

<https://doi.org/10.52676/1729-7885-2024-4-191-195>

УДК 621.039.587

РАЗРАБОТКА ТЕПЛОФИЗИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ЭЛЕКТРОПЛАВИЛЬНОЙ ПЕЧИ УСТАНОВКИ «EAGLE» ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ПРОТОТИПА КОРИУМА РЕАКТОРА НА БЫСТРЫХ НЕЙТРОНАХ С НАТРИЕВЫМ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕМ

А. С. Акаев, К. О. Толеубеков*, М. К. Бекмулдин, Г. Нурпаисова, С. Хасенова

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

* E-mail для контактов: toleubekov@nnc.kz

В настоящей статье приведены результаты моделирования температурного поля электроплавильной печи установки «EAGLE». В процессе моделирования была создана двухмерная осесимметричная теплофизическая модель в программном комплексе ANSYS и проведена валидация модели путем сравнения расчетных значений температуры с экспериментальными данными. Валидация модели показывает, что отклонение расчетных и экспериментальных значений температур в контрольных точках не превышают допустимых пределов. Таким образом, разработанная теплофизическая модель может быть использована при обосновании дальнейших экспериментов на установке «EAGLE».

Ключевые слова: кориум, индукционный нагрев, валидация, ANSYS, моделирование, установка «EAGLE».

ВВЕДЕНИЕ

Обеспечение безопасной эксплуатации ядерных реакторов является одной из важнейших задач атомной энергетики. Для решения вопросов, связанных с безопасностью энергетических реакторов, проводится большой объем работ, включающих в себя как теоретические, так и экспериментальные исследования [1–2]. Такие исследования проводятся и в Институте атомной энергии Национального ядерного центра Республики Казахстан, в том числе и в отношении реакторов на быстрых нейтронах с жидкометаллическими теплоносителями [3–4].

Для проведения таких экспериментов одной из базовых является экспериментальная установка «EAGLE», предназначенная для исследования процессов, сопровождающих тяжелые аварии с плавлени-

ем активной зоны энергетических ядерных реакторов на быстрых нейтронах [5–6]. Установка включает в себя два основных функциональных узла: электроплавильную печь (ЭПП) для подготовки расплава кориума и экспериментальное устройство для моделирования исследуемых процессов.

ЭПП позволяет получить до 26 кг расплава (прототип кориума, далее – кориум), содержащего диоксид урана, окись циркония и нержавеющую сталь или до 15 кг расплава окиси алюминия, который сливается в экспериментальное устройство. При проведении экспериментов жидкий натрий находится в экспериментальном устройстве и поступает в него из специальной транспортной емкости. На рисунке 1 показана экспериментальная установка для проведения испытаний и ее конструктивная схема.

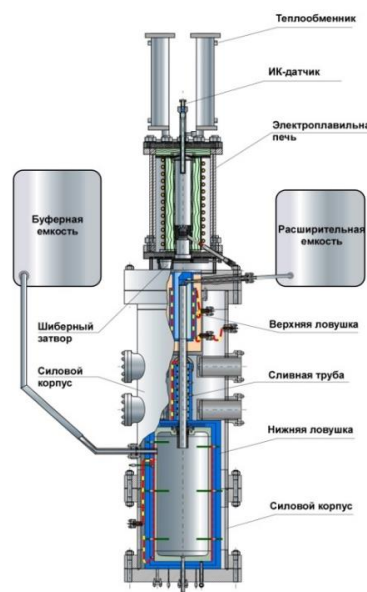


Рисунок 1. Экспериментальная установка EAGLE и ее конструктивная схема

В зависимости от объекта и целей исследования на установке «EAGLE» перед проведением экспериментов разрабатывается диаграмма нагрева компонентов расплава кориума в ЭПП. Необходимость проведения данной процедуры связана с тем, что в разных экспериментах могут использоваться как разная масса и состав шихты, так и начальная температура расплава кориума. В связи с этим, определение корректной диаграммы нагрева компонентов расплава кориума в ЭПП позволит повысить вероятность успешного проведения эксперимента и обеспечить требуемое качество проводимых исследований.

Наиболее эффективным вариантом, позволяющий разработать диаграмму нагрева перед проведением эксперимента является метод компьютерного моделирования. Компьютерное моделирование теплофизических процессов нагрева расплава в ЭПП позволяет:

1) Предварительно оценить температурные поля, установившиеся в процессе нагрева расплава кориума в ЭПП при заданном режиме нагревательного устройства. В том числе с целью недопущения нагрева элементов экспериментальной секции сверх допустимых температур.

2) Оценить характеристики нагревательного устройства, необходимые для установления необходимого температурного поля в конкретном эксперименте.

3) Провести анализ теплофизических процессов, происходящих в экспериментальной секции, исполь-

зуя результаты компьютерного моделирования и измеренные данные натурального эксперимента.

Таким образом, в настоящей статье представлено описание полученных результатов разработки теплофизической модели ЭПП установки «EAGLE» и ее валидации путем сравнения экспериментальных и расчетных данных.

ТЕПЛОФИЗИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЭПП И УСЛОВИЯ ПРОВЕДЕНИЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Для выбора режима получения расплава кориума необходимо было разработать и провести валидацию теплофизической модели тигля ЭПП установки «EAGLE» во время индукционного нагрева. Основной задачей расчета являлось проведение нестационарного теплофизического расчета температурного поля тигля ЭПП во время индукционного нагрева.

Для достижения данной задачи в расчете моделируется экспериментальная ситуация, когда методом индукционного нагрева происходит нагрев оксида алюминия массой 15 кг в графитовом тигле для получения расплава. Расчеты теплового состояния теплофизической модели были выполнены с использованием пакета прикладных программ ANSYS [7–9].

В силу симметрии ЭПП относительно центральной оси для моделирования теплообмена была выбрана двухмерная осесимметричная расчетная область. Разработанная теплофизическая модель и схема ЭПП представлена на рисунке 2.

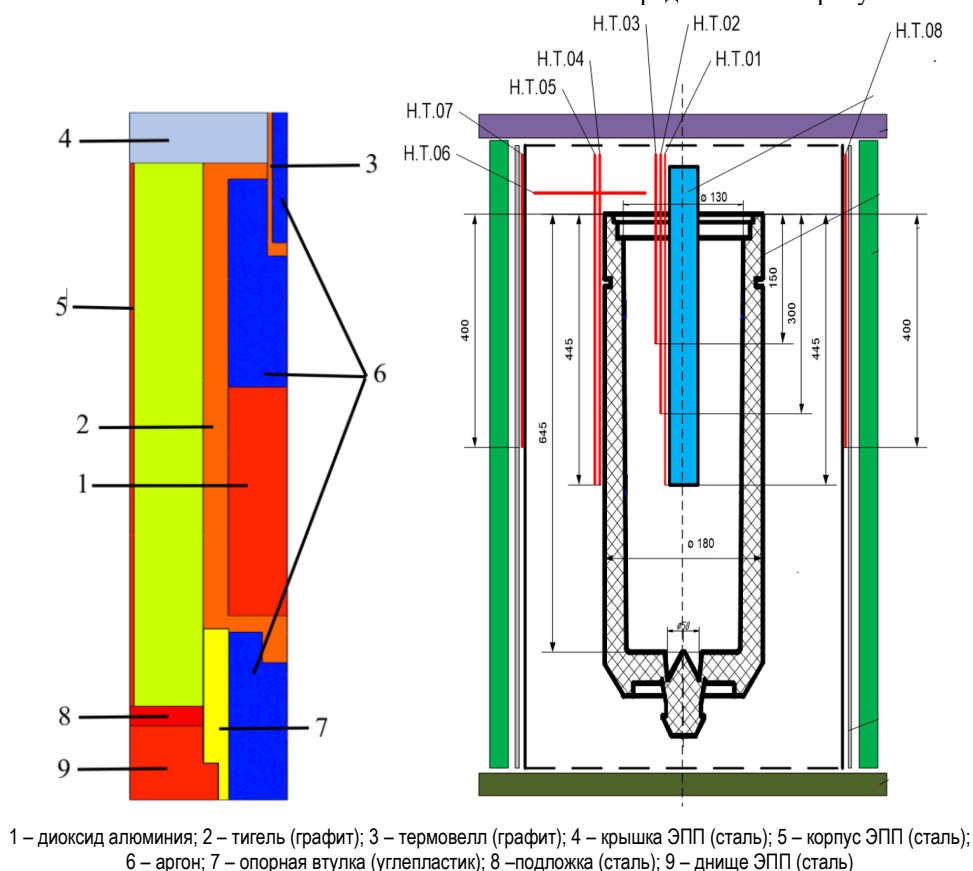


Рисунок 2. Схема и расчетная модель ЭПП установки «EAGLE»

Для сравнения результатов расчета с экспериментальными данными использовались значения температуры, полученные в результате проведения эксперимента на экспериментальном стенде «EAGLE» в контрольных точках Н.Т.01, Н.Т.04, Н.Т.07. Схема расположения контрольных точек и соответственно термопар во время эксперимента показана на рисунке 2.

Для проведения расчета были определены следующие граничные условия:

- а) начальная температура элементов ЭПП и нагреваемого Al_2O_3 – 27 °С;
- б) масса нагреваемого Al_2O_3 – 15 кг;
- в) индукционный нагрев осуществлялся согласно диаграмме, которая соответствует диаграмме, реализованной во время проведения эксперимента и представлена на рисунке 3.

При этом, теплофизическая модель учитывает:

- а) зависимость теплофизических свойств конструктивных элементов ЭПП и Al_2O_3 от температуры;

б) зависимость выделяемой энергии в графитовом тигле ЭПП от расчетного электрического КПД индуктора;

в) тепловые потоки, отводимые от водоохлаждаемых медной крышки и днища ЭПП во время индукционного нагрева.

Зависимость теплофизических свойств конструктивных элементов ЭПП от температуры использовалась согласно [10]. Расчет коэффициента полезного действия индуктора и коэффициента теплоотдачи с поверхности крышки и днища ЭПП установки «EAGLE» проводился согласно [11–12].

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

На рисунке 4 приведено сравнение расчетных значений температуры в контрольных точках с экспериментальными значениями температуры. Сплошными линиями показаны экспериментальные значения температуры, штрихпунктирными линиями – расчетные значения температуры.

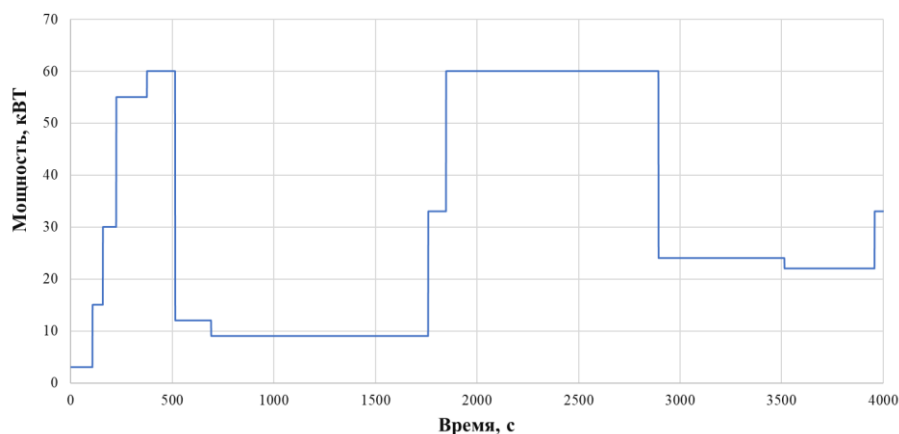


Рисунок 3. Диаграмма нагрева графитового тигля

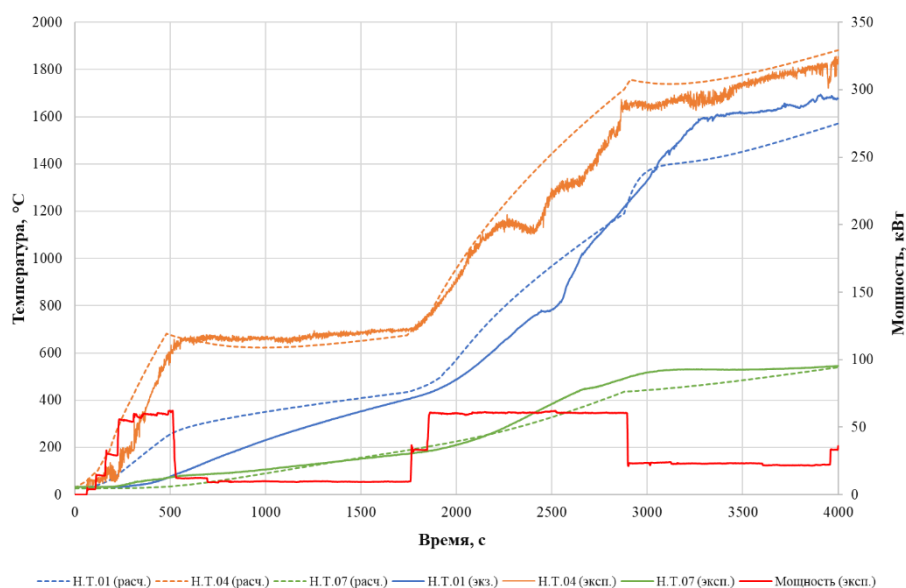


Рисунок 4. Экспериментальные и расчетные значения температуры

Сравнение расчетных и экспериментальных значений температуры в точках Н.Т.01, Н.Т.04 и Н.Т.07 показывает, что отклонения между ними составляют в среднем ~19%, 12% и 9% соответственно. Значительное отклонение в точке Н.Т.01 можно связать с неполными сведениями изменения теплофизических свойств графита плавильного тигля.

Средняя температура оксида алюминия в графитовом тигле составляет ~1750 °С после 4000 секунд индукционного нагрева, что меньше температуры его плавления. В то же время, получение расплава и его слив для проведения эксперимента было проведено путем дальнейшего индукционного нагрева. Расчет был проведен до этого момента времени в связи с выходом из строя или некорректной работой термодатчика при дальнейшем нагреве во время эксперимента.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В программе ANSYS FLUENT проведено моделирование процесса индукционного нагрева оксида алюминия в графитовом тигле установки «EAGLE» для получения расплава корнума. Нестационарный расчет проведен с целью разработки и валидации теплофизической модели ЭПП установки «EAGLE».

Анализ результатов нестационарного расчета показал хорошую согласованность с экспериментальными данными. В результате расчета определено, что отклонения между расчетными и экспериментальными значениями составляют в среднем ~19%, 12% и 9% соответственно. Средняя температура оксида алюминия в графитовом тигле составляет ~1750 °С после 4000 секунд индукционного нагрева.

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 ЭПП при индукционном нагреве. В связи с этим, разработанная теплофизическая модель ЭПП будет использована при разработке оптимизационных программ будущих экспериментов на установке «EAGLE», в частности определении режимов нагрева оксида алюминия для получения требуемых характеристик расплава.

Финансирование

Данное исследование было выполнено при финансовой поддержке Министерства энергетики Республики Казахстан в рамках программно-целевого финансирования по научным, научно-техническим программам на 2024–2026 годы по теме «Развитие атомной энергетики в Республике Казахстан» (ИРН проекта – BR24792713).

ЛИТЕРАТУРА

1. Journeau, C., Bouyer, V., Cassiaut-Louis, N. and et.al. SAFEST roadmap for corium experimental research in Europe // Proceedings of 24th International Conference on Nuclear Engineering (ICONE24). Charlotte, North Carolina, June 26–30, 2016. <https://doi.org/10.1115/ICONE24-60916>
2. Bechta, S., Ma, W., Miasoedov, A. and et.al. On the EU-Japan roadmap for experimental research on corium behavior // Annals of Nuclear Energy. – 2019. – Vol. 124. – P. 541–547. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2018.10.019>
3. Васильев Ю.С., Вурим А.Д., Жданов В.С. и др. Экспериментальные исследования по моделированию процессов характерных для тяжелых аварий ядерных реакторов проведенные в ИАЭ // Вестник НЯЦ РК. – 2009. № 4. – С. 26–54.
4. Семенина А.В., Бакланова Ю.Ю., Вурим А.Д. Структурирование экспериментальных данных по высокотемпературному взаимодействию корнума с конструкционными материалами энергетического реактора в виде информационно-аналитической системы // Вестник НЯЦ РК. – 2021. – № 1. – С. 54–60. <https://doi.org/10.52676/1729-7885-2021-1-54-60>
5. Nazarbayev N.A., Shkolnik V.S., Baturbekov E.G. and et al. Scientific, Technical and Engineering Work to Ensure the Safety of the Former Semipalatinsk Test Site. – London. – 2017. – Vol. 3, P. 290.
6. Ильиных С.А., Сысалетин А.В., Ермаков В.А. и др. Модернизация информационно-управляющей системы экспериментального стенда «EAGLE» // Вестник НЯЦ РК. – 2019. – № 1(4). – С. 38–44. <https://doi.org/10.52676/1729-7885-2019-4-38-44>
7. ANSYS Fluent User's Guide, 15th ed.; ANSYS Inc.: Canonsburg, PA, USA, 2013, 2620.
8. Толубеков К.О., Хажидинов А.С., Акаев А.С. Моделирование индукционного нагрева при имитации остаточного энерговыделения в корнуме при взаимодействии с жаропрочными материалами. // Вестник НЯЦ РК. – 2021. – № 1. – С. 9–14. <https://doi.org/10.52676/1729-7885-2021-1-9-14>
9. Скаков М.К., Бакланов В.В., Толубеков К.О., Акаев А.С., Бекмудин М.К., Градобоев А.В. Моделирование взаимодействия корнума с кандидатными металлическими материалами – охладителями в ловушке расплава легководного реактора // Вестник НЯЦ РК. – 2023. № 2. С. 49–57. <https://doi.org/10.52676/1729-7885-2023-2-49-57>
10. Чиркин В.С. Теплофизические свойства материалов ядерной техники. – М.: АТОМИЗДАТ. – 1968.
11. «Электро – термическое оборудование», справочник под общей редакцией Альтгаузена А.П. – М.: Энергия. – 1980.
12. Михеев М.А., Михеева И.М. Основы теплопередачи». – М.: Энергия. – 1977.

REFERENCES

1. Journeau, C., Bouyer, V., Cassiaut-Louis, N. and et.al. SAFEST roadmap for corium experimental research in Europe // Proceedings of 24th International Conference on Nuclear Engineering (ICONE24). Charlotte, North Carolina, June 26–30, 2016. <https://doi.org/10.1115/ICONE24-60916>

2. Bechta, S., Ma, W., Miassoedov, A. and et.al. On the EU-Japan roadmap for experimental research on corium behavior // *Annals of Nuclear Energy*. – 2019. – Vol. 124. – P. 541–547. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2018.10.019>
3. Vasilev Yu.S., Vurim A.D., Jdanov V.S. et al. Experimental studies carried out in IAE on simulation of process typical for reactor severe accidents // *NNC RK Bulletin*. – 2009. – Issue 4(40). – P. 26–54. (In Rus.)
4. Semenina A.V., Baklanova Yu.Yu., Vurim A.D. Structuring experimental data on high-temperature interaction between corium and structural materials of power reactor as information-analytical system // *NNC RK Bulletin*. – 2021. – Issue 1. P. 54-60. <https://doi.org/10.52676/1729-7885-2021-1-54-60>
5. Nazarbayev N.A., Shkolnik V.S., Batyrbekov E.G. and et al. Scientific, Technical and Engineering Work to Ensure the Safety of the Former Semipalatinsk Test Site. – London. – 2017. – Vol. 3. – pp. 290.
6. Ilinykh S.A., Syssaletin A.V., Ermakov V.A. and et al. Modernization of the information management system of the “EAGLE” test bench // *NNC RK Bulletin*. – 2019. – Issue 4. P. 38–44. <https://doi.org/10.52676/1729-7885-2019-4-38-44>
7. ANSYS Fluent User’s Guide, 15th ed.; ANSYS Inc.: Canonsburg, PA, USA, 2013, 2620.
8. Toleubekov K.O., Khazhidinov A.S., Akaev A.S. Modeling of the induction heating for imitation decay heat in the corium during the interaction with heat-resistant materials // *NNC RK Bulletin*. – 2021. Issue 1. P. 9–14. <https://doi.org/10.52676/1729-7885-2021-1-9-14>
9. Skakov M.K., Baklanov V.V., Toleubekov K.O., Akaev A.S., Bekmuldin M.K., Gradoboev A.V. Modeling of the corium and metals – coolers interaction in a core catcher of a light water reactor // *NNC RK Bulletin*. – 2023. Issue 2. – P. 49–57. <https://doi.org/10.52676/1729-7885-2023-2-49-57>
10. Chirkin V.S., «Теплофизические свойства материалов ядерной техники». – Moscow.: ATOMIZDAT. – 1968.
11. Электро-термическое оборудование, справочник под общ. ред. ред. А.П. – Moscow: Энергия. – 1980.
12. Miheev M.A., Miheeva I.M. Osnovy teploperedachi. – Moscow: Energiya. – 1977.

НАТРИЙ ЖЫЛУТАСЫҒЫШЫ БАР ШАПШАҢ НЕЙТРОНДАРДАҒЫ РЕАКТОР КОРИУМЫНЫҢ ПРОТОТИПН АЛУ ҮШІН «EAGLE» ҚОНДЫРҒЫСЫНЫҢ ЭЛЕКТРЛІ БАЛҚЫТУ ПЕШІНІҢ ЖЫЛУ ФИЗИКА МОДЕЛІН ӘЗІРЛЕУ

А. С. Акаев, К. О. Толеубеков*, М. К. Бекмулдин, Г. Нурпаисова, С. Хасенова

ҚР ҰАО РМК «Атом энергиясы институты» филиалы, Құрчатов, Қазақстан

** Байланыс үшін E-mail: toleubekov@nnc.kz*

Осы мақалада «EAGLE» қондырғысының электр балқыту пешінің температуралық өрісін модельдеу нәтижелері келтірілген. Модельдеу процесінде ANSYS бағдарламалық кешенінде екі өлшемді осимметриялық жылу-физикалық модель жасалды және температураның есептік мәндерін эксперименттік мәліметтермен салыстыру арқылы модель валидациясы жүргізілді. Модельді тексеру бақылау нүктелеріндегі температураның есептік және эксперименттік мәндерінің ауытқуы рұқсат етілген шектерден аспайтынын көрсетеді. Осылайша, әзірленген жылу-физикалық модельді «EAGLE» қондырғысында одан әрі эксперименттерді негіздеу кезінде пайдалануға болады.

Түйін сөздер: *кориум, индукциялық қыздыру, валидация, ANSYS, моделдеу, «EAGLE» қондырғысы.*

DEVELOPMENT OF A THERMOPHYSICAL MODEL OF THE ELECTRIC MELTING FURNACE OF THE “EAGLE” FACILITY FOR OBTAINING A CORIUM PROTOTYPE OF A FAST NEUTRON REACTOR WITH A SODIUM COOLANT

A. S. Akaev, K. O. Toleubekov*, M. K. Bekmuldin, G. Nurpaisova, S. Khasenova

Branch “Institute of Atomic Energy” RSE NNC RK, Kurchatov, Kazakhstan

** E-mail for contacts: toleubekov@nnc.kz*

This article presents the results of modeling of the temperature field of the electric melting furnace of the “EAGLE” facility. The two-dimensional axisymmetric thermophysical model was created in the ANSYS software and the model was validated by comparing the calculated temperature values with experimental data during modeling. Validation of the model shows that the deviations of the calculated and experimental temperature values at the control points do not exceed the permissible limits. Thus, the developed thermophysical model can be used to justify further experiments at the “EAGLE” facility.

Keywords: *corium, induction heating, validation, ANSYS, modeling, «EAGLE» facility.*