

<https://doi.org/10.52676/1729-7885-2022-3-82-87>

УДК 54.548.4

## ИЗУЧЕНИЕ ПРОЦЕССОВ ФАЗООБРАЗОВАНИЯ В ИНЕРТНЫХ МАТРИЦАХ ПО ТИПУ CER-CER НА ОСНОВЕ ОКСИДНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

**И.Е. Кенжина<sup>1,2)</sup>, А.А. Шаймерденов<sup>1,3)</sup>, А.У. Толенова<sup>1)</sup>, С.К. Аскербеков<sup>1,3)</sup>, А.Л. Козловский<sup>1,3)</sup>**

<sup>1)</sup> *Satbayev University, Алматы, Казахстан*

<sup>2)</sup> *Казахстанско-Британский технический университет, Алматы, Казахстан*

<sup>3)</sup> *Институт ядерной физики МЭ РК, Алматы, Казахстан*

*E-mail для контактов: kenzhina@physics.kz*

Целью данной работы является изучение процессов фазообразования в образцах  $(1-x)\text{ZrO}_2 - x\text{Al}_2\text{O}_3$  керамик в зависимости от вариации компонент оксидов, а также установлению изменения структурных параметров и степени кристалличности. Выбор в качестве основы для инертных матриц ядерного топлива по типу cer-cer оксидов циркония и алюминия обусловлен их физико-химическими, структурными и механическими свойствами, совокупность которых позволит получить новый тип керамик, обладающий большим потенциалом в области ядерного топлива. Данные оксидные соединения обладают высокой термической стабильностью и устойчивостью к воздействию высоких температур, что также позволяет использовать их в качестве основы для дисперсного ядерного топлива для высокотемпературных ядерных реакторов нового поколения. Для получения керамик на основе оксидных соединений был выбран метод механохимического перемалывания с последующим термическим отжигом. Выбор условий перемалывания, а также последующего термического отжига был выбран для инициализации процессов фазовых превращений и структурных изменений в результате термического воздействия и частичной релаксации иницированных при перемалывании деформационных искажений и метастабильных формирований. В качестве основного метода изучения процессов фазообразования и структурных изменений был выбран метод рентгеновской дифракции. В ходе проведенных исследований было установлено, что добавление оксида алюминия приводит к структурному упорядочению основной моноклинной фазы  $\text{ZrO}_2$ , а также формированию твердых растворов замещения и внедрения. При равной концентрации компонент оксидов с помощью метода рентгенофазового анализа было установлено полиморфное фазовое превращение в диоксиде циркония, наличие которого свидетельствует о процессах фазовых трансформаций, возникающих при добавлении оксида циркония и изменения процессов фазообразования.

**Ключевые слова:** инертные матрицы, процессы фазообразования, оксидные керамики, циркалоид, фазовые превращения.

### ВВЕДЕНИЕ

Одним из способов решения энергетического дисбаланса и ухода от зависимости от углеводородного сырья является развитие ядерной энергетики и увеличение ее вклада в мировой энергетический сектор. В этой связи большое внимание в последние несколько лет уделяется исследованиям и поиску практических и технологических решений, связанных с разработками новых видов ядерного топлива, а также реакторов нового поколения. Основными направлениями в данных исследованиях являются поиск возможностей перехода от традиционного ядерного топлива к дисперсному, замены топлива из диоксида урана на плутониевое топливо, а также возможностям повышения степени выгорания топлива и КПД ядерных реакторов [1, 2].

Решение данной задачи в последние несколько лет рассматривается переход от традиционных твэлов к дисперсному ядерному топливу, ключевой концепцией которого является размещение плутония в инертной матрице на основе оксидных или нитридных соединений [3, 4]. В случае разработки и дальнейшего использования подобной концепции дисперсного ядерного топлива большое внимание долж-

но быть уделено материалам, использующимся в качестве инертной матрицы [5]. Основными требованиями к данным материалам являются: высокая совместимость с большинством конструкционных материалов, высокие показатели прочностных и теплофизических характеристик, устойчивость к тепловому расширению и полиморфным превращениям в случае внешних воздействий, радиационная стойкость и инертность к процессам, связанным с накоплением радиационно-индуцированных дефектов [6, 7]. Также в последнее время одним из требований к материалам инертных матриц является показатель температуры плавления и устойчивости к температурному нагреву в течение длительного времени. Это требование обусловлено переходом к новым типам реакторных установок, которые будут работать при более высоких температурах.

Для решения всех вышеуказанных требований, как правило, в качестве основы инертных матриц используют тугоплавкие оксидные соединения, а также их смеси, что позволяет совместить положительные качества оксидных соединений и получить материал, обладающий большими перспективами использования в качестве дисперсного ядерного топлива [8–10].

Наиболее перспективными из известных оксидных соединений в данном направлении можно выделить диоксид циркония или циркалоидные керамики, которые в силу совокупности своих свойств являются одними из кандидатных материалов для инертных матриц дисперсного ядерного топлива. Однако, не смотря на ряд преимуществ циркалоидных керамик, существующая проблема устойчивости к полиморфным превращениям в результате внешних воздействий достаточно сильно ограничивает спектр их применения [11–13]. Для устранения данного недостатка, в ряде работ было предложено использовать стабилизирующие добавки на основе оксидов иттрия, церия и алюминия, добавление которых приводит к стабилизации и повышению устойчивости к полиморфным превращениям [14, 15].

Анализируя все вышесказанное основной целью данной работы является изучение процессов фазообразования в  $(1-x)\text{ZrO}_2 - x\text{Al}_2\text{O}_3$  керамиках, а также определения структурных параметров в зависимости от вариации компонент состава керамик. В этой связи в качестве объектов исследования были выбраны композиционных керамик по типу сег-сег на основе соединений циркалоя допированного оксидом алюминия. В свою очередь, полученные результаты в дальнейшем позволят интерпретировать результаты прочностных и механических свойств керамик в зависимости от фазового состава и степени их структурного упорядочения.

#### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Для синтеза керамик по типу сег-сег на основе соединений циркалоя допированного оксидом алюминия были использованы порошки микронного размера  $\text{ZrO}_2$  и  $\text{Al}_2\text{O}_3$  приобретенные у компании Sigma Aldrich (США). Химическая чистота используемых порошков для синтеза составила 99,95%. Синтез керамик осуществлялся путем варьирования компонент состава  $(1-x)\text{ZrO}_2 - x\text{Al}_2\text{O}_3$  в диапазоне  $x=0,1-0,5$  моль.

Синтез керамик был осуществлен с применением механохимического метода, заключающегося в перемалывании исходных порошков в заданном мольном соотношении в планетарной мельнице. Для перемалывания была использована планетарная мельница PULVERISETTE 6 classic line (Fritsch, Германия) в качестве мелющего стакана был использован стакан объемом 80 мл из карбида вольфрама, использование которого обусловлено необходимостью избегания в процессе перетирания смесей попадания примесей, обладающих повышенной твердостью. Соотношение исходной смеси и мелющих шаров составило 2:1. Перемалывание осуществлялось в течение 30 минут при скорости помола 250 оборотов в минуту. После перемалывания полученные смеси порошкообразного вида были отожжены в муфельной печи при температуре 1500 °C (скорость нагрева 10 °C /мин) в течение 8 часов с последующим остыванием вместе с печью в течение 24 часов.

Исследование фазового состава синтезированных керамик в зависимости от концентрации и соотношения компонент оксидов было проведено методом рентгеновской дифракции, реализованной с помощью порошкового рентгеновского дифрактометра D8 Advance ECO (Bruker, Germany). Съемка дифрактограмм осуществлялась в геометрии Брегг-Брентано, в угловом диапазоне  $2\theta=20-90^\circ$ , с шагом  $0,05^\circ$  и временем набора спектра в точке 1,5 с. Для расшифровки полученных дифрактограмм, а также определения фазового состава и структурных параметров было использовано программное обеспечение DiffractionEVA v. 4.2. Для уточнения фаз была использована база данных PDF-2 (2016). Уточнение параметров кристаллической решетки проводилось с использованием аппроксимирующих функций Нельсона-Тейлора.

#### РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рисунке 1 представлены результаты фазового анализа исследуемых керамик в зависимости от соотношения компонент, использующихся для синтеза. В качестве образца сравнения представлена рентгеновская дифрактограмма  $\text{ZrO}_2$  отожженного при температуре 1500 °C при тех же условиях, что и образцы смешанного состава.

Анализ образца  $\text{ZrO}_2$ , выбранного в качестве образца для сравнения после термического отжига показал, что отжиг керамик  $\text{ZrO}_2$  при температуре 1500 °C ( $0,55T_{пл}$ ) не приводит к фазовым полиморфным превращениям, а также на дифрактограмме не установлено наличие каких – либо рефлексов, характерных для примесных фаз. Полученные данные свидетельствуют о том, что в чистом виде  $\text{ZrO}_2$  керамики сохраняют моноклинную структуру (пространственная сингония  $P121/c1(14)$ ) при температуре отжига равной половине температуры плавления. При этом уменьшение параметров кристаллической решетки (см. данные в таблице) для отожженного образца в сравнении с эталонными значениями, свидетельствуют о том, что отжиг приводит к инициализации процессов структурного упорядочения и частичного снятия деформационных искажений и напряжений в кристаллической решетке.

Анализ представленной рентгеновской дифрактограммы образца с содержанием 0,1 моль  $\text{Al}_2\text{O}_3$  показал, что основные рефлексы, характерные для моноклинной фазы  $\text{ZrO}_2$ . Однако наблюдаемые рефлексы при  $2\theta=25,653^\circ$ ,  $35,372^\circ$ ,  $52,992^\circ$  и  $57,548^\circ$  характерны для фазы  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (пространственная сингония  $R-3c(167)$ ) с гексагонального типа кристаллической решетки. Наличие данных рефлексов, а также их форма, свидетельствует о том, что в процессе механохимического синтеза и последующего термического отжига происходит формирование структуры, содержащей включения в виде твердого раствора  $\text{Al}_2\text{O}_3$  без образования сложных оксидов или шпинельного типа структур. При этом оценка вкладов площадей рефлексов показала, что соотношение фаз  $\text{ZrO}_2 : \text{Al}_2\text{O}_3$

для исследуемого образца составило 89 : 11%, что в целом имеет хорошее согласие с мольным соотношением исходных компонент, использующихся для синтеза. Также стоит отметить, что, как и в случае исходного образца, для исследуемого состава наблюдается структурное упорядочение, которое выражается в уменьшении параметров кристаллической решетки, а также ее объема, свидетельствующее о снижении кристаллической плотности и степени структурного разупорядочения.

В случае увеличения компоненты  $\text{Al}_2\text{O}_3$  в составе керамик, подвергнутых термическому отжигу, наблюдается увеличение интенсивности дифракционных рефлексов, характерных для фазы  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , что свидетельствует об увеличении ее вклада в структуре.

При этом при  $2\theta=35,304^\circ$ ,  $45,599^\circ$  и  $59,945^\circ$  обнаружены дифракционные рефлексы, характерные для кубической фазы  $\text{AlZr}_3$  (пространственная сингония  $\text{Rm-3m}(221)$ ), характерной для формирования фаз по типу твердого раствора. Оценка вкладов дифракционных рефлексов, характерных для данной фазы, показал, что ее содержание составляет не менее 4%. Вклад фазы  $\text{Al}_2\text{O}_3$  составил более 20%, что в совокупности с вкладом фазы  $\text{AlZr}_3$ , составляет  $\frac{1}{4}$  от общего объема, приходящихся на примесные формирования. В свою очередь формирование кубической фазы  $\text{AlZr}_3$  свидетельствует о процессах фазовых превращений при термическом отжиге, которые сопровождаются образованием твердых растворов, а также структурному упорядочению и уплотнению керамик.

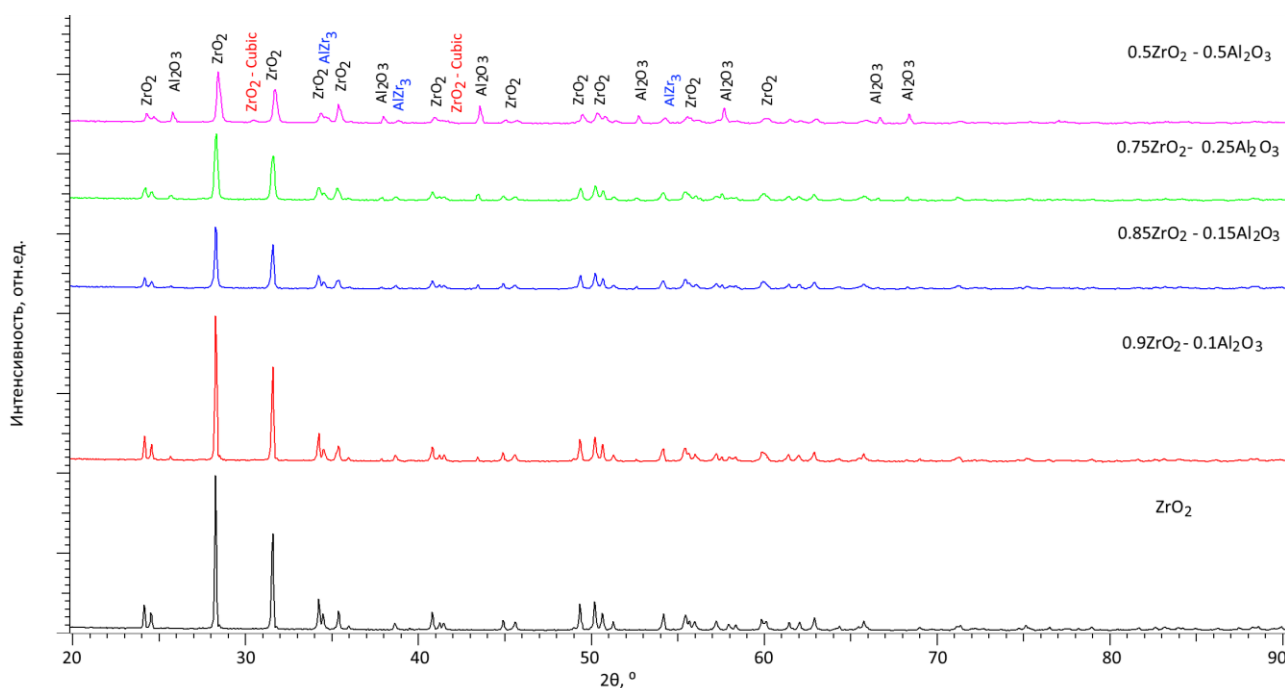


Рисунок 1. Результаты рентгеновской дифракции исследуемых образцов  $(1-x)\text{ZrO}_2 - x\text{Al}_2\text{O}_3$  керамик

Таблица. Данные структурных параметров исследуемых  $(1-x)\text{ZrO}_2 - x\text{Al}_2\text{O}_3$  керамик

Фаза	Содержание компоненты x в образцах $(1-x)\text{ZrO}_2 - x\text{Al}_2\text{O}_3$ керамиках, %				
	0	0,1	0,15	0,25	0,5
$\text{ZrO}_2$ – моноклинная	$a=5,16757\pm0,0035 \text{ \AA}$ , $b=5,18402\pm0,0025 \text{ \AA}$ , $c=5,27414\pm0,0022 \text{ \AA}$ , $\beta=99,230^\circ$ , $V=139,46 \text{ \AA}^3$	$a=5,16250\pm0,0032 \text{ \AA}$ , $b=5,19520\pm0,0044 \text{ \AA}$ , $c=5,25449\pm0,0034 \text{ \AA}$ , $\beta=99,205^\circ$ , $V=139,13 \text{ \AA}^3$	$a=5,16456\pm0,0015 \text{ \AA}$ , $b=5,18899\pm0,0035 \text{ \AA}$ , $c=5,24323\pm0,0032 \text{ \AA}$ , $\beta=99,195^\circ$ , $V=138,71 \text{ \AA}^3$	$a=5,16868\pm0,0035 \text{ \AA}$ , $b=5,18278\pm0,0042 \text{ \AA}$ , $c=5,24144\pm0,0025 \text{ \AA}$ , $\beta=99,156^\circ$ , $V=138,61 \text{ \AA}^3$	$a=5,13118\pm0,0026 \text{ \AA}$ , $b=5,16957\pm0,0025 \text{ \AA}$ , $c=5,23806\pm0,0022 \text{ \AA}$ , $\beta=99,097^\circ$ , $V=137,20 \text{ \AA}^3$
$\text{ZrO}_2$ – кубическая	—	—	—	—	$a=5,07503\pm0,0033 \text{ \AA}$ , $V=130,71 \text{ \AA}^3$
$\text{Al}_2\text{O}_3$ – гексагональная	—	$a=4,73928\pm0,0035 \text{ \AA}$ , $c=13,01062 \text{ \AA}$ , $V=253,08 \text{ \AA}^3$	$a=4,74393\pm0,0034 \text{ \AA}$ , $c=13,01062\pm0,0032 \text{ \AA}$ , $V=253,57 \text{ \AA}^3$	$a=4,73940\pm0,0024 \text{ \AA}$ , $c=13,01062\pm0,0026 \text{ \AA}$ , $V=253,09 \text{ \AA}^3$	$a=4,69944\pm0,0034 \text{ \AA}$ , $c=13,08971\pm0,0026 \text{ \AA}$ , $V=250,35 \text{ \AA}^3$
$\text{AlZr}_3$ – кубическая	—	—	$a=4,37534\pm0,0023 \text{ \AA}$ , $V=83,76 \text{ \AA}^3$	$a=4,39675\pm0,0035 \text{ \AA}$ , $V=85,00 \text{ \AA}^3$	$a=4,38727\pm0,0035 \text{ \AA}$ , $V=84,45 \text{ \AA}^3$

На рисунке 2 представлены результаты фазового анализа исследуемых  $(1-x)\text{ZrO}_2 - x\text{Al}_2\text{O}_3$  керамик, отражающих зависимости изменения содержания фаз в образцах при вариации компонент. Данные представленные на диаграмме были рассчитаны на основе оценки вкладов дифракционных рефлексов с помощью формулы (1).

$$V_{\text{вклада}} = \frac{RI_{\text{основная фаза}}}{I_{\text{примесная фаза}} + RI_{\text{основная фаза}}}, \quad (1)$$

где:  $I_{\text{основная фаза}}$  – средняя интегральная интенсивность основной фазы дифракционной линии,  $I_{\text{примесная фаза}}$  – средняя интегральная интенсивность дополнительной фазы,  $R$  – структурный коэффициент, равный 1,45.

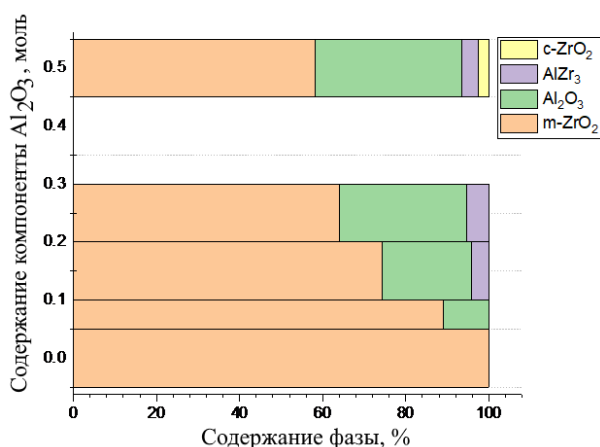


Рисунок 2. Результаты фазового анализа исследуемых  $(1-x)\text{ZrO}_2 - x\text{Al}_2\text{O}_3$  керамик

Анализ полученной рентгеновской дифрактограммы образца  $0,75\text{ZrO}_2 - 0,25\text{Al}_2\text{O}_3$  керамики показал, что вклад гексагональной фазы  $\text{Al}_2\text{O}_3$  увеличивается до 30%, а вклад кубической фазы  $\text{AlZr}_3$  увеличивается до 5%, что свидетельствует о том, что содержание примесных включений становится больше. При этом увеличение вклада дополнительных фаз приводит к формированию дополнительных межфазных границ, наличие которых обуславливает прочностные свойства керамик, а также их устойчивость к внешним воздействиям.

В случае, когда соотношение компонент  $\text{ZrO}_2$  и  $\text{Al}_2\text{O}_3$  становится равным при синтезе, оценка фазового состава показала, что содержание моноклинной фазы  $\text{ZrO}_2$  составляет не более 58–60%, а содержание фазы  $\text{Al}_2\text{O}_3$  составляет более 35%. При этом помимо ранее обнаруженных фаз  $\text{Al}_2\text{O}_3$  и  $\text{AlZr}_3$  в составе керамик, на полученных дифрактограммах наблюдаются дифракционные рефлексы, характерные для кубической фазы  $\text{ZrO}_2$  (пространственная сингония  $\text{Fm}\bar{3}\text{m}(225)$ ), формирование которой согласно полученным данным свидетельствует о возникновении полиморфных превращениях типа  $m\text{-ZrO}_2 \rightarrow c\text{-ZrO}_2$ . Полиморфные превращения подобного типа в  $\text{ZrO}_2$  могут привести к его упрочнению и повышению устой-

чивости к внешним воздействиям и механическим напряжениям. При этом анализ структурных параметров для моноклинной фазы  $\text{ZrO}_2$  показал, что формирование кубической фазы, а также примесных фаз в виде твердых растворов приводит к уменьшению параметров кристаллической решетки, свидетельствующему об упорядочении кристаллической структуры данной фазы.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье представлены результаты исследования фазового состава  $(1-x)\text{ZrO}_2 - x\text{Al}_2\text{O}_3$  керамик в зависимости от состава компонент при синтезе. Оценка фазового состава была осуществлена на основе анализа рентгеновских дифрактограмм. Синтез  $(1-x)\text{ZrO}_2 - x\text{Al}_2\text{O}_3$  керамик был осуществлен с применением метода механохимического перемалывания с последующим термическим отжигом при температуре 1500 °С. В результате проведенного анализа было установлено, что добавление оксида алюминия и увеличение его содержания в составе керамик до концентраций 0,10–0,15 моль приводит к формированию структуры по типу твердого раствора двух фаз с доминированием моноклинной фазы  $\text{ZrO}_2$ , а также присутствием в составе гексагональной фазы  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . При этом увеличение концентрации компоненты оксида алюминия в составе приводит к формированию кубической фазы, характерной для твердого раствора  $\text{AlZr}_3$ . При равном соотношении компонент  $\text{ZrO}_2$  и  $\text{Al}_2\text{O}_3$  в составе исходных смесей керамик после механохимического перемалывания и термического отжига было зафиксировано полиморфное фазовое превращение типа  $m\text{-ZrO}_2 \rightarrow c\text{-ZrO}_2$  появление которых свидетельствует об инициализации процессов фазовых превращений, связанных не только с образованием твердых растворов, но и структурных изменений диоксида циркония. Формирование подобных многофазных структур в зависимости от вариации компонент состава свидетельствует о процессах фазовообразования, а также в дальнейшем может быть использовано для формирования структур керамик, обладающих повышенной устойчивостью к механическим воздействиям, обусловленной наличием межфазных границ.

Дальнейшие исследования данных объектов будут направлены на определение их механических свойств, а также радиационной стойкости керамик к воздействию облучения тяжелыми ионами.

*Данное исследование финансируется Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (Грант № AP14871210).*

# ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

1. Yang K. et al. Multicomponent pyrochlore solid solutions with uranium incorporation—A new perspective of materials design for nuclear applications //Journal of the European Ceramic Society. – 2021. – Vol. 41, No. 4. – P. 2870–2882.
2. Wei H. et al. Effects of the key parameters of TRISO particle buffer layer on in-pile thermo-mechanical behavior in FCM fuel pellets //Journal of Nuclear Materials. – 2021. – Vol. 551. – P. 152977.
3. Shelley A., Ovi M. H. Possibility of curium as a fuel for VVER-1200 reactor //Nuclear Engineering and Technology. – 2022. – Vol. 54, No. 1. – P. 11–18.
4. Nandi C. et al. Phase evolution in  $M_{1-x}Pu_xO_2$  ( $0.0 \leq x \leq 0.6$ ) ( $M = Zr, Th$ ) as potential inert matrix fuel system under reducing and oxidizing conditions //Journal of Nuclear Materials. – 2021. – Vol. 547. – P. 152800.
5. Romano M., Pizzocri D., Luzzi L. On the intra-granular behaviour of a cocktail of inert gases in oxide nuclear fuel: Methodological recommendation for accelerated experimental investigation //Nuclear Engineering and Technology. – 2022. – Vol. 54, No. 5. – P. 1929–1934.
6. Araya N., Madariaga J., Toledo M. Numerical modelling of a three-zone combustion for heavy fuel oil in inert porous media reactor //International Journal of Hydrogen Energy. – 2021. – Vol. 46, No. 43. – P. 22385–22396.
7. Alekseeva L. S. et al. Mechanical Properties and Thermal Shock Resistance of Fine-Grained Nd:YAG/SiC Ceramics //Inorganic Materials. – 2022. – Vol. 58, No. 2. – P. 199–204.
8. Ivanov I. A. et al. Study of the Effect of  $Y_2O_3$  Doping on the Resistance to Radiation Damage of  $CeO_2$  Micro-particles under Irradiation with Heavy  $Xe^{22+}$  Ions //Crystals. – 2021. – Vol. 11, No. 12. – P. 1459.
9. Kiegiel K. et al. Management of Radioactive Waste from HTGR Reactors including Spent TRISO Fuel – State of the Art //Energies. – 2022. – Vol. 15, No. 3. – P. 1099.
10. Wareing A. et al. Development of integrated waste management options for irradiated graphite //Nuclear Engineering and Technology. – 2017. – Vol. 49, No. 5. – P. 1010–1018.
11. Zhang J. et al. Modelling of effective irradiation swelling for inert matrix fuels //Nuclear Engineering and Technology. – 2021. – Vol. 53, No. 8. – P. 2616–2628.
12. Berguzinov A. et al. Synthesis, Phase Transformations and Strength Properties of Nanostructured  $(1-x)ZrO_2-xCeO_2$  Composite Ceramics //Nanomaterials. – 2022. – Vol. 12, No. 12. – P. 1979.
13. Bhandari K. et al.  $(Y_{1-x}Nd_x)_3Zr_5O_{14.5}$  solid solutions as inert matrices: Phase evolution, order-disorder dynamics and thermophysical behavior //Materials Today Communications. – 2021. – Vol. 27. – P. 102158.
14. Schramm A. et al. High temperature wettability and corrosion of  $ZrO_2$ ,  $Al_2O_3$ ,  $Al_2O_3-C$ ,  $MgO$  and  $MgAlON$  ceramic substrates by an AZ91 magnesium alloy melt //Journal of the European Ceramic Society. – 2022. – Vol. 42, No. 6. – P. 3023–3035.
15. Liu Y. et al. Irradiation response of  $Al_2O_3-ZrO_2$  ceramic composite under He ion irradiation //Journal of the European Ceramic Society. – 2021. – Vol. 41, No. 4. – P. 2883–2891.

## ОКСИДТІ ҚОСЫЛЫСТАР НЕГІЗІНДЕ CER-CER ТИПІ БОЙЫНША ИНЕРТТІ МАТРИЦАЛАРДА ФАЗАНЫҢ ТҮЗІЛУ ПРОЦЕСТЕРІН ЗЕРТТЕУ

И.Е. Кенжина<sup>1,2)</sup>, А.А. Шаймерденов<sup>1,3)</sup>, А.У. Толенова<sup>1)</sup>, С.Қ. Әскербеков<sup>1,3)</sup>, А.Л. Козловский<sup>1,3)</sup>

<sup>1)</sup> Satbayev University, Алматы, Қазақстан

<sup>2)</sup> Қазақстан-Британ техникалық университеті, Алматы, Қазақстан

<sup>3)</sup> ҚР ЭМ Ядролық физика институты, Алматы, Қазақстан

Бұл жұмыстың мақсаты оксидтер компоненттерінің өзгеруіне байланысты  $(1-x)ZrO_2-xAl_2O_3$  керамикасының үлгілерінде фазаның түзілу процестерін зерттеу, сондай-ақ құрылымдық параметрлердің өзгеруін және кристалдылық дәрежесін анықтау болып табылады. Цирконий және алюминий оксидтерінің cer-cer типі бойынша ядролық отынның инертті матрицалары үшін негіз ретінде таңдау олардың физикалық-химиялық, құрылымдық және механикалық қасиеттеріне байланысты, олардың жиынтығы ядролық отын саласында үлкен әлеуетке ие керамиканың жаңа түрін алуға мүмкіндік береді. Бұл оксидті қосылыстар жоғары термиялық тұрақтылыққа және жоғары температураға төзімділікке ие, бұл оларды жоғары температуралы ядролық реакторлардың жаңа буыны үшін дисперсті ядролық отынның негізі ретінде пайдалануға мүмкіндік береді. Оксидті қосылыстар негізіндегі керамика алу үшін механикалық ұнтақтау, содан кейін термиялық күйдіру әдісі таңдалды. Ұнтақтау шарттарын таңдау, сондай-ақ кейінгі термиялық күйдіру, ұнтақтау кезінде басталған деформациялық бұрмаланулар мен метатұрақты түзілістердің термиялық әрекеті мен ішінара босаңсуы нәтижесіндегі фазалық өзгерістер мен құрылымдық өзгерістер процестерін инициализациялау үшін таңдалды. Фазалық процестерді және құрылымдық өзгерістерді зерттеудің негізгі әдісі ретінде рентгендік дифракция әдісі таңдалды. Зерттеулер барысында алюминий оксидінің қосылуы  $ZrO_2$  негізгі моноклиндік фазасының құрылымдық реттелуіне, сондай-ақ алмастыру мен енгізудің қатты ерітінділерінің пайда болуына әкелетіні анықталды. Рентгендік фазалық талдау әдісін қолдана отырып, оксидтер компоненттерінің бірдей концентрациясында цирконий диоксидіндегі полиморфты фазалық қайта құру анықталды, оның болуы цирконий оксидін қосу және фазалық процестердің өзгеруі кезінде пайда болатын фазалық қайта құру процестерін көрсетеді.

**Түйін сөздер:** инертті матрицалар, фазаның қалыптасу процестері, оксидті керамика, циркалойд, фазалық түрленулер.

STUDY OF PHASE FORMATION PROCESSES IN CER-CER TYPE INERT MATRICES  
BASED ON OXIDE COMPOUNDS

I.E. Kenzhina<sup>1,2)</sup>, A.A. Shaimerdenov<sup>1,3)</sup>, A.U. Tolenova<sup>1)</sup>, S.K. Askerbekov<sup>1,3)</sup>, A.L. Kozlovskiy<sup>1,3)</sup>

<sup>1)</sup> *Satbayev University, Almaty, Kazakhstan*

<sup>2)</sup> *Kazakh-British Technical University, Almaty, Kazakhstan*

<sup>3)</sup> *Institute of Nuclear Physics of ME RK, Almaty, Kazakhstan*

The purpose of this work is to study the processes of phase formation in the samples  $(1-x)\text{ZrO}_2 - x\text{Al}_2\text{O}_3$  ceramics depending on the variation of the oxide components, as well as to establish changes in the structural parameters and degree of crystallinity. The choice of zirconium and aluminum oxides as the basis for cer-cer inert matrices for nuclear fuel is due to their physical, chemical, structural and mechanical properties, the combination of which will produce a new type of ceramics with great potential in the field of nuclear fuel. These oxide compounds have high thermal stability and resistance to high temperatures, which also allows their use as a basis for disperse nuclear fuel for new-generation high-temperature nuclear reactors. The method of mechanochemical milling followed by thermal annealing was chosen to obtain ceramics based on oxide compounds. The choice of grinding conditions, as well as the subsequent thermal annealing was chosen to initiate the processes of phase transformations and structural changes as a result of thermal influence and partial relaxation of the deformation distortions and metastable formations initiated during grinding. The X-ray diffraction method was chosen as the main method to study the processes of phase transformation and structural changes. During the studies it was found that the addition of aluminum oxide leads to the structural ordering of the main monocline phase  $\text{ZrO}_2$ , as well as the formation of solid solutions of substitution and introduction. At equal concentrations of the oxide components using the method of X-ray phase analysis was established polymorphic phase transformation in zirconium dioxide, the presence of which indicates the processes of phase transformation arising from the addition of zirconium oxide and changes in the phase formation processes.

**Keywords:** *inert matrices, phase formation processes, oxide ceramics, circaloy, phase transformations.*