

УДК 537.52: 531.53

**РЕНТГЕНОВСКОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ
УСКОРИТЕЛЯ-ТАНДЕМА С ВАКУУМНОЙ ИЗОЛЯЦИЕЙ****А.Г. Башкирцев, А.А. Иванов, Д.А. Касатов, А.С. Кузнецов,
И.Н. Сорокин, С.Ю. Таскаев, В.Я. Чудаев***Институт ядерной физики СО РАН**A.S.Kuznetsov@inp.nsk.su*

В Институте ядерной физики СО РАН сооружен и введен в эксплуатацию прототип источника эпитепловых нейтронов на основе ускорителя-тандема с вакуумной изоляцией. В работе проведена оценка компонент радиационного поля ускорительной установки, обусловливаемых темновым током и пробоями в ускоряющих зазорах.

Проведены экспериментальные измерения и представлены результаты изучения динамики мощности дозы рентгеновского излучения в зависимости от изменения темнового тока в ускоряющих зазорах ускорителя. Предложены и реализованы изменения конструкции установки для предотвращения возникновения этого эффекта.

Проведенное исследование позволяет задать необходимые параметры для проектирования медицинской установки на основе ускорителя-тандема с вакуумной изоляцией с целью применения в онкологических клиниках нейтронозахватной терапии злокачественных опухолей.

Ключевые слова: ускоритель-тандем с вакуумной изоляцией, темновой ток, рентгеновское излучение, высоковольтные элементы, энергетический спектр, бор-нейтронозахватная терапия.

Введение

В Институте ядерной физики СО РАН предложен [1] и сооружен [2] прототип источника эпитепловых нейтронов на основе оригинального сильноточного ускорителя-тандема с вакуумной изоляцией, привлекательного для размещения в онкологических клиниках с целью проведения бор-нейтронозахватной терапии злокачественных опухолей.

В высоковольтных вакуумных элементах установки электроны автоэмиссионного и разрядового происхождения, представляющие основные компоненты паразитного «темнового» тока, ускоряемые в вакуумных зазорах, при торможении на электродах испускают рентгеновское излучение, являющееся существенным источником радиационной опасности установки в режиме работы без пучка ускоряемых заряженных частиц. Исследование радиационного поля неиспользуемого рентгеновского излучения установки и способов снижения его радиационной опасности до приемлемого уровня представляется актуальной задачей, тем более что ускоритель разрабатывается для медицинских целей.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (государственный контракт № 14.518.11.7039).

© 2013 А.Г. Башкирцев, А.А. Иванов, Д.А. Касатов, А.С. Кузнецов, И.Н. Сорокин,
С.Ю. Таскаев, В.Я. Чудаев

Экспериментальные измерения уровней рентгеновского излучения на установке

Для оперативного наблюдения за уровнями ионизирующих излучений вокруг экспериментальной установки и за ее биологической защитой стенд оборудован автоматизированной системой радиационного мониторинга (АСРМ) [4], разработанной в ИЯФ СО РАН.

Измерения мощности дозы фотонного излучения в системе осуществляются четырьмя блоками детектирования (рис. 1) на основе сферических ионизационных камер с воздушным наполнением объемом 0,85 л и со стенкой из полиамида толщиной 1,1 мм, покрытой тонким слоем коллоидного графита. Использование органического диэлектрика в качестве материала стенки позволяет несколько уменьшить внешние габариты и вес детектора, а также избежать значительного ухудшения чувствительности камеры к низкоэнергетическому излучению. Динамический диапазон детектора – $1 \div 12\,000$ мкЗв/ч.

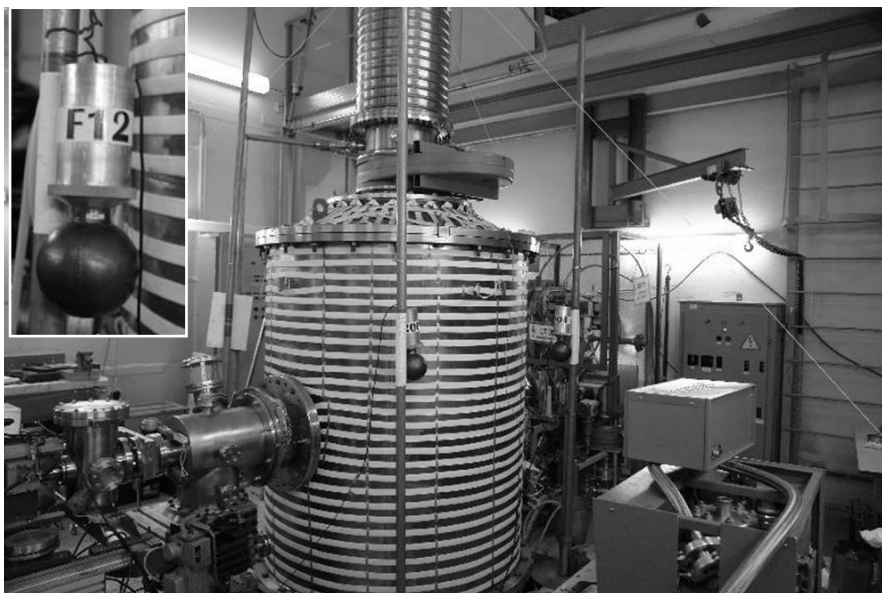


Рис. 1. Блок детектирования мощности дозы фотонного излучения (вверху слева) и размещение блоков детектирования вокруг ускорителя

Для определения равномерности уровня рентгеновского излучения в азимутальной плоскости вокруг ускорителя на расстоянии 1 м от наружной поверхности бака размещались четыре блока детектирования через 90° . После записи данных все блоки смещались на 45° и измерения повторялись.

При подъеме напряжения на тандеме, сопровождавшемся увеличением остаточного давления, был обнаружен устойчивый эффект (рис. 2), характерный для нового типа ускорителя – тандема с вакуумной изоляцией: отставание показаний делителя напряжения проходного изолятора ($U_{\text{д.изол}}$ – кривая 2) от показаний делителя напряжения источника ($U_{\text{д.ист}}$ – кривая 1). В результате выстойки под напряжением вакуум улучшался, разница в показаниях делителей уменьшалась и за время порядка двух часов исчезала полностью [3].

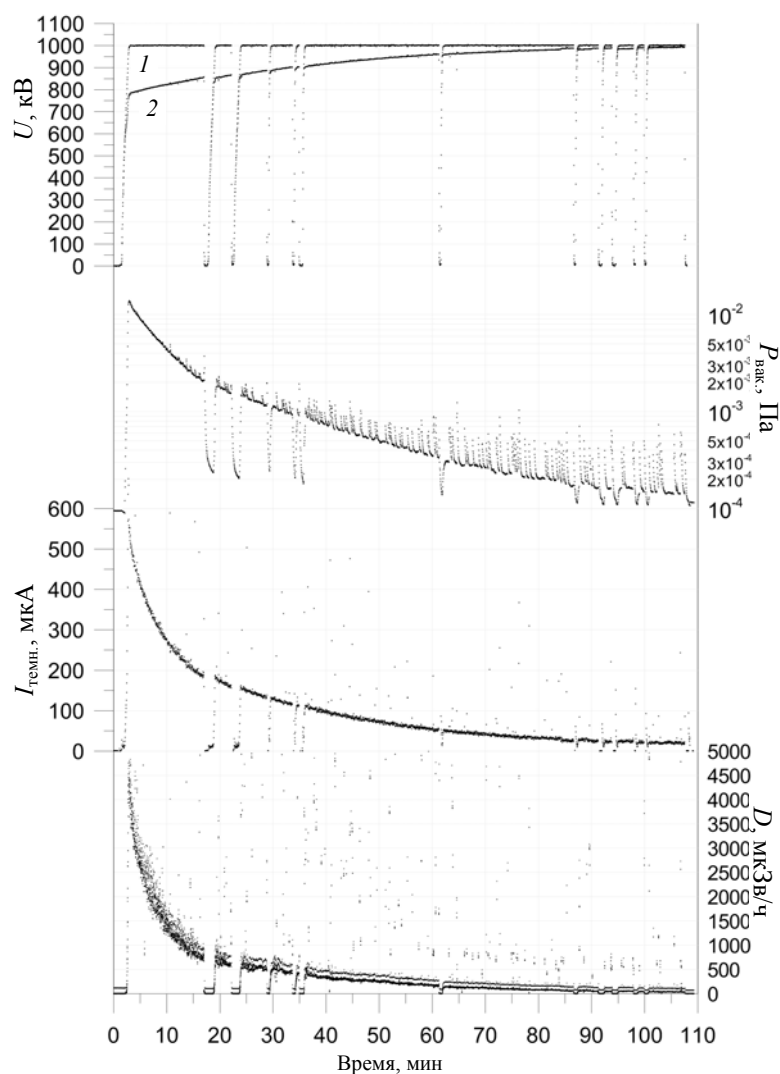


Рис. 2. Характерные графики зависимостей напряжения, вакуума, темного тока и мощности дозы рентгеновского излучения с четырех детекторов от времени

Чтобы отсеять значения, явно связанные с пробойными и предпробойными токами, которые можно определить по показаниям делителей напряжения высоковольтного источника и проходного изолятора, по резкому ухудшению остаточного вакуума в тандеме, по броскам темного тока I и мощности дозы рентгеновского излучения D , результаты измерений рентгеновского излучения во всех экспериментах обрабатывались с помощью программно реализованного алгоритма статистической обработки данных [7].

На рис. 3 представлена зависимость мощности дозы рентгеновского излучения всех четырех детекторов от темного тока. Видно, что мощность дозы излучения приблизительно пропорциональна темному току.

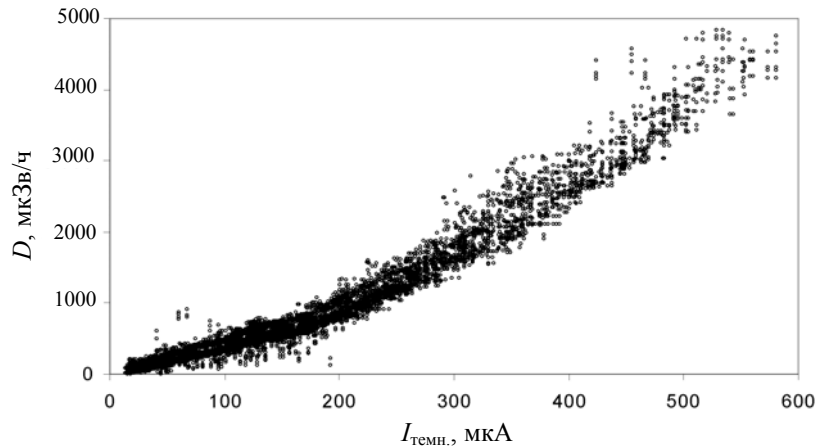


Рис. 3. Зависимость уровня рентгеновского излучения от величины темнового тока

На рис. 4 представлены усредненные данные измерений за три последовательных эксперимента для значений темнового тока $I = 300 \pm 10$ мкА и напряжения на высоковольтном электроде 1 МВ. Видно, что излучение можно считать равномерным с точностью до 20 %, что говорит об относительно равномерном распределении темновых токов по поверхности электродов.

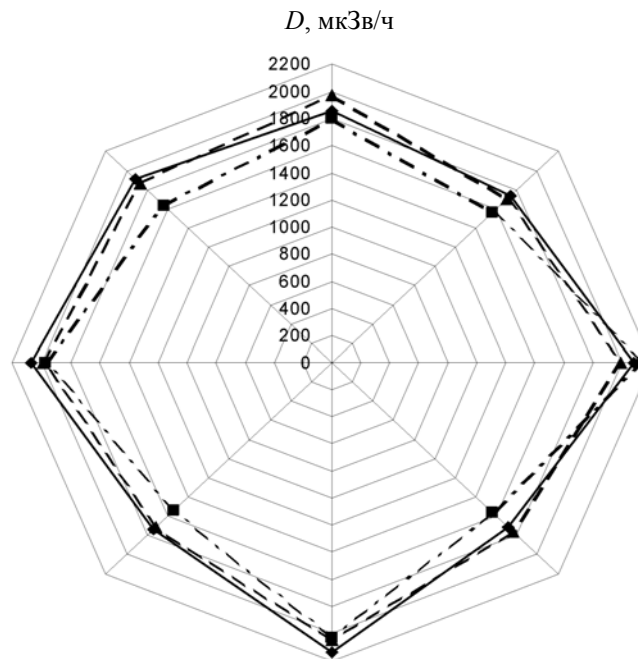


Рис. 4. Угловое распределение излучения ускорителя

Результаты измерений мощности дозы рентгеновского излучения блоками детектирования, размещенными на расстоянии 2, 3.3 и 4.2 м от центра ускорителя в горизонтальной плоскости на высоте центра ускорителя, согласуются с расчетными в

предположении точечного источника с точностью до 8 % [6]. Этот результат также подтверждает относительно равномерное распределение темновых токов по поверхности электродов.

Проведенные эксперименты показали, что за время $\sim 1\div 2$ часов тренировки уровень рентгеновского излучения существенно падает. Так, на расстоянии 1 м от корпуса ускорителя мощность дозы рентгеновского излучения снижается с 5000 мкЗв/ч до ~ 10 мкЗв/ч. При этом остаточное давление снижается до $\sim 10^{-4}$ Па. Динамика изменения темнового тока показала, что основной причиной его появления является десорбция газа с поверхностей бака и электродов. Чтобы сократить время выхода на безопасный уровень излучения, необходимо увеличить скорость вакуумной откачки.

Энергетический спектр рентгеновского излучения

С использованием ВГО-спектрометра, установленного внутри защищенного зала на расстоянии 6.3 м от центра ускорителя, измерен энергетический спектр рентгеновского излучения (рис. 5). В момент измерения спектра давление остаточного газа было $4 \cdot 10^{-4}$ Па, темновой ток имел величину 65 ± 3 мкА, а ионизационная камера на расстоянии ~ 4 м регистрировала мощность дозы 34 ± 4 мкЗв/ч. Полученный спектр в основном подтверждает пункт исходных данных о том, что достигаемая электронами энергия не должна превышать значения 200 кэВ, определяемого разностью потенциалов между соседними электродами ускоряющих зазоров.

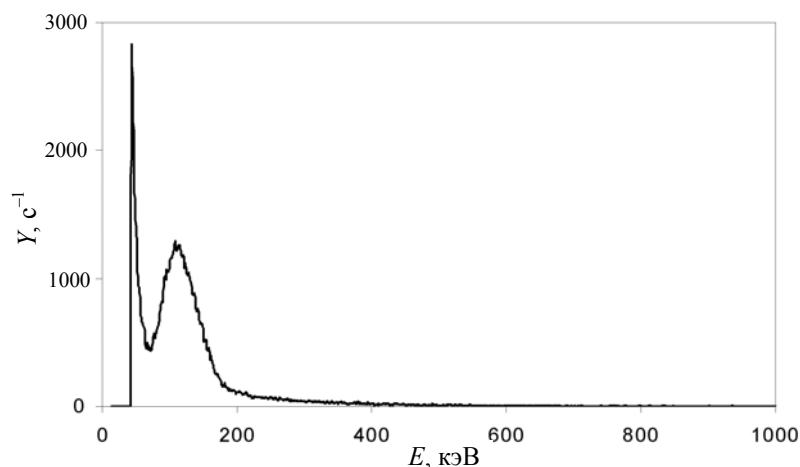


Рис. 5. Регистрируемый энергетический спектр рентгеновского излучения

Темновой ток большой интенсивности после увеличения апертуры ускорительного канала

После проведенного увеличения апертуры ускорительного канала до 58 мм был зарегистрирован темновой ток $3\div 4$ мА [5] со значительно большей интенсивностью рентгеновского излучения по сравнению с темновыми токами, изученными в работе [3] и описанными выше. В работе [5] выяснено, что при увеличении диаметра диафрагмы возрастает напряженность электрического поля на остром краю отверстия катодной части рамки крепления диафрагмы и эмитированные с этого острого края электроны попадают непосредственно в ускорительный канал. Измеренный энергетиче-

ческий спектр рентгеновского излучения при протекании данного тока большой интенсивности представлен на рис. 6. Видно, что распределение сместилось в область более высоких значений энергий фотонов, что подтверждает сделанный в работе [7] вывод о том, что эмитированные электроны попадают в ускорительный канал и ускоряются вплоть до полного напряжения. Следует заметить, что по сравнению с условиями эксперимента, описанного в работе [3], диаметры диафрагм промежуточных электродов канала ускорения отрицательных ионов водорода были не 58 мм, а постепенно уменьшающиеся: 43, 43, 35, 30, 25 и 20 мм, что возможно объясняет уменьшение значения автоэмиссионного тока вдоль ускорительного тракта тандема до ~ 1 мА.

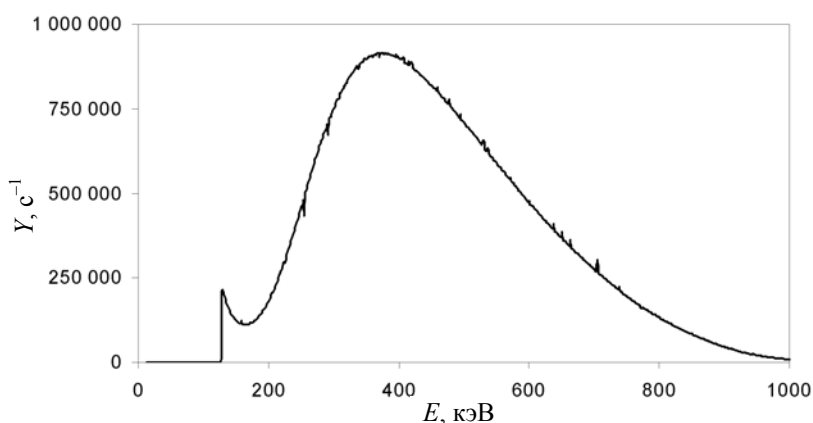


Рис. 6. Регистрируемый энергетический спектр рентгеновского излучения при протекании темнового тока большой интенсивности

Заключение

Экспериментально измерена мощность дозы рентгеновского излучения на разных азимутах, высотах и расстояниях при тренировке ускорителя. Выяснено, что излучение можно считать азимутально изотропным и убывающим примерно обратно пропорционально квадрату расстояния от центра ускорителя. Определено, что в начале тренировки ускорителя мощность дозы излучения на расстоянии 1 м от корпуса ускорителя не превышает 5000 мкЗв/ч. К концу тренировки через 1-2 ч она снижается до ~ 10 мкЗв/ч. За имеющейся 122-сантиметровой бетонной стеной радиационно защищенного зала, в котором располагается ускоритель, мощность дозы излучения ниже предела чувствительности дозиметрической аппаратуры.

ВГО-спектрометром измерен спектр рентгеновского излучения, характеризующийся в основном энергиями ниже 200 кэВ, с максимумом при энергии 120 кэВ. Полученный спектр подтверждает предположение о том, что при тренировке ускорителя основным фактором формирования поля рентгеновского излучения являются темновые токи в межэлектродных зазорах, обусловленные автоэмиссией электронов с поверхности вакуумного бака и ускоряющих электродов.

Экспериментально обнаружено и изучено возникновение мощного излучения при значительном увеличении апертуры ускорительного канала. Измеренный в этом случае спектр рентгеновского излучения содержит фотоны со значительной энергией, вплоть до энергии, соответствующей полному напряжению ускорителя. Определено, что возникновение мощного излучения связано с темновым током, текущим непо-

средственно в ускорительном канале, возникающим при увеличении апертуры канала из-за наличия острого края отверстия катодной части рамки крепления диафрагмы. В конструкцию ускорителя внесены изменения для предотвращения возникновения тока и, как следствие, мощного излучения.

Проведенное исследование позволяет задать необходимые параметры для проектирования медицинской установки на основе ускорителя-тандема с вакуумной изоляцией с целью применения в онкологических клиниках нейтронозахватной терапии злокачественных опухолей.

Авторы благодарят Экста В.В. за выполнение монтажа, наладки и запуска АСРМ.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] **Ваганов В.Ф., Белов В.Р., Бедер Е.Д. et al.** Accelerator based neutron source for the neutron-capture and fast neutron therapy at hospital. NIM A 413/2-3 (1998) – P. 397–426.
- [2] **Кузнецов А.С.** Первые эксперименты по регистрации нейтронов на ускорительном источнике для бор-нейтронозахватной терапии / А.С. Кузнецов, Г.Н. Малышкин, А.Н. Макаров и др. // Письма в ЖТФ. – 2009. – № 35. – Вып. 8. – С. 1–6.
- [3] **Алейник В.И.** Статические высоковольтные процессы при работе ускорителя-тандема с вакуумной изоляцией / В.И. Алейник, А.А. Иванов, А.С. Кузнецов, И.Н. Сорокин. – Препринт / ИЯФ СО РАН 2011-19. – Новосибирск, 2011.
- [4] **Баркова В.Г.** Труды девятого Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц, 2 / В.Г. Баркова, О.М. Корябкин, А.В. Репков, В.Я. Чудаев. – Дубна, 1985. – С. 318.
- [5] **Алейник В.И.** Регистрация темнового тока большой интенсивности в ускорителе-тандеме с вакуумной изоляцией после увеличения апертуры ускорительного канала / В.И. Алейник, А.С. Кузнецов, И.Н. Сорокин и др. – Препринт / ИЯФ СО РАН 2012-2. – Новосибирск, 2012.
- [6] **Башкирцев А.Г.** Рентгеновское излучение высоковольтных элементов тандемного ускорителя с вакуумной изоляцией / А.Г. Башкирцев, А.А. Иванов, Д.А. Касатов и др. // Медицинская физика. – № 2 (54). – 2012.
- [7] **Башкирцев А.Г.** Расчетные и экспериментальные оценки поля рентгеновского излучения, создаваемого высоковольтными элементами установки «Ускоритель-тандем БНЗТ» / А.Г. Башкирцев, А.А. Иванов, Д.А. Касатов и др. – Препринт / ИЯФ СО РАН 2012-8. – Новосибирск, 2012.

Bashkirtsev A.G., Chudaev V.Ya., Ivanov A.A., Kasatov D.A., Kuznetsov A.S., Sorokin I.N., Taskaev S.Yu.

X-RAY RADIATION HIGH-VOLTAGE ELEMENTS OF THE TANDEM ACCELERATOR WITH VACUUM INSULATION

In the Institute of Nuclear Physics SB RAS the epithermal neutron source is entered into operation based on the tandem – accelerator with vacuum isolation. There was evaluated the accelerating installation components of a X-ray field causing dark current and breakdowns in accelerating gaps.

The experimental measurements were carried out and the study results of the dose capacity dynamics are submitted, depending on change of a dark current in tandem accelerating gaps. The design changes of installation for prevention of occurrence of powerful X-ray radiation are offered and realized.

The carried research allows setting necessary parameters for designing medical installation on the basis of an accelerator-tandem with vacuum isolation with the purpose of realization in oncological clinics neutron-capture therapy of malignant tumors.

Keywords: Tandem accelerator with vacuum insulation; Dark current; X-rays; High-voltage components; Energy spectrum; Boron neutron capture therapy.

Статья поступила 17 января 2013 г.