

<https://doi.org/10.52676/1729-7885-2021-1-9-14>
УДК 621.039.587

МОДЕЛИРОВАНИЕ ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА ПРИ ИМИТАЦИИ ОСТАТОЧНОГО ЭНЕРГОВЫДЕЛЕНИЯ В КОРИУМЕ ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ С ЖАРОПРОЧНЫМИ МАТЕРИАЛАМИ

^{1,2)} Толеубеков К.О., ¹⁾ Хажидинов А.С., ¹⁾ Акаев А.С.

¹⁾ Филиал «Институт атомной энергии» РГП НЯЦ РК, Курчатов, Казахстан

²⁾ Университет имени Шакарима города Семей, Семей, Казахстан

E-mail: toleubekov@nnc.kz

Статья посвящена моделированию остаточного энерговыделения в кориуме методом индукционного нагрева. В статье представлены результаты нестационарного теплофизического расчета температурного поля кориума и огнеупорных блоков ловушки расплава. В процессе работы создана двухмерная осесимметричная модель выбранной области ловушки расплава в программном комплексе ANSYS и проведена валидация теплофизической модели путем сравнения расчетных значений температуры с экспериментальными данными.

Ключевые слова: кориум, индуктор, индукционный нагрев, остаточное энерговыделение, валидация, ANSYS, нестационарный расчет, моделирование.

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) [1].

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

Таким образом, данная работа посвящена проведению нестационарного расчета индукционного нагрева расплава кориума в ловушке расплава с целью валидации разработанной теплофизической модели путем сравнения расчетных значений с экспериментальными данными, полученными в ходе проведения эксперимента на установке ЛАВА-Б.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ МОДЕЛИРОВАНИЯ ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА

Основной задачей работы является проведение нестационарного теплофизического расчета температурного поля кориума и огнеупорных блоков ловушки расплава. Для решения указанной задачи необходимо определить параметры индуктора ловушки, применяемого для имитации остаточного энерговыделения в кориуме во время проведения эксперимента. Валидация теплофизической модели проводилась путем сравнения расчетных значений температуры с экспериментальными данными.

Экспериментальная установка ЛАВА-Б состоит из двух основных блоков: электроплавильная печь (ЭПП) для плавления прототипа кориума; устройство приема расплава (УПР), в которое сливается прототип кориума после полного расплавления. Внешний вид экспериментальной установки представлен на рисунке 1.

Кориум, в состав которого входит диоксид урана, двуокись циркония, цирконий и сталь с общей массой до 60 кг сливается в ловушку расплава, которая размещена в устройстве приема расплава (УПР). Для имитации остаточного энерговыделения в расплаве, применяется метод индукционного нагрева. Ловушка расплава выполнена в форме цилиндра. Конструктивная схема ловушки расплава с огнеупорными блоками показана на рисунке 2.

В силу симметрии ловушки относительно центральной оси для моделирования теплообмена в ловушке расплава была выбрана двумерная осесиммет-

ричная расчетная область ловушки. Разработка и расчет теплообмена расчетной модели проводились при помощи программного комплекса ANSYS. Расчетная область ловушки представлена на рисунке 3.



Рисунок 1. Внешний вид установки ЛАВА-Б

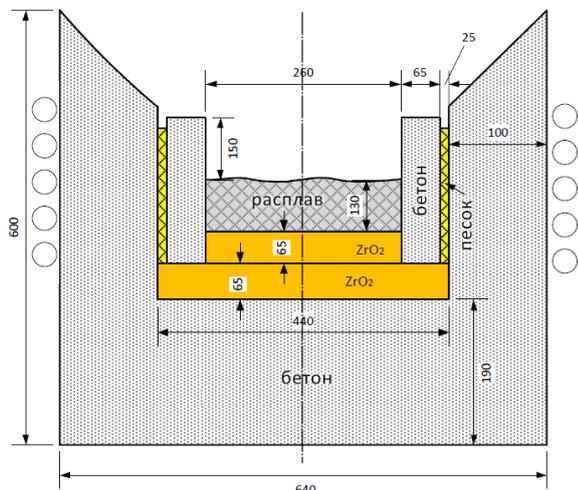


Рисунок 2. Ловушка УПР

Начальные условия и диаграмма мощности индуктора для проведения численного эксперимента идентичны условиям работ, выполненным в результате проведения эксперимента по исследованию процессов, происходящих при взаимодействии имитатора кориума ядерного реактора с огнеупорными блоками из оксида циркония на экспериментальной установке ЛАВА-Б.

Ввиду того, что в данной задаче имеет место теплообмен в материалах с сильно изменяющимися теплофизическими свойствами, необходимо учитывать зависимость от температуры свойств материалов как

ловушки расплава, так и самого кориума. Изменение свойств материалов ловушки и кориума учитывалось путем ввода в расчетную программу некоторых эмпирических зависимостей коэффициентов теплопроводности, теплоемкости и плотности материалов, изложенных в литературных источниках [2–4].

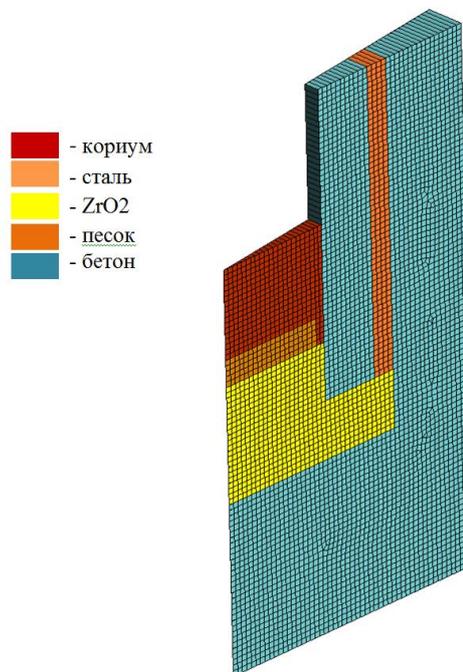


Рисунок 3. Конечно-элементная сетка расчетной модели

Мощность задавалась с учетом КПД индуктора, а также поверхностного эффекта проникновения вглубь материалов проводящей среды.

Начальные данные для проведения моделирования индукционного нагрева расплава кориума представлены в таблице 1.

Таблица 1. Исходные данные

Характеристика	Значение
Начальная температура кориума, °С	2511
Состав расплава в ловушке:	
– диоксид урана (UO_2), кг	33,0
– цирконий (Zr), кг	15,0
– диоксид циркония (ZrO_2), кг	3,0
– сталь 12Х18Н10Т, кг	9,0
Параметры индуктора:	
– высота индуктора, мм	190
– количество витков, шт.	5
– частота источника питания, Гц	2400
– диаметр трубки, мм	30
– толщина стенки трубки, мм	5

Расчет электромагнитных параметров индуктора и определение теплофизических параметров кориума выполнялись на основе литературных источников [5, 6]. Результаты расчетов представлены в таблицах 2 и 3 соответственно.

МЕЛИРОВАНИЕ ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА ПРИ ИМИТАЦИИ ОСТАТОЧНОГО ЭНЕРГОВЫДЕЛЕНИЯ В КОРИУМЕ ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ С ЖАРОПРОЧНЫМИ МАТЕРИАЛАМИ

Таблица 2. Электрические параметры индуктора

Параметр	Значение
Активная мощность индуктора, кВт	85
Напряжение источника питания, В	1000
Электрический КПД индуктора, %	36
Коэффициент мощности индуктора с учетом компенсации	0,94

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 установки и экспериментальных показаний коэффициента мощности. В расчетной модели учитывали теплообмен излучением между поверхностями бетонной ловушки, а также конвективный теплообмен между внешними поверхностями модели и окружающей средой. Температура окружающей среды принималась равной 300 К.

В процессе выполнения работы были выбраны контрольные точки к.т.1, к.т.2, к.т.3, к.т.5, к.т.6, которые были сопоставлены с экспериментальными значениями температур, регистрируемые термопарами, с целью валидации теплофизической модели. Распо-

ложение контрольных точек в ловушке расплава представлено на рисунке 4.

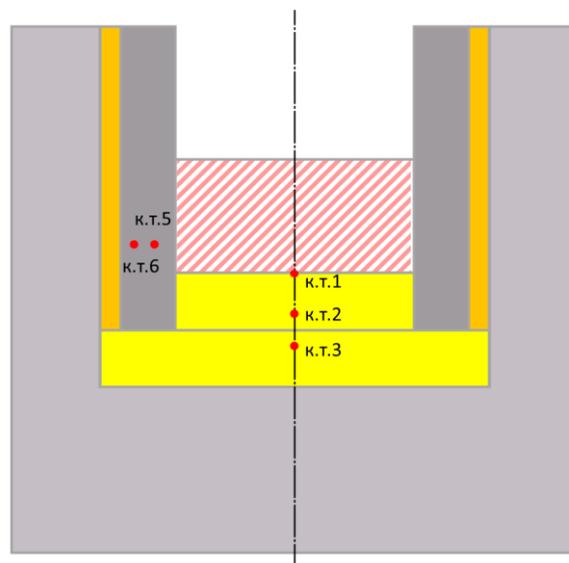


Рисунок 4. Контрольные точки измерения температур

РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

Сравнение расчетных и экспериментальных значений температуры, представленных на рисунке 5, показывает, что отклонения между ними составляют в среднем ~7%, 10%, 18% соответственно.

Из графика, приведенного на рисунке 6, видно, что расчетные значения температуры отличаются от экспериментальных значений температуры в соответствующих контрольных точках в среднем на 14% и 15% соответственно.

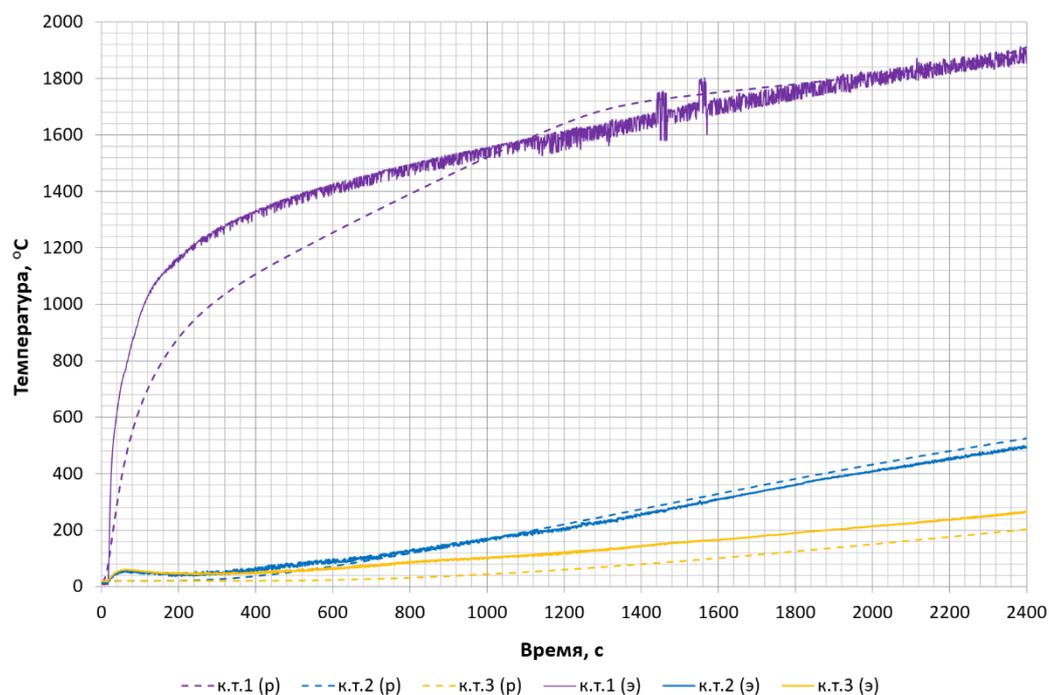


Рисунок 5. Экспериментальные и расчетные значения температуры

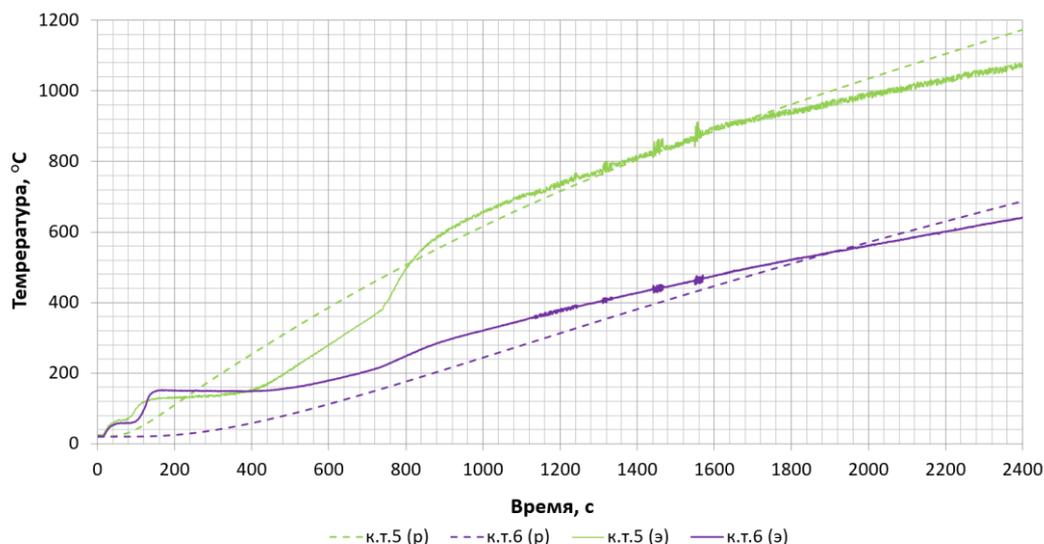


Рисунок 6. Экспериментальные и расчетные значения температуры

Касательно ступенчатого увеличения температуры в промежутке 50 °C и 150 °C в к.т.5 и к.т.6 есть предположения о том, что после слива расплава в бетонную ловушку, вследствие большого градиента температуры между бетоном и кориумом, в бетоне произошло образование трещины в районе сечения размещения термопар и затекание в нее расплава. Этим можно объяснить первый резкий скачек температуры в к.т.5, к.т.6. Далее, так как расплав внутри бетонной ловушки находится за пределами воздействия электромагнитного поля индуктора, в нем не происходит выделения тепла, а также наряду с теплообменом между бетоном и кориумом в трещине, происходит процесс затвердевание кориума. Этим можно объяснить в целом ровные участки показаний температур в промежутке с ~160 до ~400 с за счет внутренней теплоты кристаллизации кориума. Далее, вероятнее всего, после затвердевания кориума идет выравнивание теплообмена в данной области и приближении экспериментальных значений температуры к расчетным.

В связи с этими предположениями, а также невозможности учесть это событие в расчете, было принято решение исключить участок с ~160 до ~400 с из процесса валидации теплофизической модели.

На рисунке 7 приведено температурное поле ловушки расплава в конечный момент времени. На рисунке явно виден преобладающий поверхностный нагрев расплава. Это объясняется поверхностным эффектом проникновения вглубь материалов проводящей среды (скин-эффект), заключающийся в уменьшении амплитуды электромагнитных волн по мере их проникновения вглубь расплава. Данная особенность приводит к тому, что абсолютное большинство энергии, передаваемой в расплав, выделяется в некотором поверхностном слое. Прогрев внутренних слоев осуществляется за счет теплопроводности.

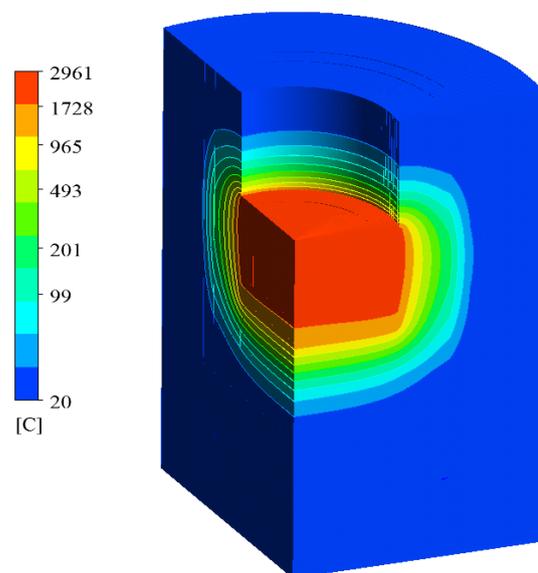


Рисунок 7. Температурное поле расплава

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проделанной работы выполнен расчет электромагнитных и теплофизических параметров системы «индуктор-расплав». Проведено моделирование имитации остаточного энерговыделения в кориуме методом индукционного нагрева в программном комплексе ANSYS.

Был проведен нестационарный расчет изменения температуры огнеупорных блоков и материала бетонной ловушки в различных точках, после слива кориума в ловушку. Произведено сравнение полученных результатов и их анализ.

В результате численного эксперимента были получены графики изменения температуры огнеупорных блоков и материала ловушки в различных точках.

Анализ полученных результатов показал, что:

1) Расчетные максимальные значения температуры огнеупорных блоков в контрольных точках к.т.1, к.т.2, к.т.3 соответственно равны 1884 °С, 541 °С, 212 °С. Отклонение от экспериментальных данных составляет 7%, 10%, 18% соответственно.

2) Расчетные максимальные значения боковой поверхности ловушки в контрольных точках к.т.5, к.т.6 соответственно равны 1167 °С и 696 °С. Отклонение от экспериментальных данных составляет 12% и 10% соответственно.

3) Средняя температура расплава составляет 2597 °С. Максимальная температура кориума наблюдается на поверхности расплава. Анализ температурного поля ловушки показал ярко выраженный поверхностный нагрев расплава, объясняющийся скин-эффектом. Это означает, что максимальная температура наблюдается на боковой поверхности расплава. Нагрев внутренних слоев осуществляется за счет теплопроводности.

В процессе определения параметров системы «индуктор-расплав» было установлено, что расчетное значение общего коэффициента полезного действия плавильной установки не превышает 25%.

Анализ результатов нестационарного расчета показал хорошую согласованность с экспериментальными данными. В среднем отклонения лежат в пределах 13%.

Таким образом, основываясь на значениях относительных отклонений расчетных и экспериментальных данных, можно констатировать, что разработанная теплофизическая модель применима для проведения нестационарных расчетов изменения температуры в элементах ловушки при индукционном нагреве.

Продолжение исследований взаимодействия кориума с жаропрочными материалами предполагает анализ факторов, влияющих на эффективность индукционного нагрева. Повышение эффективности

индукционного нагрева позволит расширить возможности исследования поведения кориума и его взаимодействия с различными материалами, тем самым повысив уровень безопасности эксплуатации АЭС.

ЛИТЕРАТУРА

1. Самойлов О.Б., Усынин Г.Б., Бахметьев А.М. Безопасность ядерных энергетических установок. – М.: Энергоатомиздат – 1989.
2. Шелудяк Ю.Е., Кашпоров Л.Я. Теплофизические свойства компонентов горючих систем. Справочник. Москва – 1992.
3. Чиркин В.С., «Теплофизические свойства материалов ядерной техники», М.: АТОМИЗДАТ – 1968.
4. Кириллов П.Л., Богословская Г.П. Теплообмен в ядерных энергетических установках. Учебник для вузов. – М.: Энергоатомиздат – 2000.
5. «Электротермическое оборудование», справочник под общей редакцией Альтгаузена А.П., М.: Энергия – 1980.
6. Михеев М.А. Основы теплопередачи / М.А. Михеев, И.М. Михеева. – М.: Энергия – 1977.

REFERENCES

1. Samoylov O.B., Usynin G.B., Bakhmet'ev A.M. Bezopasnost' yadernykh energeticheskikh ustanovok. – Moscow: Energoatomizdat – 1989.
2. Sheludyak Yu.E., Kashporov L.Ya. Teplofizicheskie svoystva komponentov goryuchikh sistem. Spravochnik. Moscow – 1992.
3. Chirkin V.S., “Teplofizicheskie svoystva materialov yadernoy tekhniki”, Moscow: ATOMIZDAT – 1968.
4. Kirillov P.L., Bogoslovskaya G.P. Teplomassoobmen v yadernykh energeticheskikh ustanovkakh. Uchebnik dlya vuzov. – Moscow: Energoatomizdat – 2000.
5. “Elektrotermicheskoe oborudovanie”, spravochnik pod obshchey redaktsiey Al'tgauzena A.P., Moscow: Energiya – 1980.
6. Mikheev M.A. Osnovy teploperedachi / M.A. Mikheev, I.M. Mikheeva. – Moscow: Energiya – 1977.

ҚЫЗУҒА ТӨЗІМДІ МАТЕРИАЛДАРМЕН ӘРЕКЕТТЕСУ КЕЗІНДЕ КОРИУМДАҒЫ ҚАЛДЫҚ ЭНЕРГИЯ БӨЛІНУДІ ИМИТАЦИЯЛАУ КЕЗІНДЕ ИНДУКЦИЯЛЫҚ ҚЫЗДЫРУДЫ МОДЕЛЬДЕУ

^{1,2)} К.О. Толеубеков, ¹⁾ А.С. Хажидинов, ¹⁾ А.С. Акаев

¹⁾ ҚР ҰЯО РМК «Атом энергиясы институты» филиалы, Курчатов, Қазақстан

²⁾ Семей қаласының Шәкәрім атындағы университеті, Семей, Қазақстан

Мақала кориум балқытпасын қармауышқа ағызғаннан кейінгі индукциялық қыздыруды моделдеуге арналған. Мақалада кориум және балқытпа қармауышының отқа төзімді блоктарының температуралық өрісінің стационарлық емес жылуфизикалық есептемесінің нәтижесі берілген. Жұмыс үдірісінде балқыма қармауышының таңдап алынған ауданының екі еселі осесиметриялық моделі ANSYS программалық кешенінде жасалды және температураның есептік мәнін эксперименттік деректерімен салыстыру жолымен жылуфизикалық моделін валидациялау жүргізілді.

Түйін сөздер: кориум, индуктор, индукциялық қыздыру, қалдық энергия бөліну, валидация, ANSYS, стационарлық емес есеп, модельдеу.

**MODELING OF THE INDUCTION HEATING FOR IMITATION DECAY HEAT IN THE CORIUM
DURING THE INTERACTION WITH HEAT-RESISTANT MATERIALS**

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

¹⁾ Branch "Institute of Atomic Energy" of the RSE NNC RK, Kurchatov, Kazakhstan

²⁾ Semey University named after Shakarim, Semey, Kazakhstan

This work is devoted to modeling of the induction heating the corium melts pouring on in the trap. The results non-stationary thermophysical calculation of the temperature field of the corium and refractory blocks of the melt trap are presented in the article. In the process of work, 2D model of the selected the melt trap area was created in the program ANSYS and the thermophysical model was validated by comparison the calculated and experimental data of the experiment.

Keywords: *corium, inductor, induction heating, decay heat, validation, ANSYS, non-stationary calculation, modeling.*