**ОТЗЫВ**

**официального рецензента на диссертационную работу**

**Толеновой Ақтолқын Усербекқызы на тему «Разработка модели генерации и выделения трития из метатитаната лития в условиях нейтронного облучения», предоставленную на соискание степени доктора философии (PhD) по образовательной программе «8D05308 – Ядерная физика»**

| № п/п | Критерии | Соответствие критериям (подчеркнуть один из вариантов ответа) | Обоснование позиции официального рецензента (замечания выделить курсивом) |
|---|---|---|---|
| 1. | Тема диссертации (на дату ее утверждения) соответствует направлениям развития науки и/или государственным программам | 1.1 Соответствие приоритетным направлениям развития науки или государственным программам:<br>**1) диссертация выполнена в рамках проекта или целевой программы, финансируемого(ой) из государственного бюджета (указать название и номер проекта или программы);**<br>2) диссертация выполнена в рамках другой государственной программы (указать название программы);<br>**3) диссертация соответствует приоритетному направлению развития науки, утвержденному Высшей научно-технической комиссией при Правительстве Республики Казахстан (указать направление).** | Тема диссертационного исследования Толеновой А.У. относится к приоритетному направлению развития науки «Энергия, передовые материалы и транспорт», утверждённому Высшей научно-технической комиссией при Правительстве Республики Казахстан. Исследовательская работа диссертации выполнена в рамках проектов и целевых программ, финансируемых из государственного бюджета: «Отработка технологии выделения трития в in-situ реакторных исследованиях двухфазной литиевой керамики» (ИРН: AP08856623, 2020–2022 гг.); «Исследование изотопных эффектов при выделении трития из литиевых керамик в условиях реакторного облучения» (ИРН: AP09259535, 2021–2023 гг.) и «Разработка и исследование перспективных композиционных материалов для энергетики и топливного цикла» (ИРН: BR21882237, 2023–2025 гг.). |
| 2. | Важность для науки | Работа **вносит**/не вносит существенный вклад в науку, а ее важность **хорошо раскрыта**/не раскрыта. | Диссертационная работа посвящена решению актуальной научной задачи – разработке комплексной математической модели процессов генерации, переноса и выделения трития в метатитанате лития $Li_2TiO_3$ в условиях нейтронного облучения. Обеспечение тритиевой самодостаточности |

| | | | |
|---|---|---|---|
| | | | является одним из ключевых научно-технических вызовов на пути реализации управляемого термоядерного синтеза.<br>Значимость выполненного исследования определяется тем, что в работе реализован учет пространственно неоднородного температурного поля внутри отдельной гранулы бридерного материала, что позволяет более корректно описывать протекающие физические процессы и повышает достоверность прогнозирования по сравнению с ранее применявшимися подходами.<br>В целом, важность полученных результатов для развития ядерной физики и материаловедения термоядерных реакторов в диссертации раскрыта последовательно и аргументированно. |
| 3. | Принцип самостоятельности | Уровень самостоятельности:<br>**1) высокий;**<br>2) средний;<br>3) низкий;<br>4) самостоятельности нет. | Автором разработан и реализован комплексный модельный подход, включающий нейтронно-физический анализ, а также аналитическое и численное моделирование сопряженных процессов тепломассопереноса. Численные расчеты в программной среде COMSOL Multiphysics, верификация модели по данным реакторного эксперимента in situ, анализ чувствительности и физическая интерпретация полученных результатов выполнены соискателем.<br>Постановка исследовательских задач осуществлялась при участии научных консультантов, что соответствует принятой практике выполнения диссертационных исследований данного уровня. |
| 4. | Принцип внутреннего единства | 4.1 Обоснование актуальности диссертации:<br>**1) обоснована;**<br>2) частично обоснована;<br>3) не обоснована. | Актуальность диссертационного исследования обоснована через рассмотрение проблемы тритиевой самодостаточности термоядерных реакторов, выявление ограничений существующих моделей переноса трития, а также необходимость учета температурных градиентов внутри отдельного пэббла бридерного материала. |
| | | 4.2 Содержание диссертации отражает тему диссертации:<br>**1) отражает;**<br>2) частично отражает; | Содержание диссертации, включающее четыре главы – обзор литературы, экспериментальные исследования, разработку модели и ее применение для прогнозных расчетов в условиях |

| | | | |
|---|---|---|---|
| | | 3) не отражает. | ИТЭР, последовательно и логично раскрывает заявленную тему. |
| | | 4.3. Цель и задачи соответствуют теме диссертации: | Поставленные в диссертации задачи логически вытекают из сформулированной цели, заключающейся в разработке и верификации комплексной модели процессов переноса тепла и массы трития. |
| | | **1) соответствуют;** | |
| | | 2) частично соответствуют; | |
| | | 3) не соответствуют. | |
| | | 4.4 Все разделы и положения диссертации логически взаимосвязаны: | Главы диссертации выстроены в четкой логической последовательности: от нейтронно-физического обоснования к экспериментальным исследованиям, далее к разработке аналитической и численной моделей и их применению для прогнозных расчетов. Каждый последующий раздел опирается на результаты предыдущего. |
| | | **1) полностью взаимосвязаны;** | |
| | | 2) взаимосвязь частичная; | |
| | | 3) взаимосвязь отсутствует. | |
| | | 4.5 Предложенные автором новые решения (принципы, методы) аргументированы и оценены по сравнению с известными решениями: | Разработанная модель подробно сопоставлена с существующими подходами к описанию переноса трития: обоснованы ее преимущества, связанные с учетом температурных градиентов, реализацией вакуумных условий эксперимента и использованием детерминированных источников. |
| | | **1) критический анализ есть;** | |
| | | 2) анализ частичный; | |
| | | 3) анализ представляет собой не собственные мнения, а цитаты других авторов; | |
| | | 4) анализ отсутствует. | |
| 5. | Принцип научной новизны | 5.1 Научные результаты и положения являются новыми? | Выделяются три ключевых элемента научной новизны: разработка комплексной модели с учетом пространственно неоднородного температурного поля внутри единичного пэббла $Li_2TiO_3$; определение кинетических параметров диффузии и десорбции трития для данного материала в вакуумных условиях; а также количественная оценка времени удержания трития в зависимости от температуры. |
| | | **1) полностью новые;** | |
| | | 2) частично новые (новыми являются 25-75%); | |
| | | 3) не новые (новыми являются менее 25%). | |
| | | 5.2 Выводы диссертации являются новыми? | Выводы по всем четырем главам содержат новые количественные результаты, которые ранее не публиковались в данной постановке задачи. |
| | | **1) полностью новые;** | |

| | | | |
|---|---|---|---|
| | | 2) частично новые (новыми являются 25-75%); | |
| | | 3) не новые (новыми являются менее 25%). | |
| | | 5.3 Технические, технологические, экономические или управленческие решения являются новыми и обоснованными: | Использованная методология и программный инструментарий, основанные на применении COMSOL Multiphysics для сопряженного решения тепловых и диффузионных задач с учетом детерминированных нейтронно-физических источников, представляют собой современный и обоснованный подход к моделированию бридерных материалов термоядерных реакторов. |
| | | **1) полностью новые;** | |
| | | 2) частично новые (новыми являются 25-75%); | |
| | | 3) не новые (новыми являются менее 25%). | |
| 6. | Обоснованность основных выводов | Все основные выводы **основаны**/не основаны на весомых с научной точки зрения доказательствах либо достаточно хорошо обоснованы (для qualitative research (куолитатив ресеч) и направлений подготовки по искусству и гуманитарным наукам). | Основные выводы диссертации подкреплены: (1) результатами нейтронно-физических расчетов в верифицированной геометрии реактора ВВР-К; (2) экспериментальными данными in situ вакуумной экстракции; (3) количественным совпадением расчетных и экспериментальных кривых кинетики выделения трития; (4) тремя статьями в журналах, индексируемых Scopus и Web of Science. Кинетические параметры диффузии и десорбции определены с указанием погрешностей и сопоставлены с литературными данными. |
| 7. | Основные положения, выносимые на защиту | Необходимо ответить на следующие вопросы по каждому положению в отдельности: | **Положение 1.** Разработана комплексная математическая модель процессов генерации, переноса и выделения трития в единичном сферическом образце (пэббле) метатитаната лития $Li_2TiO_3$ в условиях нейтронного облучения и вакуума, отличающаяся учетом пространственно неоднородного температурного поля внутри образца.<br><br>7.1. Модель реализована в программной среде COMSOL Multiphysics на основе детерминированных объемных источников тепловыделения и генерации трития ($q_{gen}(t) = 187{,}1 \cdot \frac{W(t)}{W_0}$ *Вт/см*$^3$, $G_T(t) = 8{,}64 \times 10^{-10} \cdot \frac{W(t)}{W_0}$ *моль/(см*$^3 \cdot$ *с)*), |
| | | 7.1 Доказано ли положение? | |
| | | **1) доказано;** | |
| | | 2) скорее доказано; | |
| | | 3) скорее не доказано; | |
| | | 4) не доказано; | |
| | | 5) в текущей формулировке проверить доказанность положения невозможно. | |
| | | 7.2 Является ли тривиальным? | |

| | | | |
|---|---|---|---|
| | | 1) да;<br>**2) нет;**<br>3) в текущей формулировке проверить тривиальность положения невозможно.<br>7.3 Является ли новым?<br>**1) да;**<br>2) нет;<br>3) в текущей формулировке проверить новизну положения невозможно.<br>7.4 Уровень для применения:<br>1) узкий;<br>2) средний;<br>**3) широкий;**<br>4) в текущей формулировке проверить уровень применения положения невозможно.<br>7.5 Доказано ли в статье?<br>**1) да;**<br>2) нет;<br>3) в текущей формулировке проверить доказанность положения в статье невозможно. | ее адекватность подтверждена верификацией по экспериментальным данным реактора ВВР-К.<br>7.2. Учет пространственного распределения температурного поля внутри единичного образца представляет собой нетривиальную постановку задачи, ранее не реализованную в известных моделях данного класса.<br>7.3. Предложенная модельная постановка, реализованная для условий вакуумного эксперимента с использованием детерминированных нейтронно-физических источников, является оригинальной.<br>7.4. Модель применима для анализа реакторных экспериментов с керамическими бридерными материалами в вакуумных условиях и может быть использована для расчетов условий ИТЭР и DEMO.<br>7.5. Доказано в статье: Kulsartov T. et al. Simulation of tritium release processes from lithium ceramics under reactor irradiation conditions with varying reactor power // Journal of Nuclear Materials. – 2025 (Q1, Scopus, Web of Science).<br>**Положение 2.** Определен коэффициент диффузии трития в метатитанате лития $Li_2TiO_3$, описываемый аррениусовской зависимостью $D = 3 \times 10^{-8}\, exp\left(-\frac{72\ кДж/моль}{RT}\right) м^2/с$, полученный на основе верификации модели по экспериментальным данным.<br>7.1. Параметры определены методом верификации расчетной модели по экспериментальным данным, приведены оценки погрешностей ($D_0 = (3{,}0 \pm 0{,}15) \times 10^{-8}$(м$^2$/с), $E_d = (72 \pm 1)$кДж/моль.<br>7.2. Определение коэффициента диффузии в условиях вакуумного in situ эксперимента с учетом внутреннего температурного градиента ранее не выполнялось для данного материала.<br>7.3. Полученные значения являются новыми для $Li_2TiO_3$ в рассматриваемых условиях и согласуются с диапазоном литературных данных. |

| | | | |
|---|---|---|---|
| | | | 7.4. Параметр может быть использован при моделировании поведения трития в бридерных зонах реакторов ИТЭР, DEMO и CFETR.<br>7.5. Доказано в статьях:<br>– Kulsartov T. et al. Simulation of tritium release processes from lithium ceramics under reactor irradiation conditions with varying reactor power // Journal of Nuclear Materials. – 2025 (Q1, Scopus, Web of Science).<br>– Kulsartov T. et al. Modeling of hydrogen isotopes release from lithium ceramics $Li_2TiO_3$ during in-situ experiments using vacuum extraction method // Fusion Engineering and Design. – 2021 (Q2, Scopus, Web of Science).<br>**Положение 3.** Определена константа скорости десорбции трития с поверхности метатитаната лития $Li_2TiO_3$, описываемая аррениусовской зависимостью $K_{des} = 1{,}2 \times 10^{-6}\, exp\left(-\frac{52\,кДж/моль}{RT}\right) м^2/(моль \cdot с)$, и выполнена количественная оценка времени удержания трития в материале в зависимости от температуры.<br>7.1. Константа десорбции определена совместно с коэффициентом диффузии в ходе верификации модели; время удержания трития рассчитано на основе полученных параметров и согласуется с экспериментальными данными.<br>7.2. Совместное определение параметров диффузии и десорбции в условиях глубокого вакуума, а также количественная оценка времени удержания трития в зависимости от температуры представляют собой нетривиальную задачу.<br>7.3. Полученные значения константы десорбции являются оригинальными для рассматриваемых условий и имеют самостоятельную научную значимость.<br>7.4. Данный параметр используется при расчете инвентаря трития и оптимизации конструкций бридерных зон перспективных термоядерных реакторов.<br>7.5. Доказано в статьях: |

| | | | |
|---|---|---|---|
| | | | – Kulsartov T. et al. Simulation of tritium release processes from lithium ceramics under reactor irradiation conditions with varying reactor power // Journal of Nuclear Materials. – 2025 (Q1, Scopus, Web of Science).<br>– Blynskiy P. et al. Experiments on tritium generation and yield from lithium ceramics during neutron irradiation // International Journal of Hydrogen Energy. – 2021 (Q1, Scopus, Web of Science). |
| 8. | Принцип достоверности. | 8.1 Выбор методологии - обоснован или методология достаточно подробно описана: | Методология детально описана: нейтронно-физическое моделирование – для определения объемных источников; аналитическая модель – для первичной обработки данных; МКЭ в COMSOL Multiphysics – для численного решения сопряженных задач. Выбор методов обоснован спецификой задачи. |
| | Достоверность источников и предоставляемой информации | **1) да;** | |
| | | 2) нет. | |
| | | 8.2 Результаты диссертационной работы получены с использованием современных методов научных исследований и методик обработки и интерпретации данных с применением компьютерных технологий: | Результаты диссертационного исследования получены с применением современных методов, включая нейтронно-физический анализ, численное моделирование методом конечных элементов и использование программного комплекса COMSOL Multiphysics. Методы компьютерного моделирования были задействованы на всех этапах выполнения работы. |
| | | **1) да;** | |
| | | 2) нет. | |
| | | 8.3 Теоретические выводы, модели, выявленные взаимосвязи и закономерности доказаны и подтверждены экспериментальным исследованием (для направлений подготовки по педагогическим наукам результаты доказаны на основе педагогического эксперимента): | Расчетные зависимости кинетики выделения трития согласуются с экспериментальными данными, полученными на реакторе ВВР-К; прогнозные оценки для условий ИТЭР выполнены на основе верифицированной модели. |
| | | **1) да;** | |
| | | 2) нет. | |

| | | | |
|---|---|---|---|
| | | 8.4 Важные утверждения **подтверждены**/частично подтверждены/не подтверждены ссылками на актуальную и достоверную научную литературу. | Список использованных источников включает современные публикации, охватывающие все основные аспекты исследования; ключевые положения и выводы подтверждены соответствующими ссылками. |
| | | 8.5 Использованные источники литературы **достаточны**/не достаточны для литературного обзора. | Список литературы охватывает фундаментальные исследования в области термоядерного синтеза, бридерных материалов, реакторных экспериментов, а также существующие подходы к моделированию переноса трития. Представленный перечень источников является достаточным для корректного позиционирования выполненной работы в научном контексте. |
| 9 | Принцип практической ценности | 9.1 Диссертация имеет теоретическое значение: | Работа вносит вклад в развитие теоретических представлений о переносе трития в оксидных литиевых керамиках: количественно определены кинетические параметры диффузии и десорбции в условиях глубокого вакуума с учетом внутреннего температурного градиента. |
| | | **1) да;** | |
| | | 2) нет. | |
| | | 9.2 Диссертация имеет практическое значение и существует высокая вероятность применения полученных результатов на практике: | Верифицированная модель и полученные кинетические параметры могут быть непосредственно использованы при проектировании бридерных зон ИТЭР (WCCB) и DEMO. Расчет квазиравновесного состояния (24 цикла) является практически значимым результатом для тритиевого баланса реактора. |
| | | **1) да;** | |
| | | 2) нет. | |
| | | 9.3 Предложения для практики являются новыми: | Предложенная методика совместного определения коэффициентов диффузии и десорбции, основанная на комплексной сопряженной модели переноса тепла и массы с использованием детерминированных нейтронно-физических источников, представляет собой новый инструмент для решения задач данного направления. |
| | | **1) полностью новые;** | |
| | | 2) частично новые (новыми являются 25-75%); | |
| | | 3) не новые (новыми являются менее 25%). | |
| 10. | Качество написания и оформления | Качество академического письма: | Диссертация написана научным языком, термины применяются корректно и последовательно. Структура работы логична, иллюстративный материал (рисунки, таблицы, |
| | | **1) высокое;** | |
| | | 2) среднее; | |

| | | | |
|---|---|---|---|
| | | 3) ниже среднего;<br>4) низкое. | графики) соответствует тексту. Математические выражения оформлены корректно. Список источников оформлен в соответствии с требованиями. Объем и структура диссертации соответствуют требованиям, предъявляемым к работам уровня PhD. |
| 11. | Замечания к диссертации | 1. Привлечение в теплофизическую модель механизма радиационного теплообмена по закону Стефана–Больцмана представляется обоснованным, особенно в условиях отсутствия газового или водяного охлаждения облучательной капсулы. В этой связи может представлять интерес дополнительное уточнение возможного изменения теплоэмиссионных свойств рабочих металлических поверхностей в ходе эксперимента, в частности вследствие их окисления и других воздействий. Указанное уточнение носит характер возможного развития модели и не оказывает влияния на обоснованность полученных в работе результатов.<br>2. Представляется целесообразным более подробно осветить отличия условий проведения реакторного эксперимента от условий типового применения литиевой керамики в термоядерных реакторах. В частности, интерес представляет оценка влияния различий в давлении гелия и энергетическом спектре нейтронного излучения на полученные результаты. Данное уточнение имеет характер дополнительного анализа и не влияет на достоверность и научную ценность сделанных в диссертации выводов. | |
| 12. | Научный уровень статей докторанта по теме исследования (в случае защиты диссертации в форме серии статей официальные рецензенты комментируют научный уровень каждой статьи докторанта по теме исследования) | Соискателем опубликовано 5 научных работ по теме диссертационного исследования, охватывающих все основные этапы выполненной работы.<br>К публикациям в отечественных изданиях, входящих в перечень КОКНВО, относятся статьи, посвященные экспериментальным исследованиям взаимодействия изотопов водорода с литиевыми керамиками различных составов, а также описанию экспериментальной базы реактора ВВР-К, используемой для проведения исследований выхода трития при нейтронном облучении.<br>Результаты экспериментальных исследований генерации и выделения трития из литиевых керамик при нейтронном облучении представлены в статье, опубликованной в журнале International Journal of Hydrogen Energy (Q1), что подтверждает высокий уровень и достоверность экспериментальной части работы.<br>Дальнейшее развитие полученных результатов отражено в публикации в журнале Fusion Engineering and Design (Q2), в которой предложено аналитическое описание процессов выхода изотопов водорода из $Li_2TiO_3$, основанное на обработке экспериментальных данных и позволяющее интерпретировать кинетику выделения трития в условиях in situ экспериментов.<br>В статье, опубликованной в журнале Journal of Nuclear Materials (Q1), представлена численная реализация комплексной модели, учитывающей процессы генерации, переноса и выделения трития при реакторном облучении, включая влияние изменения мощности реактора и температурных условий. | |

| | | |
|---|---|---|
| | | Таким образом, публикации соискателя образуют логически завершенную последовательность от экспериментальных исследований к аналитическому описанию и далее к численному моделированию, что подтверждает системный характер проведенного исследования. Уровень журналов, в которых опубликованы результаты, свидетельствует об их научной значимости и соответствии международным требованиям |
| 13. | Решение официального рецензента | По результатам рассмотрения диссертационной работы Толеновой Ақтолқын Усербекқызы на тему «Разработка модели генерации и выделения трития из метатитаната лития в условиях нейтронного облучения» можно отметить, что представленное исследование выполнено на высоком научном уровне и носит завершенный характер.<br>В работе решена актуальная задача, имеющая значение для физики термоядерного синтеза и моделирования поведения бридерных материалов. Полученные результаты характеризуются научной новизной, обоснованностью и практической значимостью, а предложенные подходы расширяют существующие методы анализа процессов переноса трития.<br>Представленная диссертация соответствует требованиям, предъявляемым к работам на соискание степени доктора философии (PhD).<br>**С учетом изложенного Толенова Ақтолқын Усербекқызы заслуживает присуждения степени доктора философии (PhD) по образовательной программе «8D05308 – Ядерная физика».** |

**Официальный реценезент:**

Филиал «Институт атомной энергии»
РГП «Национальный ядерный центр Республики Казахстан»,
начальник отдела разработки и испытаний реакторных устройств,
PhD, ассоциированный профессор _____ Мухамедов Нуржан Еролович
подпись

Подпись Мухамедова Н.Е. заверяю.
Ст. инспектор ОКР
Вед. специалист