«УТВЕРЖДАЮ»
Проректор
Московского государственного
университета имени М.В. Ломоносова
д.ф.-м.н., профессор А.А. Федянин

«26» 2020 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации,

Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова»,на диссертацию Чаузовой Марии Владимировны «Измерение сечений образования долгоживущих продуктов протон-ядерных реакций в конструкционных материалах электроядерных установок», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.16 – физика атомного ядра и элементарных частиц.

Диссертация Чаузовой М.В. посвящена **актуальной** проблеме – экспериментальному определению и расчетному моделированию сечений образования долгоживущих продуктов протон-ядерных реакций в конструкционных материалах электроядерных установок.

В последние годы интерес к электроядерным (ускорительно управляемым) установкам возрос в связи с необходимостью решения двух основных проблем ядерной энергетики: наработке нового ядерного топлива и уничтожению долгоживущих радиоактивных отходов путем их трансмутации, которая рассматривается в качестве альтернативы захоронению. Электроядерные установки позволяют создать необходимые условия для эффективного проведения этих процессов, но в то же время высокоинтенсивные потоки протонов и нейтронов, воздействующие на мишень и окружающие ее конструкционные материалы, приводят к образованию радиоактивных продуктов, опасность которых должна быть оценена.

Целью диссертации является экспериментальное определение сечений образования долгоживущих радиоактивных продуктов реакций взаимодействия протонов в диапазоне энергий от 0,04 до 2,6 ГэВ с мишенями из ^{nat}Cr, ^{56}Fe, ^{nat}Ni, ^{93}Nb, ^{nat}Ta, ^{nat}W и ^{27}Al и оценка на их основе предсказательной способности ядерных моделей в составе высокоэнергетических транспортных программ.

Для реализации этой цели Чаузовой М.В. в **Главе 1** выполнен обзор долгоживущих радионуклидов, образующихся при взаимодействии протонов с алюминием, желе-

зом, хромом, никелем, ниобием, танталом и вольфрамом. Установлено, что наибольший интерес с точки зрения долговременной радиологической опасности облученных протонами элементов электроядерных установок представляют радионуклиды ^{44}Ti, ^{178m2}Hfи ^{3}H, проведен информационный анализ международных баз данных по сечениям их образования и экспериментальным методам определения. В **Главе 2** представлены методики определения скоростей реакций и сечений образования радионуклидов методами гамма- и бета- спектрометрии и расчета их неопределенности, количественно оценены потери ^{3}H во время облучения и хранения образцов. В **Главе 3** подробно описаны все этапы постановка эксперимента: облучение образцов, проведение гамма-спектрометрических измерений и предложенная в рамках работы методика выделения ^{3}H из образцов с последующим измерением его активности на жидкосцинтилляционном бета-спектрометре. В **Главе 4** представлены результаты измерений сечений образования радионуклидов и их сравнение с ранее опубликованными данными с использованием фактора среднеквадратичного отклонения. **Глава 5** посвящена сравнительной оценке предсказательной способности различных ядерных моделей с использованием полученных экспериментальных данных. В главе также предложена методика расчета изомерных состояний ядер и представлены результаты сравнения модифицированной на ее основе ядерной модели CEM03.03-ext с экспериментальными данными об образовании высокоспиновых изомеров, в том числе и с данными об образовании ^{178m2}Hf, полученными в диссертации.

Практическая значимость работы определяется возможностью использования полученных экспериментальных данных для анализа остаточной активности узлов электроядерных установок и верификации расчетных программ, применяемых при их создании; возможностью применения разработанной методики измерения активности ^{3}H в облученных образцах для получения новых экспериментальных данных о сечениях его образования; возможностью использования предложенной методики расчета изомерных отношений для вычисления сечения образования изомера или суммарного сечения изомерного и основного состояния ядер в различных ядерных реакциях.

Научная новизна выполненных исследований определяется тем, что получено большое число новых значений сечений образования ^{44}Ti, ^{178m2}Hf и ^{3}H в образцах из ^{nat}Cr, ^{56}Fe, ^{nat}Ni, ^{93}Nb, ^{nat}Ta, ^{nat}W и ^{27}Al, облученных протонамис энергиями от 0,04 до 2,6 ГэВ, с использованием полученных данных оценена предсказательная способность ядерных моделей. Для реакций ^{nat}Cr(p,x)^{44}Ti, ^{93}Nb(p,x)^{44}Ti и ^{nat}Ta(p,x)^{178m2}Hf данные получены впервые, также впервые получены значения кумулятивных сечений образования ^{44}Scв ^{nat}Cr, ^{56}Fe, ^{nat}Ni и^{93}Nb. Впервые разработана методика измерений активности ^{3}H в облученных образцах с использованием жидкосцинтилляционной бета-спектрометрии и расчета сечений образования ^{3}H. Предложена методика расчета изомерных состояний, на основе которой модифицирована ядерная модель CEM03.03, предсказательная способность модифицированной версии CEM03.03-ext оценена с использованием полученных данных для ^{178m2}Hf.

В **обоснованности результатов работы и выводов основных положений, выносимых на защиту**, сомнений нет. Чаузова М.В. использует для получения результатов современные спектрометрические методы и базы ядерных данных, обеспечивающие максимальную точность измерений, применяет для расчетов широко известные программы моделирования. Обоснованием также является хорошее согласие полученных экспериментальных данных с результатами других исследовательских групп.

Результаты работы докладывались на молодежной конференции по теоретической и экспериментальной физике, 3-х международных конференциях и опубликованы в 3-х статьях в рецензируемых научных изданиях, входящих в международные реферируемые базы данных и системы цитирования Web of Science и Scopus. Полученные экспериментальные данные вошли в международную базу ядерных данных EXFOR.

Диссертация выполнена на высоком научном уровне, автором продемонстрирована высокая степень подготовки, о чем свидетельствует обзор экспериментов, выполненный в Главе 1, и выбор новых подходов к решению поставленных задач, позволяющих повысить точность измерений.

К недостаткам работы можно отнести следующие:

1. В работе никак не комментируется выбор мишеней из изотопно чистого ^{56}Fe в качестве имитатора конструкционных материалов электроядерных установок, в то время как остальные мишени имеют природный изотопный состав.
2. В Главе 2 не обсуждается точность используемой мониторных реакций и возможность снижения достигнутой точности измерения сечений.
3. В Главе 5 полученные экспериментальные данные по сечениям протон-ядерных реакций используются только для изучения предсказательной способности большого числа расчетных программ. Однако проводится только статистический анализ отклонений, а причины расхождений между экспериментальными и расчетными результатами не обсуждаются.

Несмотря на отмеченные недостатки, диссертация Чаузовой М.В. представляет собой законченную научно-квалификационную работу, в которой на основании выполненных автором экспериментальных и расчетных исследований представлены сечения образования ^{178m2}Hf, ^{44}Ti, ^{44}Sc и ^{3}H в диапазоне энергий протонов 40-2600 МэВ и выполнена верификация программ используемых для расчета сечений образования продуктов реакций.

Полученные данные и методики могут быть использованы в НИЦ «Курчатовский институт», ОИЯИ, ФЭИ, НИЦ «Курчатовский институт» - ИТЭФ, ИФВЭ, НИИЯФ МГУ и других организациях, занимающихся разработкой и верификацией высокоэнергетических транспортных программ и ядерных моделей в их составе или разработкой проектов электроядерных установок.

Таким образом, диссертация Чаузовой М.В. «Измерение сечений образования долгоживущих продуктов протон-ядерных реакций в конструкционных материалах электроядерных установок» соответствует всем критериям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук , установленным в «Положении о порядке присуждения ученых степеней», утвержденном постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 года №842 с дополнениями от 21 апреля 2016 года №335, а сама Чаузова Мария Владимировна безусловно заслуживает присуждения ей ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.16 – физика атомного ядра и элементарных частиц.

Автореферат полностью и правильно отражает содержание диссертации.

Отзыв составил
с.н.с. отдела ядерных реакций,
к.ф.-м.н. /Спасский А.В./

Результаты диссертации рассмотрены и одобрены на семинаре отдела ядерных реакций НИИЯФ МГУ «__15__» октября 2020 г.

Руководитель семинара
Заместитель директора НИИЯФ МГУ
д. ф.-м. н., /Еременко Д. О./

И.О. Директора НИИЯФ МГУ
д. ф.-м. н., профессор /Боос Э. Э../