

4 - Физика атомного ядра и элементарных частиц. Физика высоких энергий

Антохина Ксения Витальевна, 4 курс

Ростов-на-Дону, Южный федеральный университет, физический

Черенковское излучение в мишенях с нарушенной азимутальной симметрией

Мальшевский Вячеслав Сергеевич, д.ф.-м.н.

e-mail: kantohina@sfedu.ru стр. 76

Веретенников Дмитрий Геннадьевич, 4 курс

Томск, Томский политехнический университет, инженерная школа ядерных технологий

Радиационные характеристики нейтронного излучения модифицированного ядерного топлива реактора типа ВВЭР

Беденко Сергей Владимирович, к.ф.-м.н.

e-mail: dgv3@tpu.ru стр. 77

Гладких Михаил Викторович, магистрант 2 года обучения

Томск, Томский политехнический университет, инженерная школа ядерных технологий

Исследование зависимости спектра нейтронов от параметра пучка дейтронов при реакции ${}^9_4\text{Be}(\text{d},\text{n}){}^{10}_5\text{B}$ на ускорителе Р-7М

Наймушин Артем Георгиевич, к.ф.-м.н.

e-mail: mvg23@tpu.ru стр. 78

Папазян Дмитрий Артурович, 4 курс

Ростов-на-Дону, Южный федеральный университет, физический

Переходное излучение релятивистского иона в мишени конечной толщины

Мальшевский Вячеслав Сергеевич, д.ф.-м.н.

e-mail: dpapazyan@sfedu.ru стр. 79

Черенковское излучение в мишенях с нарушенной азимутальной симметрией

Антохина Ксения Витальевна

Южный федеральный университет

Мальшевский Вячеслав Сергеевич, д.ф.-м.н.

kurlbik753@gmail.com

Впервые излучение Вавилова-Черенкова было обнаружено учеными ещё в 1934 году. Но до сих пор многие свойства этого излучения не были изучены. На движение частицы внутри твердой мишени влияют множество факторов, такие как: многократное столкновение с атомами мишени, ориентация кристалла, обуславливающая влияние эффекта каналирования [1,2]. Данная работа посвящена теоретическому исследованию углового распределения интенсивности излучения Вавилова-Черенкова в мишенях с нарушенной азимутальной симметрией. В качестве мишени был выбран кристалл плавленного кварца толщиной 100 длин волн (длина волны выбрана 0.14 мкм). Дисперсионные свойства этого вещества хорошо изучены (см., например, [3]).

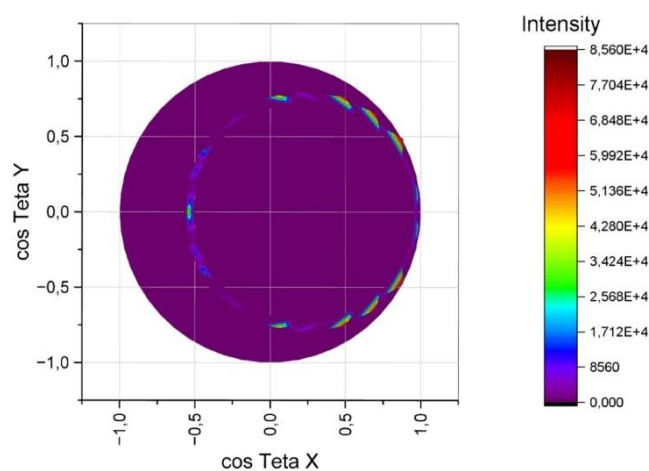


рис. 1. Угловое распределение Черенковского излучения частиц со скоростью 0.8c в плавленном кварце. Угол поворота мишени относительно направления движения частиц 10 градусов.

На рисунке 1, видно, что в случае Черенковского излучения, проходящего через мишень с нарушенной азимутальной симметрией, наблюдается специфическая интерференционная картина по азимутальному углу. На диаграмме (рис.1) заданы такие параметры, что можно наблюдать полное кольцо Черенковского излучения. Физическая причина такого явления состоит в следующем. Хорошо известно, что при нормальном падении на поверхность мишени конечной толщины угловое распределение излучения Вавилова-Черенкова имеет вид концентрических колец. Эти осцилляции по полярному углу объясняются интерференцией волн, распространяющихся в направлении движения частицы и отраженных от границ мишени. При косом влете частиц в мишень угловое распределение становится несимметричным, что ранее было установлено в ряде работ (см., например, [1]). Кроме того, при влете в мишень под некоторым углом эффективная толщина мишени увеличивается, что уменьшает угловую ширину Черенковских колец. При этом, в отличие от нормального падения, эффективная толщина для разных направлений излучения в Черенковском конусе начинает зависеть от азимутального угла. Последнее обстоятельство приводит к тому, что фазы отраженных от границ мишени волн теперь не постоянны, а также начинают зависеть от азимутального угла. Таким образом, нарушение азимутальной симметрии приведет к дополнительным интерференционным осцилляциям и по азимутальному углу. Угловое распределение в этом случае приобретет довольно сложный вид и наиболее ярко проявляется в тонких мишенях. Такое перераспределение спектрально-угловой плотности излучения, существенно увеличивает его выход в некоторых узких угловых интервалах и может иметь важные практические применения, в частности, для контроля угловой расходимости пучков ускоренных частиц.

Список публикаций:

- [1] Takabayashi Y., Fiks E. I., Pivovarov Y. L. First studies of 500-nm Cherenkov radiation from 255-MeV electrons in a diamond crystal // *Physics Letters A*. – 2015. – Т. 379. – №. 14-15. – С. 1032-1035.
- [2] Жеваго Н. К., Глебов В. И. КАНАЛИРОВАНИЕ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ РЕЛЯТИВИСТСКИХ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ В МЕТАЛЛООРГАНИЧЕСКИХ КАРКАСНЫХ СТРУКТУРАХ // *Журнал экспериментальной и теоретической физики*. – 2017. – Т. 151. – №. 6. – С. 995-1004.
- [3] Kitamura, R. Optical constants of silica glass from extreme ultraviolet to far infrared at near room temperature / R. Kitamura, L. Pilon, M. Jonasz // *Applied Optics*. – 2007. – V. 46. – No.33. – P. 8118-8133.

Радиационные характеристики нейтронного излучения модифицированного ядерного топлива реактора типа ВВЭР

Веретенников Дмитрий Геннадьевич
Томский политехнический университет
Беденко Сергей Владимирович, к.ф.-м.н.
dgv3@tpu.ru

В реакторах типа ВВЭР в качестве топлива используется UO_2 с обогащением по U^{235} от 3 до 5 %. Основными проблемами применения UO_2 является его сравнительно низкая радиационная и термическая стойкость, ограничивающая производительность и безопасность реактора.

Практическое применение получило модифицированное топливо $UO_2 + 5-8$ масс.% Gd_2O_3 . Проводятся исследования свойств активной зоны, содержащей топливо с AmO_2 в качестве выгорающего поглотителя [1]. Для длительной и эффективной работы реактора топливо легируют различными гомогенными соединениями и гетерогенными включениями. В качестве легирующих добавок также рассматриваются В, Ве, В, С, Mg, Al, Si, Hf, Ег, Ра и др. Эти элементы улучшают радиационную и термическую стойкость топлива, его теплопроводность, теплофизические и нейтронно-физические параметры активной зоны. Например, при добавлении в топливо Ве улучшается его теплопроводность [2]. При введении микродобавок, содержащих Al и Si, увеличиваются размеры зерна плотноспечённого UO_2 и тем самым повышается механическая прочность топливной композиции [3].

Очевидно, что перечисленные элементы обладают рядом преимуществ при их использовании в качестве легирующих добавок, однако некоторые из них являются целевыми для (α, n) -реакции и поэтому могут существенно осложнить радиационную обстановку на стадиях открытого и закрытого ЯТЦ. Кроме того, используемое на практике топливо с Gd_2O_3 имеет сниженное на 20 % значение теплопроводности [3], поэтому ведутся поиски альтернативных выгорающих поглотителей.

Расчёты выходов и спектров (α, n) -нейтронов из элементов малой и средней атомной массы выполнены по программе Sources-4C. В качестве расчётной модели использовалась модель плоскопараллельного моноэнергетического пучка α -частиц, падающего на материал мишени с интенсивностью 10^6 α -частиц/с. Энергия α -частиц принята равной 5,15 МэВ и соответствует средневзвешенной энергии спектра α -частиц ОЯТ реактора ВВЭР-1200 с выгоранием ~ 60 МВт·сут/т(U), выдержкой от года и удельной активностью $2,58 \cdot 10^{15}$ Бк/ТВС. Диапазон рассматриваемых энергий нейтронов обозначен от 0 до 12 МэВ и разделен на 48 равнозначных моноэнергетических групп. Далее демонстрируются результаты расчета по Sources-4C выхода нейтронов (Y_n) и их энергетического распределения для элементов (E_n), которые рассматриваются для применения с целью улучшения свойств топлива и активной зоны реактора типа ВВЭР (рис.1).

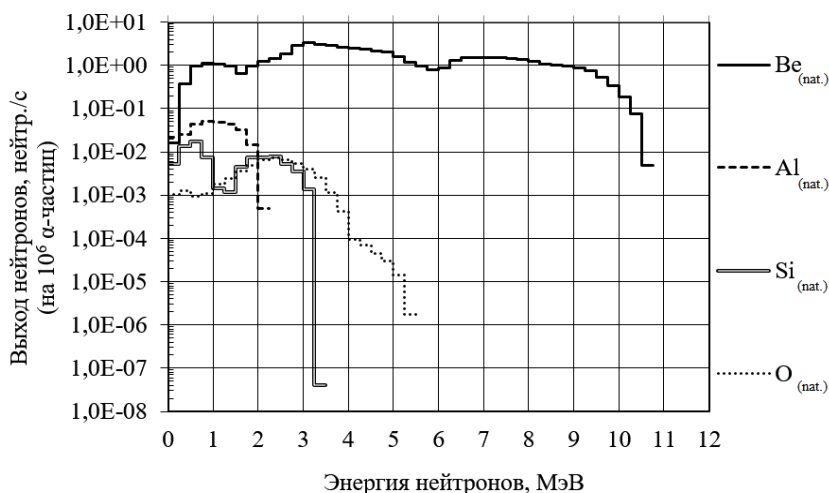


рис.1. Нейтронные спектры целевых для (α, n) -реакции элементов

Анализ результатов показывает наличие значительного выхода (α, n) -нейтронов для Be^9 , Al^{27} , $Si^{29,30}$ в сравнении с $O^{17,18}$ в составе UO_2 . Учитывая, что данные элементы также уменьшают ураноёмкость топливных таблеток и усложняют технологический процесс их изготовления, сделан вывод о нецелесообразности их применения в качестве легирующих добавок.

Состав, активность и источник α -частиц ОЯТ получен по MCNP6.2 и данным авторов [1]. Нейтронно-физический расчёт, расчёт изотопного состава, активности и выдержки ОЯТ выполнены по WIMS-D5B и MCNP6.2 для штатной ТВС ВВЭР-1200 и ТВС, содержащей AmO_2 . Снижение начального k_{eff} с 1,35 до 1,27

говорит об эффективности использования AmO_2 в качестве выгорающего поглотителя в UO_2 . Кроме того, AmO_2 (0,2 ат.%) в гомогенном исполнении не ухудшает теплопроводность топлива, в отличие от Gd_2O_3 [1].

Расчёт нейтронной компоненты излучения ОЯТ выполнен по Sources-4C с использованием гомогенной модели. В данном случае источниками альфа-излучения и нейтронов в результате спонтанного деления являются тяжелые изотопы, составляющие топливо. Материалом мишени являются изотопы O^{17} и O^{18} , являющиеся целевыми для (α, n) -реакции. По полученным данным о нейтронных спектрах рассчитана мощность эквивалентной дозы согласно Рекомендациям МКРЗ 2007 года. Расчёт мощности эквивалентной дозы ($H_{T,R}$) нейтронного излучения ОЯТ после 7 лет выдержки показывает, что при использовании топлива из UO_2 $H_{T,R}$ равна 114,5 мЗв/(ч·ТВС), при введении 0,2 % AmO_2 $H_{T,R}$ увеличивается до 296,1 мЗв/(ч·ТВС).

Результаты расчёта активности и нейтронной составляющей радиационных характеристик ОЯТ показывают, что дозовая нагрузка при использовании топлива с AmO_2 сохраняется в допустимых пределах.

Список публикаций:

[1] Shelley A. Use of americium as a burnable absorber for VVER-1200 reactor / A. Shelley, M. H. Ovi // Nuclear Engineering and Technology. – 2021. – V. 53. – P. 2454-2463.

[2] Савченко А.М. Техно-экономическая оценка (исследование - ТЭИ) Проекта: «Перспективные научно-технические разработки материалов и технологий безопасных твэлов коммерческих водо-водяных реакторов». – 2017. – 41 с.

[3] Теплофизические свойства модифицированного оксидного ядерного топлива / В.Г. Баранов [и др.] // Атомная энергия. – 2011. – Т. 110, вып. 1. – С. 36-40.

Исследование зависимости спектра нейтронов от параметров пучка дейтронов при реакции ${}^2_1\text{D} + {}^9_4\text{Be} \rightarrow {}^{10}_5\text{B} + {}^1_0\text{n}$ на ускорителе Р-7М

Гладких Михаил Викторович

Овсенёв Александр Евгеньевич, Смольников Никита Викторович, Терещенко Андрей Васильевич
Национальный исследовательский томский политехнический университет

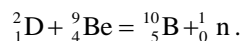
Наймушин Артём Георгиевич, к.ф.-м.н.

mvg23@tpu.ru

Нейтрон-захватная терапия (НЗТ) – один из методов радиационной терапии для селективного лечения злокачественных новообразований головного мозга, шеи, легких и т.д. В основе метода лежит ядерная реакция радиационного захвата нейтрона сильнопоглощающими изотопами (B^{10} , Gd^{157}).

В качестве источников нейтронного излучения для целей НЗТ возможно использование ядерных реакторов, ускорителей, Cf^{252} . Среди упомянутых, наиболее функциональным в качестве источника нейтронов является использование ускорителя благодаря возможности реализации установок с заданными свойствами для исследований НЗТ на базе экспериментальных устройств ускорителя, а также уменьшению дозовых нагрузок на здоровой ткани от гамма-излучения.

В ТПУ в качестве установки по осуществлению НЗТ используется циклотрон Р-7М. Циклотрон Р-7М с диаметром полюсов магнита 1,2 м является прототипом серии циклотронов У-120 и предназначен для ускорения ионов. Главными преимуществами циклотрона Р-7М является возможность ускорения ионов в широком диапазоне масс от протонов с массой 1 до аргона с массой 40 а.е.м. до любой энергии в диапазоне от 0,9 до 6 МэВ/нуклон для легких ионов и 0,65-1,37 МэВ/нуклон для самых тяжелых из указанных ионов. Для дейтронов, на данном ускорителе, максимальный ток пучка достигает 50 мкА, а диапазон энергий пучка от 9 до 14 МэВ. Циклотрон служит источником ускоренных дейтронов для инициирования реакции:



Для определения параметров источника нейтронов сформирована модель и определена зависимость спектра нейтронов от параметров пучка дейтронов. Формирование модели проведено в программе PHITS (Particle and heavy ion transport code system), которая осуществляет моделирование переноса излучения методом Монте-Карло. В результате получены спектры потока нейтронов на расстоянии 1 м от источника в зависимости от энергии пучка дейтронов (рис. 1).

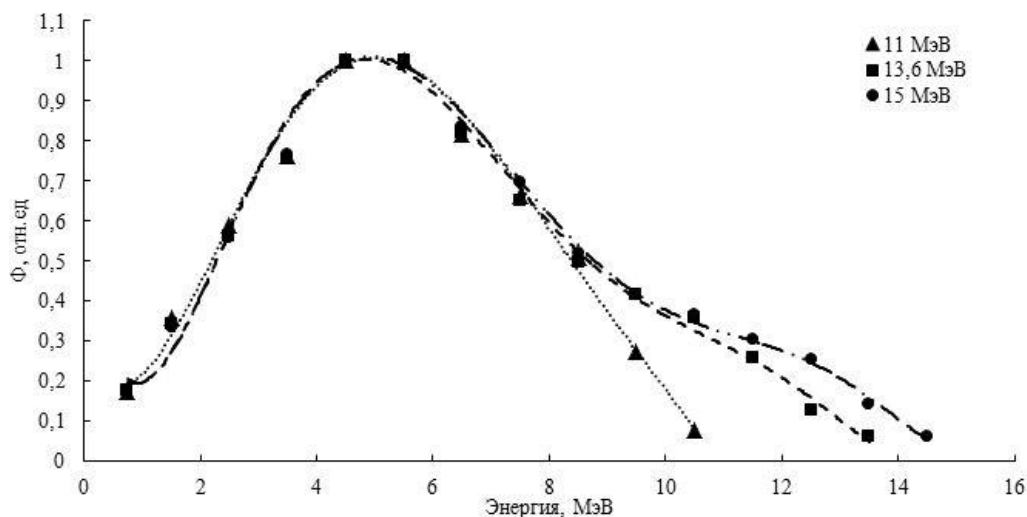


рис. 1. Спектры потока нейтронов при разной энергии пучка дейтронов

В ходе работы установлено, что с увеличением энергии дейтронов наиболее вероятная энергия нейтронов увеличивается с 4,98 МэВ до 6,06 МэВ, а средняя энергия увеличивается с 4,33 МэВ до 5,10 МэВ.

Переходное излучение релятивистских ионов в мишени конечной толщины

Папаян Дмитрий Артурович
Южный федеральный университет
Мальшевский Вячеслав Сергеевич
dparazyan@sfedu.ru

Экспериментальные и теоретические исследования взаимодействия тяжелых ультрарелятивистских ионов с конденсированной средой описывают фундаментальные явления атомных столкновений в твердых телах. Одним из таких явлений, обусловленным движением тяжелых релятивистских ионов в среде, является переходное излучение или Черенковское электромагнитное излучение [1, 2]. Особенности этих процессов с участием релятивистских ионов связаны с возможным изменением зарядового состояния иона при переходе из одной среды в другую. При этом, говоря о переменном заряде, полагаем, что часть заряда системы «ионы + мишень» покидает состояние движения и остается в среде, однако полный заряд всей системы остается неизменным. Настоящая работа посвящена теоретическому исследованию особенностей спектрально-углового распределения электромагнитного излучения многозарядных ионов в тонких мишенях.

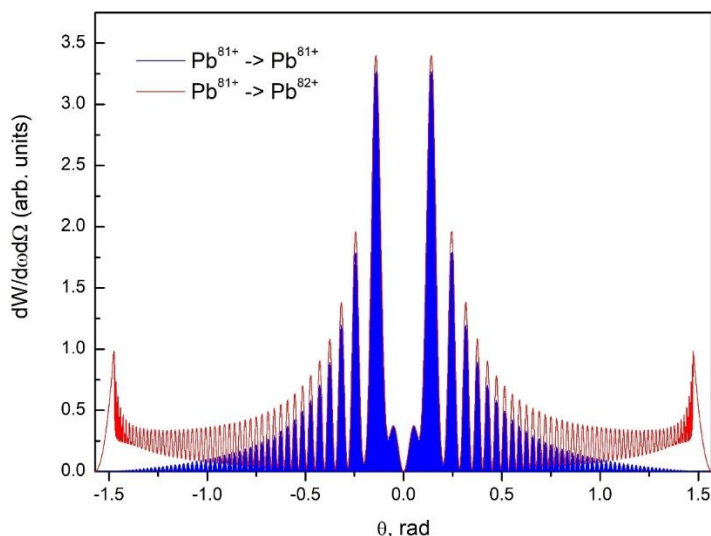


рис.1. Угловое распределение излучения в направлении «назад» релятивистских ионов свинца (Лоренц-фактор $\gamma = 10$), пересекающих тонкую золотую пластину, при различных значениях конечного заряда. Энергия испускаемого кванта $\hbar\omega = 500$ эВ, толщина пластины $L \approx 125$ нм (или пятьдесят длин волн).

Для решения уравнений Максвелла и нахождения электромагнитных полей наличие границ «вакуум-среда» потребует сшивки нормальной и тангенциальной составляющих полей на ней. Таким образом, мы получаем систему уравнений для нормальной и тангенциальной составляющих электрических полей. Решения этой системы позволяют рассчитывать спектрально-угловые характеристики излучения (в направлении «вперед» (вдоль направления движения частицы) или в направлении «назад»). Результаты расчетов представлены на рис.1, где энергия излучения дана в относительных единицах $e^2/\pi^2 c$. Энергия испускаемых квантов выбрана в диапазоне вакуумного ультрафиолета ($\hbar\omega = 500$ эВ, данные о дисперсии диэлектрической постоянной взяты из [3]). В этом случае появляются узкие максимумы в угловом распределении излучения в рентгеновском диапазоне частот при углах, близких к $\pi/2$. Причиной появления таких максимумов возможно является эффект полного внешнего отражения виртуальных фотонов от поверхности мишени.

Список публикаций:

- [1] М. М. Л. Тер-Микаелян, *Влияние среды на электромагнитные процессы при высоких энергиях*, Изд-во АН Арм.ССР, Ереван (1969), с. 210.
- [2] Батыгин В. В., Топтыгин И. Н. 3.2. *Кинематика релятивистских частиц // Современная электродинамика, часть 1. Микроскопическая теория.* — Москва-Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2002. — С. 238. — 736 с. — 1000 экз.
- [3] B.L. Henke, E.M. Gullikson, and J.C. Davis. *X-ray interactions: photoabsorption, scattering, transmission, and reflection at E=50-30000 eV, Z=1-92.* // *Atomic Data and Nuclear Data Tables.* — Vol. 54 (no.2). — 181-342 (July 1993).