

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПЛАЗМОХИМИЧЕСКОГО СИНТЕЗА ОКСИДНЫХ  
КОМПОЗИЦИЙ ИЗ ВОДНО-ОРГАНИЧЕСКИХ НИТРАТНЫХ РАСТВОРОВ ДЛЯ  
ПЕРСПЕКТИВНЫХ ВИДОВ ЯДЕРНОГО ТОПЛИВА**

В.В. Зубов<sup>1,2</sup>, Е.С. Лихачева<sup>2</sup>

Научный руководитель: профессор, д.ф.-м.н. И.В. Шаманин

<sup>1</sup>ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», Россия, г. Саров, пр. Мира, 37, 607188

<sup>2</sup>НИ «Томский политехнический университет»,

Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, 634050

E-mail: [kaberne1812@yandex.ru](mailto:kaberne1812@yandex.ru)

**MODELING OF PROCESS PLASMA CHEMICAL SYNTHESIS OF OXIDE COMPOSITIONS OF  
WATER-ORGANIC NITRATE SOLUTIONS FOR THE ADVANCED TYPES OF NUCLEAR FUEL**

V.V. Zubov<sup>1,2</sup>, E.S. Likhacheva<sup>2</sup>

Scientific Supervisor: lecturer, acting head "Department of natural Sciences", Ph.D. I.V. Shamanin

<sup>1</sup>VNIIEF, Russia, Sarov, Mir str., 37, 607188

<sup>2</sup>Tomsk Polytechnic University, Russia, Tomsk, Lenin str., 30, 634050

E-mail: [kaberne1812@yandex.ru](mailto:kaberne1812@yandex.ru)

**Abstract.** *This article shows results of thermodynamic modeling of treatment on uranium nitrate solution in air plasma for uranium and matrix production. Compositions are based on uranium nitrate solution, matrix and air. Process was carried out for widely temperature and mass fraction ranges of air plasma coolant at some VONS:air molar ratios. Optimal consists of uranium nitrate solution and modes for practical application were determined.*

**Введение.** Значительную часть атомной энергетики в XXI веке еще будут составлять АЭС, использующие керамическое ядерное топливо (ЯТ) из диоксида урана, обогащенного по изотопу U-235, у которого наряду с достоинствами есть и существенные недостатки: низкая теплопроводность, ограничивающая удельную мощность реактора по температуре плавления; хрупкость и склонность к растрескиванию; короткий цикл использования (до 3-5 лет); невозможность создания энергетических установок сверхмалой (до 10 МВт) и малой (до 100 МВт) мощности; большие расходы на утилизацию отработавшего ЯТ; ограниченный ресурс изотопа U-235.

При использовании изотопов U-238, Th-232 и Pu-239 отпадает необходимость в дорогостоящем изотопном обогащении, цикл использования ЯТ может быть доведен до 10-15 лет, а прогнозных запасов тория в земной коре в 3-5 раз больше, чем урана. Использование керамического ЯТ из оксидных композиций на основе тория дает возможность создания сверхмалых и малых энергетических установок для использования в удаленных и труднодоступных регионах, на рудниках и карьерах. Однако у керамического ЯТ остается существенный недостаток – низкая теплопроводность.

Одним из перспективных направлений дальнейшего развития атомной энергетики является использование дисперсионного ЯТ, в котором ядерные материалы в виде гранулированных оксидных композиций размещают в матрице, имеющей высокий коэффициент теплопроводности [1]. Однако использование в качестве матрицы порошков металлов (алюминия, молибдена, вольфрама, нержавеющей

стали и др.) увеличивает коэффициент теплопроводности, но приводит к ухудшению нейтронного баланса дисперсионного ЯТ из-за резонансного поглощения нейтронов.

К недостаткам применения внешнего гелеобразования (золь-гель процесса) для получения гранулированных оксидных композиций из смесевых нитратных растворов следует отнести: многостадийность; продолжительность; низкую производительность; необходимость использования химических реагентов; дополнительное водородное восстановление; высокую себестоимость. Кроме того, раздельное получение и механическое смешение микросфер и металлической матрицы не обеспечивают однородное распределение фаз в таком дисперсионном ЯТ.

Предлагается совместный плазмохимический синтез наноразмерных оксидных композиций, включающих ядерные материалы (оксиды урана, тория, плутония) и матрицу (оксиды магния, бериллия и др.) с высоким коэффициентом теплопроводности и низким резонансным поглощением нейтронов, из диспергированных водно-органических нитратных растворов на основе смесевых водных нитратных растворов и органического компонента (спирты, кетоны и др.). Это обеспечит прямой плазмохимический синтез в воздушной плазме нанодисперсных оксидных композиций с однородным распределением фаз и требуемым стехиометрическим составом ( $MgO-UO_2$ ,  $MgO-UO_2-PuO_2$  и др.) без дополнительного водородного восстановления, а также высокую производительность и существенное снижение энергозатрат на их получение.

**Материалы и методы исследования.** Для прямого плазмохимического синтеза ВОНР предлагается использование воздушно-плазменного потока, генерируемого высокочастотным плазмотроном.

Одним из основных параметров горения газозвушных смесей является температура горения, которая определяется по формуле [2]:

$$T_{\text{ог}} = \frac{Q_{\text{н}}^{\text{н}} + \alpha \cdot m_{\text{ок}} \cdot c_{\text{ок}} \cdot t_{\text{ок}}}{V_{\text{пр}} \cdot c_{\text{пр}}}, \text{ К} \quad (1)$$

где:  $Q_{\text{н}}^{\text{н}}$  - низшая теплота сгорания газозвушной смеси (кДж/кг),  $\alpha$  - коэффициент избытка окислителя (воздух),  $m_{\text{ок}}$  - масса теоретически необходимого окислителя (кг),  $c_{\text{ок}}$  - удельная теплоемкость окислителя (кДж/кг·град),  $t_{\text{ок}}$  - исходная температура окислителя (К),  $V_{\text{пр}}$  - объем продуктов горения (м<sup>3</sup>),  $c_{\text{пр}}$  - удельная теплоемкость продуктов горения (кДж/м<sup>3</sup>·град).

Для определения оптимальных режимов процесса плазмохимического синтеза ВОНР были проведены расчеты равновесных составов газообразных и твердофазных продуктов. Расчеты равновесных составов и основных термодинамических параметров проводились с использованием лицензионного программного пакета «TERRA» при давлении 0,1 МПа в диапазоне температур (1000–4000) К и изменяемой массовой доле воздушного плазменного теплоносителя.

Вывод об оптимальности режима проводился на основании стабильного формирования диоксида урана с матрицей при рабочих температурах ~1500 К. В качестве целевого продукта выбран диоксид урана с матрицей.

**Результаты.** На рисунках 1–2 представлены газообразные (а) и конденсированные продукты (б) плазмохимического синтеза ВОНР в составе оптимальной композиции при содержании воздушного теплоносителя 50 % масс. и 70 % масс.

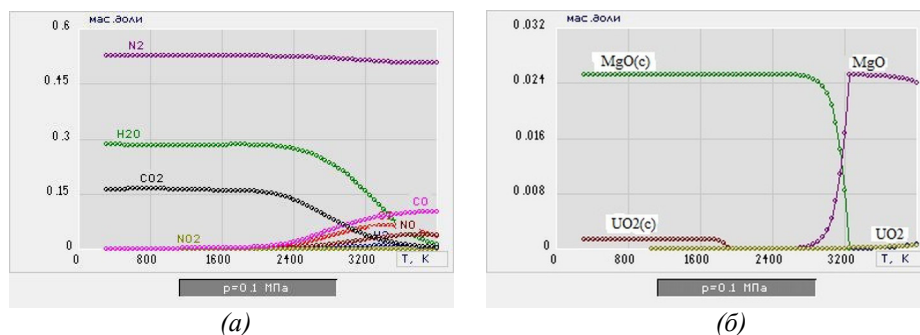


Рис.1. Газообразные (а) и конденсированные (б) продукты плазмохимического синтеза ВОНР

При температурах 1150–1700 К с максимальным выходом образуется целевой продукт – диоксид урана с матрицей MgO–UO<sub>2</sub>(с) в конденсированной фазе.

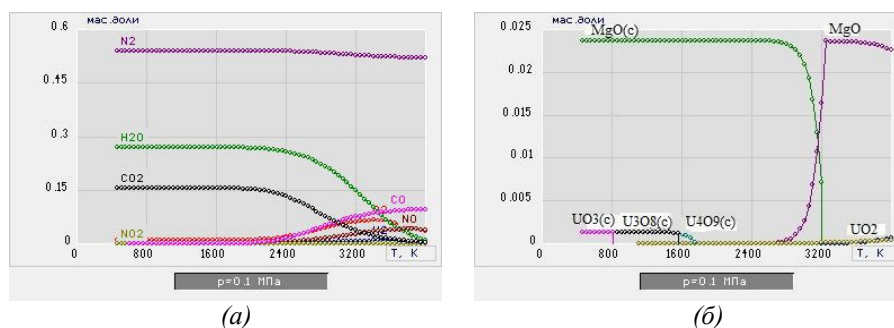


Рис.2. Газообразные (а) и конденсированные (б) продукты плазмохимического синтеза ВОНР

При температурах 1150–1700 К с максимальным выходом не образуется целевой продукт – диоксид урана с матрицей MgO–UO<sub>2</sub>(с) в конденсированной фазе.

**Заключение.** С учётом полученных результатов могут быть рекомендованы для практической реализации процесса плазмохимического синтеза оксидных композиций следующие оптимальные режимы:

- состав смеси (50 % ВОНР : 50 % воздух);
- интервал рабочих температур: (1150–1700) К.

Результаты проведенных исследований могут быть использованы при разработке альтернативной отечественной энергоэффективной технологии плазмохимического синтеза нанодисперсных оксидных композиций для перспективных видов ядерного топлива.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алексеев С.В., Зайцев В.А., Толстоухов С.С. Дисперсионное ядерное топливо. – М.: Техносфера, 2015. – 248 с.
2. Бернадинер М.Н., Шурыгин А.П. Огневая переработка и обезвреживание промышленных отходов. – М.: Химия, 1990. – 304 с.