

## ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

о диссертации Алексеевой Людмилы Сергеевны "Оксиды со структурой граната как матрицы для иммобилизации выделенных фракций ВАО и трансмутации минор-актинидов" на соискание учёной степени кандидата химических наук по специальности 1.4.1 – Неорганическая химия

Диссертация Л. С. Алексеевой посвящена исследованиям процессов синтеза неорганических соединений со структурой граната, предназначенных для использования в задачах обращения с отходами ядерного топливного цикла, спекания керамических и композиционных материалов на их основе методом электроимпульсного плазменного спекания (ЭИПС, также известен как Spark Plasma Sintering, SPS) и изучению свойств созданных материалов. Актуальность темы диссертации не вызывает сомнений в связи с перспективными приложениями данных материалов в ядерной энергетике. Исследования инновационных методов консолидации, использующих воздействие электромагнитных полей, представляют значительный интерес в современной физике спекания.

В диссертационной работе представлены результаты цикла систематических комплексных исследований создания исследуемых материалов, охватывающих химический синтез, получение нанопорошков, кинетику спекания, микроструктуру, фазовый состав, механические свойства, радиационную и химическую устойчивость. Работа состоит из введения, трех глав, выводов и списка цитируемой литературы, а также приложений.

В главе 1 представлен достаточно краткий, но весьма информативный обзор, вводящий читателя в проблематику и позволяющий определить роль и место выполненных работ в общей картине научных исследований. В главе 2 содержится описание экспериментальных методов, использованных при проведении исследований. Основные результаты содержатся в главе 3, зани-

мающей более 60 % от общего объема диссертации. В разделе 3.1 описано получение порошковых материалов и спекание керамических и композиционных образцов на их основе. В разделе 3.2 описано исследование теплофизических свойств полученных материалов – теплоемкости и коэффициента теплопроводности. В разделе 3.3 приведены результаты радиационных испытаний при облучении исследуемых материалов ускоренными ионами, а также под воздействием внутреннего облучения при добавлении в состав образца трансплутониевых элементов. В разделе 3.4 описаны исследования химической устойчивости полученных керамических образцов (в том числе облученных) в различных средах. В приложении А описаны исследования стойкости к термоудару, выполненные на одном из полученных композиционных материалов.

Среди наиболее интересных результатов диссертации, по мнению оппонента, следует отметить следующие. Синтезированы соединения со структурой граната составов  $Y_{2,5}Nd_{0,5-x}Sm_xAl_5O_{12}$ . Получены нанокomпозиционные порошки со структурой "ядро – оболочка" на основе указанных соединений и металлической фазы (Mo, Ni, W), осажденной в виде слоя нанометровой толщины на поверхности частиц граната. Детально охарактеризованы процессы ЭИПС указанных керамических материалов, композитов YAG – металл и YAG – керамика (MgO, SiC). Найдены режимы ЭИПС, обеспечивающие получение высоких конечных плотностей спеченных материалов (свыше 99 % от теоретического значения для керамических материалов, 92 – 99 % для композиционных). Разработанные композиционные материалы являются новыми, они обладают повышенными теплофизическими и механическими свойствами. В частности, полученные композиционные материалы YAG:Nd – SiC демонстрируют повышенную трещиностойкость, а YAG:Nd – Mo имеют коэффициент теплопроводности, примерно вдвое превышающий коэффициент теплопроводности однофазной керамики.

Представленные в диссертации результаты являются новыми и имеют

важное значение для науки и практики. Выполнены обширные исследования широкой совокупности свойств полученных материалов, обуславливающих их потенциальное применение в задачах обращения с отходами ядерного топливного цикла, при этом продолжительность отдельных циклов исследований радиационной и химической устойчивости созданных материалов измерялась годами. Обоснованы положения, касающиеся применения разработанных материалов как для целей иммобилизации высокоактивных отходов, так и в качестве термостойких инертных топливных матриц.

Обоснованность и достоверность научных положений и выводов, полученных в диссертации, подтверждается корректным использованием фундаментальных физических законов, применением апробированных экспериментальных методов и современных средств измерения, сопоставимостью полученных результатов с экспериментальными данными других авторов. Основные результаты работы опубликованы в 15 статьях в рецензируемых отечественных и международных научных журналах, проведена их апробация на всероссийских и международных научных конференциях, семинарах и школах.

Автореферат правильно отражает содержание диссертации.

Диссертация выполнена на высоком научном уровне и производит благоприятное впечатление. Однако она не свободна от отдельных недостатков, что, разумеется, неудивительно при столь большом объеме выполненных исследований.

1. В п. 4 раздела "Выводы" сказано: "Установлено, что значительный вклад в повышенную трещиностойкость наноструктурированных композитов YAG:Nd – Cer вносят сжимающие внутренние напряжения, формирующиеся при ЭИПС" (стр. 142). Это утверждение нуждается в обосновании. К числу композитов YAG:Nd – керамика, рассмотренных в диссертации, относятся композиции с MgO и с SiC. Для композитов YAG:Nd – MgO данных о трещиностойкости в диссертации не представлено. Для композитов YAG:Nd –

SiC данные измерений трещиностойкости приведены на стр. 86, и в них имеется тенденция к росту трещиностойкости с увеличением содержания SiC, однако никакого обсуждения этих данных не приводится. Краткое обсуждение возникновения внутренних напряжений в композитах YAG – SiC при охлаждении, связанного с различием коэффициентов теплового расширения фаз, содержится в Приложении А (стр. 171). Однако, во-первых, данное Приложение помещено в диссертации уже после раздела "Выводы", а во-вторых, в нем не обсуждается непосредственно трещиностойкость композиционного материала.

2. На стр. 55, 62, 69, 75, 80, 85 обсуждается скорость линейной усадки спекаемых образцов при ЭИПС, максимальные значения которой для различных композиций составляют порядка 0,005 – 0,01 мм/с. Для сравнительного сопоставления этих данных хотелось бы перейти к относительным скоростям усадки, для чего нужно поделить эти величины на высоту цилиндрического порошкового образца. К сожалению, данных о начальной высоте порошковых образцов, приготовленных для спекания, в диссертации найти не удалось.

3. На рис. 3.34, иллюстрирующем процесс ЭИПС композиций YAG:Nd – MgO, на промежуточной стадии спекания наблюдаются провалы остаточного давления ("давления вакуума") практически до нуля. При ЭИПС других композиций таких провалов не наблюдается. Было бы желательно обсудить причины данного явления. Например, может ли оно быть связано с протеканием твердофазной реакции образования алюмомагниевого шпинели?

4. В диссертации имеются неточности в употреблении наименований физических величин и единиц их измерения. Так, на рис. 3.13, 3.20, 3.21, 3.28, 3.34, 3.38 в качестве единиц измерения давления (при ЭИПС) используются килоньютоны. На этих же графиках приведено неудачное наименование "Давление вакуума", которое следовало бы заменить, например, на "Остаточное давление воздуха". На стр. 16 в тексте без видимой необходимости

используются как системные (Бк), так и несистемные (Кюри) единицы измерения активности. На стр. 41 упоминаются "импульсы постоянного электрического тока большой мощности (до 3 кА)" – очевидно, речь идет о силе тока, а не о мощности.

5. Несмотря на в целом высокое качество подготовки текста диссертации, в нем встречаются отдельные ошибки и опечатки, например:

- орфографические ошибки (стр. 56, строка 2 снизу – раздельное написание "Так же" вместо слитного; стр. 124, строка 3 снизу – неправильное написание "в течении" вместо "в течение");

- пунктуационные ошибки (стр. 30, строки 9 и 16; стр. 36, строка 7; стр. 41, строка 12);

- пропущенные слова (стр. 39, строка 12 снизу – пропущен предлог "в"; стр. 48, строка 12 снизу – пропущено слово "ионами"; стр. 86, строка 2 – пропущено слово "скорости" [усадки]; стр. 141, строка 4 снизу – пропущен предлог "к");

- опечатки (стр. 88, строка 3; стр. 105, строка 6 снизу; стр. 113, 1-я строка подраздела 3.3.3; стр. 139, строки 5 сверху и 11 снизу).

Отмеченные недостатки не снижают научного уровня представленной диссертации и ценности полученных результатов. Диссертация "Оксиды со структурой граната как матрицы для иммобилизации выделенных фракций ВАО и трансмутации минор-актинидов" представляет собой завершённую научно-квалификационную работу. Структура работы характеризуется внутренним единством. Тема диссертации актуальна и соответствует научной специальности, результаты и выводы обоснованы, соответствуют поставленным задачам и имеют научную и практическую ценность.

Таким образом, диссертация соответствует всем требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени кандидата наук, установленным "Положением о присуждении ученых степеней", утвержденным Постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013

года № 842 в действующей редакции, а автор диссертации Людмила Сергеевна Алексеева заслуживает присуждения учёной степени кандидата химических наук по специальности 1.4.1 – Неорганическая химия.

Дата составления отзыва: 13.05.2026

Официальный оппонент



Рыбаков Кирилл Игоревич

Доктор физико-математических наук, доцент

Заведующий сектором теории СВЧ разряда

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук» (ИПФ РАН)

603951, г. Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46

Телефон: + 7 831 416 4831

Email: rybakov@ipfran.ru

Подпись К. И. Рыбакова удостоверяю.

Ученый секретарь ИПФ РАН



И. В. Корюкин