

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ ЛИНЕЙНОГО КРИСТАЛЛИЗАТОРА  
НЕПРЕРЫВНОГО ТИПА НА ПРИМЕРЕ ВЫДЕЛЕНИЯ КРИСТАЛЛОВ ГЕКСАГИДРАТА  
НИТРАТА УРАНИЛА**

Е.А. Посеницкий<sup>1</sup>

Научный руководитель: директор отделения, к.ф.-м.н. В.А. Кашеев<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский Томский политехнический университет,  
Россия, г.Томск, пр. Ленина, 30, 634050

<sup>2</sup>Высокотехнологический научно-исследовательский институт неорганических материалов  
имени академика А.А. Бочвара,  
Россия, г. Москва, ул. Рогова, 5а, 123098

E-mail: [posenickiy@gmail.com](mailto:posenickiy@gmail.com)

**MATHEMATIC SIMULATION OF CONTINUOUS TYPE LINEAR CRYSTALLIZER  
OPERATING MODES BASED ON URANYL NITRATE HEXAHYDRATE CRYSTALS SORTING**

E.A. Posenitskiy<sup>1</sup>

Scientific Supervisor: Dir. of Department, Ph.D. V.A. Kasheev<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Tomsk Polytechnic University, Russia, Tomsk, Lenin str., 30, 634050

<sup>2</sup>High-Technology Scientific Research Institute for Inorganic Materials,  
Russia, Moscow, Rogov St., 5a, 123098

E-mail: [posenickiy@gmail.com](mailto:posenickiy@gmail.com)

**Abstract.** *The object of research is crystallization affinage process of uranyl nitrate from nitric acid solution. The process of crystallization affinage is a working operation, which can provide effective extraction and purification of desired products (fission materials) during spent nuclear fuel (SNF) reprocessing. The purpose of the work is mathematical description of the line continuous crystallizer operating modes through the example of uranyl nitrate hexahydrate crystals sorting. The mathematical model presented in the work allows describing changing parameters of the crystallization process in the crystallizer active volume and choosing the most effective operating modes from the point of view of SNF reprocessing desired product extraction.*

**Введение.** Основной задачей процесса переработки облученного ядерного топлива (ОЯТ) является извлечение присутствующих в ОЯТ делящихся материалов (урана и плутония) с целью их повторного использования для фабрикации ядерного топлива [1], причем при переработке необходимо обеспечить довольно высокую степень очистки делящихся материалов от накопленных в ОЯТ продуктов деления. Промышленно используемая в Российской Федерации [2] и других странах технология переработки ОЯТ основана на растворении ОЯТ в азотной кислоте и использовании различных экстрагентов для селективного извлечения делящихся материалов из азотнокислого раствора с последующей операцией отделения целевых продуктов от экстрагента. Отработавший экстрагент является радиоактивным продуктом, его утилизация представляет серьезную проблему и сопровождается возникновением особого класса отходов – органических радиоактивных отходов. В связи с этим, особый интерес представляет

разработка технологических операций, основанных на использовании безреагентных способов извлечения целевых продуктов из ОЯТ.

Одним из таких способов является метод кристаллизационного выделения урана и плутония из ОЯТ [3-5]. Метод основан на создании условий, при которых целевые продукты, находящиеся в растворенном виде в азотнокислом растворе, выделяются в кристаллическую фазу. Указанный метод в последние годы достаточно интенсивно разрабатывается и имеет аппаратное воплощение в виде экспериментальных аппаратов – кристаллизаторов, наиболее совершенный из которых – линейный кристаллизатор непрерывного действия, разработанный в АО «ВНИИНМ» [6], схематически изображен на рис. 1.

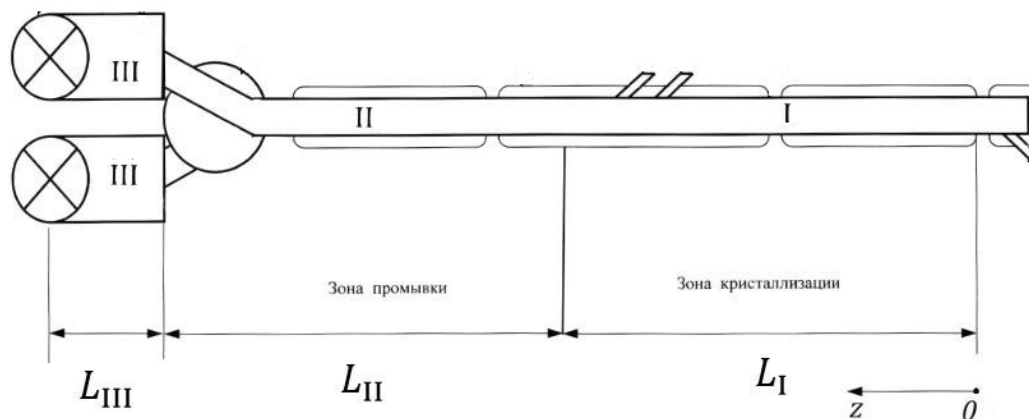


Рис. 1. Схема линейного кристаллизатора непрерывного типа.

I – зона кристаллизации, II – зона промывки, III – накопительная емкость

**Математическая модель процесса кристаллизационного выделения в линейном кристаллизаторе.**

Запишем полученную после некоторых преобразований систему уравнений, описывающую динамику нестационарных процессов в линейном кристаллизаторе.

№	Уравнение	Параметр
1	$\frac{\partial R}{\partial t} + v_{\text{ТВ}} \frac{\partial R}{\partial z} = k (C_{\text{НУ}}^{m, \text{нас}} - C_{\text{НУ}}^m)$	$R(z, t)$
2	$\frac{\partial [nv_{\text{ТВ}}]}{\partial z} = - \frac{\partial n}{\partial t}$	$n(z, t)$
3	$W = \frac{4}{3} \pi R^3 n$	$W(z, t)$
4	$\frac{\partial [C_{\text{НУ}}^m \rho_{\text{ж}} v_{\text{ж}} (1-W)]}{\partial z} + \frac{\partial [C_{\text{НУ}}^m \rho_{\text{ж}} (1-W)]}{\partial t} = -4\pi k C_{\text{ТВ}} \rho_{\text{ТВ}} R^2 n (C_{\text{НУ}}^{m, \text{нас}} - C_{\text{НУ}}^m)$	$C_{\text{НУ}}^m(z, t)$
5	$\frac{\partial}{\partial z} \left\{ T \left[ v_{\text{ТВ}} W + v_{\text{ж}} \frac{\rho_{\text{ж}}}{\rho_{\text{ТВ}}} \frac{C_{\text{ж}}}{C_{\text{ТВ}}} (1-W) \right] \right\} + \frac{\partial}{\partial t} \left\{ T \left[ W + \frac{\rho_{\text{ж}}}{\rho_{\text{ТВ}}} \frac{C_{\text{ж}}}{C_{\text{ТВ}}} (1-W) \right] \right\} = A (T_{\text{ст}} - T)$	$T(z, t)$
6	$C_{\text{НУ}}^{m, \text{нас}} = C_{\text{НУ}}^{m, \text{нас}}(T)$	$C_{\text{НУ}}^{m, \text{нас}}(z, t)$ (1)
7	$\rho_{\text{ж}} = \frac{1023 - 0,4681 \cdot T}{1 - 0,79 \cdot C_{\text{НУ}}^m - 0,466 \cdot C_{\text{HNO}_3}^m + 0,00055 \cdot C_{\text{HNO}_3}^m \cdot T}$	$\rho_{\text{ж}}(z, t)$
8	$\frac{\partial [\rho_{\text{ж}} v_{\text{ж}} (1-W)]}{\partial z} + \frac{\partial [\rho_{\text{ж}} (1-W)]}{\partial t} = -4\pi k \rho_{\text{ТВ}} R^2 n (C_{\text{НУ}}^{m, \text{нас}} - C_{\text{НУ}}^m)$	$v_{\text{ж}}(z, t)$
9	$v_{\text{ТВ}} = v_{\text{ж}} + \frac{2}{9} \frac{g}{v} R^2 \left[ \frac{\rho_{\text{ТВ}}}{\rho_{\text{ж}}} - 1 \right]$	$v_{\text{ТВ}}(z, t)$

**Результаты численного моделирования.** При проведении численного моделирования применяется метод простых итераций с постоянным шагом по времени  $\Delta t$ . Ниже приведены результаты численных расчетов системы уравнений (1). Представлены зависимости размера кристаллов ГНУ, объемной доли твердой фазы, концентрации НУ в жидкой фазе и скорости движения кристаллов ГНУ в зоне кристаллизации аппарата в зависимости от координаты в различные моменты времени.

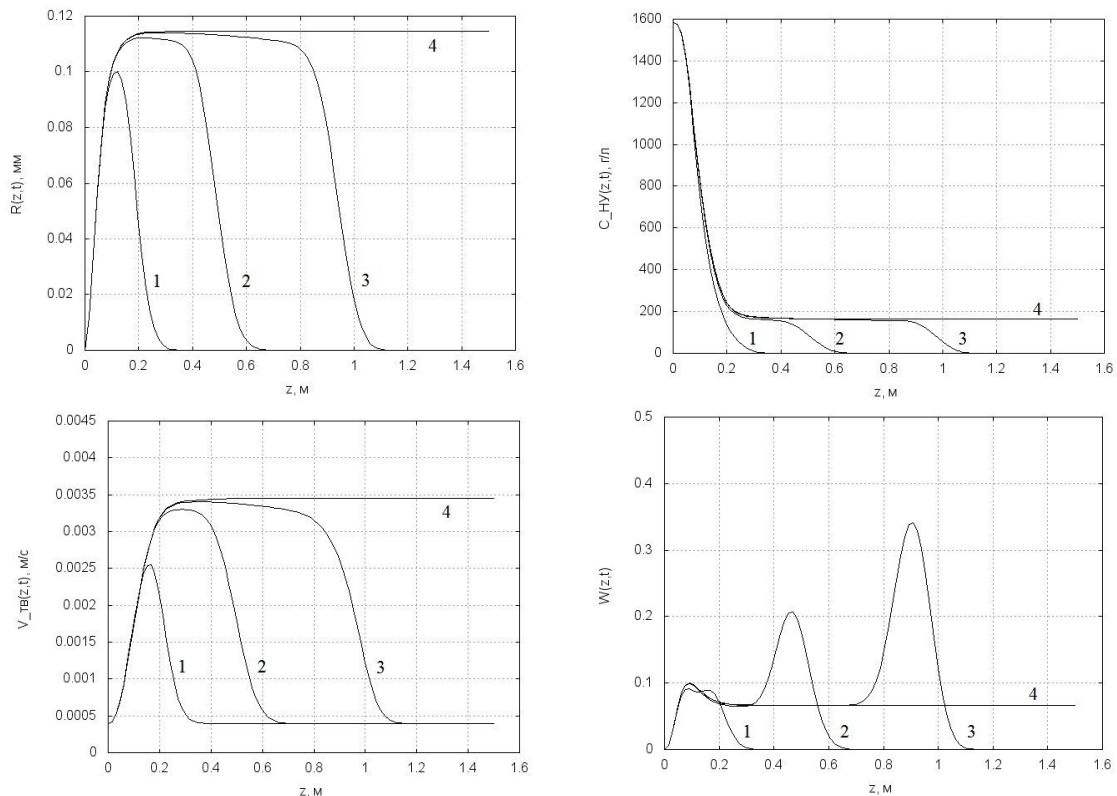


Рис. 2. Графики зависимости параметров процесса кристаллизации от координаты в зоне I аппарата в различные моменты времени: 1 – 10 мин, 2 – 15 мин, 3 – 20 мин, 4 – 60 мин

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Taylor R. Reprocessing and Recycling of Spent Nuclear Fuel. - Woodhead Publishing, 2015.
2. Балакин И.М., Рошин А.Н., Никулин С.Л. и др. Разработка и совершенствование фильтрационного и экстракционного оборудования завода РТ-1 // Вопросы радиационной безопасности. - 1997. - № 2. - С. 13-26.
3. Пат. 2268510 РФ. G21C19/46. Способ очистки нитрата уранила от продуктов деления и устройство для его осуществления / Волк В.И., Арсеенков Л.В., Данилин Е.М. и др. Заявлено 24.02.2004; Оpubл. 20.01.2006.
4. Волк В.И., Арсеенков Л.В., Веселов С.Н., Жеребцов А.А., Мельникова С.Н. Физико-химические основы процесса кристаллизационного выделения и очистки урана в виде плава гексагидрата нитрата уранила // Радиохимия-2009: Сб. тезисов докладов конференции. Москва, 2009. - С. 221.
5. Volk V.I., Arsenkov L.V., Nikonov S.A., Veselov S.N. The study of co-crystallization of uranium and plutonium nitrate hexahydrate in the process of mixture undivided refining crystallization // The first Russian-Nordic Symposium on Radio-chemistry. - Moscow, 2013.
6. Пат. 2528399 РФ. G21C19/00. Способ кристаллизационного выделения и очистки гексагидрата нитрата уранила и устройство для его осуществления / Волк В.И., Арсеенков Л.В., Веселов С.Н. и др. Заявлено 23.01.2013; Оpubл. 20.09.2014.