

ТЕМНОВЫЕ ТОКИ УСКОРИТЕЛЯ-ТАНДЕМА С ВАКУУМНОЙ ИЗОЛЯЦИЕЙ

© 2013 г. В. И. Алейник, А. А. Иванов, А. С. Кузнецов,
И. Н. Сорокин, С. Ю. Таскаев

Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН
Россия, 630090, Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 11
Поступила в редакцию 06.08.2012 г.

В работе изучены темновые токи, протекающие в высоковольтных зазорах электростатического ускорителя-тандема с вакуумной изоляцией, и эффекты, связанные с их протеканием. Этот ускоритель, отличающийся быстрым темпом ускорения заряженных частиц и большой площадью поверхностей ускоряющих электродов, предназначен для получения протонного пучка с энергией 2 МэВ и постоянным током до 10 мА.

DOI: 10.7868/S0032816213040150

Для получения протонного пучка с энергией 2 МэВ и постоянным током до 10 мА был разработан и введен в эксплуатацию новый тип ускорителя — электростатический ускоритель-тандем с вакуумной изоляцией [1, 2]. В работе [3] были рассмотрены вопросы оптимизации высоковольтной тренировки ускорителя при полных или частичных пробоях. В данной работе проведен анализ результатов высоковольтных испытаний ускорителя, позволивший идентифицировать темновые токи, протекающие в высоковольтных зазорах.

Конструкция ускорителя-тандема с вакуумной изоляцией показана на рис. 1. Инжектируемые отрицательные ионы водорода ускоряются до 1 МэВ подаваемым на высоковольтный электрод потенциалом, превращаются в протоны в газовой обдирочной мишени, и затем протоны в том же поле ускоряются до 2 МэВ. Откачка газа обдирочной мишени осуществляется криогенным и турбомолекулярными (TMH_1 – TMH_3) насосами через систему жалюзи, расположенных в верхней части высоковольтных электродов-экранов. Потенциал на высоковольтный и пять промежуточных электродов подается от высоковольтного источника напряжения через проходной изолятор, в котором установлен омический делитель.

Ускоритель характеризуется высокой напряженностью электрического поля в межэлектродном промежутке (около 25 кВ/см) и большой общей площадью электродов (десятки квадратных метров). Вакуум во время выдержки прибора под напряжением в режиме работы без пучка изменялся в пределах 10^{-3} – 10^{-5} Па.

В такой системе согласно [4–6] в межэлектродных промежутках неизбежно должны протекать темновые токи различной природы. Ввиду

использования активного делителя напряжения на изоляторе для задания потенциала по электродам-экранам и малой (сотни микроампер) величины тока по этому делителю темновые токи в ускоряющих зазорах способны значительно повлиять на распределение потенциала вдоль ускорительного канала, а следовательно, и на транспортировку, фокусировку и ускорение пучка. Таким образом, возникает необходимость в изучении темновых токов в ускоряющих зазорах.

ДИАГНОСТИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА

Потенциал высоковольтного электрода измеряется с помощью двух омических делителей напряжения высоковольтного источника питания и проходного изолятора. Сигналы с опорных сопротивлений этих делителей называются далее соответственно “напряжением делителя источника” и “напряжением делителя изолятора”. При отсутствии токов в межэлектродных пространствах эти напряжения идентичны.

Поскольку потенциалы промежуточных электродов задаются делителем в проходном изоляторе, то при наличии темновых токов напряжение делителя изолятора может отличаться от напряжения ускорителя. Меньшее напряжение делителя изолятора указывает на преимущественный темновой ток в зазоре между вакуумным баком и первым ускоряющим электродом, большее — на преимущественный темновой ток в пространстве между ускоряющими электродами.

Темновой ток в зазоре между вакуумным баком и первым ускоряющим электродом определяется по разности тока высоковольтного источника питания и тока делителя проходного изолятора. Темновой ток в других ускоряющих зазорах

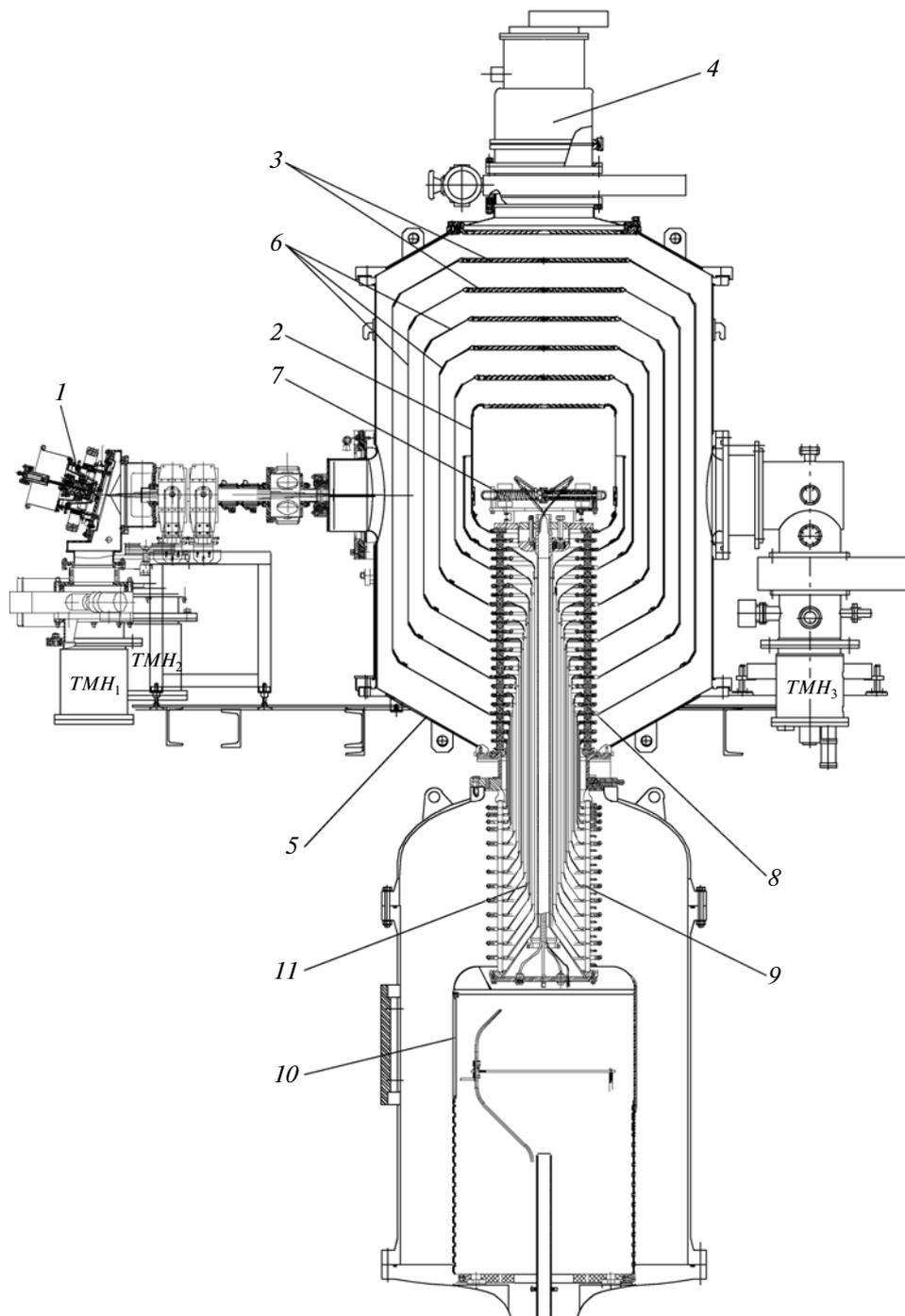


Рис. 1. Ускоритель-тандем с вакуумной изоляцией. 1 – источник отрицательных ионов водорода; 2 – высоковольтный электрод; 3 – жалюзи электродов-экранов; 4 – криогенный насос; 5 – вакуумный бак ускорителя; 6 – промежуточные электроды – экраны ускорителя; 7 – газовая перезарядная мишень; 8 – вакуумная часть высоковольтного изолятора и 9 – его газовая часть; 10 – высоковольтный источник напряжения; 11 – внутренние коаксиальные цилиндры, соединяющие электроды одинакового потенциала газовой и вакуумной частей изолятора.

может быть вычислен в предположении его равенства по отличию напряжения ускорителя от напряжения делителя изолятора.

Вакуум измеряется компактной вакуумной лампой Pfeiffer Vacuum типа PKR 251, имеющей

линейную чувствительность по воздуху в широком диапазоне давлений. Она установлена сразу на выходе из ускорителя в колене откачки турбомолекулярного насоса TМН₃ (рис. 1). Измерение уровня ионизирующего излучения осуществляет-

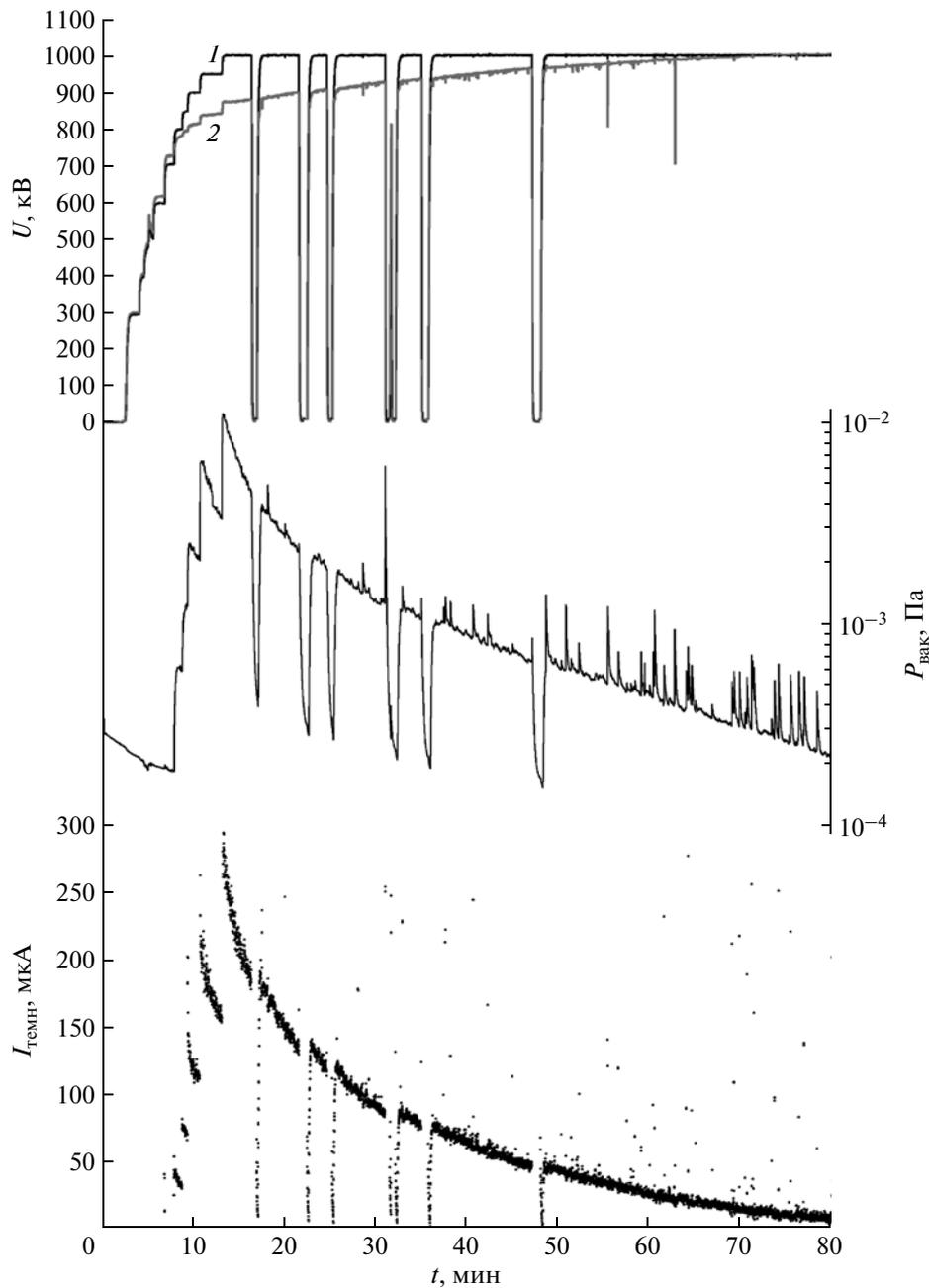


Рис. 2. Тренировочные кривые.

ся автоматизированной системой радиационного мониторинга, подробно описанной в [7].

РЕГИСТРАЦИЯ ТЕМНОВОГО ТОКА

При тренировке ускорителя плавно поднимают напряжение и выдерживают прибор в течение нескольких часов при рабочем напряжении. При подъеме напряжения был обнаружен устойчивый эффект (рис. 2): отставание показаний напряжения делителя изолятора ($U_{\text{д.изол}}$ — кривая 2) от по-

казаний напряжения делителя источника ($U_{\text{д.ист}}$ — кривая 1). Его можно объяснить появлением темновых токов в ускоряющих зазорах, связанных с возникновением микрозарядов, сопровождающихся десорбцией адсорбированных газов с поверхности электродов при подъеме напряжения.

Согласно [4] микрозаряды возникают в результате взаимной вторичной эмиссии положительных и отрицательных ионов и сопровождаются интенсивным газовыделением, поэтому при большой площади электродов наблюдается повы-

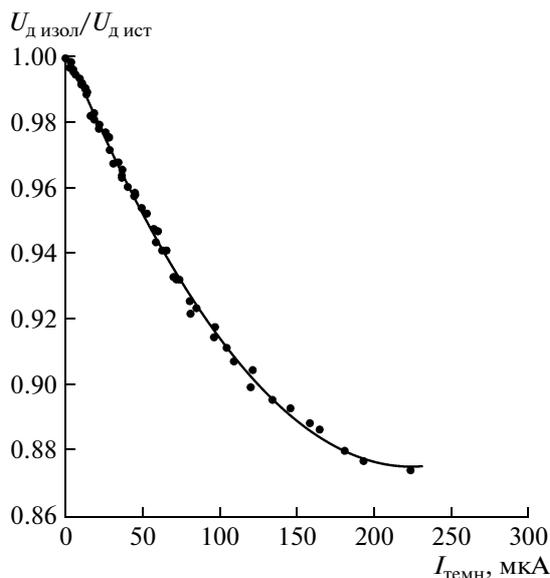


Рис. 3. Зависимость отношения $U_{д\text{ изоля}}/U_{д\text{ ист}}$ от величины темнового тока в первом зазоре.

шение давления в вакуумном объеме. Прекращение подъема напряжения приводит к постепенному уменьшению десорбции, которая вновь может возрасти при дальнейшем увеличении напряжения.

Приведенные на рис. 2 временные зависимости остаточного давления газа $P_{\text{вак}}$ в вакуумном объеме и темнового тока $I_{\text{темн}}$ в ускоряющем зазоре между стенкой вакуумного бака и ближайшим к ней ускоряющим электродом подтверждают данное выше объяснение. После срабатывания защиты по току высоковольтного выпрямителя напряжение с ускорителя снимается, и видно, что в эти моменты времени улучшается остаточное давление.

Характерные положительные броски остаточного давления связаны с пробоями, в большей степени частичными, не приводящими к срабатыванию защиты по току. На рис. 2 видно, что при выдержке под напряжением вакуум улучшается, ток в ускоряющем зазоре уменьшается, и разница в показаниях делителей за время порядка часа практически исчезает.

На рис. 3 показано отношение $U_{д\text{ изоля}}/U_{д\text{ ист}}$ в зависимости от темнового тока, пересчитанное из рис. 2 для напряжения источника 1 МВ. Значения отношения напряжений усреднены по пяти экспериментам с разбросом значений не более $\pm 5\%$ относительно среднего. Значения темнового тока в пределах каждой экспериментальной точки $U_{д\text{ изоля}}/U_{д\text{ ист}}$ также отличались мало. Видна однозначная зависимость отношения этих напряжений от величины темнового тока, что подчеркивает их связь между собой.

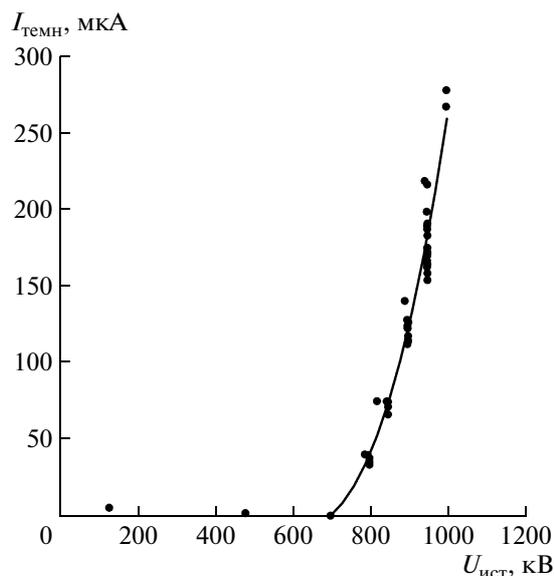


Рис. 4. Экспериментальная зависимость темновых токов в ускоряющих зазорах ускорителя от напряжения источника.

Нелинейной зависимости $U_{д\text{ изоля}}/U_{д\text{ ист}}$ от $U_{д\text{ ист}}$ в эксперименте соответствовала нелинейная зависимость тока нагрузки ($I_{\text{нагр}}$) источника напряжения от $U_{д\text{ ист}}$. Зависимость разности между током нагрузки источника напряжения и суммой токов всех резистивных делителей ($I_{\text{темн}} = I_{\text{нагр}} - \sum I_{\text{дел}}$) ускорителя от напряжения источника показана на рис. 4 сплошной линией с экспериментальными точками. Появление дополнительного тока в вакуумном объеме ускорителя по напряжению совпадает с началом ухудшения вакуума.

Для оценки этих токов воспользуемся схемой делителей напряжения высоковольтного источника и проходного изолятора с дополнительными переменными сопротивлениями, моделирующими появление проводимости вакуумной изоляции ускоряющих зазоров (рис. 5).

Делитель мощного источника напряжения расположен в баке, заполненном элегазом, внутри вторичного контура выпрямителя в равномерном поле и одним концом соединен с высоковольтным электродом источника, а другим концом — с “земляным” электродом. Промежуточные точки соединения делителя с элементами установки отсутствуют.

Делитель изолятора расположен в элегазе. Элементы делителя закреплены на электродах как вакуумной, так и газовой части проходного изолятора. Основная функция делителя — задание потенциалов по электродам ускоряющих зазоров. Все сопротивления делителя, обозначенные на схеме, состоят из набора последовательно и параллельно соединенных резисторов.

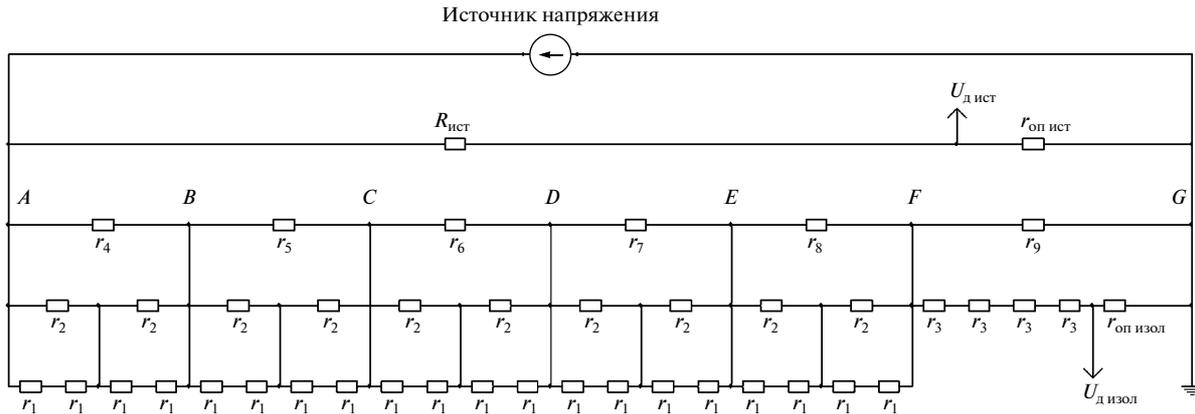


Рис. 5. Схема активных делителей напряжения высоковольтного источника и проходного изолятора: r_1 – сопротивления делителя вакуумной части изолятора, r_2 и r_3 – сопротивления делителя газовой части изолятора, $r_{оп\ изоэл}$ – опорное сопротивление делителя изолятора, $R_{ист}$ и $r_{оп\ ист}$ – плечи делителя высоковольтного источника, $U_{д\ ист}$ и $U_{д\ изоэл}$ – сигналы с делителей изолятора и высоковольтного источника, умноженные на соответствующие коэффициенты деления.

Сопротивления делителя изолятора соединены с электродами вакуумных ускоряющих зазоров в точках $A-G$, причем точке A соответствует высоковольтный электрод, а G – “земляной”. Нумерация электродов и ускоряющих зазоров начинается от “земляного” электрода. При отсутствии неконтролируемых токов в высоковольтных зазорах показания делителей источника и изолятора должны совпадать.

Сопротивления r_4-r_9 моделируют появление проводимости и соответственно темновых токов между ускоряющими электродами. В случае отсутствия темновых токов $r_4-r_8 \rightarrow \infty$. Как видно из схемы, величину тока, протекающего через сопротивление r_9 , можно определить как разность между током нагрузки источника напряжения и суммой токов всех резистивных делителей. Такой способ определения тока по первому ускоряющему зазору и использовался в эксперименте.

При появлении тока только в первом зазоре или превышении этого тока над остальными уменьшается $U_{д\ изоэл}/U_{д\ ист}$ и одновременно возрастает напряжение на каждом из остальных пяти ускоряющих зазоров. В такой же пропорции увеличивается и ток делителя изолятора, что необходимо учитывать при выборе мощности применяемых резисторов. Если же токи в каждом из пяти зазоров превышают ток в первом ускоряющем зазоре, показания делителя изолятора будут превышать показания делителя источника.

В случае отсутствия в системе иных темновых токов, кроме фиксируемого в первом зазоре, напряжение делителя изолятора вычисляется согласно схеме по формуле

$$U_{д\ изоэл} = U_{ист} - \left(\frac{20r_1r_2}{2r_1 + r_2} \right) I_{r_9}.$$

Экспериментальные значения напряжения $U_{д\ изоэл}$ отличаются от вычисленных по указанной формуле (рис. 6), что говорит о невозможности объяснения наблюдаемого в эксперименте расхождения показаний делителей изолятора и высоковольтного источника наличием темнового тока только в первом ускоряющем зазоре.

Для расчета темновых токов учтем следующее обстоятельство: размеры жалюзи, сквозь щели которых происходит основная откачка газа из внутреннего объема ускорителя, геометрия электродов всех ускоряющих зазоров, кроме первого, и рабочая напряженность электрического поля во всех зазорах отличаются мало. Тогда и величины темновых токов разряда в каждом из пяти зазоров тоже не должны существенно отличаться.

Геометрия первого зазора отличается от остальных наличием в “земляном” электроде отверстий для ввода-вывода ионного пучка и отверстия для насоса криогенной откачки. Диаметры всех отверстий в “земляном” электроде существенно превышают величину первого зазора, и электрическое поле в области отверстий превышает поля “гладких” коаксиальных электродов остальных высоковольтных зазоров, повышая вероятность появления дополнительных токов.

Для оценки темновых токов в пяти ускоряющих зазорах использовалась упрощенная схема делителей напряжения высоковольтного источника и проходного изолятора (рис. 7), эквивалентная схеме, представленной на рис. 5. Расчет проводился в предположении равенства токов в этих пяти зазорах.

Суммарный ток через первый ускоряющий зазор и соответствующий ему участок делителя равен $I_{сум\ изоэл} = I_{темн1} + I_{д\ изоэл}$, напряжение на первом зазоре $U_1 = I_{темн} r_{ут1} = I_{д\ изоэл} (r_1 + r_{оп\ изоэл})$. Следова-

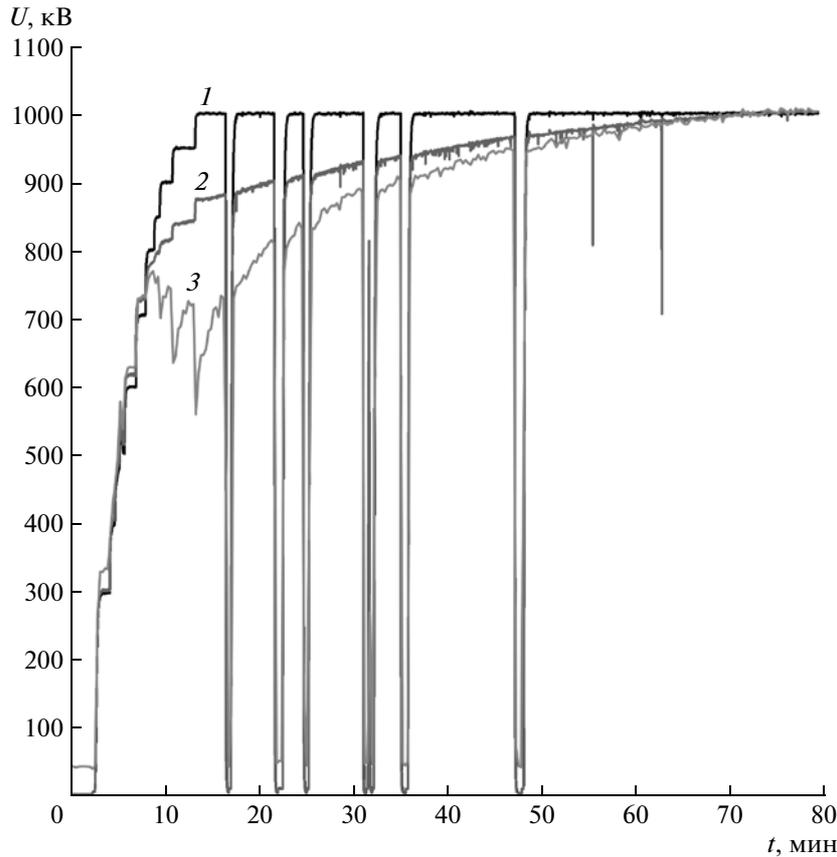


Рис. 6. Зависимость напряжения на делителях источника (1), изолятора (2) и расчетная кривая напряжения изолятора при наличии темновых токов только в первом зазоре (3).

тельно, общее напряжение на пяти зазорах и соответствующих им участков делителя изолятора равно $U_{2-6} = U_{ист} - U_1$, темновой ток пяти вакуумных зазоров можно теперь записать как $I_{темн2-6} = I_{сум\ изоля} - \frac{U_{2-6}}{r_{2-6}}$.

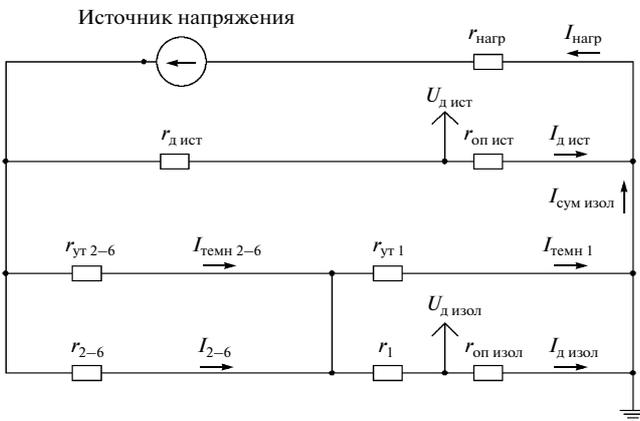


Рис. 7. Упрощенная схема делителей напряжения высоковольтного источника и проходного изолятора.

На рис. 8 представлены результаты вычислений для одного из проведенных экспериментов. Видно, что значение среднего тока по пяти зазорам $I_{темн2-6}$ в начале эксперимента ниже, чем темновой ток, фиксируемый в первом зазоре. Кроме того, $I_{темн2-6}$ в ходе эксперимента спадает до минимального значения быстрее, чем ток в первом зазоре. Это можно объяснить отличающимся от остальных качеством обработки поверхности “земляного” электрода (поверхность бака – шлифованная, поверхность электродов – зеркально полированная), а также особенностями его геометрии, такими как наличие отверстия для криогенного насоса и отверстий большего, чем в остальных электродах, радиуса для ввода-вывода пучка.

Появление токовой нагрузки в зазорах приводит к перераспределению напряжения по зазорам и увеличивает вероятность пробоя ускорителя. На этапе вывода ускорителя на полное напряжение был проведен эксперимент по определению среднего времени между пробоями при разных значениях остаточного давления и полном напряжении 1 МВ. Каждый цикл измерений включал наблюдение пяти пробоев в одном диапазоне остаточного давления и пяти – в другом. Эти цик-

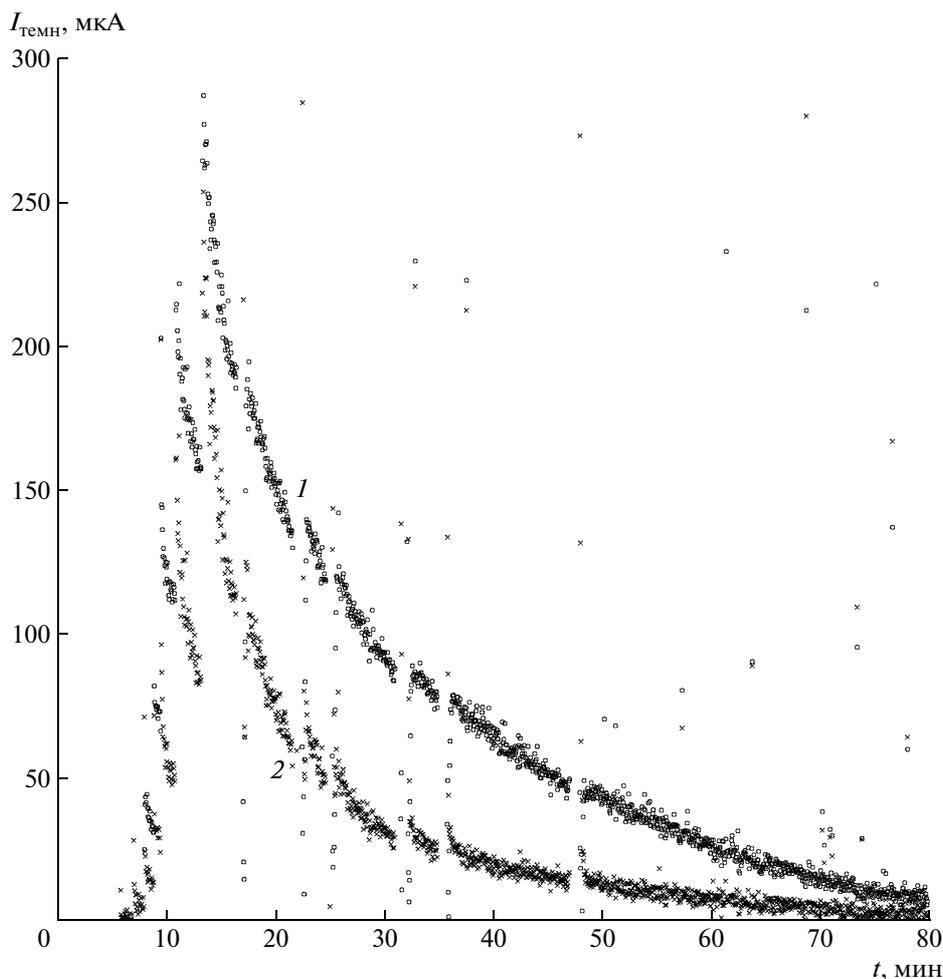


Рис. 8. Изменение темнового тока первого зазора (I) в ходе эксперимента и расчетная кривая тока остальных пяти зазоров (2).

лы были повторены 3 раза. С увеличением остаточного давления уменьшается время между пробоями. При этом соответствующие вакуумные зазоры и параллельно соединенные с ними элементы (изоляционные кольца, газовые зазоры, см. рис. 1) из-за тока газового разряда в первом зазоре перегружались по напряжению не более чем на 4%.

РЕГИСТРАЦИЯ МИКРОПРОБОЕВ

На рис. 9 приведены осциллограммы сигналов в процессе плавного подъема напряжения. Видно, что при напряжении более 400 кВ возникают микропробой в промежутках между ускоряющими электродами. Поскольку при микропробоях напряжение делителя изолятора подскакивает, то это указывает на преимущественный ток в зазорах между ускоряющими электродами. Вместе с тем, и в первом ускоряющем зазоре всегда при каждом микропробое протекает темновой ток (рис. 9б).

Каждый из микропробоев сопровождается десорбцией газа, что наглядно видно на кривых поведения давления (рис. 9в) и всплесков радиации (рис. 9г). Можно обратить внимание также на то, что при напряжении более 700 кВ темновой ток из импульсного режима переходит в стационарный. Рисунок демонстрирует еще один интересный эффект: с момента времени $t = 610$ с произошло резкое уменьшение мощности рентгеновского излучения при ухудшении вакуумных условий.

ТЕМНОВОЙ ТОК БОЛЬШОЙ ИНТЕНСИВНОСТИ

В серии экспериментов по увеличению тока пучка в тракте ускорения пучка отрицательных ионов водорода были увеличены диаметры отверстий электродов с 20 до 58 мм, за исключением высоковольтного электрода, в котором диаметр отверстия остался прежним — 20 мм. Такое изменение привело к регистрации достаточно частого возникновения темнового тока большой интен-

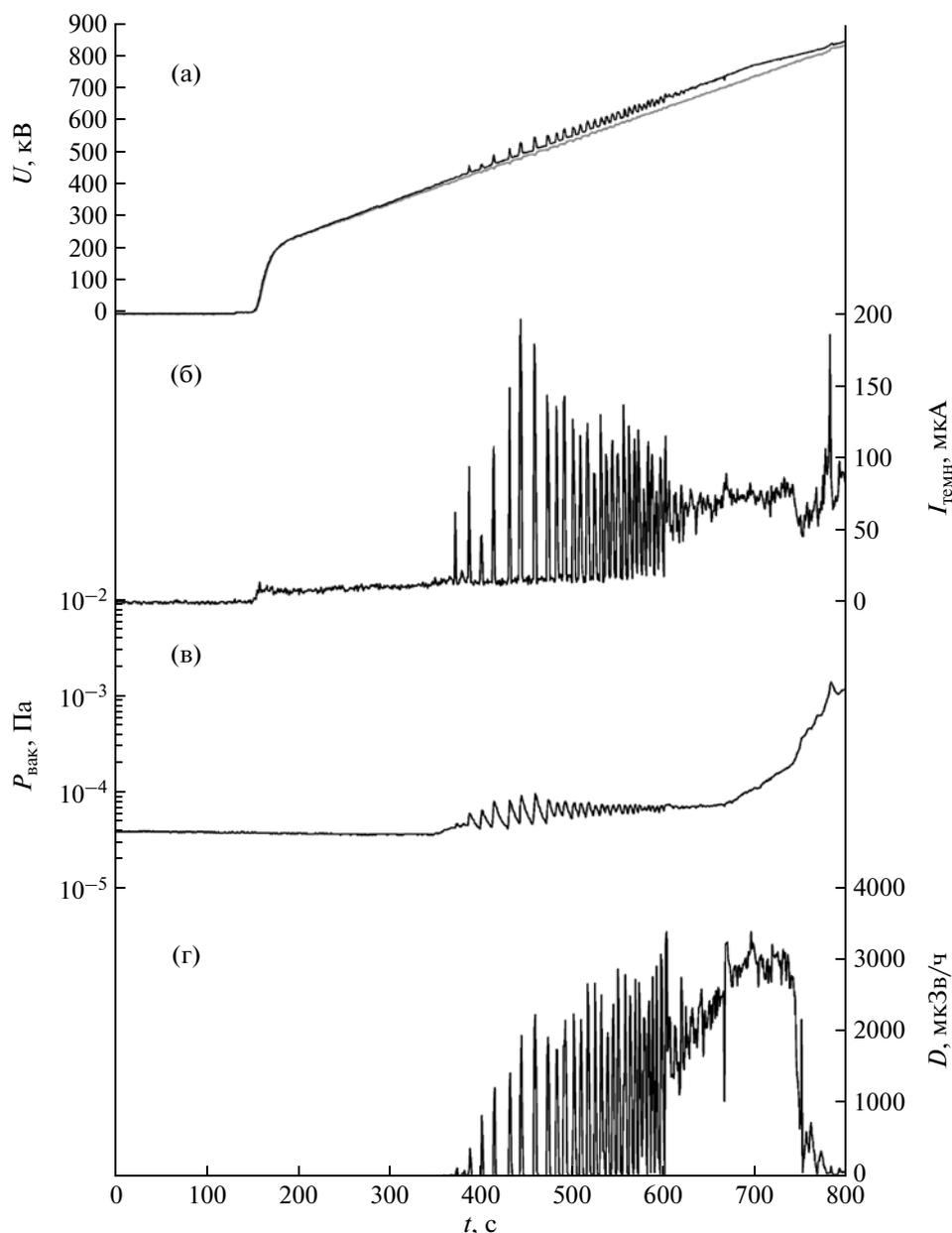


Рис. 9. Временные зависимости: **а** — напряжения ускорителя (1) и напряжения делителя изолятора (2); **б** — темнового тока; **в** — вакуумного давления; **г** — мощности рентгеновского излучения.

сивности — обычно уже после тренировки ускорителя, когда темновой ток уменьшался до характерных значений десятка микроампер, он вдруг резко возростал до 3–4 мА [8].

Так в одном эксперименте в течение 100 с в первом ускоряющем зазоре протекал темновой ток 3.2 ± 0.5 мА. Поскольку напряжение делителя изолятора было на 18% больше напряжения ускорителя, то темновой ток между электродами был больше темнового тока с земли, как показывают расчеты, на 100 мкА. Протекание такого тока по сравнению со стандартным режимом тренировки приводило к двукратному увеличению газоотде-

ления и почти 100-кратному увеличению мощности радиации.

Последнее обстоятельство указывало на большую энергию электронов, что возможно при протекании тока в зазоре не между соседними электродами, а, например, между корпусом вакуумного бака или первым электродом и высоковольтным. Это предположение было подтверждено измерением спектра рентгеновского излучения сцинтилляционным ВГО-спектрометром [9] — максимум сместился с 120 до 400 кэВ. Также в работе [9] показано, что значительное увеличение мощности рентгеновского излучения связано не только с увеличением

энергетического выхода тормозного излучения из-за увеличения энергии электронов, но и со значительно меньшим ослаблением рентгеновского излучения стальными 6-мм стенками вакуумного бака.

После вскрытия вакуумной камеры ускорителя было обнаружено, что часть диафрагмы высоковольтного электрода расплавилась. Проведенный численный расчет электростатических полей показал, что при увеличении апертуры канала напряженность электрического поля острого края отверстия катодной части рамки крепления диафрагмы возрастает с 42 до 51 кВ/см, что может приводить к усиленной эмиссии электронов, выносимых непосредственно в ускорительный канал. Для предотвращения возникновения данного тока была уменьшена апертура канала и закруглены острые края отверстий рамки крепления диафрагм.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе проведен анализ результатов испытания высоковольтных элементов ускорителя, позволивший идентифицировать темновые токи, протекающие в высоковольтных зазорах. Описан способ оценки величины темнового тока и даны объяснения ряду наблюдаемых явлений, связанных с его протеканием.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (государственные контракты № 16.518.11.7038 и № 14.518.11.7039).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Bayanov B., Belov V., Bender E. et al.* // Nucl. Instrum. and Methods in Phys. Res. 1998. V. A413. № 2–3. P. 397.
2. *Кузнецов А.С., Малышкин Г.Н., Макаров А.Н. и др.* // Письма в ЖТФ. 2009. Т. 35. Вып. 8. С. 1.
3. *Сорокин И.Н., Широков В.В.* // ПТЭ. 2007. № 6. С. 5.
4. *Сливков И.Н., Михайлов В.И., Сидоров В.И. и др.* Электрический пробой и разряд в вакууме. М.: Атомиздат, 1966.
5. *Сливков И.Н.* Электроизоляция и разряд в вакууме. М.: Атомиздат, 1972.
6. *Эспе В.* Технология электровакуумных материалов. М.: Госэнергоиздат, 1962.
7. *Баркова В.Г., Корябкин О.М., Репков А.В., Чудаев В.Я.* // Труды девятого Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Дубна: ОИЯИ, 1985. Т. 2. С. 318.
8. *Алейник В.И., Кузнецов А.С., Сорокин И.Н. и др.* Препринт ИЯФ 2012-2. Новосибирск, 2012.
9. *Баширцев А.Г., Иванов А.А., Касатов Д.А. и др.* // Медицинская физика. 2012. № 2. С. 5.