического моделирования остаточного тепловыделения на установке ЛАВА-Б применяется метод индукционного нагрева. Статья посвящена индукционному нагреву кориума при проведении экспериментальных исследований его взаимодействия с жаростойкими материалами на установке Лава-Б. В статье представлены результаты анализа параметров, влияющих на эффективность системы индукционного нагрева, и определены оптимальные условия для увеличения мощности и эффективности имитации остаточного энерговыделения. В результате проделанной работы сделаны выводы об необходимых условиях повышения энерговыделения в кориуме и эффективности индукционного нагрева как метода физического моделирования остаточного энерговыделения в кориуме.

Ключевые слова: кориум, индуктор, индукционный нагрев, остаточное энерговыделение, оптимизация.

ВВЕДЕНИЕ

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 конструктивных элементов ядерного реактора, в случае тяжелой аварии с расплавлением активной зоны и проплавлением корпуса реактора [1].

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 конструктивных 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 в бетонной ловушке. В качестве метода физического моделирования остаточного тепловыделения на установке ЛАВА-Б применяется метод индукционного нагрева, заключающийся в бесконтактном нагреве электропроводящих материалов токами высокой частоты и большой величины.

Явным преимуществом индукционного нагрева кориума является бесконтактный способ передачи энергии в расплав. Если удастся разработать специальный комплекс мер, обеспечивающих достаточную равномерность и высокое энерговыделение, то

данный вид нагрева будет являться более предпочтительным в сравнении с другими способами имитации остаточного энерговыделения.

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

Таким образом, данная работа посвящена анализу факторов, влияющих на эффективность системы индукционного нагрева при имитации остаточного энерговыделения в кориуме при взаимодействии с жаропрочными материалами.

ОПТИМИЗАЦИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПАРАМЕТРОВ ИНДУКЦИОННОЙ СИСТЕМЫ НАГРЕВА

Одним из способов повышения электрического КПД индуктора является подбор оптимальных электромагнитных и геометрических параметров в соответствии с теорией индукционных установок [2–4]. 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 на-

грева 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 оценочные расчеты для корректирования некоторых зависимостей в условия данной нам задачи.

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. Внешний вид экспериментальной установки ЛАВА-Б представлен на рисунке 1.



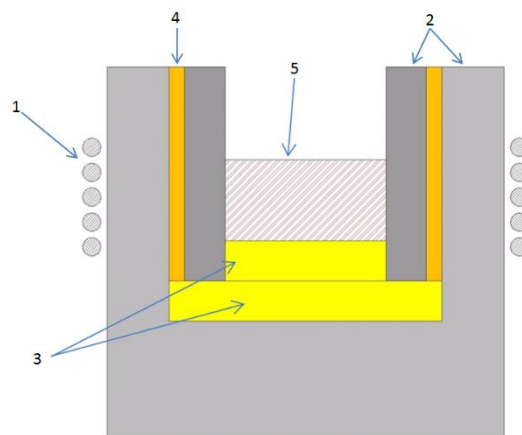
Рисунок 1. Внешний вид установки «ЛАВА-Б»

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.

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 работу индукционной установки является час-

тота тока, определяющая глубину проникновения электромагнитной волны в материал загрузки, то есть так называемый скин-эффект, в котором выделяется от 70 до 85% тепла от общего тепловыделения.



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

Рисунок 2. Схема нагрева имитатора расплава

Как видно из рисунка 3, по мере увеличения частоты тока происходит уменьшение глубины проникновения тока в расплав. То есть, с точки зрения имитации остаточного энерговыделения для ее приближения к реальному процессу, выгоднее всего использовать низкие частоты для сквозного нагрева расплава, однако существует ряд негативных моментов, которые исключают возможность использования низких частот.

Так, на рисунке 4 мы видим, что при использовании низких частот тока отмечаются низкие значения КПД, возрастающие по мере увеличения частоты тока, а также высокой реактивной мощности, возникающей в индукторе, компенсация которой производится конденсаторами значительной емкости. На графике видно, что приемлемые значения КПД и емкости конденсаторных батарей, требуемых для компенсации реактивной мощности, начинаются при использовании средних частот.

В таблице приведены результаты расчета параметров индукционной системы для трех различных вариантов индуктора, которые отличаются следующими параметрами: числом витков и высотой индуктора, а так же напряжением на индукторе. В качестве основной частоты тока рассматривалось значение 2400 Гц. Расчет проводился на основе литературных источников [4–7].

Согласно таблице, увеличение напряжения тока индуктора не приводит к существенному изменению КПД индуктора, однако можно заметить, что КПД индукторов с большей высотой и количеством витков незначительно выше, чем у индукторов меньших размеров.

Также данные таблицы показывают, что КПД всей индукционной установки чувствителен к изме-

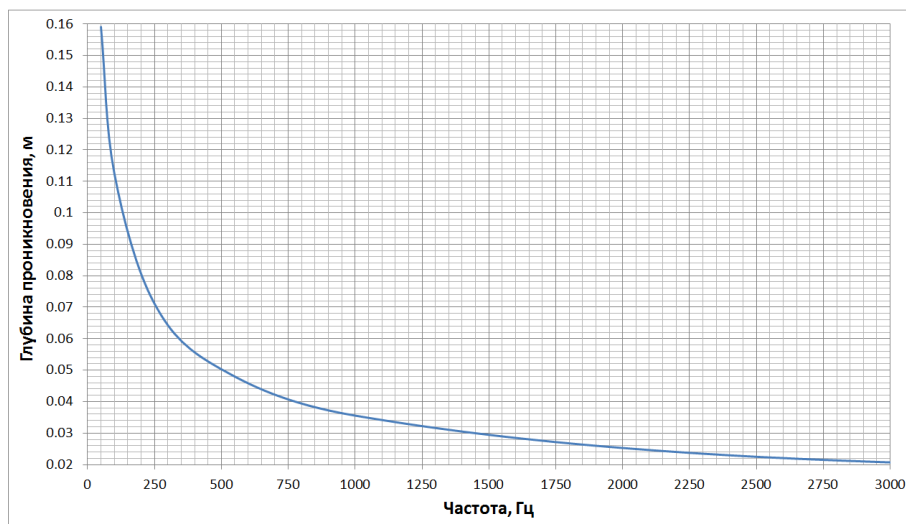


Рисунок 3. Зависимость глубины проникновения тока в расплав кориума от частоты источника тока

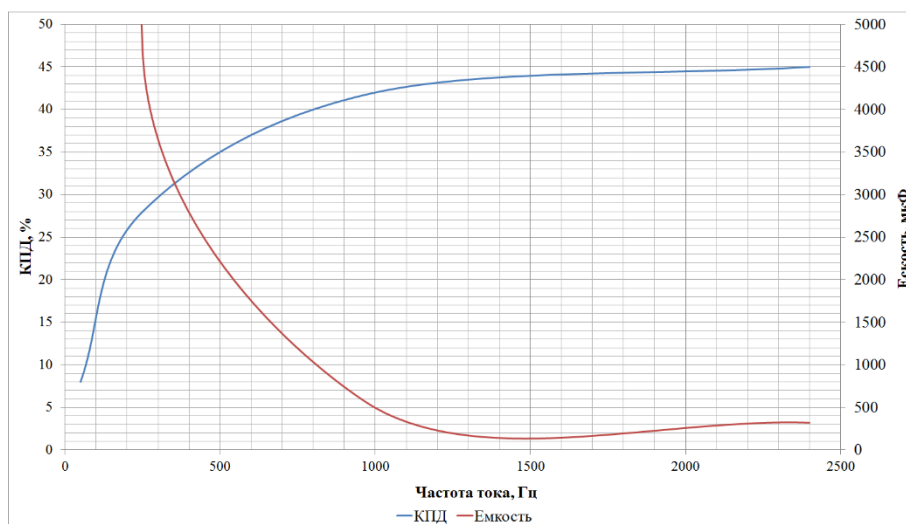


Рисунок 4. Зависимость КПД индуктора и емкости конденсаторов от частоты источника тока

Таблица. Параметры индукционной установки

Параметр	I	II	III	IV	V	VI
Частота источника питания, Гц	2400	2400	2400	2400	2400	2400
Глубина проникновения тока в расплав, мм	23	23	23	23	23	23
Число витков, шт.	10	8	5	10	8	5
Высота индуктора, м	0,4	0,32	0,24	0,4	0,32	0,24
Электрический КПД индуктора, %	46	44	43	45	43	40
Емкость конденсаторной батареи, мкФ	315	282	223	173	154	121
Общий КПД установки, %	35	32	25	31	26	15
Напряжение на индукторе, В	1000	1000	1000	1350	1350	1350

нению напряжения тока. Так, на рисунке 5 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 с 10 витками. Зависимости инд.2 и инд.3 относятся к индукторам с высотой 0,32 м и 0,24 м соответственно.

На рисунке 5 видно, что общий КПД установки уменьшается при увеличении напряжения индуктора. Также можно заметить, что индукторы с большей высотой и количеством витков имеют больший КПД, следовательно, выгоднее всего использовать более низкие напряжения и использовать индукторы с большей высотой и количеством витков для более эффективного индукционного нагрева. Однако также

необходимо учитывать реактивную мощность, возникающую в индукторе. Компенсация реактивной мощности осуществляется использованием специальных компенсирующих конденсаторных батарей. На рисунке 6 показана зависимость величины требуемой емкости конденсаторных батарей от напряжения тока.

Из рисунка 6 видна обратная ситуация. При увеличении напряжения индуктора уменьшается емкость конденсаторов, необходимых для компенсации реактивной мощности. Следовательно, выгоднее всего использовать более высокие напряжения и использовать индукторы с меньшей высотой и количеством витков для снижения реактивной мощности в цепи, так как индукторы с большей высотой и количеством витков должны обладать большой емкостью конденсаторных батарей по сравнению с индукторами меньших геометрических параметров.

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, и других факторов [2].

Согласно теории индукционных установок, индуктор по возможности необходимо располагать как можно ближе к заготовке, что приводит к увеличению КПД индуктора, за счет уменьшения рассеивания магнитного поля. Однако подобное соотношение не соответствует большинству практических случаев, в силу наличия, технологического зазора или материалов бетонной ловушки в условиях нашей задачи.

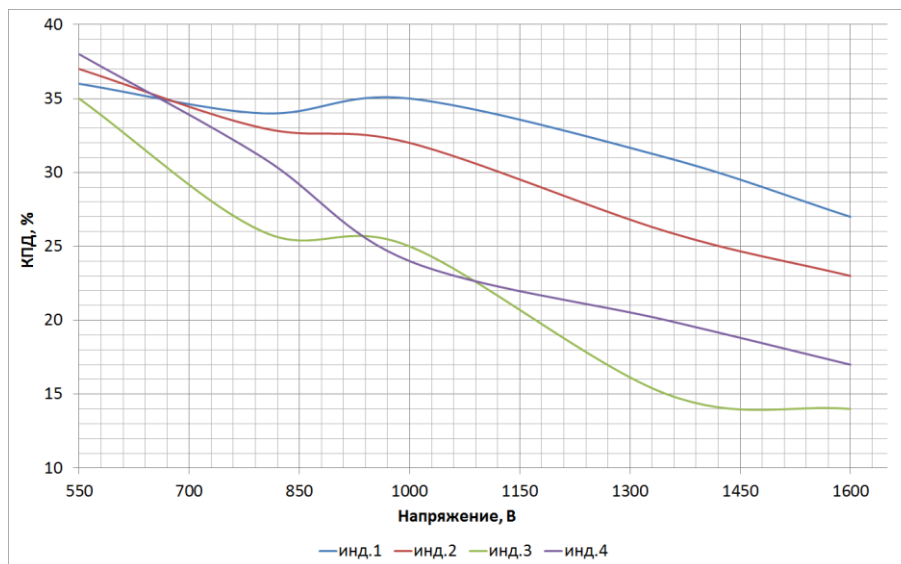


Рисунок 5. Зависимость КПД установки от напряжения индуктора

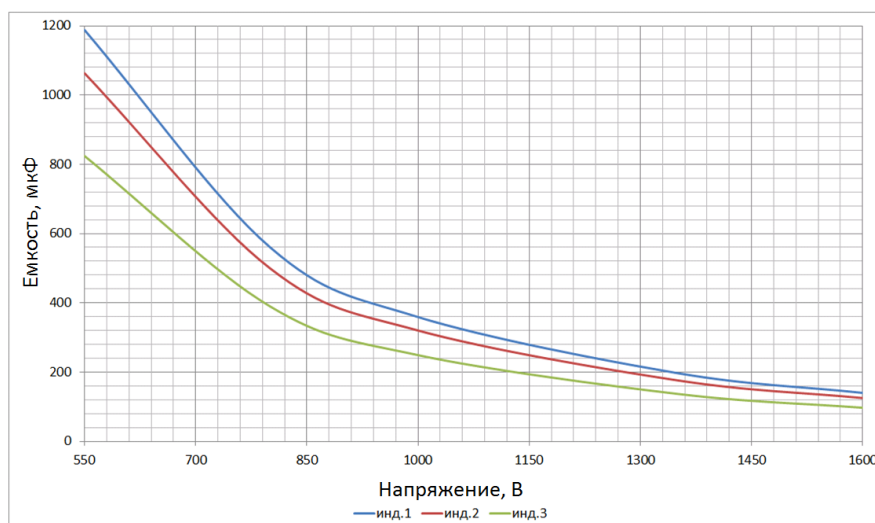


Рисунок 6. Зависимость емкости конденсаторов от напряжения индуктора

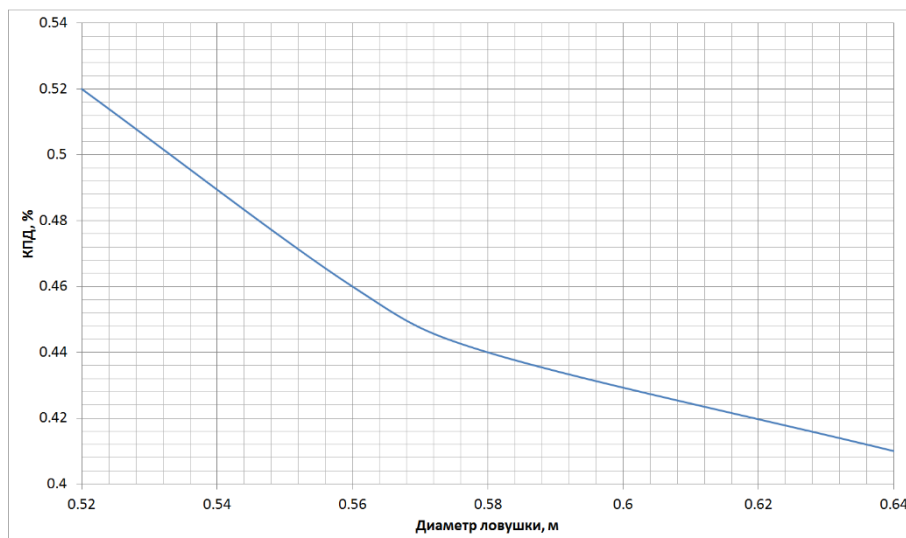


Рисунок 7. Зависимость КПД индуктора от диаметра ловушки

Так, на рисунке 7 показана зависимость КПД индуктора от диаметра расплава ловушки. Индуктор с 10 витками имеет высоту 0,4 м. Можно заметить, что при уменьшении диаметра ловушки, т. е. расстояния между индуктором и расплавом, происходит увеличение КПД индуктора и, следовательно, энерговыделение в расплаве.

Оптимально подобранные геометрические параметры ловушки и индуктора позволят увеличить эффективность индукционного нагрева. Можно констатировать тот факт, что индукционный нагрев носит сложный характер, эффективность которого зависит от множества факторов, часто оказывающих влияние друг на друга.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В процессе работы выполнен анализ параметров, влияющих на эффективность системы индукционного нагрева для имитации остаточного энерговыделения в кориуме при взаимодействии с жаропрочными материалами.

Выполнен расчет параметров системы «индуктор-расплав» для различных вариантов индуктора, которые отличаются следующими параметрами: числом витков, высотой индуктора, а так же напряжением на индукторе. В результате расчета можно сделать следующие выводы:

- при использовании низких частот будет наибольшая глубина проникновения тока в материал загрузки. Это свойство обеспечит прогрев расплава по всему объему, с точки зрения имитации остаточного энерговыделения, использование данных частот более приемлемо, однако использование данной частоты отличает низкий КПД и высокие значения реактивной мощности индуктора, на компенсацию которых требуются конденсаторные батареи большей емкости. Эти значения емкости батарей значительно выше имеющихся технологических возможностей,

поэтому наиболее оптимальной частотой источника тока являются средние частоты;

- увеличение напряжения тока в индукторе приводит к незначительному уменьшению электрического КПД индуктора, и довольно таки значительно снижению общего КПД установки. Также можно отметить, что при увеличении высоты индуктора и количества витков происходит увеличение КПД индуктора;

- с увеличением напряжения тока индуктора уменьшается емкость конденсаторов, необходимых для компенсации реактивной мощности. Замечено, увеличение высоты индуктора и количества витков приводит к увеличению реактивной мощности, что соответственно приводит к необходимости использования конденсаторов большей емкости;

- с уменьшением расстояния между расплавом и индуктором увеличивается мощность, вкладываемая в расплав, вследствие повышения КПД индуктора.

Таким образом, для увеличения энерговыделения в расплаве и повышения эффективности индукционного нагрева как метода имитации остаточного энерговыделения в кориуме необходимо:

- 1) Изготовить ловушку расплава с минимально возможным диаметром камеры приема расплава. Увеличение диаметра камеры приема расплава, наряду с поверхностным эффектом проникновения вглубь материалов проводящей среды, приведет к тому, что вся энергия в расплаве будет выделяться на боковой поверхности расплава, что не соответствует самой сути имитации остаточного энерговыделения;
- 2) Уменьшить расстояние между индуктором и расплавом. Увеличение расстояния между нагреваемым элементом и индуктором приводит к уменьшению эффективности энерговыделения в расплаве;
- 3) Использовать индуктор, высота которого превышает высоту расплава.

Таким образом, представленный выше анализ позволяет сделать вывод о возможности использования и повышения эффективности индукционного нагрева

как метода имитации остаточного энерговыделения в корииуме только за счет оптимизации геометрических параметров индуктора и бетонной ловушки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Самойлов О.Б., Усынин Г.Б., Бахметьев А.М. Безопасность ядерных энергетических установок. – М.: Энергоатомиздат, 1989.
2. Злотников И.И., Захаров И.В. Повышение эффективности работы устройств для индукционного нагрева // Электротехника и энергетика. – 2015. – С. 53–59.
3. Захаров И.В. Анализ факторов, воздействующих на реактивную мощность цилиндрической системы «индуктор-загрузка» // Наука и техника Казахстана. – 2001. – Вып. 2. – С. 165–173
4. Л.И. Иванова, Л.С. Грובהва, 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.
5. Михеев М.А. Основы теплопередачи / М.А. Михеев, И.М. Михеева. – М.: Энергия, 1977.
6. Ю.Е. Шелудяк, Л.Я. Кашпоров Теплофизические свойства компонентов горючих систем. Справочник. Москва, 1992.
7. Чиркин В.С. Теплофизические свойства материалов ядерной техники, М.: Атомиздат, 1968.

ҚЫЗУҒА ТӨЗІМДІ МАТЕРИАЛДАРМЕН ӘРЕКЕТТЕСУ КЕЗІНДЕ КОРИУМДАҒЫ ҚАЛДЫҚ ЭНЕРГИЯ БӨЛІНУДІ ҮЛГІЛЕУ ҮШІН ИНДУКЦИЯЛЫҚ ЖЫЛЫТУ ЖҮЙЕСІНІҢ ТИІМДІЛІГІН АРТТЫРУ

^{1,2)} К.О. Төлеубеков, ²⁾ А.С. Акаев, ²⁾ М.К. Бекмүлдин

¹⁾ *Шәкәрім атындағы Семей мемлекеттік университеті, Семей, Қазақстан*

²⁾ *ҚР ҰЯО РМК «Атом энергиясы институты» филиалы, Курчатова, Қазақстан*

Кориумның ерекшеліктерінің бірі қалдықты энергияның бөлуінің бар болуы. Лава-Б қондырғысында қалдықты энергия бөлуді физикалық моделдеу әдісі ретінде индукциялық қыздыру әдісі қолданылады. Мақала Лава-Б қондырғысында кориумның ыстыққа тұрақты материалдармен өзара әсеріне тәжіртбелік зерттеулерді жүгізу кезінде оны индукциялық қыздыруға арналған. Мақалада индукциялық қызу жүйесінің тиімділігіне әсер ететін параметрлерді талдау нәтижелері берілген және қалдықты энергия бөлуді еліктеу қуаты мен тиімділігін арттыруға арналған тиімді жағдай анықталды. Жүргізілген жұмыстың нәтижесінде кориумда энергия бөлінуді және кориумда қалдықты энергияның бөлінуін физикалық моделдеу әдісі ретінде индукциялық қыздыру тиімділігін арттырудың қажетті жағдайлары туралы кейбір қорытындылар жасалды.

Түйінді сөздер: кориум, индуктор, индукциялық қызу, қалдықты энергия бөлу, тиімдеу.

IMPROVING THE EFFICIENCY OF THE INDUCTION HEATING SYSTEM FOR IMITATION THE RESIDUAL ENERGY RELEASE IN THE CORIUM DURING THE INTERACTION WITH HEAT-RESISTANT MATERIALS

^{1,2)} K.O. Toleubekov, ²⁾ A.S. Akaev, ²⁾ M.K. Bekmoldin

¹⁾ *Semey State University named after Shakarim, Semey, Kazakhstan*

²⁾ *Branch "Institute of Atomic Energy" RSE NNC RK, Kurchatov, Kazakhstan*

One of the features of corium is the presence of residual energy release. Induction heating is used as a method for physical modeling of residual energy release at the LAVA-B installation. The article is devoted to the induction heating of corium during experimental studies of its interaction with heat-resistant materials at the Lava-B installation. The results of the analysis of parameters that affect the efficiency of the induction heating system, and determine the optimal conditions for increasing the power and efficiency of simulation of residual energy release are presented. As a result of this work, some conclusions are made about the necessary conditions for increasing energy release in corium and the efficiency of induction heating as a method of physical modeling of residual energy release in corium.

Keywords: corium, inductor, induction heating, residual energy, optimization.