УДК 621.365.5

М. Ю. Максименко, И. В. Позняк, А. Н. Шатунов, А. Ю. Печенков, В. В. Кичигин, А. И. Максимов

УПРАВЛЕНИЕ ФРОНТОМ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ РАСПЛАВА ПРИ НЕПРЕРЫВНО-ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЙ ЗОННОЙ ПЛАВКЕ В ИНДУКЦИОННОЙ ПЕЧИ С ХОЛОДНЫМ ТИГЛЕМ

Создание новых технологий обращения с ОЯТ, в том числе и переработка ядерного топлива с целью его повторного использования в топливном цикле, требует большого внимания. Анализ разработок выявил способ наиболее подходящий с точки зрения экономических, технологических, экологических и других критериев способ очистки при помощи зонной плавки. Зонная плавка позволяет получать необходимую степень очистки, осуществлять непрерывную работу установки, не требующую периодической остановки для удаления примеси.

Зонная плавка, индукционный нагрев, холодный тигель, очистка отработанного ядерного топлива

В настоящее время проблема обращения с отработанным ядерным топливом (ОЯТ) атомных станций требует проведения исследовательских работ по созданию новых технологий переработки ОЯТ. Существующие технологии обращения с ОЯТ, основанные на химическом способе (водные), имеют существенные недостатки, в первую очередь связанные с экономическими, технологическими, экологическими и им подобными критериями [1], [2]. В различной стадии разработки находятся неводные, например мембранные, методы, недостатками которых являются высокая энергоемкость и необходимость проведения сложных подготовительных операций (реагентное умягчение, коагуляция и др.).

Кроме химических способов очистки ОЯТ к наиболее перспективным относится способ, основанный на плавлении и рекристаллизации расплава. Технологическим его решением может быть метод зонной плавки [2]. Особенности зонной плавки делают этот метод наиболее актуальным для очистки ОЯТ. Преимущество зонной очистки состоит в значительном сокращении операций повторной кристаллизации. Медленное перемещение узкой расплавленной зоны вдоль слитка, позволяет перераспределить примеси в нем. Такой способ очистки позволяет получать кристаллический продукт высокой степени чистоты.

На рис. 1 представлена технологическая схема очистки ОЯТ от продуктов деления в индукционной печи с холодным тиглем (ИПХТ) [3]. Печь работает следующим образом: на первом этапе (так называемый стартовый нагрев) формируется ванна расплава. При комнатной температуре материал ОЯТ (смесь оксидов тяжелых металлов) обладает недостаточной электропроводностью, поэтому в качестве стартового материала используется металлический уран. Количество вещества стартового материала определяется в соответствии с методикой, подробно описанной в книге Петрова Ю. Б. [3].

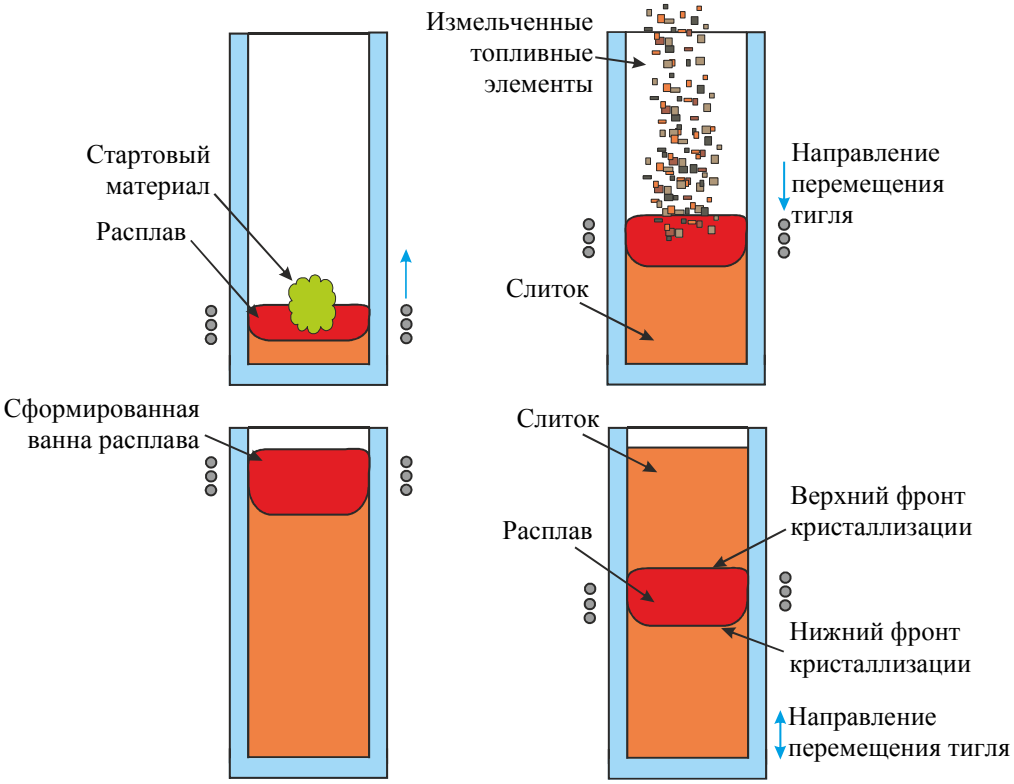

Рис. 1

При нагреве урана происходит экзотермическая реакция, тепло от которой расплавляет часть оксидного материала. После того как появилось достаточное количество расплава, этот расплав нагревается за счет внешнего воздействия высокочастотного электромагнитного поля. На втором этапе происходит наплавление слитка: тигель постепенно смещается вниз относительно индуктора. Постоянный уровень расплава поддерживается за счет непрерывной загрузки шихты (таблеток) и ее плавления. На третьем этапе окончательно формируется ванна расплава необходимого объема. На четвертом этапе производится зонная плавка слитка с перекристаллизацией и, соответственно, с отгонкой примесей из расплавленной зоны.

Математическая модель кристаллизации в ИПХТ. 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. Математическую модель можно разделить на задачи, последовательность решения которых представлена на рис. 2.

Представленная обобщенная математическая модель основывается на системах нелинейных уравнений для трехмерной области, что представляет определенную сложность для ее реализации и использования. Поэтому для существенного упрощения математической модели можно ввести ряд допущений. Первое допущение основывается на том, что в приграничной области, между расплавом и слитком, нет активного перемешивания расплава, что позволяет использовать лишь коэффициент теплопроводности вещества как функцию от температуры, а не учитывать эффективное значение коэффициента теплопроводности с учетом движения расплава. 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. Второе допущение основывается на том, что форма фронта кристаллизации расплава не изменяется по угловой координате в цилиндрической системе. Это позволяет решать тепловую задачу и задачу кристаллизации в двухмерной постановке.

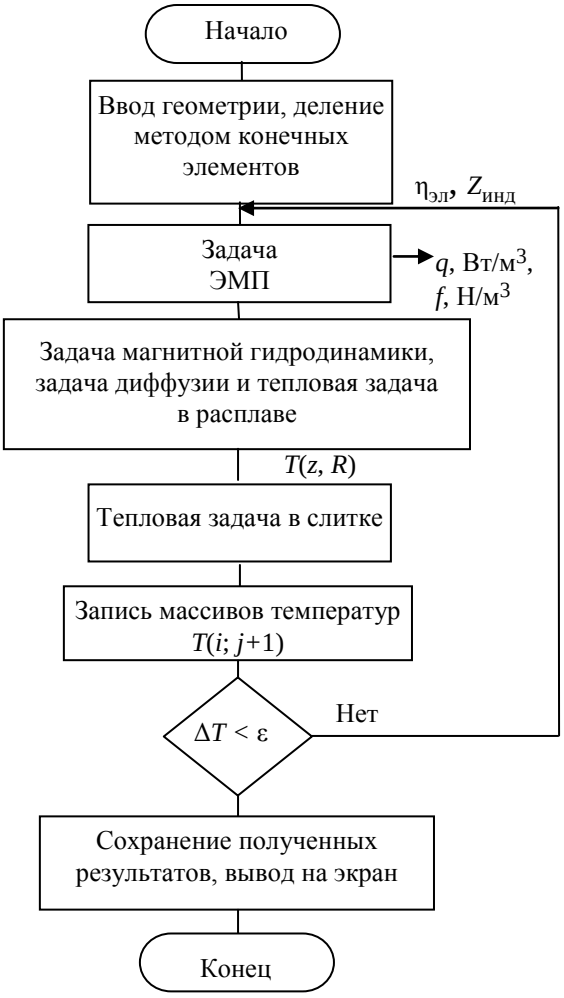

Рис. 2

Таким образом, после принятых допущений математические модели температурного поля в расплаве-слитке и кристаллизации расплава с учетом граничных условий имеют следующий вид:

$$\begin{cases} C_p(T)\,\gamma\ \ T\ \ \dfrac{\partial T}{\partial t} = \dfrac{1}{R}\ \dfrac{\partial}{\partial R}\left(\lambda(T) R \dfrac{\partial T}{\partial R}\right) + \dfrac{\partial}{\partial z}\left(\lambda(T)\dfrac{\partial T}{\partial z}\right), \\ q_1 = \alpha\ \ T - T_{\text{c}}\ , \\ q_2 = \alpha\ \ T - T_{\text{c}}\ , \\ q_3 = \alpha\ \ T - T_{\text{c}}\ , \\ T(R, z_0) = T_{\text{гр1}}, \\ T(R, z_L) = T_{\text{гр2}}, \\ T(R, z_2) = T_{\text{гр3}}, \\ T(R, z_H) = T_{\text{гр4}}, \\ T(R, z_1) = T_{\text{sol}}. \end{cases}$$

где C_p – удельная теплоемкость, Дж/кг·К; T – температура, К; t – время, с; γ – плотность, кг/м^3; R – радиальная координата; λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К); м; z – осевая координата; z_0 – нулевая координата; z_1 – координата температуры на границе со слитком; z_L – координата температуры на границе с расплавленной зоной; z_R – координата температуры в зоне расплава; z_2 – координата температуры на границе с расплавленной зоной; z_H – координата верхней границы загрузки; z_3 – координата границы воздуха; α – коэффициент теплообмена; T_c – температура окружающей среды, К; $T_{гр1}$, $T_{гр2}$, $T_{гр3}$, $T_{гр4}$ – значения температур на границах области решения; T_{sol} – температура на границе расплава и слитка, К; v – скорость перемещения тигля, мм/мин, °С.

На рис. 3 показана расчетная область исследуемой системы, где выделены подобласти: *1* – решения задачи ЭМП; *2* – решения задачи гидродинамики и диффузии в расплаве; *3* – решения тепловой задачи в расплаве; *4* – решения тепловой задачи в слитке, а также обозначены $\eta_{эл.}$ –электрический КПД, %; Z_{ind} – входной импеданс индуктора, Ом; ε – ошибка, %; q – внутренние источники теплоты, Вт/м^3; f – сила Лоренца, Н/м^3; i – текущая координата; j – текущее время; $\Delta T = T(i{:}j + 1) - T(i{:}j)$ – изменение по температуре, °С; q_1, q_2, q_3 – тепловые потоки в загрузке, Вт/м^3.

Одним из основных исходных данных для решения тепловой задачи является тепловой поток от нагретого материала (расплава/слитка) в стенку водоохлаждаемого тигля. На рис. 4 представлена величина экспериментально определенного теплового потока от расплава q_2 и от слитка q_3 в стенку холодного тигля [4].

Алгоритм решения тепловой задачи представлен на рис. 5. Решается она в программной среде ANSYS [5].

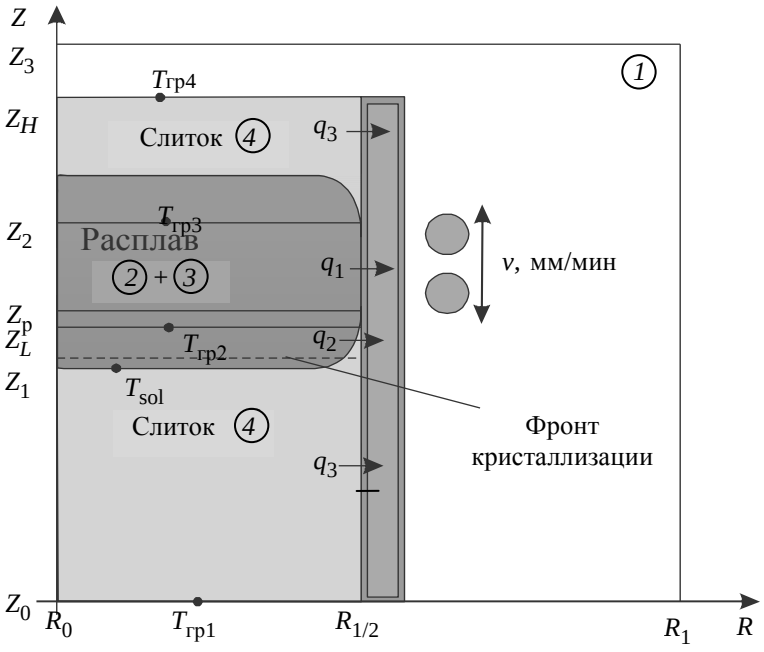

Рис. 3

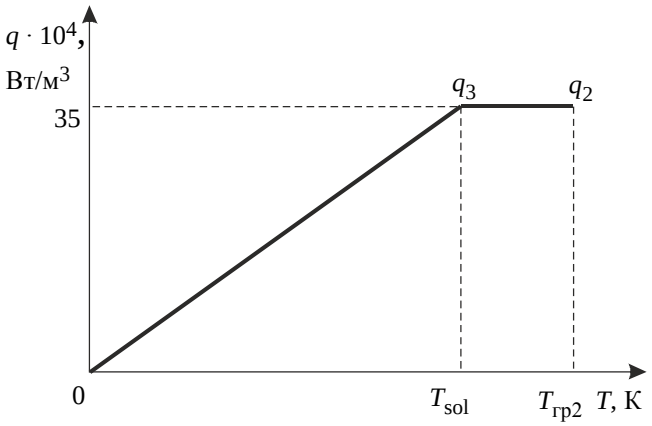

Рис. 4

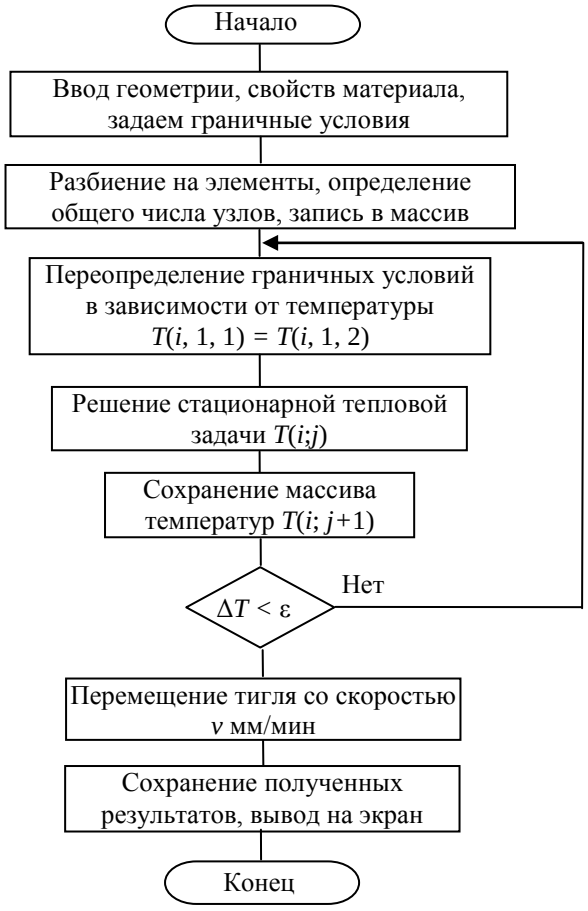

Рис. 5

В задаче используются температурнозависимые теплофизические свойства материалов, такие как – теплопроводность, удельная теплоемкость, плотность, электропроводность, коэффициент теплового расширения [6]–[8]. Перемещение тигля относительно индуктора осуществляется заданием скорости *v* мм/мин и количества циклов итераций движения тигля *t*.

Анализ результатов. На рис. 6 представлены формы фронта кристаллизации при скоростях перемещения расплава относительно индуктора 2 и 5 мм/мин.

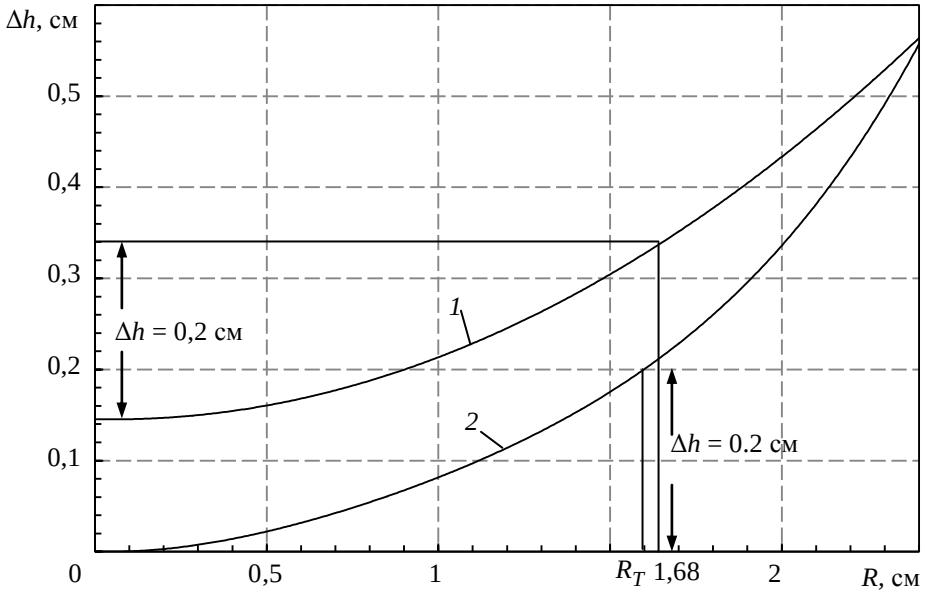

Рис. 6

Целевой функцией является получение плоского фронта кристаллизации. Плоский фронт кристаллизации расплава характеризует оптимальные параметры плавки. Для оценки формы фронта кристаллизации введем следующие критерии. Если изменение формы фронта лежит в пределах 2 мм по координате *Z* на 70 % радиуса расплава, будем считать форму фронта кристаллизации плоской: $R_{\text{Т}}/R \geq 0{,}70$; $\Delta h \leq 0{,}2$ см, где R – радиус загрузки, см; $R_{\text{Т}}$ – текущий радиус, см; Δh – изменение формы фронта кристаллизации по радиусу, см.

При скорости перемещения тигля относительно индуктора 5 мм/мин изменение фронта кристаллизации в пределах 2 мм располагается на 67 % поверхности расплава (зависимость *2*, рис. 6). При такой скорости кристаллизации образуется ванна расплава с большой высотой, что определяет большие затраты энергии на плавку.

При скорости перемещения тигля 2 мм/мин изменение фронта кристаллизации в пределах 2 мм располагается на 70 % поверхности расплава (зависимость *1*, рис. 6), что удовлетворяет введенным критериям и, соответственно, характеризует оптимальные параметры плавки.

Исследования проводились при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013г., соглашение № 14.132.21.1733.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пат. 2244048 № 2000116804/02; МПК C30B13/16 / В. Х. Забаровский. Способ зонной плавки и устройство для его осуществления; заявитель и патентообладатель В. Х. Забаровский; опубл. 10.01.2005.

2. Пфанн В. Зонная плавка М.: Мир, 1970.

3. Петров Ю. Б. Индукционная плавка окислов. Л.: Энергоатомиздат, Ленингр. отд-ние, 1983.

4. Физико-химические и теплофизические процессы в гарнисаже и защитных покрытиях на конструкционной стали при контакте с перегретыми расплавами ферросплавов и оксидов / Ю. П. Удалов, Б. А. Лавров, Н. В. Гуськова и др. // Физика и химия стекла. 2011. Т. 37, №. 1 С. 85–97.

5. Чигарев, А. В., Кравчук А. С., Смалюк А. Ф. ANSYS для инженеров: Справ. пособие М.: Машиностроение-1, 2004.

6. Кржижановский Р. Е., Штерн З. Ю. Теплофизические свойства неметаллических материалов. Л.: Энергия, 1973.

7. Самсонов Г. В. Физико-химические свойства окислов. М.: Металлургия, 1978.

8. Мюллер Г. Выращивание кристаллов из расплава. М.: Мир, 1991.

M. Yu. Maximenko, I. V. Poznyak, A. N. Shatunov, A. Yu. Pechenkov, V. V. Kichigin, A. I. Maksimov

CONTROL FRONT MELT CRYSTALLIZATION WITH CONTINUOUS-SEQUENCE ZONE MELTING IN AN INDUCTION FURNACE WITH A COLD CRUCIBLE

Development of new technologies for spent nuclear waste, including the reprocessing of nuclear fuel for reuse in the fuel cycle, requires a lot of attention The analysis of developments showed the most suitable way in terms of economic, technological, environmental and other criteria – a way to clear it with the zone melting. Zone melting allows to receive necessary degree of purification, to obtain a crystalline product, provide continuous operation of the device not requiring periodic stops to remove impurities.

Zone melting, induction heating, cold crucible, clean nuclear waste