

РЕНТГЕНОВСКОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ТАНДЕМНОГО УСКОРИТЕЛЯ 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 им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск

В ИЯФ СО РАН сооружен и введен в эксплуатацию источник эпитепловых нейтронов на основе тандемного ускорителя с вакуумной изоляцией. Проведена оценка компонент радиационного поля ускорительной установки, обусловленных темновым током и пробоями в ускоряющих зазорах. Выполнен оценочный расчет мощности эквивалентной дозы на разных расстояниях от ускорителя в каньоне и за его защитой.

Проведены измерения и представлены результаты изучения динамики мощности дозы фотонов в зависимости от изменения темнового тока в ускоряющих зазорах тандема при полном рабочем напряжении 1 МВ без генерации пучка протонов. Также измерен спектр тормозного излучения. Экспериментально обнаружено и изучено возникновение мощного излучения при значительном увеличении апертуры ускорительного канала. Предложены и реализованы изменения конструкции установки для предотвращения возникновения этого излучения.

Полученные результаты необходимы для проектирования медицинской установки на основе данного ускорителя с целью проведения нейтронозахватной терапии злокачественных опухолей.

Ключевые слова: нейтронозахватная терапия, ускоритель протонов, радиационное поле, темновой ток, электрический пробой

Введение

Перспективным подходом в лечении ряда злокачественных опухолей, в первую очередь, трудноизлечимых опухолей головного мозга и меланом, рассматривается бор-нейтронозахватная терапия (БНЗТ). Метод основан на селективном накоплении нерадиоактивного нетоксичного изотопа ^{10}B в опухоли и последующем облучении надтепловыми нейтронами. В результате поглощения нейтрона бором происходит ядерная реакция $^{10}\text{B}(n,\alpha)^7\text{Li}$ с большим выделением энергии именно в той клетке, которая содержала ядро бора, что приводит к ее гибели. Практическая реализация метода обеспечивается большой величиной сечения захвата тепловых нейтронов бором, малой длиной пробега продуктов ядерной реакции и избира-

тельным накоплением раковыми клетками содержащих бор фармпрепаратов. Проведенные клинические испытания методики на ядерных реакторах продемонстрировали её достаточную эффективность в лечении некоторых опухолей, однако широкое внедрение методики в клиническую практику требует компактных, безопасных и относительно недорогих источников эпитепловых нейтронов. В качестве источников нейтронов могут использоваться ускорители заряженных частиц. В Институте ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН предложен [1] и изготовлен [2] прототип источника эпитепловых нейтронов на основе электростатического тандемного ускорителя протонов с вакуумной изоляцией для генерации нейтронов в результате реакции $^7\text{Li}(p,n)^7\text{Be}$.

В данном ускорителе инжектируемые отрицательные ионы водорода ускоряются до 1–1,2 МэВ подаваемым на высоковольтный электрод потенциалом, превращаются в протоны в газовой обдирочной мишени, и затем протоны тем же потенциалом ускоряются до 2–2,4 МэВ. Потенциал на высоковольтный и 5 промежуточных электродов подается от источника напряжения через проходной изолятор. В высоковольтных вакуумных зазорах электроны автоэмиссионного и разрядового происхождения ускоряются, а затем при торможении в электродах испускают тормозное излучение. В работе исследовано радиационное поле этого излучения от высоковольтных элементов ускорителя, определены источники излучения и предложены способы его снижения до приемлемого уровня.

Расчетные оценки уровня тормозного излучения

Ранее в работе [3] было определено, что максимальное значение темнового тока, обусловленного автоэмиссией электронов с поверхностей вакуумного бака и ускоряющих электродов (с последующим их ускорением и торможением в материале электродов) не превышает 600 мкА. При этом энергия, достигаемая электронами, не должна превышать значения 200 кэВ, определяемого разностью потенциалов между соседними электродами ускоряющих зазоров. Основная доля темнового тока электронов эмитируется из внутренней поверхности стенки бака ввиду её шероховатости и тормозится в наружном электроде (поверхности ускоряющих электродов зеркальные).

Также источником тормозного излучения могут быть пробой по вакуумной поверхности отдельных колец проходного изолятора. В этом случае напряжение между электродами имеет величину 50 кВ, а запасенная энергия в ёмкости ускорителя – 70 Дж. Максимальный выход излучения возникнет при последовательном пробое всех поверхностей проходного изолятора в вакууме.

Относительный энергетический выход тормозного излучения при полном торможении электронов с энергией E [кэВ] в мишенях из материалов с атомным номером Z согласно [4] равен:

$$\eta = 3 \cdot 10^{-6} \cdot Z \cdot E^{3/4}.$$

Из используемых в установке конструкционных материалов наибольший выход тор-

мозного излучения будет на железе: $1,5 \cdot 10^{-3}$ при 50 кэВ и $4,2 \cdot 10^{-3}$ при 200 кэВ.

Все источники тормозного излучения располагаются внутри вакуумного бака ускорителя, представляющего собой цилиндр диаметром 1,4 м высотой 2,3 м (рис. 1). Выходящее излучение ослабляется стальными стенками бака. При характерной толщине стенок вакуумного бака 6 мм фотонное излучение ослабляется в 12 раз при $E_0=200$ кэВ и в $\sim 10^8$ раз при $E_0=50$ кэВ [5].

Определим уровень тормозного излучения внутри каньона площадью 60 м^2 , в котором расположен ускоритель, и снаружи его за бетонными стенами толщиной 1,22 м.

Оценим сначала уровень излучения, обусловленного вкладом темнового тока. В соответствии с данными работы [5] удельная мощность экспозиционной дозы на расстоянии 1 м от рентгеновской трубки при анодном напряжении 200 кВ равна $1,4 \text{ Р} \cdot \text{м}^2 / (\text{мА} \cdot \text{мин})$. Поскольку электроны тормозятся в железе, а не в вольфраме, то при токе 0,6 мА с учётом ослабления стенкой бака максимально возможное значение мощности эквивалентной дозы на внутренней поверхности стены каньона (на расстоянии 3 м от поверхности бака ускорителя) составит $\sim 1 \text{ мЗв/ч}$.

В соответствии с [5] слой десятикратного ослабления бетоном мощности дозы рентгеновского излучения при $E_0=200$ кэВ можно приближённо принять равным 10 см. Следовательно, бетонная стена толщиной 122 см обеспечивает кратность ослабления $1,6 \cdot 10^{12}$. Таким

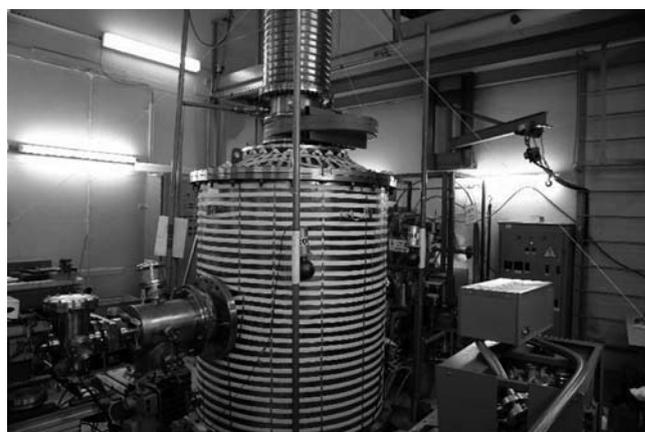


Рис. 1. Размещение блоков детектирования вокруг ускорителя

образом, вне каньона мощность дозы не превышает $2 \cdot 10^{-16}$ Зв/ч, что пренебрежимо мало.

Теперь проведем оценку вклада в излучение пробоев по поверхности проходного изолятора в вакууме. При этом надо учитывать, что протокол подъёма напряжения ускорителя не позволяет достичь задаваемого максимального значения в течение двух минут после пробоя, что ограничивает частоту повторения таких пробоев. При максимальной частоте пробоев между кольцами проходного изолятора 1 раз в 2 мин при запасённой энергии 70 Дж и напряжении 50 кВ средний ток будет 12 мкА. Удельная мощность экспозиционной дозы на расстоянии 1 м от рентгеновской трубки при анодном напряжении 50 кВ в соответствии с [6] равна $0,15 \text{ Р} \cdot \text{м}^2 / (\text{мА} \cdot \text{мин})$. В пересчёте на железную мишень при токе 12 мкА имеем $6,3 \cdot 10^{-4} \text{ Р} \cdot \text{м}^2 / \text{мин}$. Выход с учётом ослабления стальной стенкой бака дает $3,6 \cdot 10^{-12}$ Зв \cdot м²/ч, что намного ниже порога чувствительности дозиметрической аппаратуры.

Приведённые выше оценки показывают, что уровни рентгеновского излучения вне каньона не только ниже норм, установленных ОСПОРБ 99/2010 [6] и НРБ-99/2009 [7], но и значительно ниже естественного радиационного фона. Внутри же зала и вблизи ускорительной установки мощность дозы полностью определяется током темновых электронов, ускоряемых до 200 кэВ, и может существенно (в 100–1000 раз) превышать допустимые уровни для персонала группы А.

Измерения уровней тормозного излучения

Для оперативного наблюдения за уровнями ионизирующих излучений вокруг экспериментальной установки и за её биологической защитой стенд был оборудован автоматизированной системой радиационного мониторинга (АСРМ) [8], разработанной в ИЯФ СО РАН.

Измерения мощности дозы фотонного излучения в системе осуществляются четырьмя блоками детектирования (рис. 1) на основе сферических ионизационных камер (рис. 2) с воздушным наполнением объёмом 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.

Для определения равномерности уровня тормозного излучения в азимутальной плоскости вокруг ускорителя на расстоянии 1 м от наружной поверхности вакуумного бака были размещены 4 блока детектирования через каждые 90° (рис. 1). После записи данных все блоки смещались на 45° и измерения повторялись. Чтобы отсеять значения, явно связанные с пробойными и предпробойными токами, которые можно определить по показаниям делителей напряжения источника и изолятора, а также по резкому ухудшению остаточного вакуума в тандеме и по броскам темнового тока I и мощности дозы фотонов D (рис. 3), результаты измерений тормозного излучения во всех экспериментах обрабатывались с помощью программно реализованного алгоритма статистической обработки данных.

На рис. 4 представлена зависимость мощности дозы излучения от темного тока для всех 4 детекторов. Видно, что с хорошей точностью мощность излучения пропорциональна темновому току. На рис. 5 представлены усред-



Рис. 2. Блок детектирования мощности дозы фотонного излучения

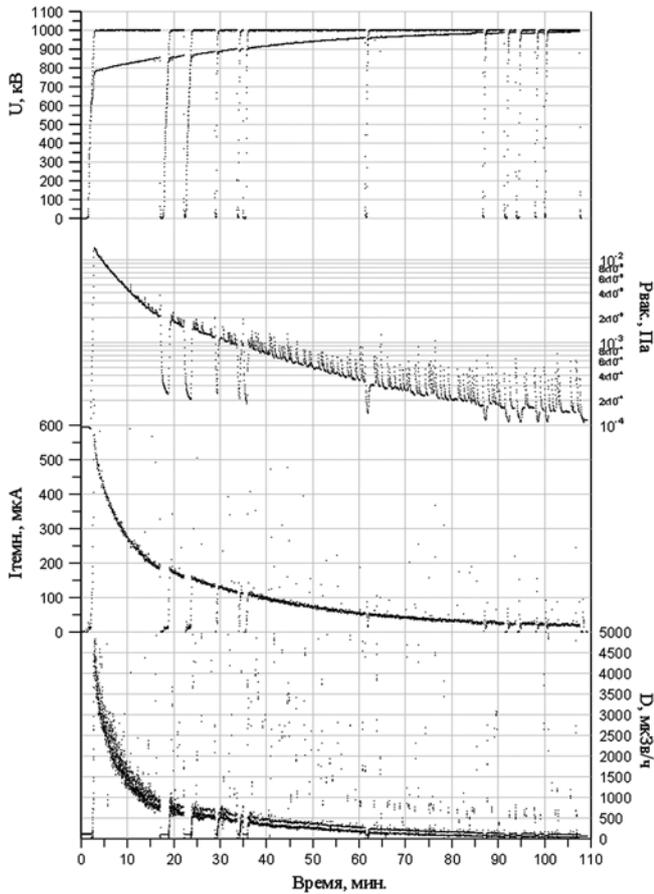


Рис. 3. Характерные графики зависимостей напряжения, вакуума, темнового тока и мощности дозы тормозного излучения от времени

ненные 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

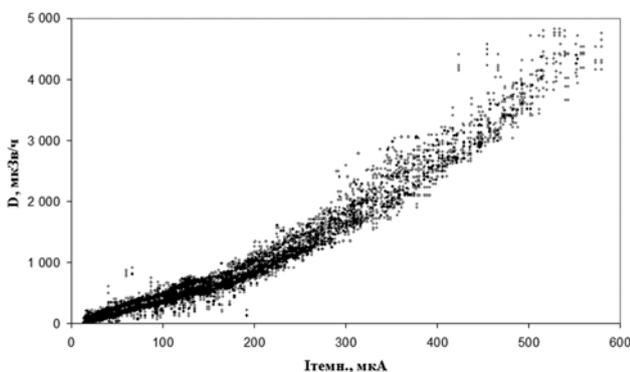


Рис. 4. Зависимость уровня тормозного излучения от величины темнового тока

погрешностью до 20 %, что говорит об относительно равномерном распределении темновых токов по поверхности электродов.

Результаты измерений урвней излучения детекторами, 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 погрешностью до 8 %. Данный результат подтверждает относительно равномерное распределение темновых токов по поверхности электродов.

Проведенные эксперименты показали, что за время $\sim 1 \div 2$ часов тренировки уровень фотонного излучения значительно снижается. Так, на расстоянии 2 м от ускорителя мощность дозы излучения снижается с 1000 до ~ 10 мкЗв/ч. При этом значение вакуума составляет $\sim 10^{-4}$ 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 радиационного фона необходимо увеличить скорость вакуумной откачки.

Энергетический спектр тормозного излучения

С использованием гамма-спектрометра со сцинтиллятором на основе германата висму-

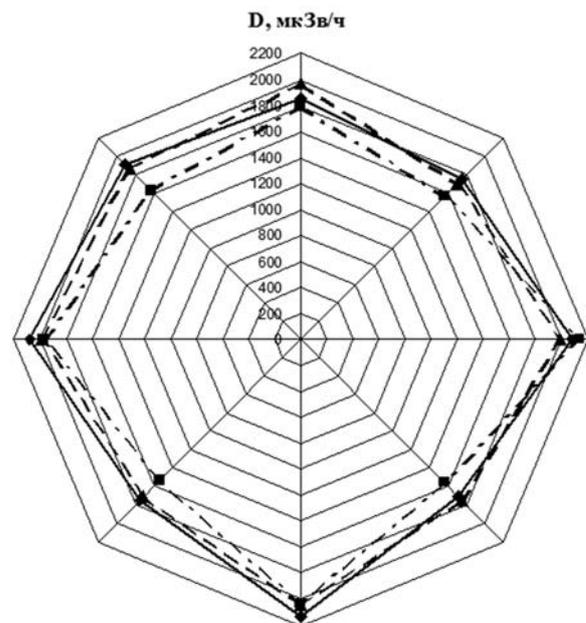


Рис. 5. Угловое распределение излучения ускорителя

та ВГО, установленного внутри защищенного зала на расстоянии 6,3 м от центра ускорителя, измерен энергетический спектр излучения (рис. 6). 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. Данный спектр хорошо подтверждает исходное предположение о том, что достигаемая электронами энергия не должна превышать значения 200 кэВ, определяемого разностью потенциалов между соседними электродами ускоряющих зазоров.

Влияние увеличения апертуры ускорительного канала на уровень излучения

После проведенного увеличения апертуры ускорительного канала до 58 мм был зарегистрирован высокий темновой ток 3–4 мА [9] со значительно большей интенсивностью радиации по сравнению с темновыми токами, изученными в работе [3] и описанными выше. В работе [9] 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 энергетический спектр фотонного излучения при протекании данного тока представлен на рис. 7. Видно, что распределение сместилось в область больших значений энергий фотонов, что подтверждает сделанный в работе [9] вывод о том, что эмитированные электроны попадают в ускорительный канал и ускоряются полным напряжением. 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 уменьшаются: 43, 43, 35, 30, 25 и 20 мм, что, возможно, объясняет меньшее значение тока – на уровне 1 мА.

На рис. 8 представлены временные зависимости темнового тока и мощности дозы тормозного излучения (провалы до нулевых значений связаны с пробоями по высокому напряжению или выключением напряжения). На графике видно, что в момент времени 3401 с произошло резкое уменьшение темного тока и еще более резкое уменьшение уровня дозы излуче-

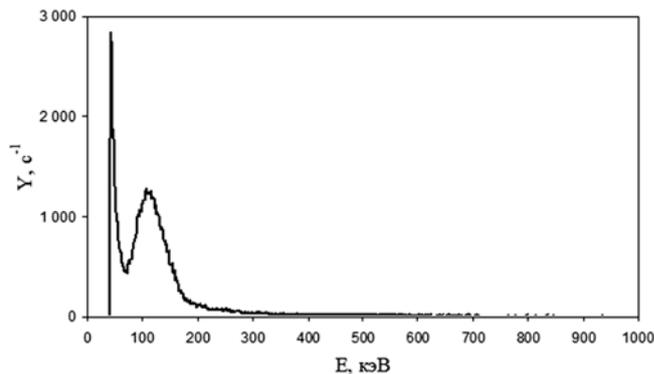


Рис. 6. Регистрируемый энергетический спектр тормозного излучения при протекании нормально-го темнового тока

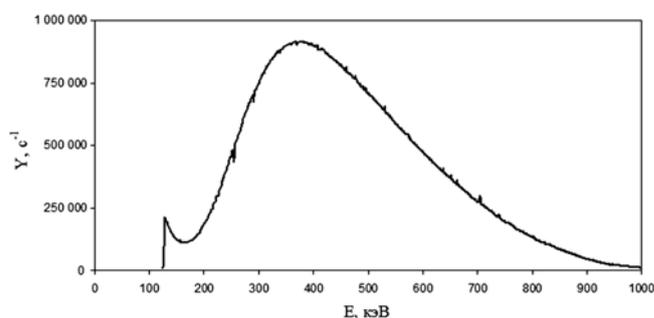


Рис. 7. Регистрируемый энергетический спектр тормозного излучения при протекании повышенно-го темнового тока

ния. Вероятнее всего, в этот момент времени по каким-то причинам потух разряд, вызванный электронами в ускорительном канале. Предположив наличие таких двух темновых токов, один из которых течет в пространстве между соседними электродами, когда энергия электронов не может превышать 160 кэВ, а другой – в ускорительном канале, когда электроны могут ускориться вплоть до 900 кэВ, можно объяснить поведение кривых на рис. 8. Первый темновой ток с энергией электронов менее 200 кэВ, связанный с возникновением микрозарядов, сопровождающихся десорбцией адсорбированных газов с поверхности электродов, в течение эксперимента плавно уменьшается со значений порядка 600 мкА до ~ 100 мкА, что характерно для процесса при тренировке ускорителя [3]. Второй темновой ток, связанный с переносом электронов в ускорительном канале, медленно возрастает до 1 мА за 10 минут, потом полчаса держится на этом уровне и резко пропадает.

Таблица 1

Средние значения темного тока большой интенсивности и мощности дозы до и после момента исчезновения

Временной интервал, с	2800–3400	3400–4000
Темновой ток, мкА	910±50	200±30
Мощность дозы, мкЗв/ч	8600±1000	130±40

Были выбраны два временных интервала до момента исчезновения темного тока большой интенсивности и после него, определены средние значения тока и мощности дозы. Результаты представлены в табл. 1.

Предположим, что во временном интервале 2800–3400 с темновой ток 910 мкА является суммой темного тока 210 мкА, сопровождаемого радиацией на уровне 140 мкЗв/ч, и тока 700 мкА, приводящего к радиации в 8500 мкЗв/ч. Отнормировав на единицу тока, получим, что мощность дозы фотонов второго тока превосходит мощность первого в 18 раз. Если энергии электронов второго тока превосходят энергии первого в 6 раз (по количеству зазоров), то относительный энергетический выход тормозного излучения при полном торможении

электронов, зависящий от энергии как $E^{3/4}$, вырастет в 3,8 раза. Оставшееся различие в 5 раз может объясняться значительно меньшим ослаблением тормозного излучения стальными стенками вакуумного бака при $E_0=900$ кэВ, чем при $E_0=200$ кэВ. В работе [6] данных для 900 кэВ нет, есть только данные до 300 кэВ: при характерной толщине стенки 6 мм тормозное излучение при $E_0=200$ кэВ ослабляется в 12 раз, а при $E_0=300$ кэВ – в 7 раз.

Заключение

Измерены характеристики поля тормозного излучения на разных азимутах, высотах и расстояниях при тренировке ускорителя. Выяснено, что излучение можно считать азимутально равномерным и убывающим квадратично с расстоянием от центра ускорителя. Определено, что при тренировке ускорителя мощность дозы фотонов на расстоянии 2 м от ускорителя не превышает 1000 мкЗв/ч, а к концу тренировки через 1–2 ч снижается до ~10 мкЗв/ч. За имеющейся 122-сантиметровой бетонной стеной каньона, в котором располагается ускоритель, мощность дозы тормозного излучения ниже предела чувствительности дозиметрической аппаратуры.

С помощью гамма-спектрометра измерен спектр тормозного излучения, характеризующийся энергиями ниже 200 кэВ с максимумом 120 кэВ. Данный спектр подтверждает предположение о том, что при тренировке ускорителя источником радиации являются темновые токи в межэлектродных зазорах, обусловленные автоэмиссией электронов с поверхности вакуумного бака и ускоряющих электродов.

Экспериментально обнаружено и изучено возрастание выхода тормозного излучения при значительном увеличении апертуры ускорительного канала. Измеренный спектр фотонов характеризуется значительной энергией, вплоть до энергии, соответствующей полному напряжению на электродах ускорителя. Пока-

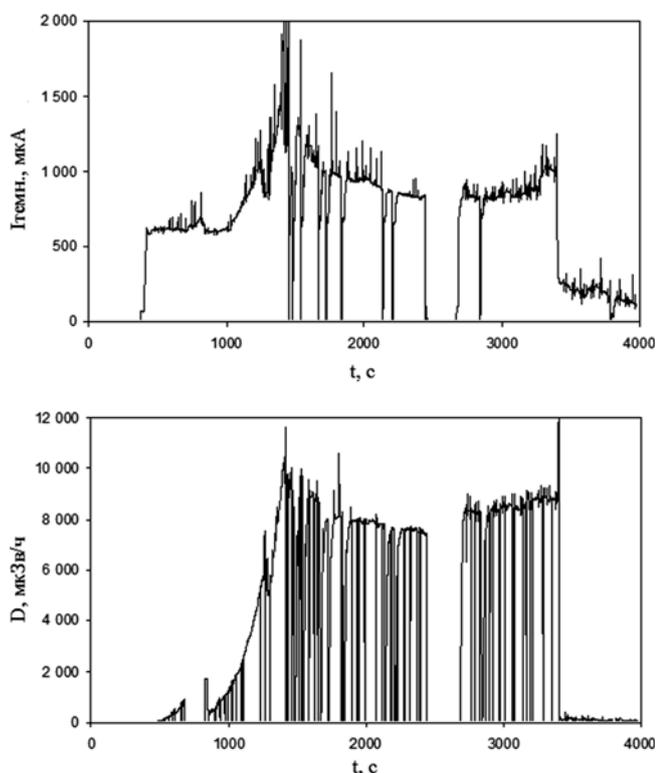


Рис. 8. Временные зависимости темного тока I и мощности дозы тормозного излучения D

зано, что увеличение мощности дозы связано с темновым током, текущим непосредственно в ускорительном канале и возникающим при увеличении апертуры канала из-за наличия острого края отверстия катодной части рамки крепления диафрагмы. В конструкцию ускорителя внесены соответствующие изменения для предотвращения возникновения тока и, как следствие, увеличения выхода излучения.

Проведенное исследование позволяет задать необходимые параметры для проектирования медицинской установки на основе тандемного ускорителя с вакуумной изоляцией с целью проведения нейтронозахватной терапии злокачественных опухолей.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (государственный контракт № 16.518.11.7038) и Сибирского отделения Российской академии наук (междисциплинарный интеграционный проект фундаментальных исследований № 134 и проект партнерских фундаментальных исследований № 52).

Список литературы

1. *Bayanov B., Belov V., Bender E. et al.* Accelerator based neutron source for the neutron-capture and fast neutron therapy at hospital. // Nucl. Instrum. Meth. in Phys. Res., 1998, A 413/2-3, P. 397–426.
2. *Кузнецов А.С., Малышкин Г.Н., Макаров А.Н. и соавт.* Первые эксперименты по регистрации нейтронов на ускорительном источнике для бор-нейтронозахватной терапии. // Письма в ЖТФ, 2009, **35**, № 8, С. 1–6.
3. *Алейник В.И., Иванов А.А., Кузнецов А.С., Сорокин И.Н.* Статические высоковольтные процессы при работе ускорителя-тангема с вакуумной изоляцией. Препринт ИЯФ СО РАН 2011-19. Новосибирск, 2011.
4. *Егер Р.* Дозиметрия и защита от излучений. – М.: Госатомиздат, 1961.
5. *Dale Trout E. et al.* // Health Phys., 1975, **29**, P. 163–169.
6. Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности ОСПОРБ 99/2010. СП 2.6.1.2612–10.
7. Нормы радиационной безопасности НРБ-99/2009. СанПиН 2.6.1.2523–09.
8. *Баркова В.Г., Корябкин О.М., Репков А.В., Чудаев В.Я.* Автоматизированная система радиационного контроля электрон-позитронного ускорительно-накопительного комплекса ВЭПП-4. // Труды 9-го Всесоюз. совещания по ускорителям заряженных частиц, Дубна, 1985. Том 2, С. 318.
9. *Алейник В.И., Кузнецов А.С., Сорокин И.Н. и соавт.* Регистрация темнового тока большой интенсивности в ускорителе-тангеме с вакуумной изоляцией после увеличения апертуры ускорительного канала. Препринт ИЯФ СО РАН 2012-2. Новосибирск, 2012.

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

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

Budker Institute of Nuclear Physics, SB RAS, Novosibirsk, Russia

In the Budker Institute of Nuclear Physics an epithermal neutron source based on vacuum isolation tandem accelerator has been created and entered into operation. It was evaluated the components of a X-ray field causing dark current and breakdowns in accelerating gaps. The estimated account of equivalent dose power on different distances from the accelerator in the protected hall and behind its is made.

The experimental measurements are carried out and the study results of the dose power are submitted, depending on change of a dark current in tandem accelerating gaps at a complete working voltage 1 MV without a beam. The spectrum of X-ray radiation is measured. It is experimentally revealed and the occurrence of powerful X-ray radiation is investigated at substantial growth of the aperture of the accelerating channel. Modifications of the facility for prevention of occurrence of powerful X-ray radiation are offered and realized. The carried out research allows to set necessary parameters for designing medical installation on the basis of an vacuum isolation tandem accelerator with the purpose of realization neutron capture therapy of malignant tumours.

Key words: neutron capture therapy, proton accelerator, X-ray field, dark current, electrical breakdowns

E-mail: I.N.Sorokin@inp.nsk.su