

УДК 621.365.5

М. Ю. Суворова, И. В. Позняк

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

## **Постановка задачи исследования формы фронта кристаллизации при зонной плавке в индукционной печи с холодным тиглем**

*Представлены результаты исследований технологии очистки отработанного ядерного топлива (ОЯТ) на основе многократной кристаллизации расплава в индукционной печи с холодным тиглем при помощи зонной плавки. Проведена работа по исследованию формы фронта кристаллизации расплава при различной скорости перемещения тигля относительно индуктора. Разработана обобщенная математическая модель процесса очистки ОЯТ, представлен алгоритм работы программы. Проведено численное моделирование процессов рекристаллизации расплава при различной скорости перемещения тигля относительно индуктора, а также теоретический расчет параметров системы для получения наилучшего результата. Представлен способ зонной плавки, позволяющий получать кристаллический продукт высокой чистоты при непрерывной работе ИПХТ, которое не требует периодической остановки для удаления примесей. Проведена верификация данных полученных при численном моделировании с данными натурального эксперимента. Результаты верификации указывают на то, что разработанная модель формы фронта кристаллизации достоверна для расчетов.*

### **Зонная плавка, индукционный нагрев, холодный тигель, очистка отработанного ядерного топлива, форма фронта кристаллизации**

По данным Международного агентства по ядерной энергии (МАГАТЭ) ныне в 31 стране мира действуют 442 ядерных реактора, на которых вырабатывается электроэнергия. На долю США, Франции и Японии приходится 49 % всех АЭС и 57 % всей «ядерной» электроэнергии. В России доля производства атомной электроэнергии на данный момент составляет 17 % от общего объема, а к 2020 г. должна составлять 20–25 %. Захоронение продуктов ОЯТ весьма сложное и экономически затратное мероприятие, поэтому во всем мире стоит вопрос о вторичном использовании ОЯТ [1].

Широко известно, что среди радиоактивных продуктов деления содержится большое количество ценных радионуклидов (из которых 96 % ОЯТ – это уран-235 и уран-238, около 1 % – плутоний, 2–3 % – радиоактивные осколки деления), которые можно использовать в области малой ядерной энергетики (радиоизотопные источники тепла для термогенераторов электроэнергии), а также для изготовления источников ионизирующего излучения.

Существуют различные способы переработки ОЯТ, наиболее широко применяемые из них – водные и неводные. Однако и те и другие имеют существенные недостатки – коррозия конструкционных материалов реакторов, что требует специальных мер защиты; высокая энергоемкость и необходимость проведения сложных подготовительных операций (реагентное умягчение, коагуляция); использование агрессивной среды (для неводных способов); большой расход химических реагентов и т. д.

Альтернативой существующим способам переработки ОЯТ служит метод зонной плавки [2]. К достоинствам данного метода относят получение кристаллического продукта высокой чистоты, осуществление непрерывной работы устройства, не требующей периодической остановки для удаления примесей. На рис. 1 представлена технологическая схема зонной плавки, процессы и физические явления, происходящие в системе во время работы, на основе которых в дальнейшем строится математическая модель процесса очистки ОЯТ.

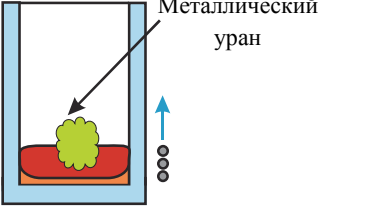
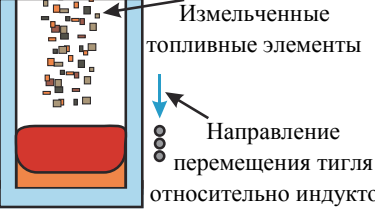
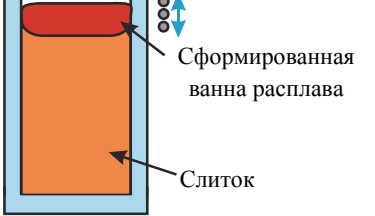
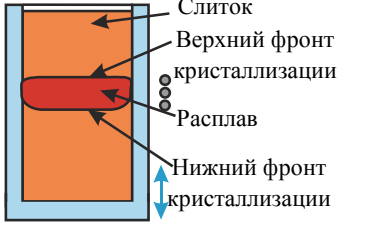
Технологическая схема процесса зонной плавки	Процессы, происходящие в системе	Физические явления
 <p>Металлический уран</p>	<p>Индукционный нагрев стартового материала и индукционный нагрев оксидного материала при 2773 К</p>	<p>Высокочастотное электромагнитное поле в среде с электропроводящими областями</p>
 <p>Измельченные топливные элементы</p> <p>Направление перемещения тигля относительно индуктора</p>	<p>Перемешивание расплава посредством воздействия электромагнитных сил и сил Архимеда</p>	<p>Магнитная гидродинамика в расплаве с учетом нелинейности теплофизических свойств вещества</p>
 <p>Сформированная ванна расплава</p> <p>Слиток</p>	<p>Кристаллизация расплава с заданным фронтом</p>	<p>Фазовые переходы в веществе от твердого состояния к жидкому и наоборот</p>
 <p>Слиток</p> <p>Верхний фронт кристаллизации</p> <p>Расплав</p> <p>Нижний фронт кристаллизации</p>	<p>Перераспределение примесей в слитке при рекристаллизации расплава (зонная плавка)</p>	<p>Диффузия примесей в расплаве и на границе с фронтом кристаллизации расплава</p>

Рис. 1

Математическая модель процесса очистки ОЯТ основывается на описании физических явлений в ИПХТ, включающих электромагнитное поле (ЭМП), гидродинамику расплава, кристаллизацию расплава и распределение примесей при кристаллизации.

Представленная обобщенная математическая модель основывается на системах нелинейных уравнений для трехмерной области, что представляет определенную сложность для ее реализации и использования. Поэтому для ее упрощения был введен ряд допущений:

Температурное поле моделируется в пограничном слое расплав–слиток с учетом следующих допущений:

- в расплаве устанавливается тонкий пограничный слой между основной массой расплава и фронтом кристаллизации;
- на границе пограничного слоя с расплавом устанавливается граничное условие первого рода, в котором задается температура расплава  $T_{\text{плав}}$ .

Теплопередача от расплава к слитку осуществляется только за счет теплопроводности материала, т. е. принимаем, что в пограничном слое не происходит перемешивание жидкости. Это допущение позволяет на первом этапе уйти от решения задач ЭМП и гидродинамики, оставив для решения тепловую задачу в расплаве и слитке и задачу кристаллизации.

Уравнение температурного поля решаемой области:

$$\gamma c_P \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda(T) \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \frac{1}{R} \frac{\partial}{\partial R} \left( R \lambda(T) \frac{\partial T}{\partial R} \right) + W;$$

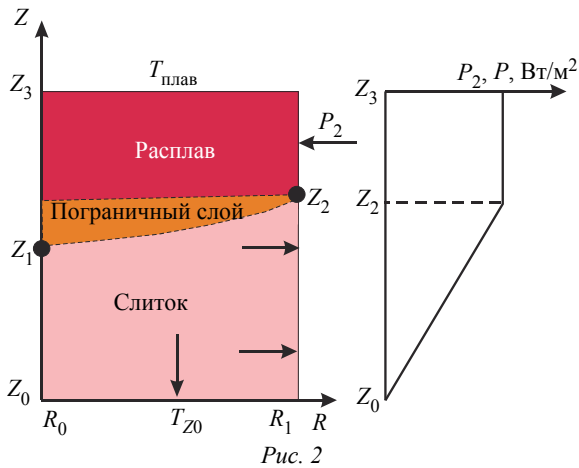
$$\left( \lambda \frac{\partial T}{\partial R} \right) = -q_{\text{бок}},$$

где  $\gamma$  – плотность, кг/м<sup>3</sup>;  $c_P$  – теплоемкость, Дж/(кг · К);  $T$  – температура, К;  $\lambda$  – теплопроводность, Вт/(м · К);  $R$  – радиальная координата, м;  $W$  – объемная плотность внутренних источников

теплоты, Вт/м<sup>3</sup>;  $q_{бок}$  – тепловой поток в боковую стенку тигля, Вт/м<sup>2</sup>;

– значение теплового потока от расплава и от слитка в стенку холодного тигля было определено экспериментально [3]. На рис. 2 представлена расчетная область тепловой задачи, где  $Z$  – осевая координата;  $Z_0$  – нулевая координата;  $Z_1$  – координата температуры на границе со слитком;  $Z_2$  – координата температуры на границе с расплавленной зоной;  $Z_3$  – координата верхней границы загрузки;  $P_2$  – заданный поток в расплав, определенный экспериментально, Вт/м<sup>2</sup>;  $R$  – радиальная координата, м;  $R_0$  – нулевая радиальная координата, м;  $R_1$  – координата радиуса загрузки, м;  $T_{плав}$  – температура расплава, К;  $T_{Z_0}$  – температура на границе области решения, К;

– форма фронта кристаллизации расплава не изменяется по угловой координате в цилиндрической системе. Это позволяет решать тепловую задачу и задачу кристаллизации в двухмерной постановке. Алгоритм работы программы для исследования тепловых параметров печи представлен на рис. 3, где  $i$  – текущая координата;  $j$  – текущее время;  $\Delta T = T(i/j+1) - T(i/j)$  – изменение по температуре;  $\varepsilon$  – ошибка, %.



В процессе исследования варьировались длина тигля (длина прохода), диаметр тигля, скорость перемещения расплавленной зоны. Постобработка результатов расчета включает определение геометрии фронта кристаллизации и температур на границах исследуемой области. На рис. 4 представлен график, основанный на результатах численного моделирования (распределение температурного поля по сечению исследуемой области) в ANSYS (конфигурация фронтов плавления и кристаллизации при скорости 0.5 мм/мин).

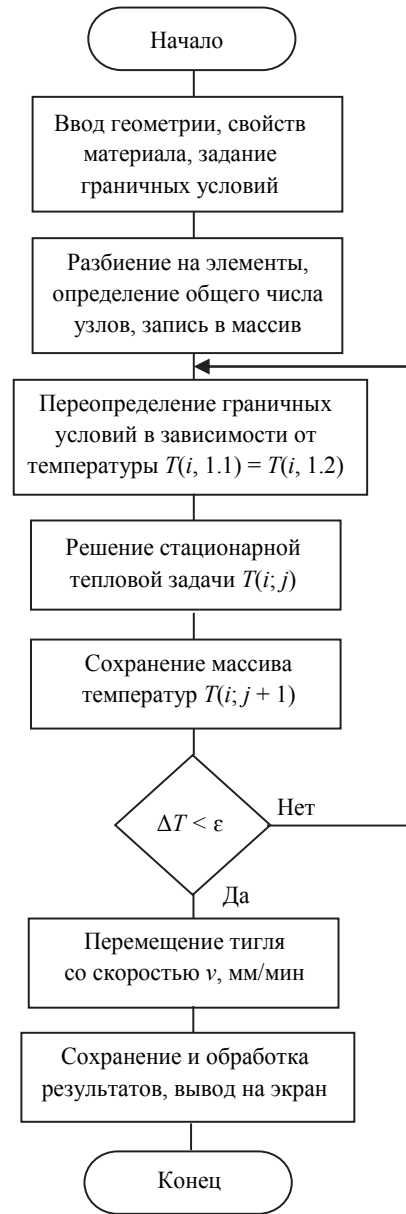


Рис. 3

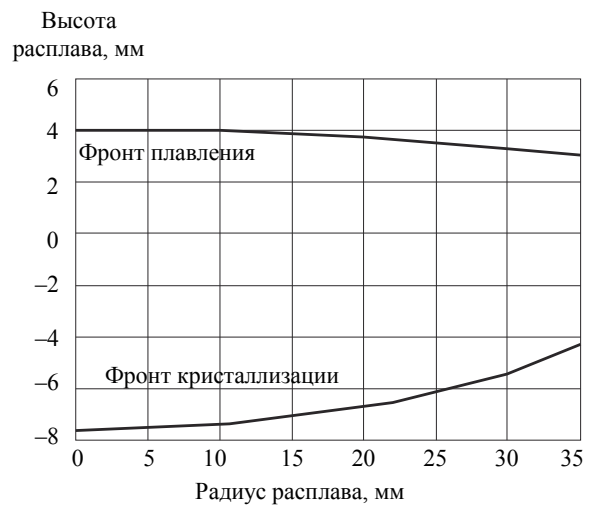


Рис. 4



Рис. 5

Видны отличающиеся изотермы для нижней (с фронтом кристаллизации) и верхней (с фронтом плавления) половин области. По численным расчетам для получения оптимальных параметров плавки (наиболее пологого фронта кристаллизации) и наибольшей производительности скорость перемещения тигля относительно индуктора должна быть в пределах  $v = 1 \dots 3$  мм/мин.

Для верификации данных, полученных при аналитическом расчете в программной среде ANSYS, сравнили результаты с данными проведенного эксперимента. Эксперимент был проведен на установке CVR-3 с используемым источником питания IS-1 (160 кВт). В качестве стартового материала использовался металлический алюминий, впоследствии применялся модельный состав  $25\% \text{ Al}_2\text{O}_3 + 75\% \text{ ZrO}_2$ . Индукционная система и слиток, полученный в процессе плавки, представлены на рис. 5 (установка CVR-3 – индукционная печь с холодным тиглем (ИПХТ)) и 6 (слиток, полученный в ИПХТ зонной плавкой) соответственно.

В теории электрошлакового переплава металлов [4], [5] для описания жидкометаллической ванны принято использовать коэффициенты формы ванны  $k_{\phi}$  и фронта кристаллизации  $k_{\text{фр}}$ . В ходе эксперимента была получена эллипсоидная форма ванны расплава, представленная на рис. 6, где  $a_{\text{в}}$  – полная глубина ванны, м;  $a_{\text{к}}$  – глубина кристаллизующейся части, м;  $a_{\text{ц}}$  – высота цилиндрической части расплава, м;  $R_2$  – радиус зеркала ванны, м. Высота ванны составила 2 см, а общий диаметр – 5 см. Коэффициент формы ванны попал в допустимый предел  $0 < k_{\phi} < 1$ ,  $k_{\phi} = 0.15$ , а коэффициент кристаллизации  $k_{\text{фр}} = 1.47$ . Скорость перемещения тигля относительно индуктора составила  $v = 1.6$  мм/мин [6].

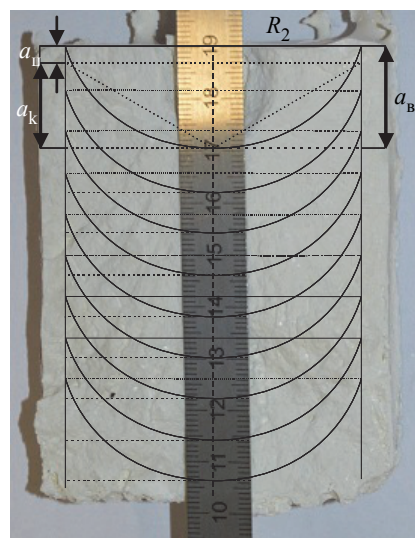


Рис. 6

Кристаллический блок после наплавления ИПХТ имеет поперечное сечение той же формы, что и сечение тигля. Структура блока – поликристаллическая с выраженными слоями кристаллитов. Глубина и форма ванны – технологические параметры, определяющие структуру блока. Как было показано ранее, ванна состоит из двух частей (цилиндрической и эллиптической) и может быть описана коэффициентами фронта и формы. При  $k_{\text{фр}} < 1$  в блоке преобладают радиально направленные кристаллиты. При  $k_{\text{фр}} > 1$  преобладают кристаллиты с осевой направленностью. При  $k_{\text{фр}} \rightarrow \infty$  дно ванны становится плоским и эллиптическая часть ее исчезает. Таким образом, в ходе математического расчета был выявлен критерий для получения оптимальных параметров как по технико-экономическим показателям, так и по качеству структуры блока – плавка, при которой  $k_{\text{фр}} \approx 1$ , а  $k_{\text{кр}} \approx 0.707$  [4]. Скорость перемещения с данными критериями равна  $v = 0.8$  мм/мин.

Таким образом, в ходе исследований была разработана математическая модель процесса плавки в коммерческой среде ANSYS и проведено численное моделирование тепловых параметров системы. При помощи численного моделирования было проведено исследование формы фронта кристаллизации расплава при различной скорости перемещения тигля относительно индуктора, а также определено значение скорости  $v = 0.8$  мм/мин для получения оптимальных параметров плавки. Была проведена верификация полученных данных с данными эксперимента. Полученные результаты позволяют говорить о том, что разработанная модель формы фронта кристаллизации достоверна для расчетов (с допустимой погрешностью 5%).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пат. РФ № 2244048: МПК С30В13/16. Способ зонной плавки и устройство для его осуществления / В. Х. Забаровский; заявитель и патентообладатель В. Х. Забаровский; № 2000116804/02; заявл. 23.06.2000; Опубл. 10.01.2005.
2. Пфанн В. Зонная плавка. М.: Мир, 1970.
3. Управление фронтом кристаллизации расплава при непрерывно-последовательной зонной плавке в индукционной печи с холодным тиглем / М. Ю. Максименко, И. В. Позняк, А. Н. Шатунов, А. Ю. Печенков, В. В. Кичигин, А. И. Максимов // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2013. № 3. С. 73–78.
4. Петров Ю. Б. Индукционная плавка окислов. Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1983.
5. Петров Ю. Б. Индукционная плавка оксидов в холодных тиглях; дис. ... д-ра техн. наук: 05.09.10. Л., 1986.
6. Суворова М. Ю., Позняк И. В. Верификация фронта кристаллизации и скорости перемещения тигля относительно индуктора при зонной плавке в холодном тигле // Тр. X Всерос. науч. конф. молодых ученых «Наука. Технологии. Инновации». Новосибирск (НТИ-2017). Ч. 5. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2017. С. 59–63.

---

M. Yu. Suvorova, I. V. Poznyak  
Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI»

### FORMULATION OF THE PROBLEM OF STUDYING THE SHAPE OF THE CRYSTALLIZATION FRONT DURING ZONE MELTING IN AN INDUCTION FURNACE WITH A COLD CRUCIBLE

*Presents the results of research on the technology of purification of spent nuclear fuel (SNF) on the basis of multiple crystallization of the melt in an induction furnace with a cold crucible during by zone melting. The work was carried out to study the form of the melt crystallization front at different speeds of the crucible relative to the inductor. The generalized mathematical model of SNF cleaning process is developed, the algorithm of the program operation is presented. Numerical simulation of melt crystallization processes is carried out, as well as theoretical calculation of the system parameters to obtain the best result. Verification of the data obtained by numerical simulation with the data of full-scale experiment is carried out. The verification results indicate that the developed model of the crystallization front shape is reliable for calculations.*

**Zone melting, induction heating, cold crucible, purification of spent nuclear fuel, front of crystallization**

---

УДК [62.83:621.94]:004.32.26

М. П. Белов, И. С. Носиров, А. М. Белов  
Санкт-Петербургский государственный электротехнический  
университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

## Синтез нейросетевого регулятора для двухмассовой электромеханической системы привода подачи токарного станка

*Рассмотрен анализ преимуществ и недостатков нейроконтроллера с предсказанием (Neural Network Predictive Controller), реализованного в пакете прикладных программ Neural Network Toolbox. Приведено математическое описание двухмассовой электромеханической системы привода подачи токарного станка с упругими связями. Рассмотрена процедура синтеза нейрорегулятора для стабилизации скорости линейного движения и компенсации колебаний, возникающих в упругих элементах приводов подачи токарных станков. Приведены сравнительные исследования нескольких алгоритмов: Моллера, Левенберга–Марквардта, Полка–Рибера, градиентного спуска, для обучения нейрорегулятора NARMA-L2 Controller. Определены параметры нейрорегулятора NARMA-L2 Controller, существенно влияющие на качество управления. Приводится сравнительный анализ показателей качества обучения нейросетевого регулятора при различных алгоритмах обучения. Показано, что применение нейросетевого регулятора NARMA-L2 Controller позволяет улучшить качество показателей системы управления (СУ) привода подачи токарного станка.*

**Электромеханическая система, привод подачи токарного станка с упругими связями, нейрорегулятор, алгоритм обучения Левенберга–Марквардта**

**Постановка проблемы.** При проектировании металлорежущих станков на первый план выдвигаются проблемы повышения точности и производительности. В процессе механической обра-