

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ ИМ. Г.И. БУДКЕРА
СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

На правах рукописи

СОРОКИН ИГОРЬ НИКОЛАЕВИЧ

**ВЫСОКОВОЛЬТНАЯ ПРОЧНОСТЬ
УСКОРИТЕЛЯ-ТАНДЕМА С ВАКУУМНОЙ ИЗОЛЯЦИЕЙ**

01.04.01 – Приборы и методы экспериментальной физики

Диссертация на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Научный руководитель

Иванов Александр Александрович

доктор физико-математических наук

Новосибирск-2014

Содержание

Введение	4
Глава 1. Ускоритель-тандем с вакуумной изоляцией.....	7
§ 1.1 Обзор экспериментальных данных о высоковольтной прочности вакуумных зазоров	7
§ 1.2 Описание ускорителя	14
Глава 2. Выбор количества ускоряющих вакуумных зазоров	28
Глава 3. Испытания высоковольтного вакуумного зазора	38
§ 3.1. Изучение влияния запасённой энергии на электрическую прочность высоковольтного вакуумного зазора	39
§ 3.2. Изучение влияния перезарядного газа на электрическую прочность высоковольтного вакуумного зазора.....	44
Глава 4. Подъем напряжения на высоковольтных вакуумных зазорах ускорителя.....	54
Глава 5. Темновые токи в вакуумных зазорах ускорителя-тандема.....	62
§ 5.1. Анализ полученных экспериментальных данных	63
§ 5.2. Оценка величины темновых токов в ускоряющих зазорах.....	67
§ 5.3. Регистрация автоэмиссионного тока большой интенсивности после увеличения апертуры ускорительного канала.....	72
Глава 6. Расчетная и экспериментальная оценка уровня рентгеновского излучения	82
§ 6.1 Расчетная оценка выхода тормозного излучения	82
6.1.1 Радиационный вклад темнового тока.....	83

6.1.2 Радиационный вклад пробоев по вакуумной поверхности проходного изолятора	85
§ 6.2. Экспериментально измеренные значения мощности дозы рентгеновского излучения вблизи ускорителя	86
§ 6.3. Энергетический спектр рентгеновского излучения.....	95
Заключение.....	97
Литература.....	100

Введение

Нейтронная терапия в последние годы привлекает все большее внимание благодаря высокой биологической эффективности нейтронов в лечении злокачественных новообразований. Особенно перспективной представляется бор-нейтронозахватная терапия (БНЗТ).

По данным Всемирной организации здравоохранения онкологическая заболеваемость неуклонно растет – её распространенность удваивается каждые 20 лет. Разработка лекарств и методов лечения злокачественных опухолей является важной и до сих пор не до конца решенной научной задачей. Перспективным подходом в лечении ряда опухолей считается БНЗТ, которая имеет чрезвычайно высокую привлекательность за счет избирательного воздействия непосредственно на клетки опухоли при селективном накоплении в них бора. Клинические испытания методики, проведенные на ядерных реакторах, показали, что БНЗТ позволяет лечить глиобластомы мозга, метастазы меланомы и другие опухоли. Однако реакторы в силу разных причин не подходят для широкого внедрения методики в практику. Требуется компактные, недорогие и безопасные источники нейтронов, которые можно будет разместить в онкологических клиниках. Такие источники могут быть сделаны на основе ускорителя заряженных частиц, однако требования, предъявляемые к ним со стороны БНЗТ, достаточно сложные для реализации. За последние 20 лет было предложено множество проектов источников нейтронов для БНЗТ на основе ускорителя, но, ни один из них ещё не завершился созданием компактной, недорогой и безопасной установки для клиники.

В электростатических ускорителях с ускорительными трубками получение ионных пучков с током в десятки миллиампер вызывает большие

трудности. При попадании ускоряемого или вторичного заряда на внутренние поверхности изоляторов трубок и поверхности электродов электрическая прочность трубок падает.

В 1998 году для получения сильноточных протонных пучков был предложен новый тип ускорителя – ускоритель-тандем с вакуумной изоляцией [1]. Выбор нового типа ускорителя обусловлен стремлением создать компактный ускоритель, который мог бы располагаться в медицинской клинике.

Электростатический ускоритель тандемного типа имеет ряд преимуществ по сравнению с ускорителем прямого действия – он позволяет работать с источником ионов, находящимся под заземленным потенциалом, и потенциал высоковольтного источника соответствует только половинной энергии ускоренных протонов.

Предложенный ускоритель отличается от других большой площадью электродов и высоким темпом ускорения заряженных частиц. Данных о высоковольтной прочности подобных многоэлектродных систем с площадью электродов в десятки квадратных метров, расстоянием между электродами несколько сантиметров и запасенной энергии в десятки джоулей, нет. Экспериментальные данные о пробивном напряжении вакуумных зазоров имеются, как правило, для простейших двухэлектродных систем с электродами значительно меньшей площади.

Получение экспериментальных данных о высоковольтной прочности вакуумных сантиметровых зазоров с электродами площадью в десятки квадратных метров и с запасенной энергией в десятки джоулей **актуально** для проектирования новаторского ускорителя-тандема с вакуумной изоляцией.

Целью диссертационной работы являлось проведение исследований для обеспечения необходимой высоковольтной прочности ускорителя-тандема с вакуумной изоляцией на напряжение 1 МВ. Для достижения поставленной

цели необходимо было изучить влияние на электрическую прочность следующих факторов:

- запасенной в ускоряющих вакуумных зазорах энергии;
- перезарядного газа, выходящего из обдирочной мишени в ускоряющие зазоры;
- темнового тока, возникающего в зазорах при подъёме напряжения и, как следствие, рентгеновского излучения.

Результаты диссертации изложены в работах [31-55], из них 8 опубликованы в рекомендованных ВАК российских рецензируемых научных журналах, 14 – в трудах российских и международных научных конференций.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Получение данных о высоковольтной прочности вакуумного зазора с площадью цилиндрического высоковольтного электрода 0.71 м^2 при увеличении запасенной энергии в зазоре до 50 Дж.
2. Обеспечение высоковольтной прочности ускорителя-тандема с вакуумной изоляцией на напряжении 1 МВ оптимизацией ускоряющих вакуумных зазоров и тренировкой пробоями.
3. Уменьшение темнового тока и рентгеновского излучения в ускорительных вакуумных зазорах при длительно выдерживаемом напряжении.
4. Предотвращение автоэмиссионного тока в ускорителе-тандеме с вакуумной изоляцией оптимизацией диафрагм в ускоряющих электродах.

Глава 1

Ускоритель-тандем с вакуумной изоляцией

В Главе 1 приводится обзор экспериментальных исследований высоковольтной прочности вакуумных зазоров и даётся описание предложенного ускорителя-тандема с вакуумной изоляцией с акцентом на элементы, существенно влияющие на его высоковольтную прочность.

§ 1.1 Обзор экспериментальных данных о высоковольтной прочности вакуумных зазоров

В науке и технике широко используются изолирующие свойства вакуума. Ускорители заряженных частиц, рентгеновские и электроннолучевые трубки, электронные микроскопы, вакуумные конденсаторы – таков далеко не полный перечень приборов, в которых применяется вакуумная изоляция, и параметры которых ограничиваются электрической прочностью вакуумного зазора. Значительное число работ посвящено изучению механизма возникновения и развития пробоя в высоком вакууме. Были сделаны многочисленные попытки объяснения явлений, наблюдаемых при пробое различных вакуумных зазоров и при различных формах электродов. Накоплен обширный экспериментальный материал в простейших двухэлектродных системах.

Зависимость пробивного или длительно выдерживаемого напряжения от величины межэлектродного зазора — одна из важнейших характеристик любой изоляции. Но для вакуумной изоляции определение такой характеристики

осложнено сильным влиянием на нее ряда плохо контролируемых факторов и сильным разбросом между результатами экспериментов различных авторов.

На рисунке 1 из работы [2] представлена зависимость пробивного напряжения от величины разрядного промежутка системы шар – диск небольших размеров. Как видно, при увеличении расстояния между электродами пробивное напряжение возрастает, хотя напряжённость поля около катода, соответствующая пробое, падает. Таким образом, пробивные напряжения при больших расстояниях между электродами определяются не только напряжённостью поля, но и зависят от полного напряжения на вакуумном зазоре.

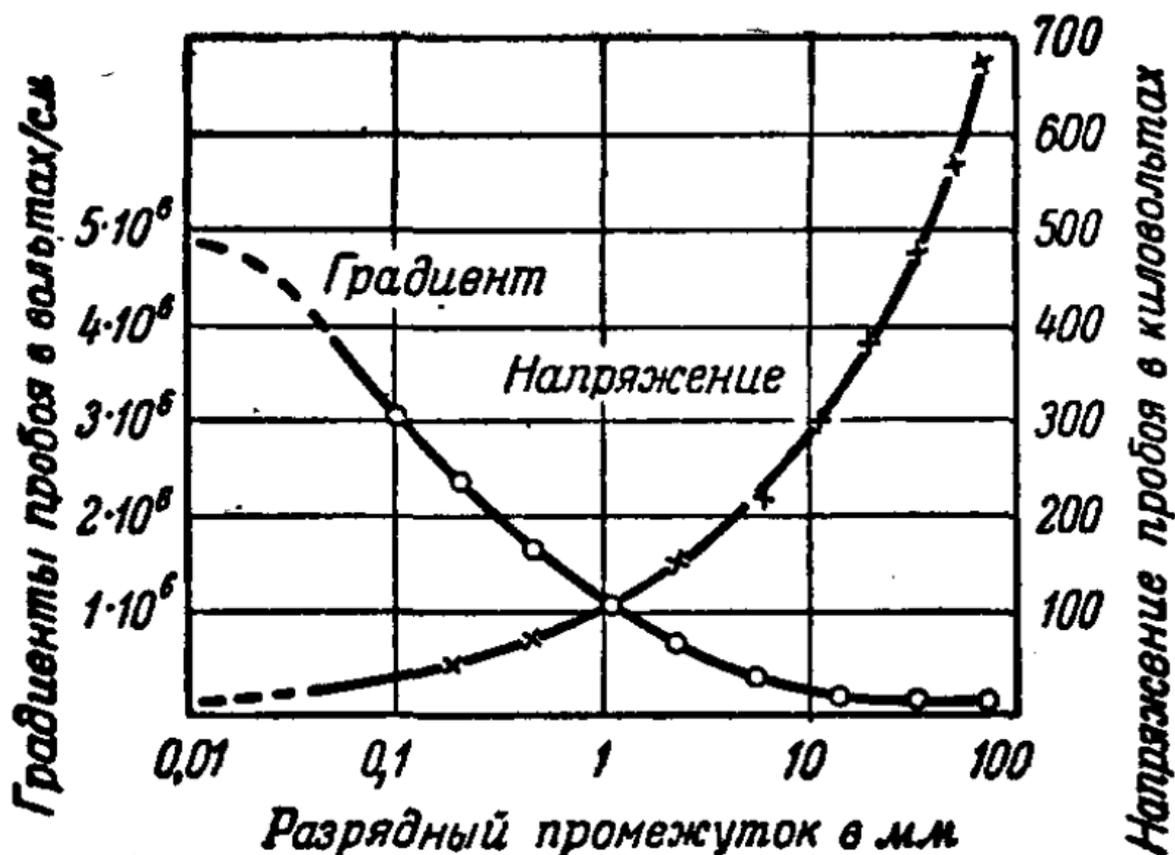


Рисунок 1. Пробивные напряжения (крестики) и напряжённости поля (кружки) при пробое в высоком вакууме между стальным шаром диаметром 25.4 мм (анод) и плоским стальным диском диаметром 50.8 мм.

В таблице 1 приведены данные о зависимости пробивного напряжения от давления в камере и межэлектродного зазора s для плоских электродов из нержавеющей стали диаметром 200 мм [3]. Видно, что существенный рост электропрочности благодаря повышению давления наблюдается уже при $s = 20$ мм и что он увеличивается по мере перехода к большим зазорам.

Таблица 1.

Зависимость пробивного напряжения от давления в камере и межэлектродного зазора для электродов из нержавеющей стали

s , мм	$U_{пр}$, кВ		$U_{пр}$, %	s , мм	$U_{пр}$, кВ		$U_{пр}$, %
	$p=0.1$ мПа	$p=10$ мПа			$p=0.1$ мПа	$p=10$ мПа	
10	167	170	3	60	470	600	28
20	290	350	21	100	580	820	41
40	400	500	25	120	750	1100	46

В таблице 2 приведены данные длительно выдерживаемого напряжения и предпробойного тока в зависимости от рода и давления остаточного газа при зазоре 50 мм между плоскими электродами площадью 0.75 м^2 из нержавеющей стали [4].

Таблица 2.

Зависимость длительно выдерживаемого напряжения и предпробойного тока от рода и давления остаточного газа при зазоре 50 мм между плоскими электродами из нержавеющей стали площадью 0.75 м^2

Газ	p , Па	$U_{дл.}$, кВ	I , мкА
Аргон	0.25	330	30
Гелий	0.25	320	50

Также в работе [4] приведены значения длительно выдерживаемого напряжения, создаваемого маломощным электростатическим генератором, для плоских электродов из различных материалов. Они представлены в таблице 3. Видно, что для большинства материалов электродов, за исключением латуни и серебра, длительно выдерживаемое напряжение отличается незначительно.

Таблица 3.

Зависимость длительно выдерживаемого напряжения от материала плоских электродов площадью 100 см^2 , кВ

Материал электродов	S , мм		Материал электродов	S , мм	
	35	50		35	50
Хром	350	450	Медь	332	-
Алюминий	-	430	Никель	328	-
Дюраль	328	420	Латунь	179	-
Нержавеющая сталь	319	400	Серебро	-	280

На рисунке 2 представлены экспериментальные данные, взятые из работ, где получены рекордно высокие или близкие к ним значения пробивного и длительно выдерживаемого напряжения в более широком диапазоне значений межэлектродных зазоров. Условия экспериментов, при которых получены результаты, приведенные на рисунке 2, даны в таблице 4.

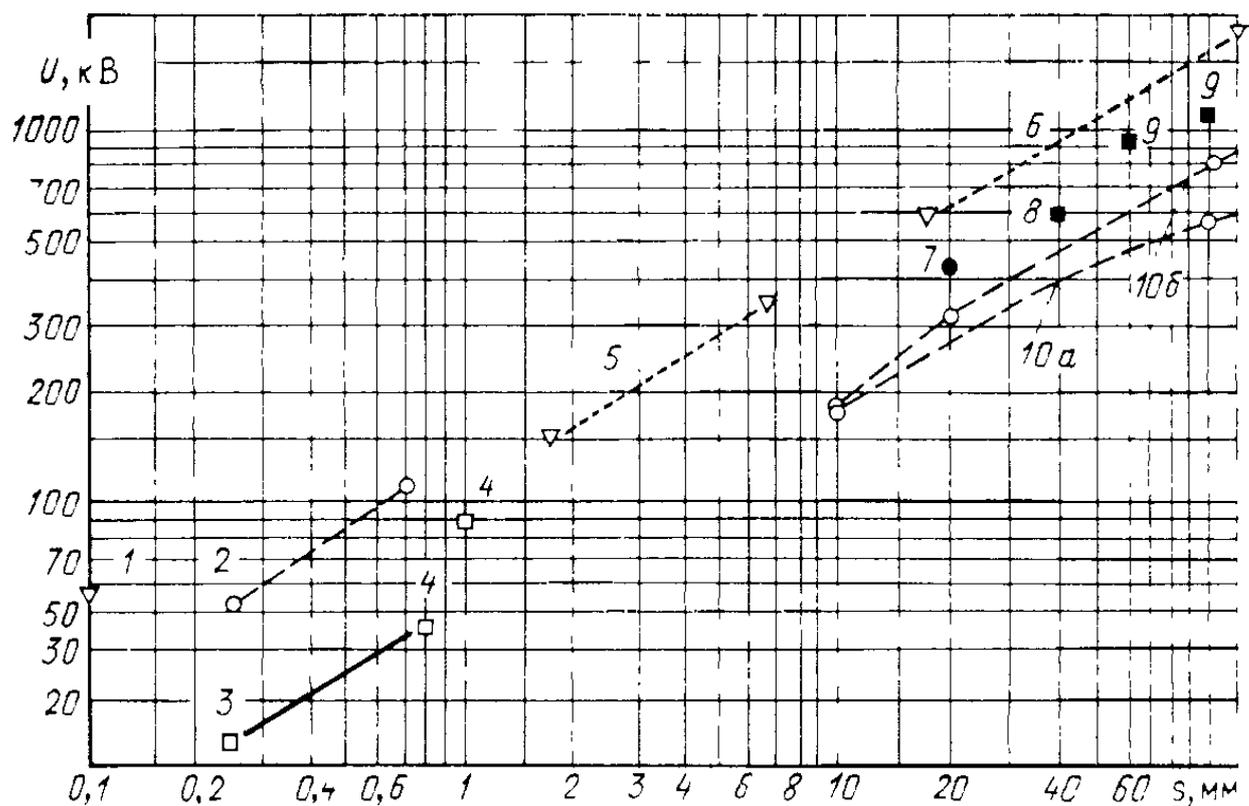


Рисунок 2. Зависимость пробивного и длительно выдерживаемого напряжения от межэлектродного зазора между электродами малой кривизны: — □, ■ — длительно выдерживаемое напряжение; --- , ○ , ● — пробой при постоянном напряжении; - - - , ▽ — пробой при импульсах микросекундной длительности; ▽, □, ○ — чистометаллические электроды; ■, ● — катод покрыт изоляционной или полупроводящей пленкой.

Условия экспериментов, при которых получены данные рисунка 2

№	Материал, форма и размер электродов	Способ обработки электродов	Давление, способ откачки	Литература
1	Молибденовые диски, Ø 17 мм	Интенсивный тлеющий разряд в аргоне, несколько тренировочных пробоев	10^{-5} Па, безмасляный	[5]
2	Вольфрамовые диски, Ø 32 мм	Тренировка током	10^{-2} Па, при напуске инертного газа	[6]
3	Стальные диски, Ø 32 мм	Тренировка пробоями	10^{-4} Па, диффузионно-масляный	[7]
4	Молибденовые диски, Ø 17 мм	Интенсивный тлеющий разряд, длительно выдерживаемое постоянное напряжение с постепенным подъемом	10^{-6} Па, безмасляный	[8]
5	Анод – сфера, Ø 30 мм; катод – сталь диск, Ø 100 мм	Тренировка пробоями	10^{-3} Па, диффузионно-масляный	[9]
6	Катод – сфера, Ø 150 мм; анод – дюралюминий, плоскость	То же	То же	[10]
7	Катод – проводящее оксидное стекло, $2 \cdot 10^7$ Ом·см; анод – нержавеющая сталь, диски, Ø 120 мм	Тренировка током	0.1 Па, при напуске гелия	[11]
8	Материал электродов тот же, плоские электроды площадью $0,48 \text{ м}^2$ из материалов п. 7	То же	То же	[11]
9	Плоские электроды площадью $0,3 \text{ м}^2$; катод – оксидированный алюминий, анод – нержавеющая сталь	То же	0.03 Па, при напуске гелия	[12, 13]
10	Нержавеющая сталь, диски Ø 200 мм	То же	А – 10^{-4} Па, Б – 10^{-2} Па, ртутно-дифф.	[12, 3]

В таблице 5 приведены данные, характеризующие зависимость пробивного напряжения от площади рабочей поверхности плоских электродов [14].

Таблица 5.

Влияние площади электродов на пробивное напряжение, кВ

Материал катода	Зазор, мм	Давление, мПа	Площадь электродов, см ²				
			7	10	50	300	700
Оксидированный алюминий	6	0.1	215		195	185	175
	6	100	280	265	250	240	240
	10	100	450	480	415	375	360
Нержавеющая сталь	10	0.1	235		200	170	180
	10	100	290	290	250	200	185

Видно, что с увеличением площади электродов из нержавеющей стали пробивное напряжение уменьшается. С достаточной для практических применений точностью эта зависимость описывается эмпирическим соотношением $U_{пр} \sim A^{-0.1}$, где A – площадь электрода.

По измерениям, выполненным в [15] с тренированными плоскими электродами из стали и графита при зазоре между ними до 1 мм, пробивное напряжение было одинаково при площади электродов до 10÷30 мм² и практически не зависело от предварительной (перед тренирующими пробоями) обработки поверхности. При дальнейшем увеличении площади от 30 до 3000 мм² пробивное напряжение все время уменьшалось. Так например, при полированных стальных электродах и зазоре 0.8 мм пробивное напряжение было равно 77, 60, 45 и 41 кВ при площади электродов соответственно 30, 100, 1000 и 3000 мм². Это уменьшение пробивного напряжения с увеличением площади не совсем точно подчинялось вышеприведенному соотношению для $U_{пр}$: уменьшение пробивного

напряжения в диапазоне $30 \div 300 \text{ мм}^2$ происходило на $20 \div 25 \%$ быстрее. Авторы [15] считают, что при большой поверхности электродов, образующиеся пары и частицы эродированного материала оседают на электродах, что делает тренировку электродов пробоями малоэффективной.

Из приведенного выше обзора видно, что имеющиеся разрозненные данные о высоковольтной прочности вакуумных зазоров не позволяют прогнозировать высоковольтную прочность сантиметровых вакуумных зазоров для проектируемого ускорителя-тандема с площадью электродов в десятки квадратных метров при запасенной в зазорах энергии в десятки джоулей. Поэтому целью данной диссертационной работы явилось подробное изучение высоковольтной прочности таких зазоров.

§ 1.2 Описание ускорителя

В конструкции созданного электростатического ускорителя с вакуумной изоляцией, для получения протонного пучка с энергией 2 МэВ применяется традиционная тандемная схема ускорения заряженных частиц: сначала ускоряются отрицательные ионы водорода, а затем образующиеся после обдирки протоны ускоряются тем же потенциалом. В результате на выходе из ускорителя протоны имеют энергию, соответствующую удвоенному потенциалу высоковольтного электрода.

Достоинства ускорителя-тандема с вакуумной изоляцией заключаются в отсутствии ускорительных трубок: газ перезарядной мишени откачивается не через объём ускорительных трубок, а через жалюзи ускоряющих электродов-экранов. Впервые применена конструкция ускоряющей структуры, в которой вакуумная поверхность изолятора сильно удалена от тракта ускорения ионного пучка, что предотвращает неконтролируемое осаждение рассеянных заряженных частиц на вакуумную поверхность изолятора с последующим её пробоем.

Общий вид ускорителя представлен на рисунке 3.

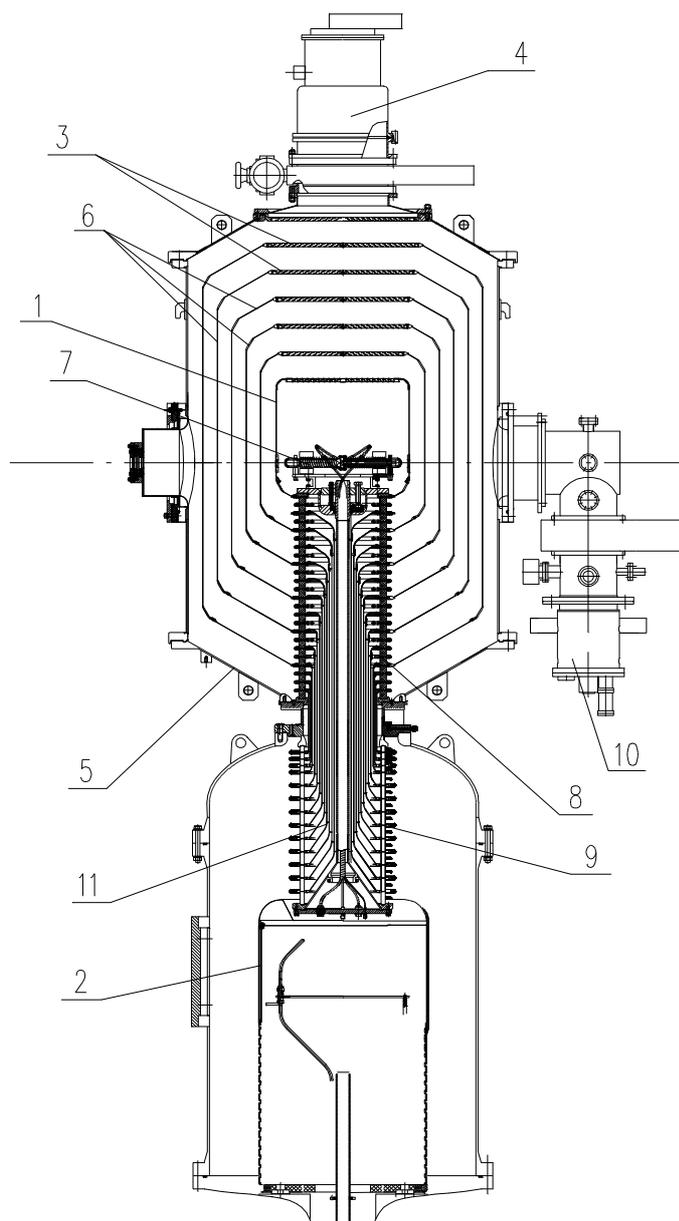


Рисунок 3. Общий вид электростатического 6-зазорного ускорителя-тандема с вакуумной изоляцией: 1 – высоковольтный электрод ускорителя-тандема; 2 – высоковольтный электрод источника постоянного напряжения; 3 – жалюзи электродов-экранов; 4 – криогенный насос; 5 – вакуумный бак ускорителя; 6 – промежуточные электроды-экраны ускорителя-тандема; 7 – газовая обдирочная мишень; 8 – вакуумная часть проходного изолятора; 9 – газовая часть проходного изолятора; 10 – турбомолекулярный насос; 11 – внутренние коаксиальные цилиндры.

Промежуточные цилиндрические электроды-экраны 6 с рамками крепления для диафрагм (рисунок 4) и диафрагмами (рисунок 5) ускорителя-тандема расположены соосно с высоковольтным электродом (рисунок 6) и корпусом вакуумного бака 5 (рисунок 7).



Рисунок 4. Промежуточные цилиндрические электроды-экраны.



Рисунок 5. Диафрагмы.



Рисунок 6. Высоковольтный электрод.



Рисунок 7. Вакуумный бак ускорителя-тандема.

Откачка вакуумного объема осуществляется турбомолекулярным 10 и криогенным 4 насосами через горловину вакуумного объема и профилированные крышки- жалюзи 3 (рисунок 8) промежуточных электродов.



Рисунок 8. Жалюзи вакуумных ускоряющих электродов.

Распределение потенциала по электродам-экранам задается резистивным делителем, расположенным внутри верхней 8 и снаружи нижней 9 части газонаполненного проходного изолятора через систему внутренних коаксиальных цилиндров 11, соединяющих электроды одного потенциала нижней (газовой) и верхней (вакуумной) частей проходного изолятора.

При диаметре корпуса вакуумного объёма 1400 мм, и высоковольтного электрода 600 мм напряженности электрического поля в ускоряющих зазорах в среднем составляют ~ 25 кВ/см. При этом площадь электродов, находящихся в вакууме под напряжением, достигает десятков квадратных метров.

Источником высокого напряжения, задающего потенциал высоковольтного электрода в ускорителе-тандеме, служит каскадный генератор с индуктивной связью и параллельным питанием каскадов промышленного ускорителя серии ЭЛВ [16], выпускаемого в ИЯФ.

Напряжение от высоковольтного выпрямителя подаётся на центральный электрод и промежуточные электроды-экраны ускорителя-тандема через секционированный разборный проходной изолятор (рисунок 9), который находится вне области прохождения и ускорения пучка.

Вакуумная часть проходного изолятора собрана из 24 кольцевых стеклянных изоляторов (рисунок 10), вакуумно плотно стянутых с промежуточными электродами через индиевые уплотнители. Высота стеклянных колец, внешняя боковая поверхность которых находится в вакууме, равна 35 мм.

Газовая часть проходного изолятора, расположенная в баке высоковольтного выпрямителя, состоит из 14 керамических колец, склеенных со своими электродами (рисунок 11). Высота разновысоких керамических колец, боковые поверхности которых находятся в среде элегаза 30 и 60 мм. Диаметр керамических, как и диаметр стеклянных, колец составляет ~ 400 мм.

Труба, стягивающая обе части в единый проходной изолятор, расположена на оси системы.

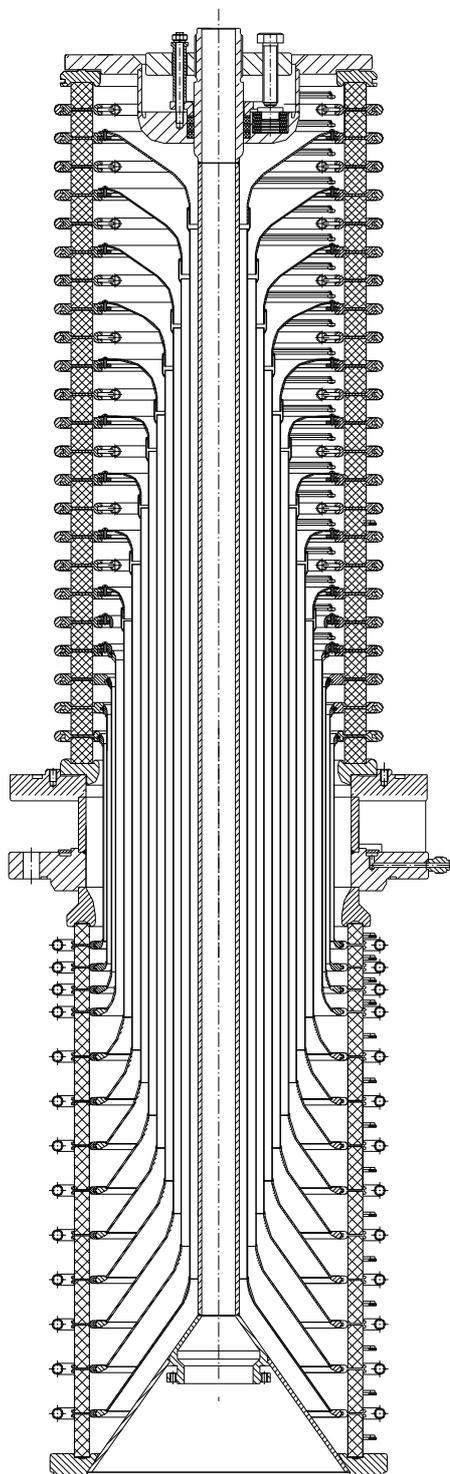


Рисунок 9. Общий вид проходного изолятора в сборе.



Рисунок 10. Стекланные изоляторы и электроды вакуумной части проходного изолятора.



Рисунок 11. Керамические изоляторы и электроды газовой части проходного изолятора.

Нижняя внешняя газовая поверхность изолятора находится в баке высоковольтного выпрямителя, в котором поддерживается давление до 0.8 МПа. Внутренняя часть проходного изолятора работает в атмосфере элегаза (SF_6) под давлением до 0.3 МПа. Верхняя наружная поверхность проходного изолятора находится в вакууме. Общее усилие, которое необходимо создать для уплотнения изолятора, составило ~ 5.5 тонн.

Резистивный делитель (рисунок 12), расположенный вокруг газовой части проходного изолятора, через электроды газовой части изолятора, металлические тонкостенные трубы различной длины и диаметра (рисунок 14), коаксиально расположенные внутри изолятора (рисунок 15), и электроды вакуумной части изолятора равномерно распределяет напряжение высоковольтного источника по промежуточным ускоряющим электродам. Распределение потенциала по электродам вакуумной части изолятора, гальванически не связанным с коаксиальными трубами, задается резисторами

(рисунок 13), расположенными внутри вакуумной части проходного изолятора.



Рисунок 12. Газовая часть проходного изолятора (в сборе) с делителем снаружи.



Рисунок 13. Вакуумная часть проходного изолятора (частично разобранная) с делителем внутри.



Рисунок 14. Внутренние коаксиальные трубы.



Рисунок 15. Коаксиальные трубы в сборе.

Промежуточные цилиндрические электроды-экраны закреплены на электродах верхней (вакуумной) части проходного изолятора (рисунок 16 и 17). Напряженность электрического поля для стеклянных изоляторов ~ 12 кВ/см, а для керамических ~ 14 кВ/см.



Рисунок 16. Расположение электродов-экранов на изоляторе.



Рисунок 17. Частично собранные электроды-экраны.

Данная конструкция позволяет располагать электроды достаточно близко друг к другу – на расстоянии нескольких сантиметров, тем самым обеспечивая быстрый темп ускорения заряженных частиц и компактность ускорителя.

Для перезарядки отрицательных ионов водорода с энергией 1 МэВ в протоны в работе [17] были рассмотрены различные мишени. В качестве оптимальной выбрана газовая аргоновая мишень. Выбор обусловлен тем, что аргон – инертный газ и, что наиболее важно, перезарядка не сопровождается диссоциацией аргона, приводящей к дополнительному нагреву и получению нежелательных продуктов диссоциации.

Конструктивно мишень изготовлена в виде охлаждаемой цилиндрической трубки с напуском газа в середине (рисунок 18). Длина трубки равна 400 мм, внутренний диаметр – 10 мм. На рисунке 19 представлен общий вид перезарядной мишени, расположенной внутри высоковольтного электрода ускорителя-тандема.

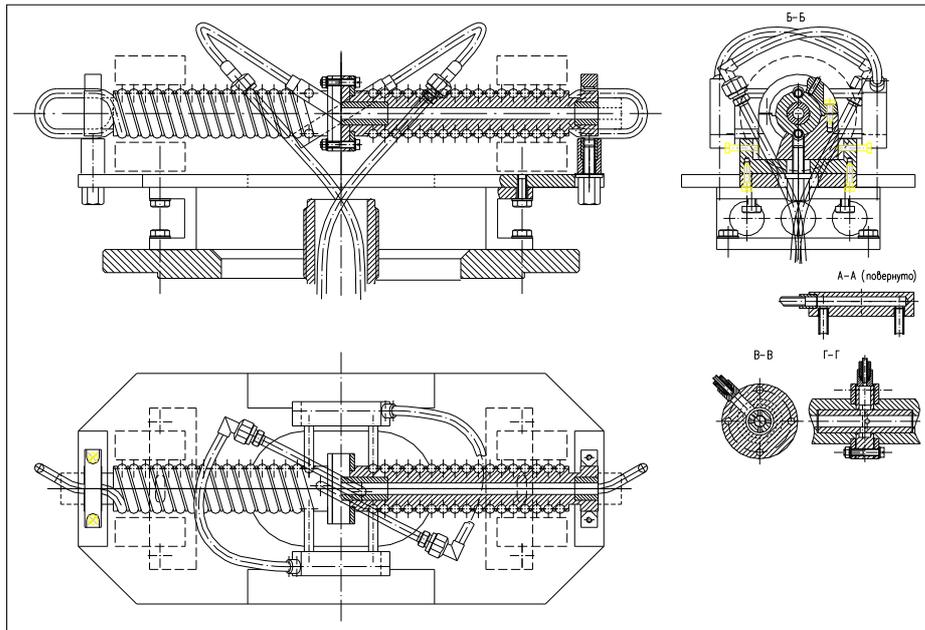


Рисунок 18. Сборочный чертёж перезарядной мишени.

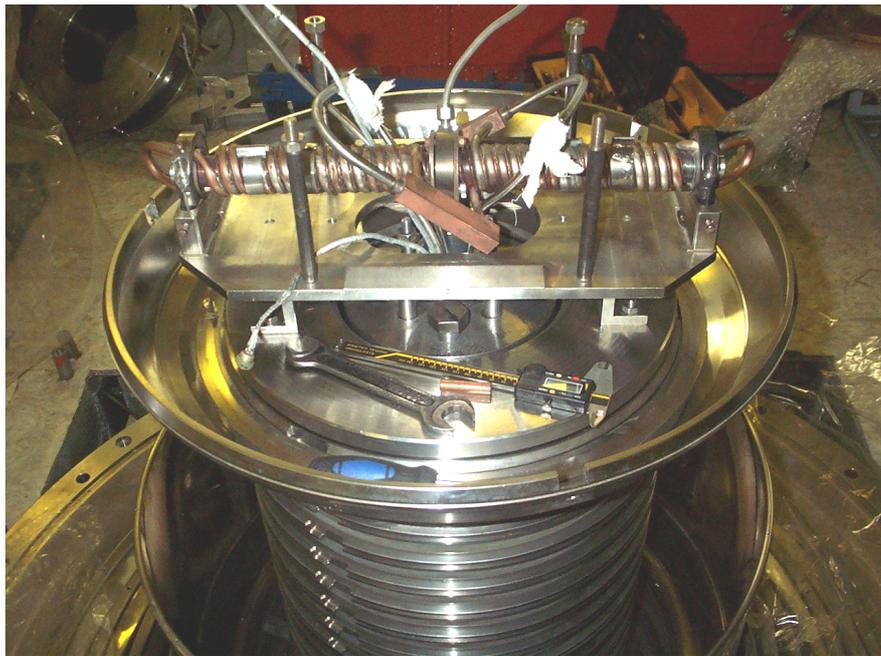


Рисунок 19. Перезарядная мишень внутри высоковольтного электрода.

Система подачи газа (Ar) в перезарядную мишень показана на рисунке 20.



Рисунок 20. Система подачи газа в перезарядную мишень.

Подача газа в обдирочную мишень осуществляется следующим образом. В высоковольтном электроде источника питания ускорителя расположены 5-литровый баллон аргона с газовым редуктором GCE, ограничивающим давление на выходе, электромеханический клапан, задающий режим подачи аргона в перезарядную мишень, и игольчатый вентиль тонкой регулировки

расхода газа (натекатель). Клапан управляется источником (27 В), запитанным от последней секции высоковольтного выпрямителя. Между клапаном и натекателем расположен буферный объем. Режим напуска газа в буферный объем, заданный программным образом (рисунок 21), обеспечивается открытием клапана полностью или с определенной частотой и длительностью импульса. В проведенных экспериментах длительность открывания клапана была установлена 160 мс, а выходное давление редуктора 4 атм. Из буферного объема через натекатель газ поступает в обдирочную мишень по трубке длиной 2 м с внутренним диаметром 4 мм, расположенной внутри проходного изолятора. Характерное время вытекания газа из буферного объема составляет 500 с.

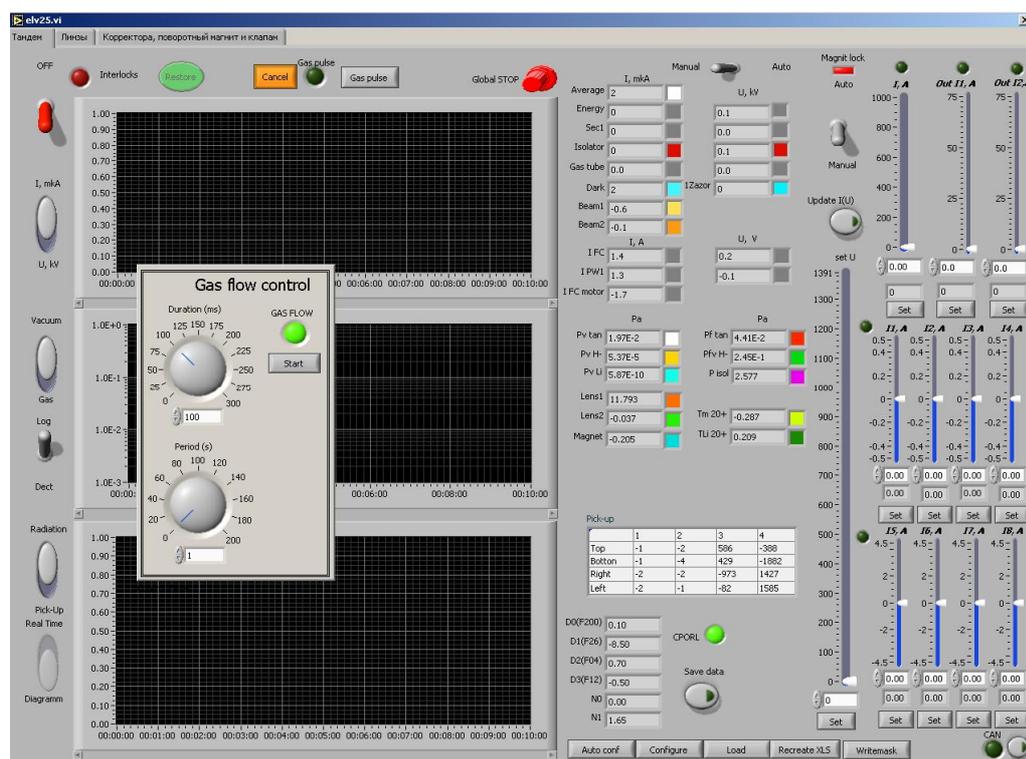


Рисунок 21. Интерфейс программы управления ускорителем и напуском газа в перезарядную мишень.

Согласно [17], линейная толщина аргоновой мишени при 99 % перезарядке пучка составляет $nL = 3.1 \times 10^{16} \text{ см}^{-2}$. При этом для перезарядной

трубки длиной $L = 40$ см среднее давление $\langle P \rangle = 3$ Па. Расход газа составляет величину $Q = 7.3$ мПа \times м³/с, что соответствует потоку частиц 1.8×10^{18} с⁻¹.

Давление внутри высоковольтного электрода при потоке 7.3 мПа \times м³/с, учитывая, что проводимость через последовательно установленные электроды с отверстиями на уровне 1500 л/с, имеет характерную величину 4.7×10^{-3} Па, что допустимо.

Расход газа может быть уменьшен в 1.6 раза, если допустить 95 %-ную перезарядку пучка, причем уменьшение происходит как за счет снижения давления, так и за счет приближения режима течения к молекулярному.

В качестве теплоносителя для принудительного охлаждения цилиндрической трубки перезарядной мишени в стационарном режиме используется трансформаторное масло, обладающее достаточно высокой электрической прочностью. Согласно расчетным данным [17], была изготовлена система охлаждения (рисунок 22 и 23), которая обеспечивает отвод до 5 кВт мощности из высоковольтного электрода.



Рисунок 22. Передняя панель системы охлаждения перезарядной мишени.

Ввод масла в область центрального высоковольтного электрода ускорителя-тандема осуществляется по полиэтиленовым трубкам, имеющим

ограниченную механическую прочность при температуре выше 60 °С. Зависимость температуры масла в системе охлаждения от выделяемой на перезарядной мишени мощности при ее изменении от 0 до 1 кВт показано на рисунке 24.



Рисунок 23. Система подачи масла.

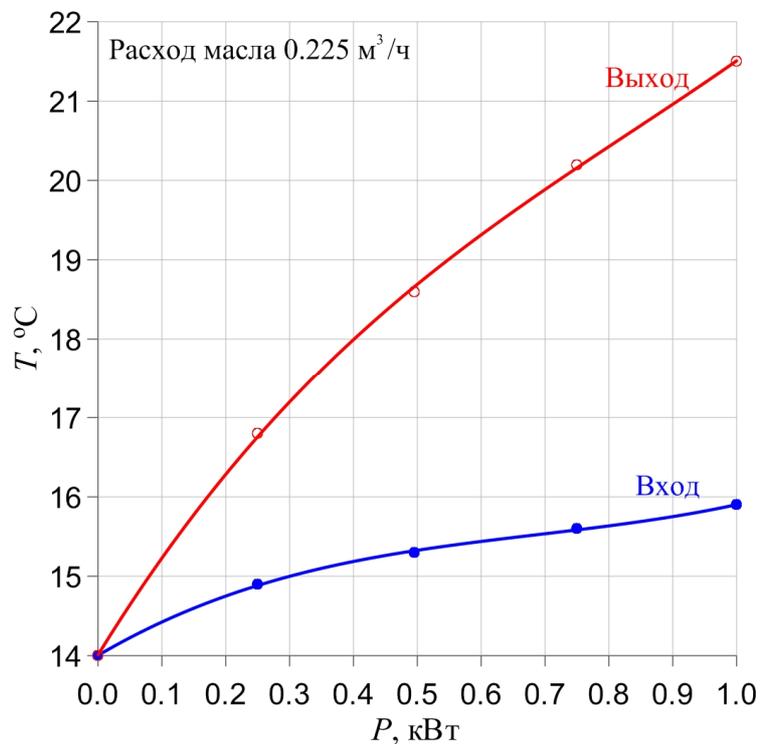


Рисунок 24. Экспериментально измеренная зависимость температуры масла на входе и выходе системы охлаждения перезарядной мишени при расходе масла 0.225 м³/ч.

Глава 2

Выбор количества ускоряющих вакуумных зазоров

Реализация схемы ускорителя-тандема вакуумной изоляцией по сравнению с традиционными ускорительными трубками приводит к значительному увеличению площади поверхности электродов и, как следствие, к значительному увеличению запасенной энергии в вакуумных зазорах – до нескольких десятков джоулей.

В ускорителе возможны, в основном, два типа пробоев: пробой конструктивной выходной ёмкости высоковольтного источника (пробой по «полному напряжению») и тренировочные пробой высоковольтных вакуумных зазоров. На режим тренировки последовательными пробоями и конечную электрическую прочность вакуумных зазоров существенно влияет энергия, запасаемая как в емкостях высоковольтных зазоров и связанных с ними емкостях других элементов ускорителя-тандема, так и в выходной емкости высоковольтного источника (~ 200 пФ). Перенапряжение на отдельных элементах ускорителя-тандема может привести к их последовательному пробоям и к потере электрической прочности.

Увеличение уровня перенапряжения на керамических и стеклянных кольцах, из которых собран проходной изолятор, может приводить как к пробоям по поверхности изоляторов, так и к их электрическому старению и, как следствие, разрушению.

Известно [18], что пробой с выделяемой энергией более 10 Дж ведёт к падению электрической прочности миллиметровых вакуумных зазоров. Для сантиметровых зазоров разрабатываемого ускорителя-тандема это не очевидно. Уменьшить энергию, запасённую в отдельном зазоре, можно за счёт

увеличения количества вакуумных ускоряющих зазоров (количества промежуточных электродов).

Рассмотрим характеристики 4, 6 и 12-зазорной схемы ускорителя-тандема. Количество зазоров связано с их кратностью количеству изоляционных колец вакуумной части проходного изолятора: 24.

На рисунке 25 показана электрическая схема соединения емкостей элементов ускорителя-тандема с 12 высоковольтными ускоряющими зазорами.

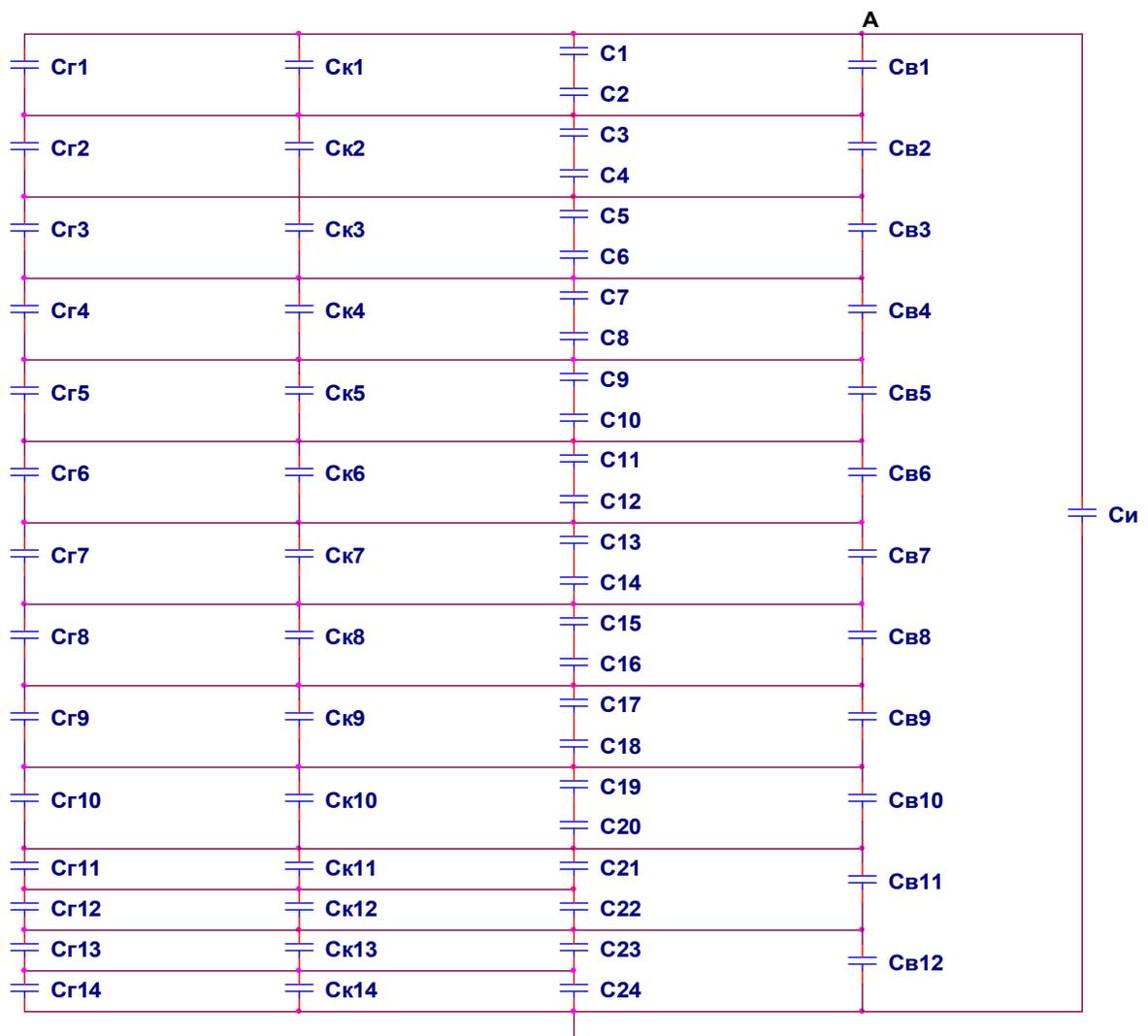


Рисунок 25. Электрическая схема соединения емкостей элементов ускорителя-тандема с 12 ускоряющими зазорами.

A – точка стыковки емкостей ускорителя-тандема с выходной емкостью $C_{и}$ высоковольтного источника;

$C_{в1} \div C_{в12}$ – емкости высоковольтных вакуумных зазоров;

$C1 \div C24$ – емкости стеклянных колец проходного изолятора;

$C_{к1} \div C_{к14}$ – емкости керамических колец проходного изолятора;

$C_{г1} \div C_{г14}$ – межэлектродные емкости газовой части изолятора, образованные коаксиальными трубами.

В приведенной схеме при изменении количества высоковольтных вакуумных зазоров (12, 6, 4) меняется только число емкостей $C_{вi}$, каждая из которых соединена с одинаковым количеством стеклянных изоляторов. На рисунке 26 приведены оценочные значения энергий, запасаемых в межэлектродных емкостях $C_{вi}$ и связанных с ними соответствующих емкостях $C_{кi}$ и $C_{ги}$, в зависимости от числа вакуумных зазоров при потенциале высоковольтного электрода 1.2 МВ.

Номера вакуумных зазоров, как и значения приведенных к ним конструктивных емкостей, увеличиваются от высоковольтного электрода к корпусу бака. Значения перенапряжения на стеклянных и керамических изоляторах можно оценить, зная перенапряжение на зазорах.

Перенапряжение на элементах ускорителя-тандема из-за кратковременности процессов пробоя обусловлено только емкостями его отдельных элементов. Расчет перенапряжения удобно провести методом наложения [19].

Результаты оценочного расчета изменения напряжения на вакуумных зазорах при пробое по “полному напряжению” приведены на рисунке 27. U_i – напряжение в i -м высоковольтном зазоре после пробоя ускорителя-тандема “по полному напряжению”; U_0 – то же до пробоя ускорителя (рабочее напряжение во всех зазорах одинаково).

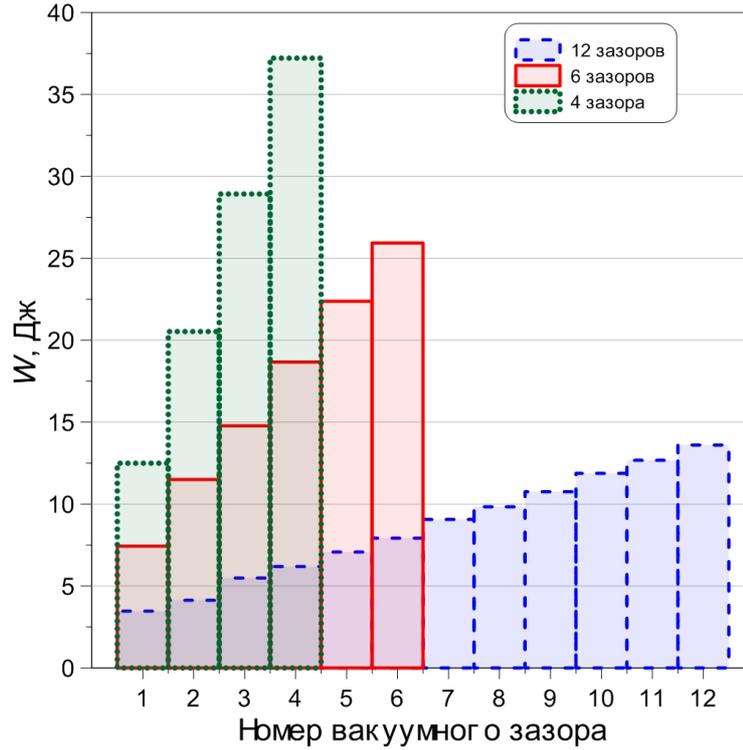


Рисунок 26. Оценочные значения энергии, запасаемой в 4, 6, 12 ускоряющих зазорах ускорителя-тандема.

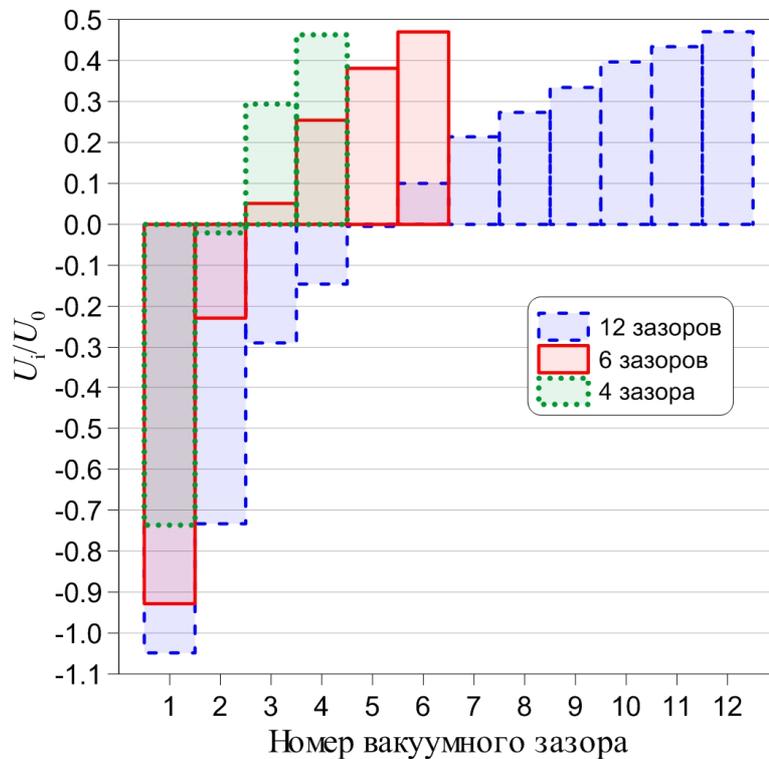


Рисунок 27. Отношение напряжения в ускоряющих зазорах при пробое ускорителя по “полному напряжению” к напряжению до пробоя.

Результаты расчета показывают, что при пробое по полному напряжению только в одном зазоре 12-зазорного ускорителя происходит возрастание напряжения на величину около 5%. На остальных зазорах 12-, 6- и 4-зазорного ускорителя напряжение при пробое меньше напряжения до пробоя.

При пробое отдельных вакуумных зазоров напряжение на всех остальных зазорах возрастает. При этом напряжение на высоковольтном источнике уменьшается. На рисунке 28, в качестве примера, приведены результаты расчета перенапряжений на зазорах для 4-зазорного ускорителя.

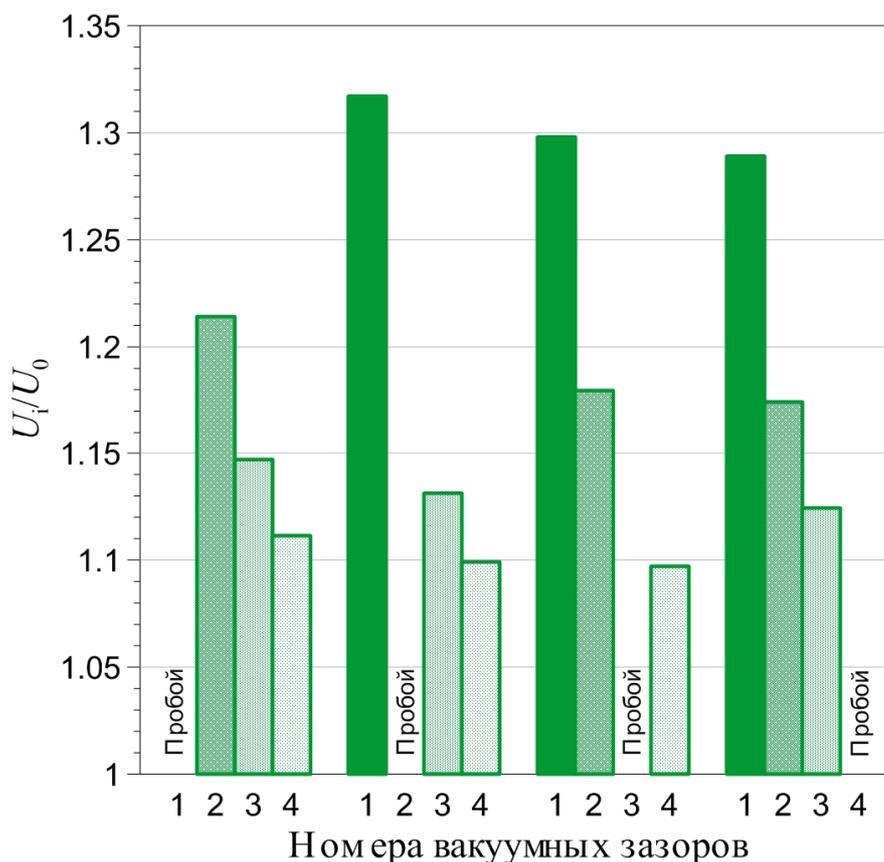


Рисунок 28. Величина перенапряжения на ускоряющих вакуумных зазорах при пробое одного из зазоров для 4-зазорного варианта ускорителя.

Расчеты показали, что при пробое зазора № 1 напряжение на соседнем возрастает на 21 %, при этом напряжение на высоковольтном источнике

уменьшается на 13 %. При пробое зазоров № 2, 3 и 4 наибольшее перенапряжение возникает в первом зазоре – на 32, 30 и 29 %, при этом напряжение на высоковольтном источнике уменьшается на 11.3, 10.6 и 10.3 % соответственно.

Исходя из оценочных расчетов (рисунок 29), максимальное перенапряжение для 4-, 6- и 12-зазорного варианта ускорителя составляет 32, 23 и 12 % соответственно. Увеличение количества зазоров при уменьшении запасенной энергии в них, ведет к меньшим перенапряжениям при пробоях отдельных зазоров.

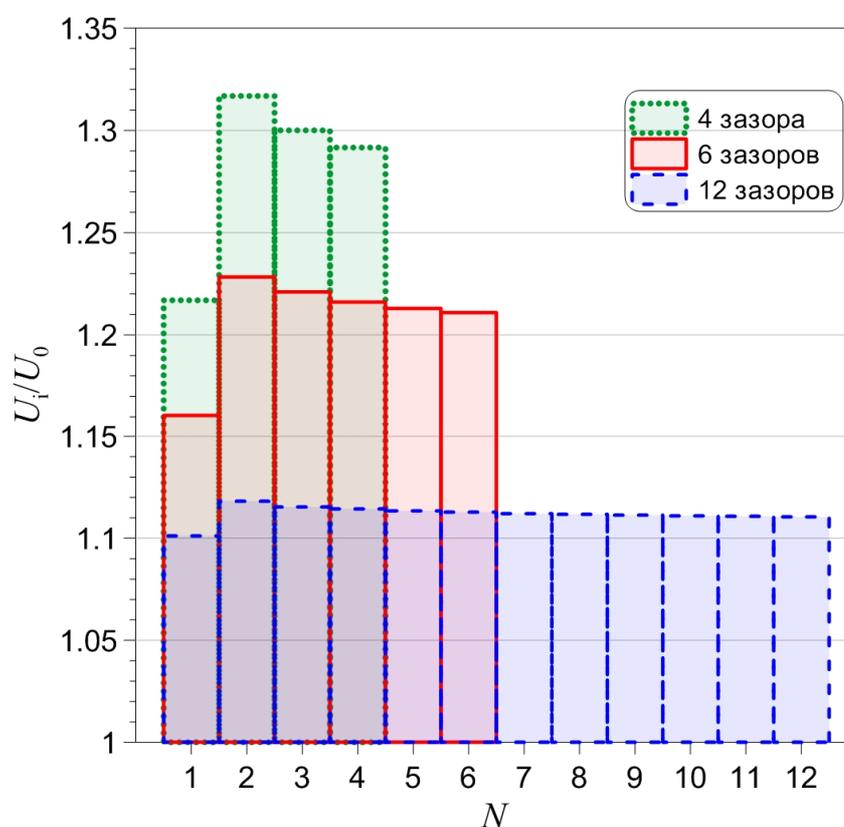


Рисунок 29. Величина максимального перенапряжения на ускоряющих вакуумных зазорах при пробое одного из зазоров для 4-, 6- и 12-зазорного варианта ускорителя. N – номер вакуумного зазора, в котором произошёл пробой.

При эксплуатации ускорителя возможны пробои и других высоковольтных элементов. Такими элементами, включёнными параллельно с каждым ускоряющим высоковольтным вакуумным зазором, являются керамические и стеклянные кольца проходного изолятора и цилиндрические коаксиальные трубы, соединяющие электроды вакуумной и газовой частей изолятора.

Рассмотрим 6-зазорный вариант. Каждый, с 1 по 5, вакуумный высоковольтный ускоряющий зазор параллельно соединён с четырьмя последовательно соединёнными стеклянными изоляторами, с двумя керамическими изоляторами и двумя последовательно соединёнными газовыми зазорами между цилиндрическими электродами проходного изолятора. Из-за особенностей конструкции ускорителя-тандема для 6-го вакуумного зазора число последовательно соединённых керамических изоляторов меньшей высоты и газовых зазоров равно 4.

При потенциале высоковольтного электрода ускорителя-тандема в 1 МВ расчётная напряжённость электрического поля по поверхности керамических колец составляет ~ 14 кВ/см. В [20] показано, что у колец, эксплуатируемых в среде элегаза под давлением ≥ 0.3 МПа, электрическая прочность по поверхности > 100 кВ/см, что существенно выше расчётной. Внешняя поверхность керамических колец изолятора работает под давлением элегаза до 0.8 МПа и имеет ещё больший запас электрической прочности.

Из практики известно, что первые поверхностные вакуумные пробои изоляторов высотой несколько сантиметров с хорошо экранированной тройной точкой проходят при напряжённости 10 кВ/см. Для достижения же расчётной напряжённости в 12 кВ/см по вакуумной поверхности стеклянных изоляторов требуется их высоковольтная тренировка пробоями.

Напряжённость в регулярной части газовых зазоров между цилиндрическими трубами, соединяющими электроды вакуумной и газовой части проходного изолятора, составляет около 100 кВ/см, что примерно в 2

раза меньше, чем пробивная напряжённость газовых зазоров с электродами соответствующей площади при давлении газа 0.4 МПа [20].

Таким образом, первичный (или после длительной остановки) вывод ускорителя-тандема на рабочий режим будет сопровождаться тренировочными пробоями стеклянных колец изолятора по вакуумной поверхности. Эти пробои могут влиять на пробои остальных упомянутых выше высоковольтных элементов ускорителя-тандема.

Расчёты показали, что при пробое любого стеклянного изолятора (кроме последних четырёх) напряжение на парном с ним (относительно соответствующих C_T или C_K) возрастает в ~ 1.9 раза. При пробое одного из изоляторов с номерами от 21 до 24 напряжение на остальных трех также возрастает (максимально в 1.35 раза).

Таким образом, если пробивается одно из двух стеклянных колец, соединённых попарно с соответствующим газовым зазором, то из-за возрастания напряжения на втором кольце практически неизбежен его пробой, что эквивалентно пробоем соответствующего газового зазора или соответствующего керамического изолятора.

Результаты расчёта возрастания напряжения на газовом зазоре, парном (относительно соответствующего вакуумного зазора) с пробиваемым зазором, приведены на рисунке 30. Здесь же показано максимальное значение возрастания напряжения, на каком либо из газовых зазоров с $C_{Г11}$ по $C_{Г14}$ при пробое одного из них.

Видно, что при пробое любого газового зазора между трубами проходного изолятора напряжение на парном с ним газовом зазоре возрастает в диапазоне от 1.32 до 1.71, увеличивая вероятность пробоя парного зазора.

Последовательный пробой парных газовых зазоров эквивалентен пробоем соответствующего вакуумного ускоряющего зазора. Результаты расчёта максимального возрастания напряжения на вакуумных зазорах, при

пробое одного из них, приведены на рисунке 29 для 6-зазорного ускорителя-тандема.

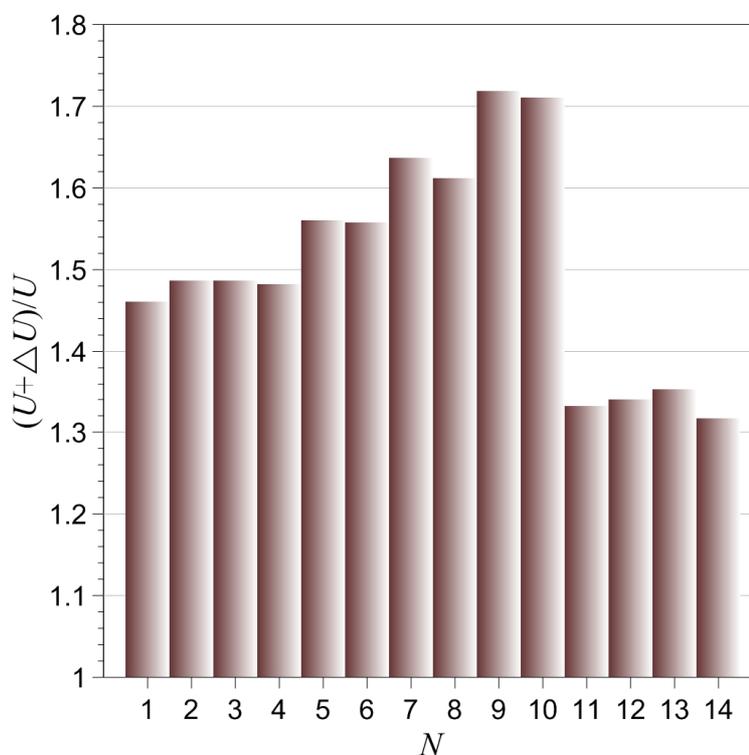


Рисунок 30. Возрастание напряжения на газовом зазоре при пробое парного ему. N – номер газового зазора, в котором произошёл пробой, $(U+\Delta U)/U$ – перенапряжение на парном с ним газовом зазоре.

Видно, что при пробое одного из вакуумных зазоров пробой любого соседнего с ним зазора из-за малого возрастания напряжения на нём и большого запаса электрической прочности маловероятен. Но при этом из-за повышения напряжения на остальных вакуумных зазорах возрастёт напряжение и на соответствующих им газовых зазорах и стеклянных изоляторах (максимально в 1.23 раза), что также увеличивает вероятность последовательного пробоя всех газовых зазоров проходного изолятора ускорителя-тандема.

Результаты анализа высоковольтной прочности вакуумных зазоров ускорителя по запасенной энергии и величине перенапряжения при пробоях

позволяют отдать предпочтение 6- или 12-зазорному варианту ускорителя-тандема. Но более технологически простым и наименее дорогостоящим для производства представляется 6-зазорный вариант ускорителя.

Глава 3

Испытания высоковольтного вакуумного зазора

Первые высоковольтные эксперименты для проверки параметров, закладываемых в основные узлы ускорителя-тандема, были проведены на специально изготовленном стенде (рисунок 31) с 45-мм вакуумным зазором и площадью высоковольтного электрода 0.71 м^2 . Каскадный генератор (рисунок 32) использовался в качестве источника постоянного напряжения.



Рисунок 31. Высоковольтный вакуумный стенд.



Рисунок 32. Каскадный генератор.

§ 3.1. Изучение влияния запасённой энергии на электрическую прочность высоковольтного вакуумного зазора

Цель экспериментов: выяснение влияния запасённой энергии на электрическую прочность 45 мм зазора между поверхностями высоковольтного электрода и корпусом вакуумного объёма.

Геометрия эксперимента показана на рисунке 33.

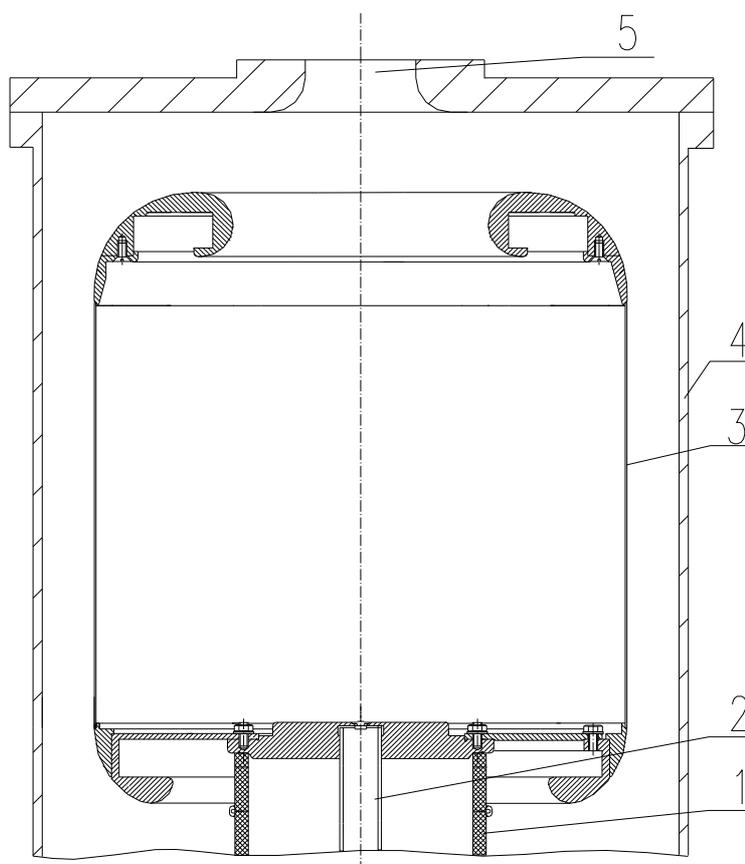


Рисунок 33. Высоковольтный вакуумный стенд: 1 - проходной изолятор, 2 - труба с высоким потенциалом, 3 – высоковольтный электрод, 4 - корпус бака, 5 - горловина для вакуумной откачки.

В проводимых экспериментах постоянное напряжение на высоковольтный электрод 3 с “напряженной” площадью 0.71 м^2 подавалось от каскадного генератора через проходной изолятор 1 по трубе 2. Предварительные расчеты показали, что изменения напряженности

электрического поля в пределах этой площади составили менее 15 %. Вакуумный объём откачивался двумя 100-литровыми магниторазрядными насосами через горловину 5 корпуса 4 бака. Корпус вакуумного объёма и высоковольтный электрод изготовлены из нержавеющей стали с электрохимполированными рабочими поверхностями. Электровакуумный прогрев электродов экспериментального зазора не проводился.

К измеренной емкости высоковольтного зазора ($C \sim 200$ пФ), отделенной от емкости каскадного генератора высокоомными резисторами СЗ-14, поочередно добавлялись емкость каскадного генератора ($C \sim 400$ пФ) и емкость специального накопителя энергии ($C \sim 750$ пФ), который располагался внутри высоковольтного электрода и состоял из последовательно соединенных конденсаторов К15-10 и экранирующих электродов (рисунок 34).

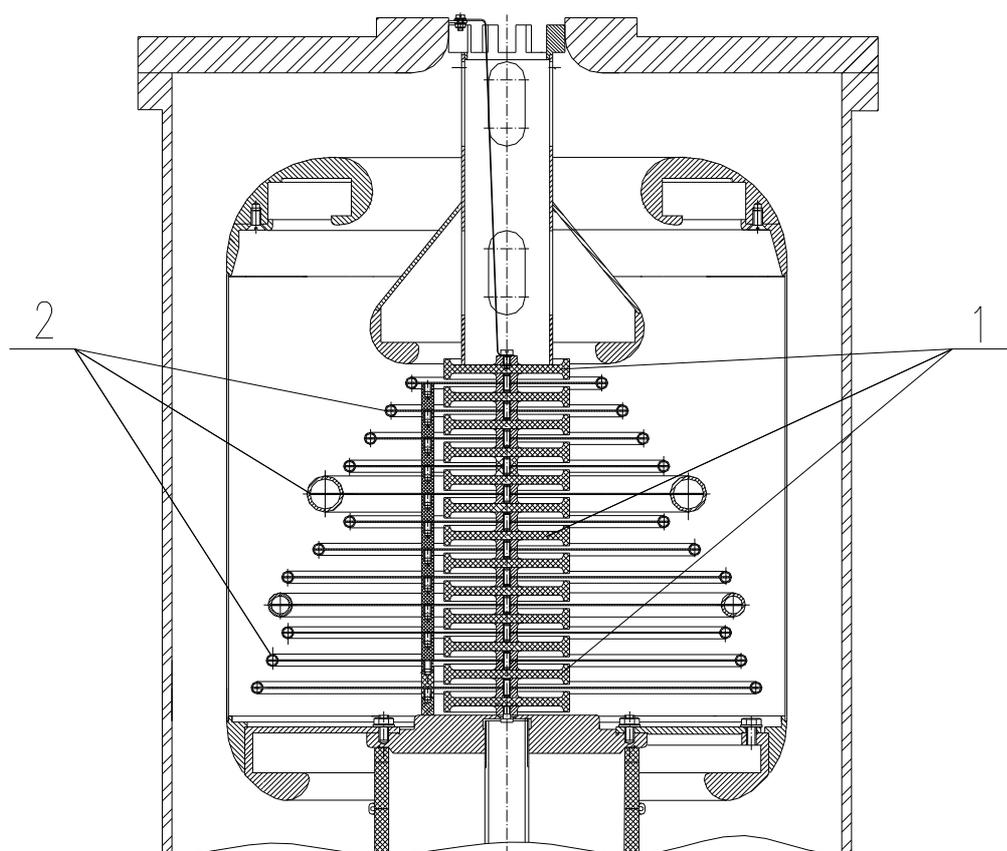


Рисунок 34. Высоковольтный вакуумный стенд с накопителем энергии:

1 – конденсаторы К15-10, 2 – экранирующие электроды.

Процесс управления и сбора информации в эксперименте был полностью автоматизирован. Фиксировались: напряжение, значение остаточного давления в вакуумном объеме, темновой ток, определяемый как разность измеряемого тока нагрузки выпрямителя и тока через резистивные делители напряжения.

Графики подъема напряжения на высоковольтном вакуумном зазоре показаны на рисунке 35, где N – номер последовательного пробоя, а E – значение напряженности электрического поля в высоковольтном вакуумном зазоре, при которой произошел пробой промежутка.

Символами (•••) отмечено среднее значение рабочей напряженности, принятое для высоковольтных ускоряющих промежутков ускорителя-тандема ~ 25 кВ/см, что соответствует напряжению на экспериментальном зазоре 112.5 кВ.

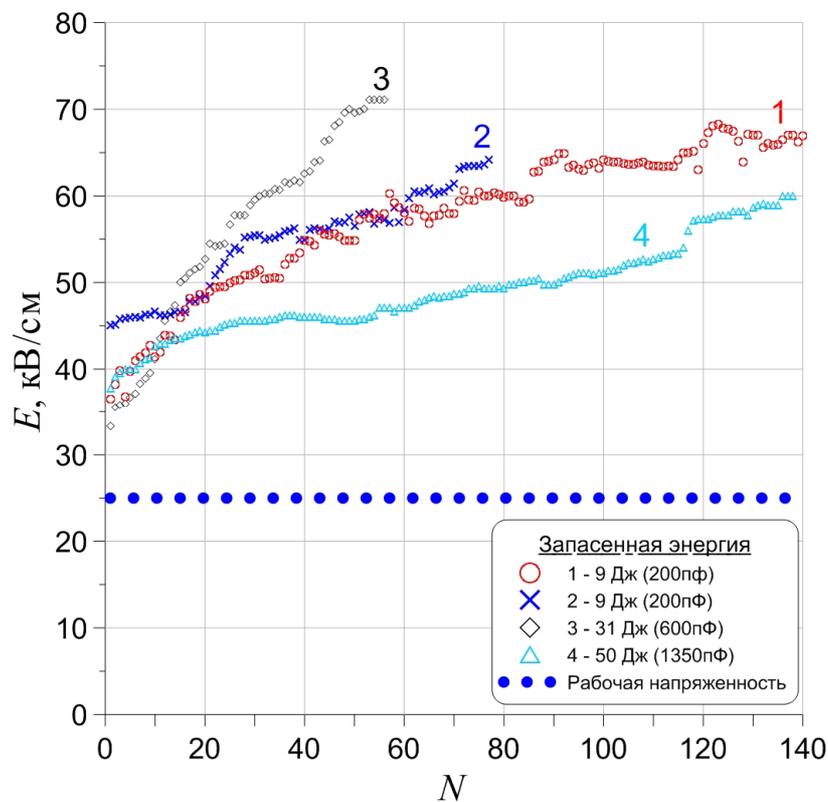


Рисунок 35. Зависимость напряженности поля в зазоре при пробое от количества пробоев.

Эксперимент без специального накопителя энергии проводился дважды с перерывом в два месяца (кривые 1 и 2). Максимальные значения напряженности при пробое соответствуют запасенной энергии 9 Дж ($C \approx 200$ пФ). Первые пробои проходили при напряженности, превышающей значение 25 кВ/см. Влияние предшествующих пробоев на последовательный рост пробивного напряжения не наблюдалось.

По результатам эксперимента с добавленной емкостью каскадного генератора (кривая 3) и накопителем энергии (кривая 4) можно утверждать, что запасенная энергия до 31 Дж ($C \approx 600$ пФ) и до 50 Дж ($C \approx 1350$ пФ) не привела к потере электрической прочности 45 мм вакуумного зазора.

На рисунке 36 приведена величина темнового тока от напряженности электрического поля в высоковольтном зазоре.

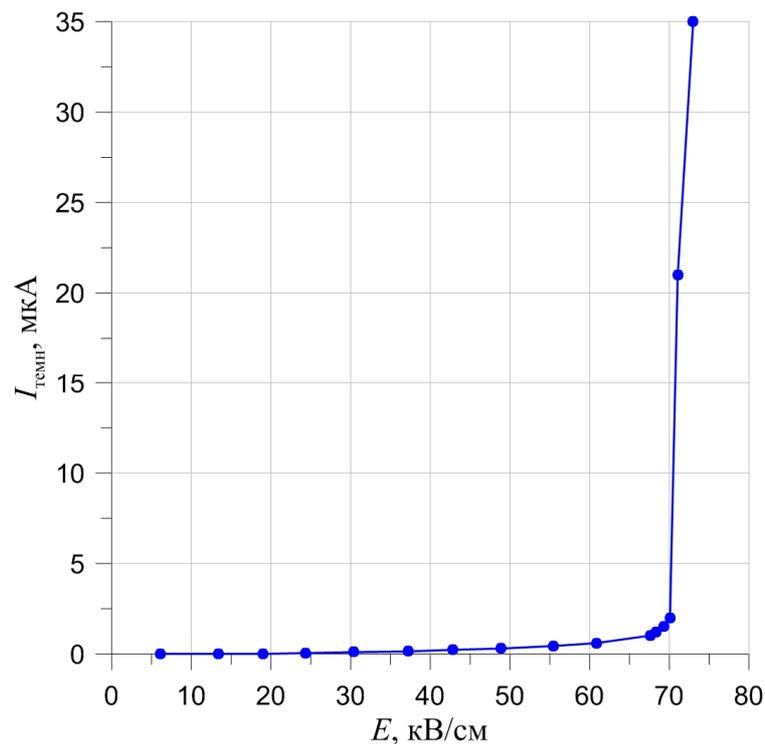


Рисунок 36. Зависимость темнового тока от напряженности электрического поля в высоковольтном зазоре.

Из графика видно, что при рабочей напряженности ускорителя-тандема темновой ток практически равен нулю.

На рисунке 37 приведены экспериментальные данные величины темнового тока и остаточного давления в вакуумном объеме. По мере улучшения вакуума темновой ток уменьшается.

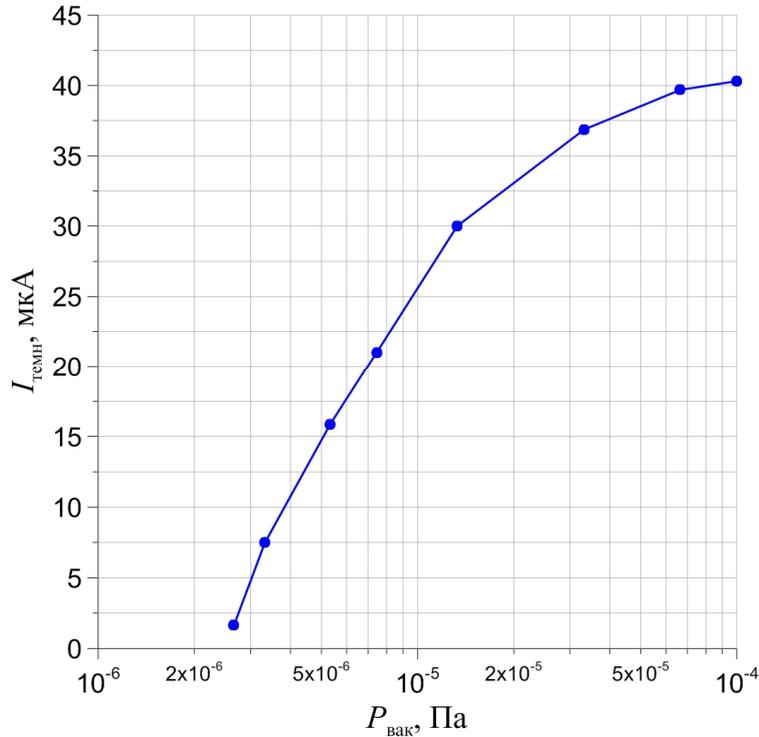


Рисунок 37. Зависимость темнового тока от остаточного давления в вакуумном объеме.

Первые пробои 45-мм вакуумного зазора (при зазорах разрабатываемого ускорителя-тандема в десятки миллиметров) начинались выше выбранной для ускорителя-тандема рабочей напряженности. Обработка экспериментальных данных показала, что время выдержки высокого напряжения в зазоре без пробоев при средней напряженности электрического поля менее 60 кВ/см составила несколько часов, при 66 кВ/см - 1.57 ± 0.62 ч, при 73 кВ/см – менее получаса.

Отсутствие падения электрической прочности высоковольтного зазора при запасенной энергии до 50 Дж позволило убедиться в правильности выбора количества промежуточных электродов ускорителя.

§ 3.2. Изучение влияния перезарядного газа на электрическую прочность высоковольтного вакуумного зазора

Газ обдирочной мишени, выходящий в область ускорения ионного пучка, может повлиять на высоковольтную прочность ускорителя. Целью эксперимента является определение верхней границы давления газа в области ускорения пучка путем измерения осевого и радиального распределения плотности газа, выходящего из трубки обдирочной мишени, и определение высоковольтной прочности исследуемого зазора при этом давлении газа.

Для проведения экспериментов с перезарядным газом высоковольтный вакуумный стенд был модернизирован (рисунок 38). Установлен турбомолекулярный насос для увеличения скорости откачки до 600 л/мин.



Рисунок 38. Модернизированный объем.

Величина потока перезарядного газа, выбранного для мишенных экспериментов (рисунок 39), регулировалась давлением в вакуумно-плотном газовом объеме 8 с натекателем 6. Объем находился внутри высоковольтного электрода 3. Из баллона, который находился рядом с испытательным стендом, газ подавался в объем через каскадный генератор и проходной изолятор по диэлектрической трубке 2. Расстояние от концов трубки мишени 7 внутренним диаметром 10 мм и длиной 400 мм до стенки вакуумного объема 4 составляло 75 мм.

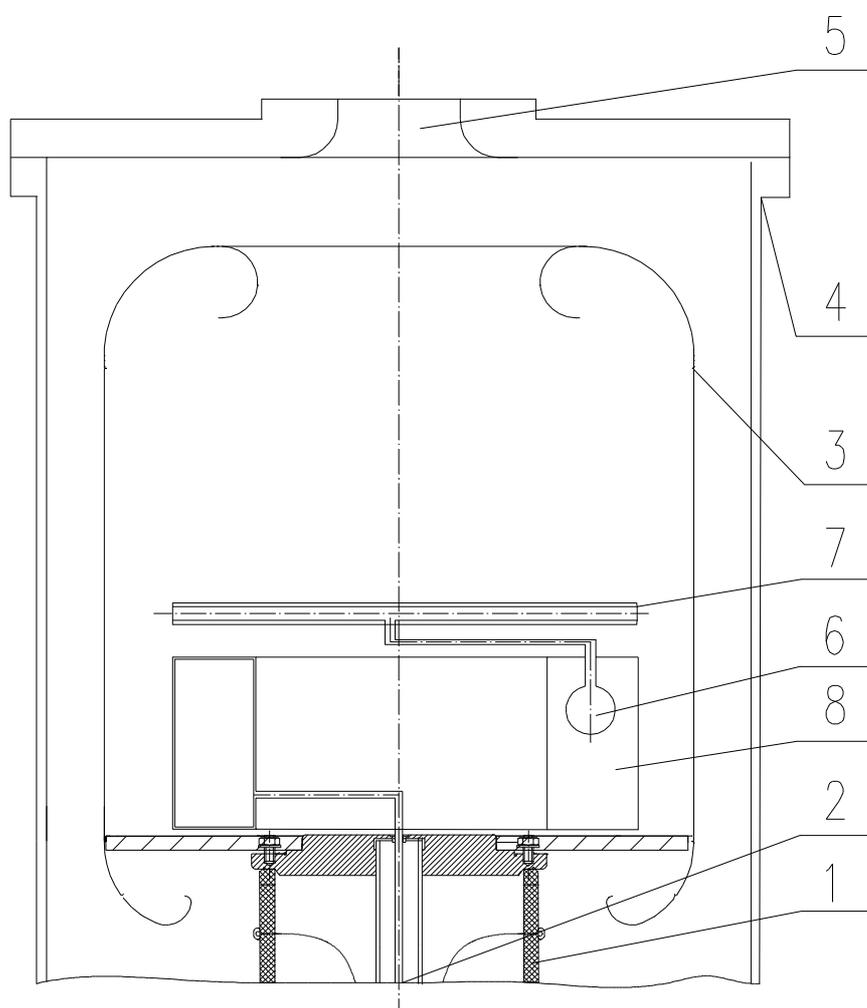


Рисунок 39. Геометрия эксперимента: 1 – проходной изолятор, 2 – диэлектрическая труба для подачи газа, 3 – высоковольтный электрод, 4 – вакуумный бак, 5 – горловина для откачки, 6 – натекатель, 7 – трубка газовой мишени, 8 – вакуумно-плотный газовый объем.

Форма аксиально-радиального распределения плотности потока газа исследовалась при снятом высоковольтном электроде (рисунок 40), т.к. отверстия для прохождения пучка в цилиндрической стенке высоковольтного электрода отсутствовали.



Рисунок 40. Перезарядная мишень с газовым объёмом и проходной изолятор.

Диаметр газовой обдирочной мишени определяется величиной ускоряемого тока [21] и во многом определяет величину газового потока, выходящего в вакуумный объём: например, для разрабатываемого ускорителя-тандема соответствует поток газа мишени в десятки $\text{мПа} \times \text{м}^3/\text{с}$ [17].

Для снятия распределения плотности газа был разработан и изготовлен ионизационный вакуумметр с осевым коллектором при объёме анодной сетки менее 1 см^3 . Конструкция привода вакуумметра позволяла перемещать его в осевом и радиальном направлениях без нарушения вакуумной плотности объёма.

Экспериментально полученные зависимости распределения плотности газа (локального давления) по оси струи для ряда потоков газа мишени показаны на рисунке 41, где Z - расстояние от конца трубки до центра вакуумметра.

Остаточное давление в вакуумном объёме для всех потоков газа измерялось на расстоянии 100 мм от оси потока и 10 мм от стенки вакуумного объёма.

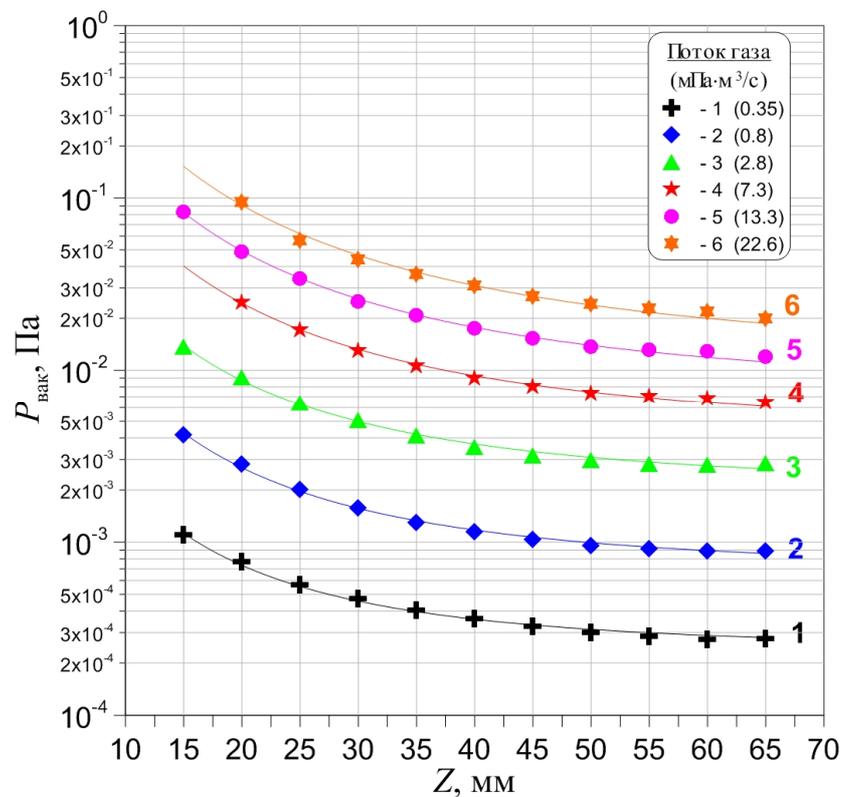


Рисунок 41. Осевое распределение плотности газа в струе.

Кривые 1÷6 соответствуют потокам газа в $0.35 \text{ мПа} \times \text{м}^3/\text{с}$, $0.8 \text{ мПа} \times \text{м}^3/\text{с}$, $2.8 \text{ мПа} \times \text{м}^3/\text{с}$, $7.3 \text{ мПа} \times \text{м}^3/\text{с}$, $13.3 \text{ мПа} \times \text{м}^3/\text{с}$, $22.6 \text{ мПа} \times \text{м}^3/\text{с}$.

Для аппроксимации полученных экспериментальных данных применялась зависимость аксиального распределения плотности газа для точечного источника

$$P(Z) = \frac{A}{Z^2} + B,$$

где A и B – константы.

Для каждого потока подобраны такие значения констант A и B , чтобы расчётные зависимости (сплошные линии) и экспериментальные точки хорошо совпадали. Различия в значениях констант для разных потоков, как и несовпадение значения B с величиной остаточного давления можно объяснить отличием геометрии мишенного эксперимента от геометрии с точечным источником (при равномерном угловом распределении вылетающих из него молекул).

При $Z < 15$ мм эксперименты не проводились из-за прогнозируемой большой ошибки измерений (существенное изменение плотности газа на расстоянии порядка размера вакуумметра).

Видно, что для всех потоков газа давление на оси струи спадает медленно: на расстоянии от конца трубки до точки измерения, эквивалентном $6 \div 6.5$ диаметрам трубки, в 4 раза превышает соответствующее фоновое давление в вакуумном объёме.

Для приведённой в [17] скорости откачки вакуумного объёма разрабатываемого ускорителя-тандема одним внешним насосом с учетом полученных экспериментальных результатов, верхняя граница ожидаемого давления на оси струи в районе первого высоковольтного зазора при потоке газа мишени 13.3×10^{-3} Па \times м³/с оценивается не более 2×10^{-2} Па.

Измеренная форма радиального распределения плотности газа в струе примерно одинакова для вышеупомянутых потоков газа. Для потока в 13.3 мПа \times м³/с график приведён на рисунке 42, где R - расстояние от оси струи до центра вакуумметра. Кривые 1, 2, 3, 4 показывают радиальное распределение плотности газа в плоскостях, расположенных перпендикулярно оси струи на расстоянии от конца трубки мишени 20, 30, 40 и 50 мм соответственно.

Замечено, что для вышеупомянутых потоков газа достаточно высокое остаточное давление вдоль оси струи на диаметре, эквивалентном $\approx 4 \div 6$ диаметрам трубки мишени, не меняется в измеренном диапазоне расстояний и с ростом радиуса уменьшается до значения фонового быстрее, чем давление на оси с ростом расстояния от конца трубки.

Диаметр отверстий для прохождения пучка в высоковольтном электроде разрабатываемого ускорителя-тандема равен двум диаметрам трубки мишени. Основное количество газа мишени откачивается внешним насосом через жалюзи в высоковольтном электроде и электродах-экранах (рисунок 3) при фоновом давлении практически не влияющим на электрическую прочность высоковольтных промежутков.

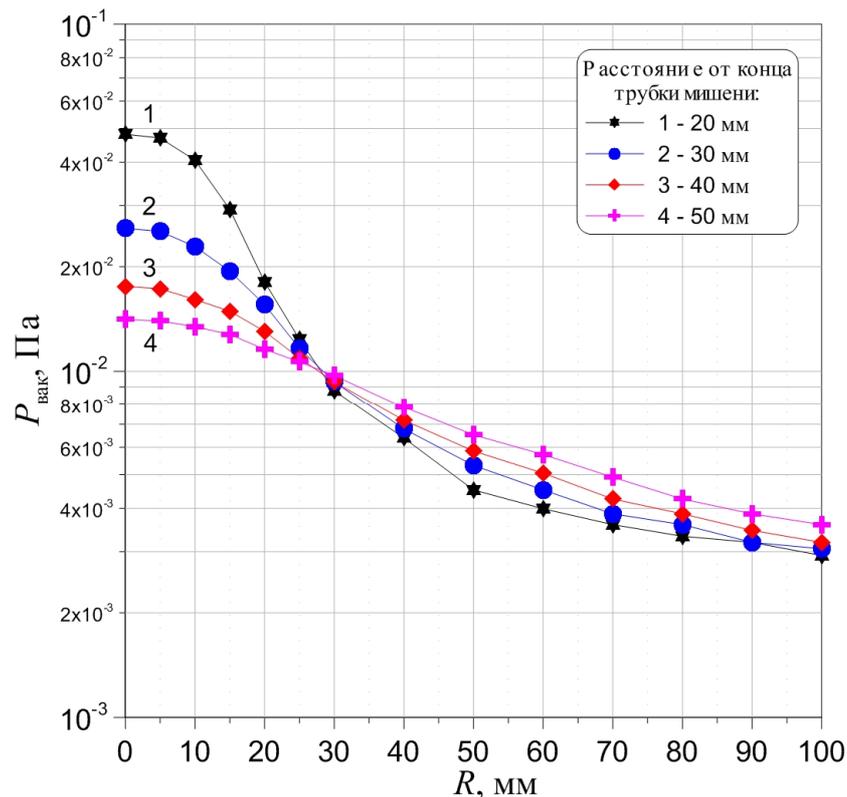


Рисунок 42. Радиальное распределение плотности газа в струе.

С учётом сделанных оценок, эксперименты по исследованию влияния остаточного вакуума в высоковольтном зазоре на его электрическую

прочность (рисунок 39) проводились при давлении до 4×10^{-2} Па и средней напряжённости электрического поля в зазоре выше 60 кВ/см.

Регулируемый поток газа, выходящий через оба конца трубки мишени, определял величину остаточного давления в исследуемом высоковольтном зазоре.

Высоковольтная тренировка заключалась в ступенчатом подъёме напряжения на зазоре. Изменение показаний рентгеновского датчика соответствовало изменению темнового тока. Вакуумные пробои в зазоре не снижали его электрической прочности.

На рисунке 43 приведена типичная тренировочная кривая, где N - номер последовательного вакуумного пробоя, а E – среднее значение напряженности электрического поля в высоковольтном зазоре, при котором произошёл пробой промежутка.

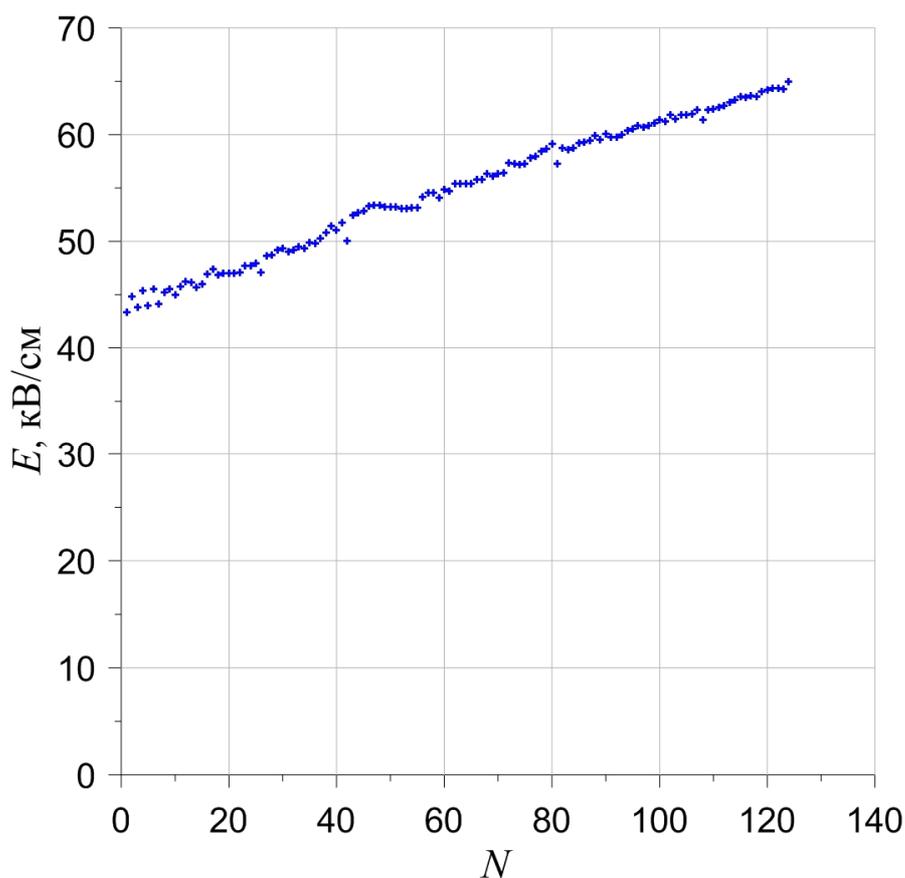


Рисунок 43. Тренировочная кривая высоковольтного зазора при остаточном давлении в вакуумном объеме 4×10^{-2} Па.

Типичные графики зависимости темнового тока ($I_{\text{темн}}$) в высоковольтном зазоре в начале (1) и конце (2) тренировки от напряженности электрического поля показаны на рисунке 44. Штриховой линией отмечено значение рабочей напряженности для высоковольтных зазоров ускорителя-тандема ~ 25 кВ/см.

Зависимость времени тренировки зазора при напряженности 60 кВ/см от длительности перерыва между включениями установки (при фиксированной методике тренировки) приведена на рисунке 45.

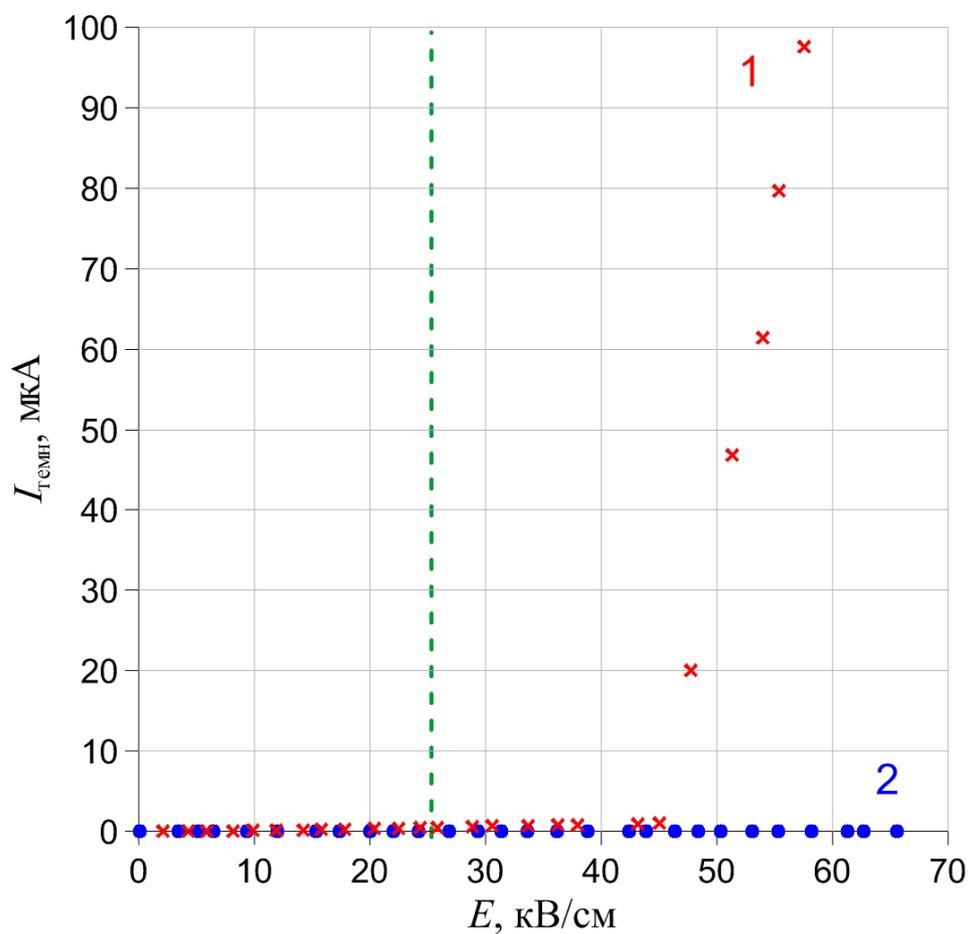


Рисунок 44. Зависимость темнового тока от напряженности электрического поля в высоковольтном зазоре в начале (1) и в конце тренировки (2).

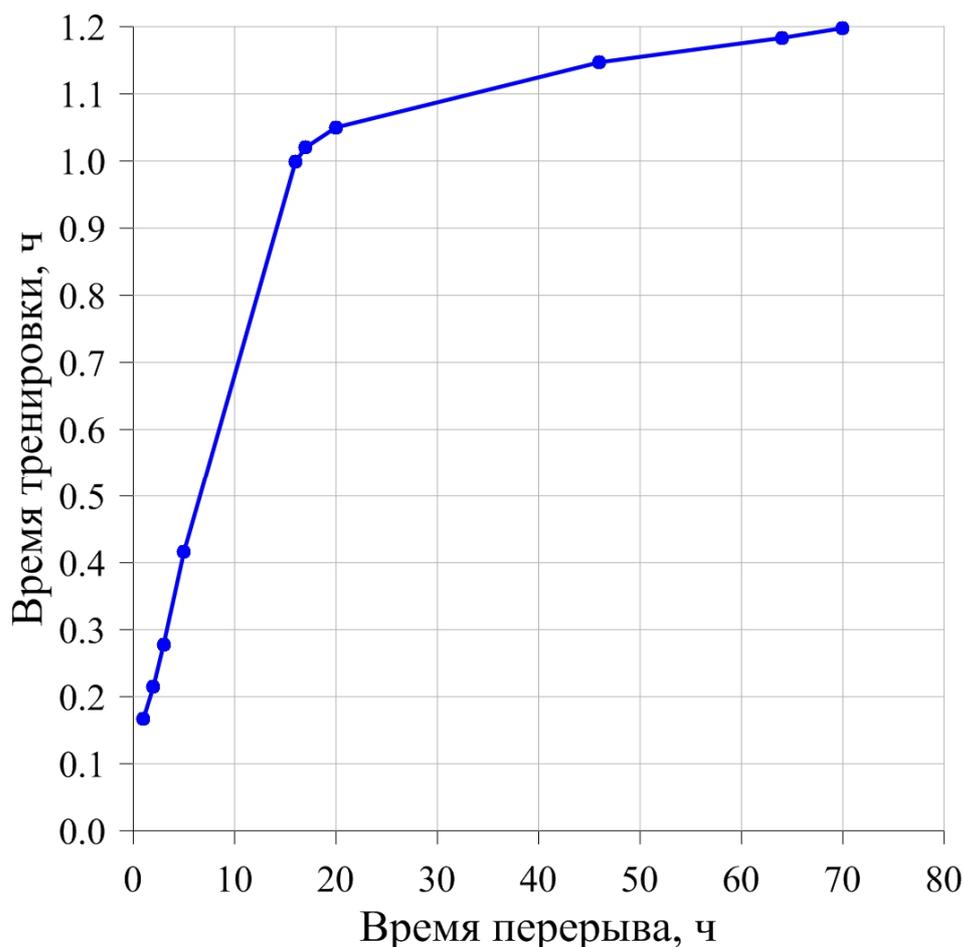


Рисунок 45. Зависимость времени тренировки зазора от времени перерыва между включениями.

Даже при отсутствии достаточной статистики в результатах видно, что основное влияние на время повторной тренировки зазора оказывают первые сутки перерыва в работе.

При уменьшении вакуумной проводимости входного и выходного отверстий для пучка в высоковольтном электроде и с учётом результатов высоковольтных экспериментов возможна откачка газа мишени через жалюзи электродов-экранов внешним насосом без потери электрической прочности зазоров разрабатываемого ускорителя-тандема.

Для высоковольтного коаксиального 45-миллиметрового вакуумного зазора при возрастании до 4×10^{-2} Па остаточного давления, определяемого

молекулами перезарядного газа, не обнаружено влияния газа на электрическую прочность зазора вплоть до 60 кВ/см.

Значения темновых токов в вакуумных зазорах после тренировки в атмосфере аргона вплоть до давлений 4×10^{-2} Па малы и не требуют увеличения мощности активного делителя напряжения для ускоряющих зазоров ускорителя-тандема.

Длительность перерыва в подаче напряжения на высоковольтный зазор более суток мало влияет на время повторной высоковольтной тренировки зазора.

Глава 4

Подъем напряжения на высоковольтных вакуумных зазорах ускорителя.

В данной главе представлены результаты экспериментов и анализ полученных данных испытаний высоковольтных элементов ускорителя-тандема.

В процессе сборки ускорителя-тандема все его элементы, находящиеся в вакууме под напряжением, тщательно очищались от пыли и загрязнений. Все электроды-экраны и сам вакуумный бак отдельно предварительно прогревались в электровакуумной печи до 400 °С. Перед подъемом напряжения проводился электровакуумный прогрев бака ускорителя-тандема до 110 °С с помощью нагревателей, намотанных на внешнюю поверхность вакуумного бака (рисунок 46).

На этапе высоковольтных экспериментов откачка вакуумного объема осуществлялась турбомолекулярным насосом, присоединённым к выходному отверстию вакуумного бака ускорителя-тандема.

Эксперименты проводились в два этапа. Сначала подъем напряжения осуществлялся на каждом отдельном зазоре, а затем проводилось их последовательное подключение и выход на полное напряжение.

Для испытания как отдельных, так и последовательно подключаемых зазоров было разработано и изготовлено специальное приспособление (рисунок 47) в виде двух перемещающихся по высоте штанг, закрепленных на изоляторе между высоковольтным электродом и стенкой бака высоковольтного выпрямителя.



Рисунок 46. Вакуумный бак ускорителя-тандема, криогенный и турбомолекулярный насосы.

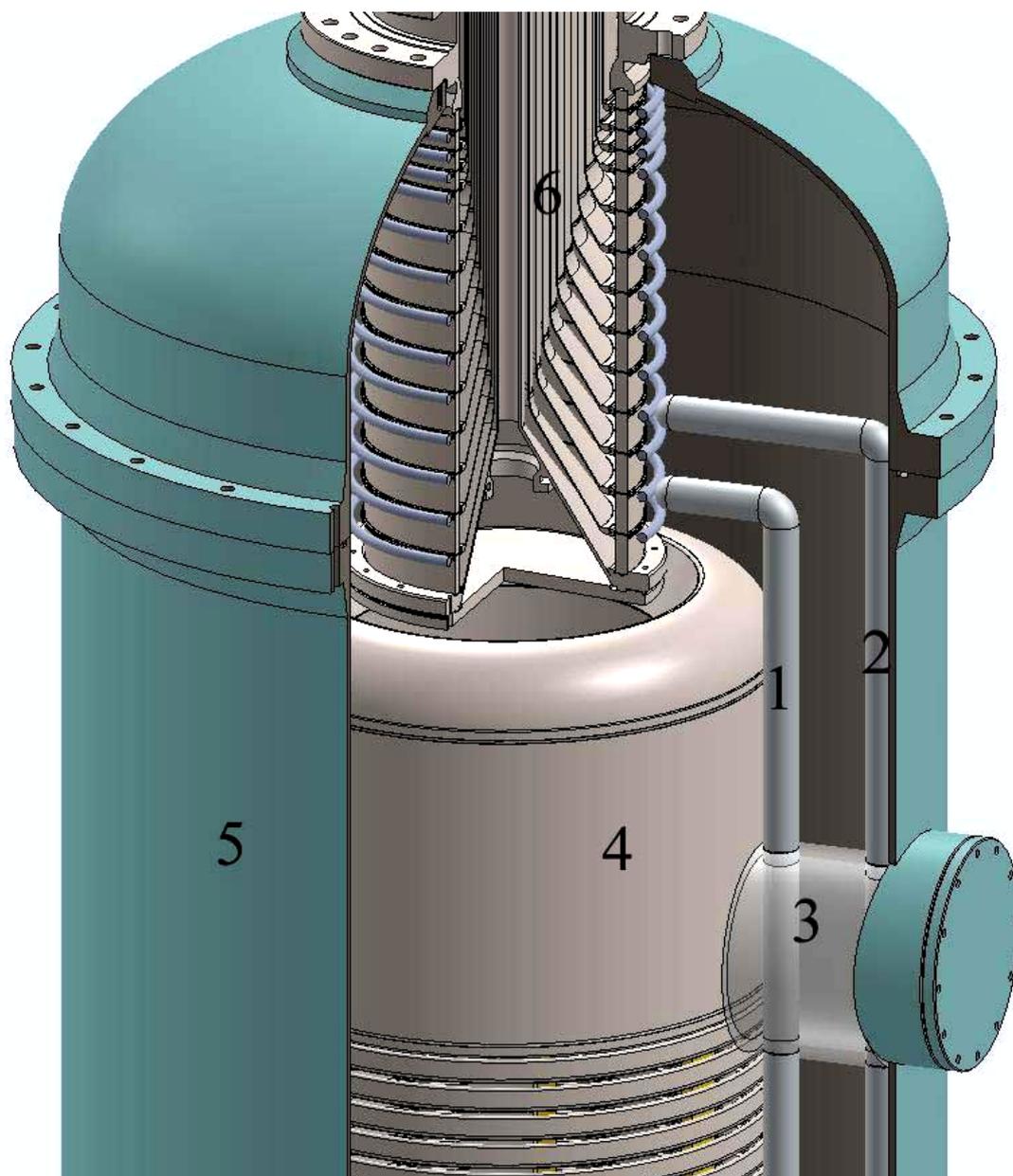


Рисунок 47. Приспособление для одиночного и последовательного подключения зазоров: 1 – штанга с высоким потенциалом; 2 – заземленная штанга; 3 – изолятор; 4 – высоковольтный электрод выпрямителя; 5 – бак выпрямителя; 6 – газовая часть проходного изолятора.

Штанга 1 имела общий потенциал с выпрямителем, штанга 2 – с землей. Каждый из 6 вакуумных ускоряющих зазоров (совместно с соответствующими газовыми зазорами, стеклянными и керамическими изоляторами) испытывался на напряжение до 200 кВ.

На рисунке 48 показан подъём напряжения на одном из ускоряющих зазоров при позазорной тренировке. Видно, что первый пробой прошёл на уровне 140 кВ, что соответствует напряжённости по поверхности стеклянного изолятора ~ 10 кВ/см.

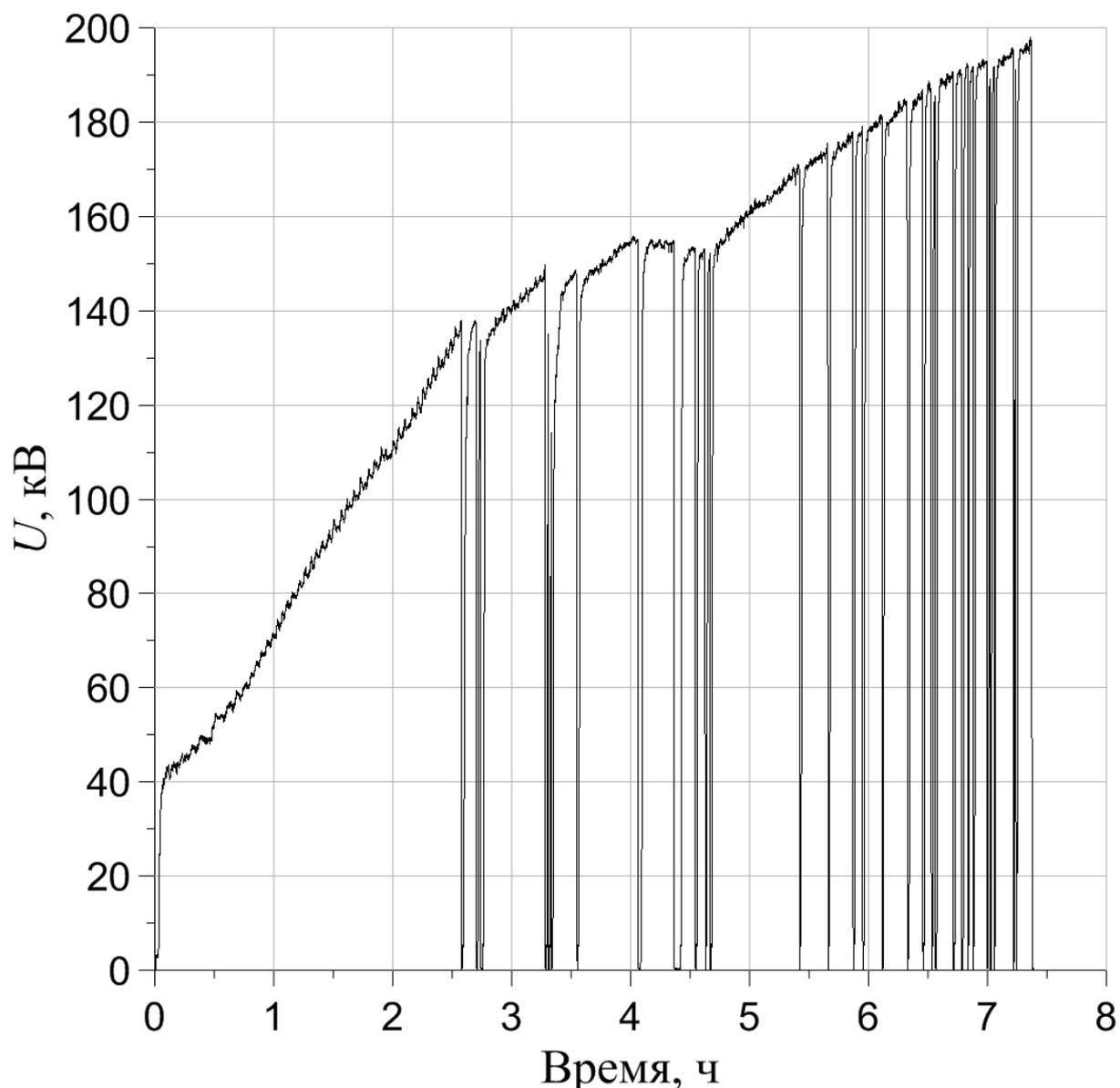


Рисунок 48. Подъём напряжения на одиночном зазоре.

Испытания с последовательно подключаемыми зазорами проводились при давлении элегаза внутри бака высоковольтного выпрямителя – 6 атм, внутри проходного изолятора – 3 атм. На рисунке 49 представлены графики зависимости пробивного напряжения от количества пробоев для одного, двух,

трех, четырех и пяти последовательно подключенных зазоров. Из графиков видно, что с увеличением числа зазоров пробивное напряжение ускорителя-тандема растет, а на пяти зазорах было достигнуто напряжение 1000 кВ.

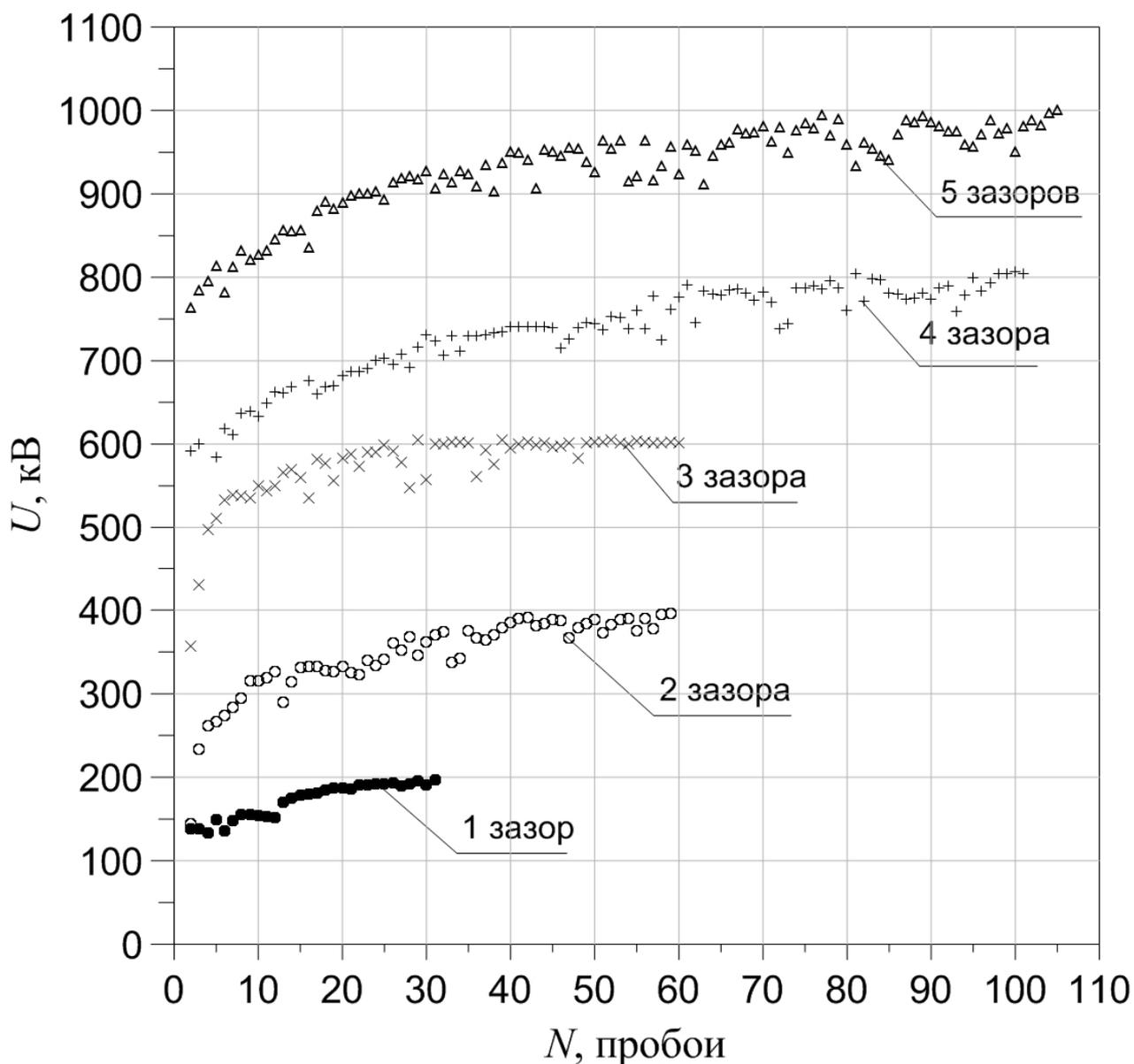


Рисунок 49. Зависимость пробивного напряжения от количества пробоев.

Достигнутые в экспериментах напряженности ~ 30 кВ/см (рисунок 50) выше уровня рабочей напряженности ~ 25 кВ/см, принятой для ускорителя-тандема.

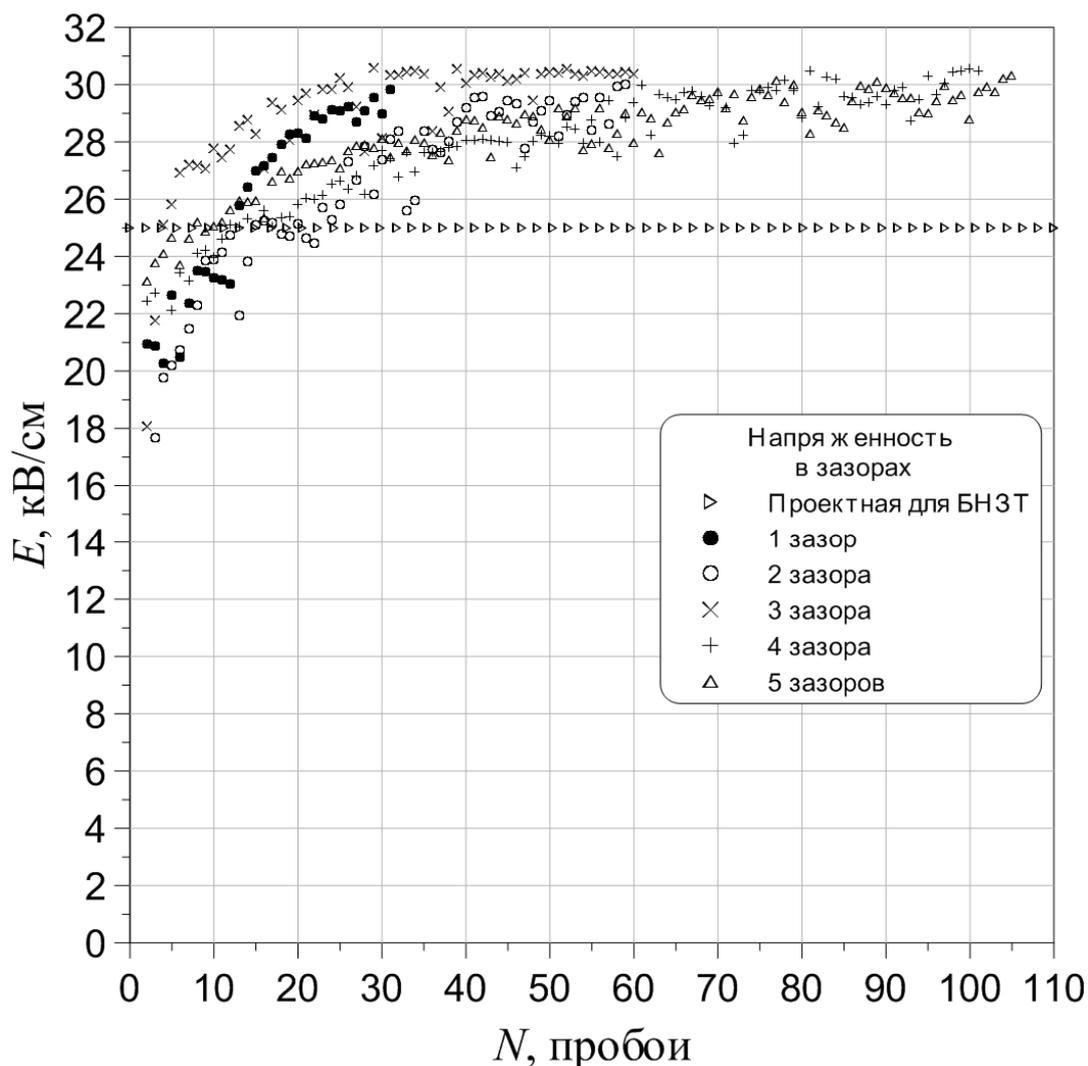


Рисунок 50. Зависимость напряженности в зазорах от количества пробоев.

После проверки на электрическую прочность всех элементов отдельных ускоряющих зазоров ускоритель был включён на полное напряжение. Тренировочная кривая начала одного из первых экспериментов представлена на рисунке 51а. Первый пробой прошёл при напряжении 770 кВ, что соответствует средней напряженности электрического поля в зазорах 20 кВ/см. Подъём напряжения и пробой сопровождался изменением остаточного давления в вакуумном баке. На ускорителе было получено напряжение 1 МВ, динамика выхода на режим без пробоев показана на рисунке 51. Максимальное время длительно выдерживаемого напряжения без пробоев составило более 2 часов.

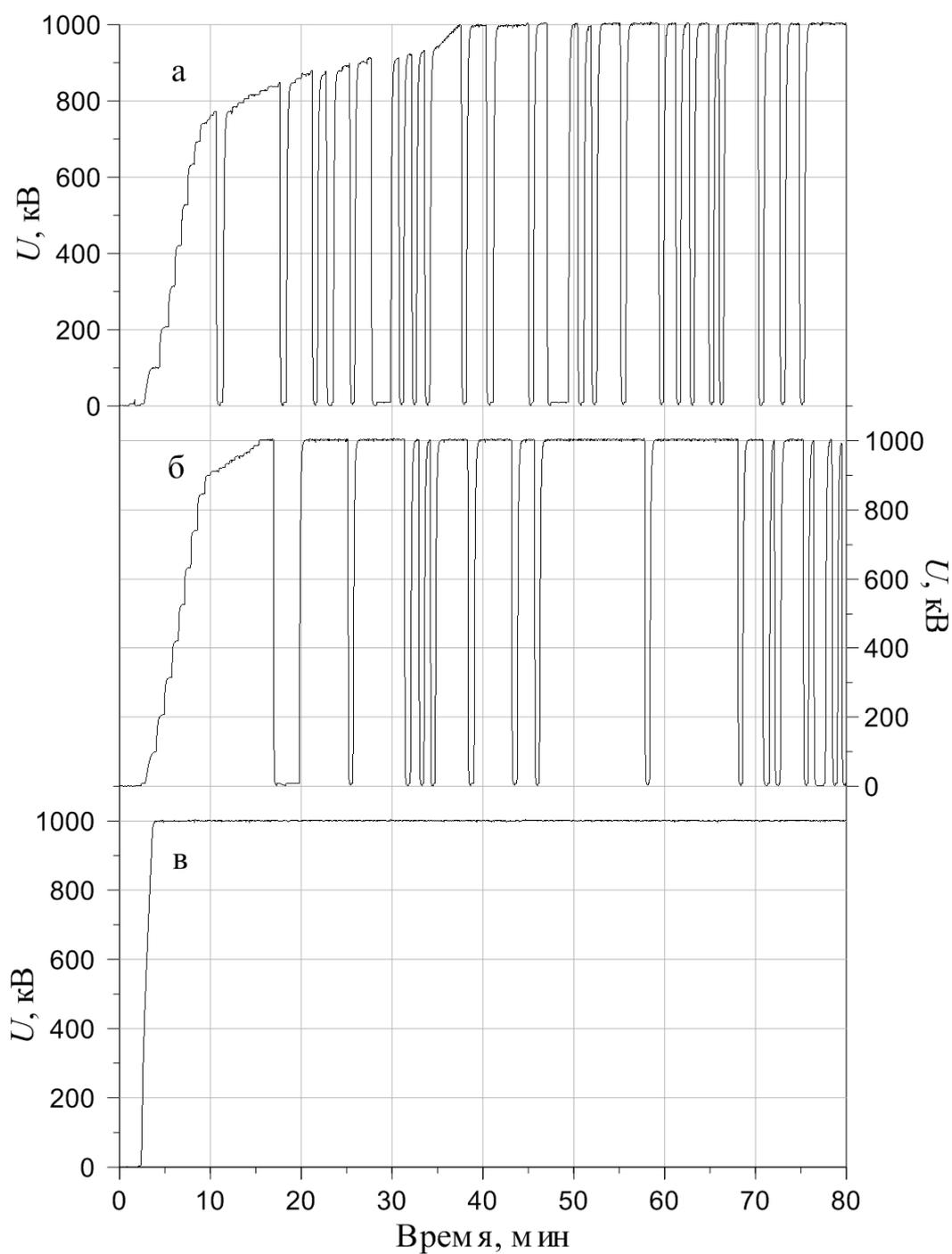


Рисунок 51. Подъем напряжения на ускорителе до 1 МВ (а – подъем и выдержка с пробоями; б – подъем без пробоев, выдержка с пробоями; в – режим без пробоев).

Для выяснения влияния перезарядного газа на высоковольтную прочность ускорителя-тандема были проведены следующие эксперименты. В

вакуумный объем напускался газ до давления 1×10^{-2} Па, затем было подано напряжение 1 МВ. При этом вакуум изменялся в диапазоне от 1×10^{-2} до 2×10^{-3} Па. Результаты эксперимента показаны на рисунке 52. Из графика видно отсутствие падения электрической прочности вакуумных зазоров.

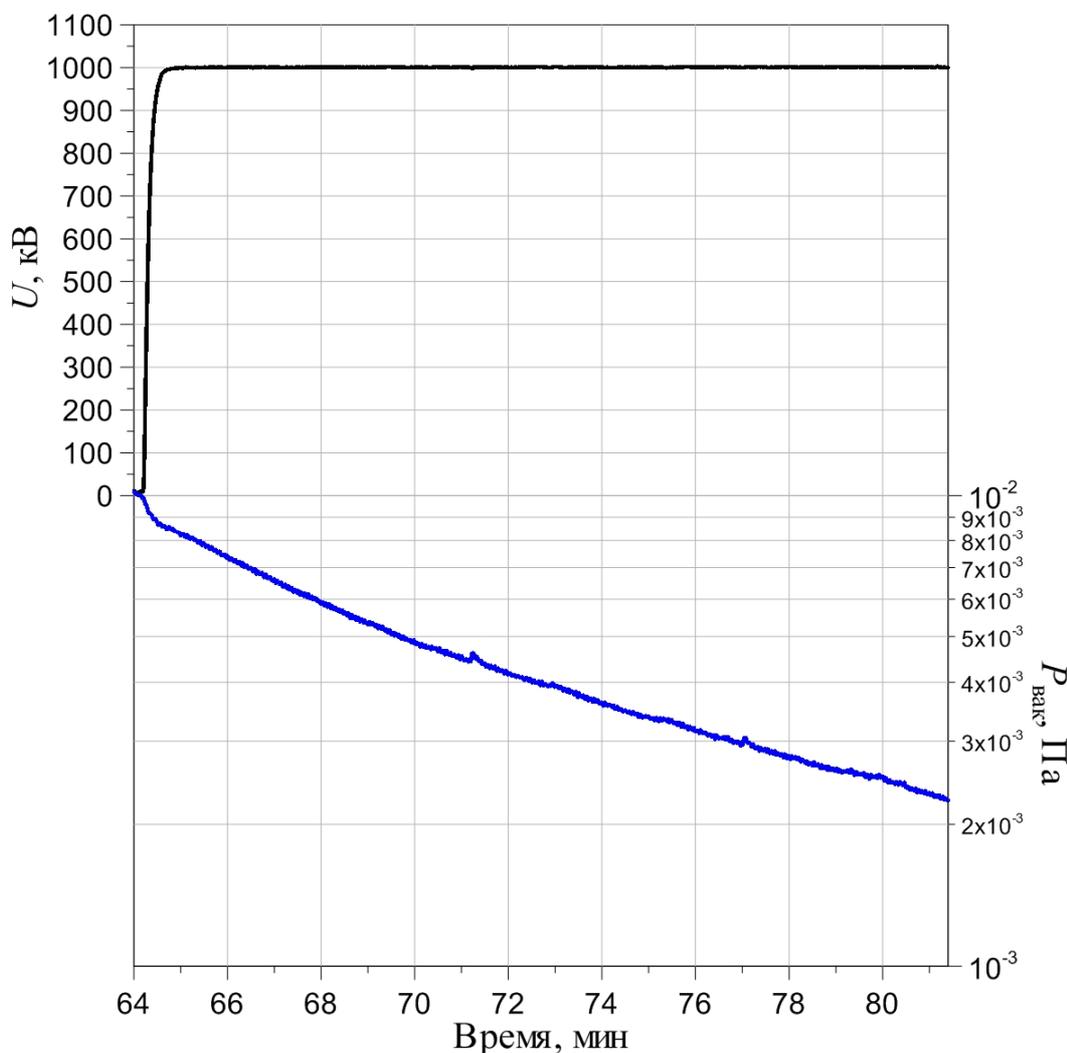


Рисунок 52. Временная зависимость напряжения и остаточного давления при напуске перезарядного газа (Ar).

В результате проведенных экспериментов достигнуто требуемое напряжение 1 МВ и обеспечена высоковольтная прочность ускорителя-тандема с вакуумной изоляцией на этом уровне напряжения.

Глава 5

Темновые токи в вакуумных зазорах ускорителя-тандема

Проводимость вакуумного изоляционного промежутка может возникать при напряжении ниже пробивного [22]. Протекающие при этом темновые токи сильно зависят от напряженности на электродах и сравнительно медленно изменяются во времени, хотя могут наблюдаться и значительные скачкообразные изменения.

Сильная зависимость величины темновых токов и характера их изменения от условий эксперимента является одной из основных особенностей, затрудняющих их аналитическое описание. Темновой ток распределен по поверхности электрода неравномерно, его стабильность во времени и интенсивность зависят от многих факторов.

Темновые токи состоят в основном из электронов [22], хотя могут включать в себя и ионную составляющую, причем электронная составляющая, которая может быть обусловлена либо автоэмиссией с неровностей микрорельефа, либо, в случае присутствия ионной компоненты, – эмиссией электронов при бомбардировании катода ионами, быстро возрастает с увеличением напряженности.

При длительном приложении постоянного напряжения возникают микрозаряды – самогасящиеся маломощные импульсы тока продолжительностью $10^{-4} \div 10^{-1}$ с, повторяющиеся с частотой $0.1 \div 100$ Гц, появление которых сопровождается десорбцией адсорбированных молекул газа с поверхности электродов.

При малых зазорах между электродами микрозаряды возникают на фоне значительных темновых токов (до 10^{-3} А), однако по мере увеличения

межэлектродного промежутка до сантиметровых расстояний микроразряды возникают раньше заметных темновых токов.

Возникновение микроразрядов между электродами сопровождается интенсивным газовыделением, поэтому при большой площади электродов может наблюдаться увеличение давления в вакуумном объеме. Стабилизация напряжения приводит к постепенному уменьшению десорбции, которая вновь может возрасти при дальнейшем подъеме напряжения. Для предотвращения возникновения разряда в десорбируемом газе скорость подъема напряжения ограничивают.

В ускорителе-тандеме рабочая напряженность электрического поля в межэлектродном промежутке составляет ~ 25 кВ/см в режиме генерации тепловых нейтронов при общей площади электродов в десятки квадратных метров. Вакуум во время выстойки под напряжением в режиме работы без пучка изменялся в пределах $10^{-3} \div 10^{-5}$ Па. В такой системе, согласно [12, 22, 23], 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 пучка. Возникает необходимость в оценке величины темновых токов и их распределения в ускоряющих зазорах.

§ 5.1. Анализ полученных экспериментальных данных

При подъеме напряжения на ускорителе-тандеме (рисунок 53), сопровождавшемся увеличением остаточного давления, был обнаружен

эффект: расхождение показаний делителя напряжения изолятора ($U_{\text{д.изол.}}$ - кривая 2) и показаний делителя напряжения высоковольтного источника ($U_{\text{д.ист.}}$ - кривая 1).

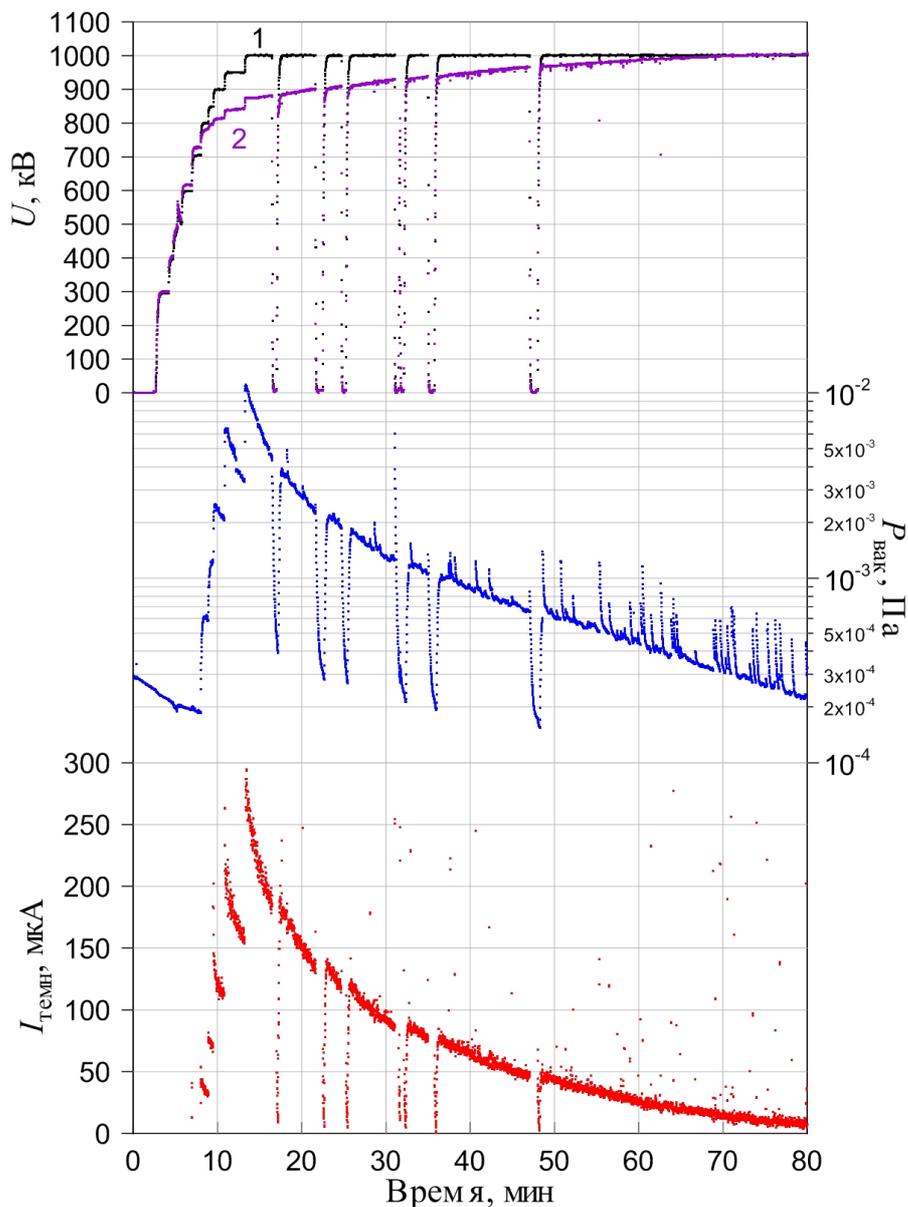


Рисунок 53. Временная зависимость изменения напряжения (1 – $U_{\text{д.ист.}}$, 2 – $U_{\text{д.изол.}}$), вакуума и темнового тока при тренировке ускорителя.

В условиях отсутствия неконтролируемых токов в высоковольтных зазорах показания делителей источника и изолятора должны совпадать.

В результате выстойки под напряжением разница в показаниях делителей уменьшалась и за время ~ 1.5 ч исчезала полностью. Порог

остаточного давления, за которым начинаются отличия в показаниях делителей напряжения, превысил 1.33×10^{-2} Па.

Падение значений до нуля на кривых напряжения соответствует пробоям в ускорителе. Подъем напряжения после пробоя не происходил мгновенно, поэтому на кривой вакуума фиксировалось улучшение остаточного давления в периоды отсутствия напряжения. Положительные броски остаточного давления также соответствовали пробоям. Часть бросков вакуума с изменением остаточного давления соответствовала частичным пробоям в ускорителе, которые не приводили к срабатыванию защиты высоковольтного выпрямителя при пробое. Порог начала ухудшения вакуума совпадал с порогом появления темнового тока в вакуумном объеме ускорителя-тандема по напряжению.

Обнаруженный эффект можно объяснить появлением темновых токов (рисунок 53) в ускоряющих зазорах ускорителя-тандема, сопровождающимся десорбцией адсорбированных молекул газа с поверхности электродов при подъеме напряжения.

На рисунке 54 (аппроксимация) линией и экспериментальными точками показано отношение $U_{\text{д.изол}}/U_{\text{д.ист}}$ в зависимости от величины темнового тока, пересчитанное из рисунка 53, при напряжении 1 МВ. Значения отношения напряжений усреднены по пяти экспериментам с разбросом не более $\pm 5\%$ относительно среднего. Значения темнового тока в пределах каждой экспериментальной точки $U_{\text{д.изол}}/U_{\text{д.ист}}$ также отличались мало.

Нелинейной зависимости $U_{\text{д.изол}}/U_{\text{д.ист}}$ от $U_{\text{д.ист}}$ в эксперименте соответствовала нелинейная зависимость тока нагрузки ($I_{\text{нагр}}$) источника напряжения от $U_{\text{д.ист}}$. Зависимость разницы между током нагрузки источника напряжения и суммой токов всех резистивных делителей ($I_{\text{темн}} = I_{\text{нагр}} - \sum I_{\text{дел}}$) ускорителя-тандема от напряжения источника показана на рисунке 55 сплошной линией (аппроксимация) с экспериментальными точками.

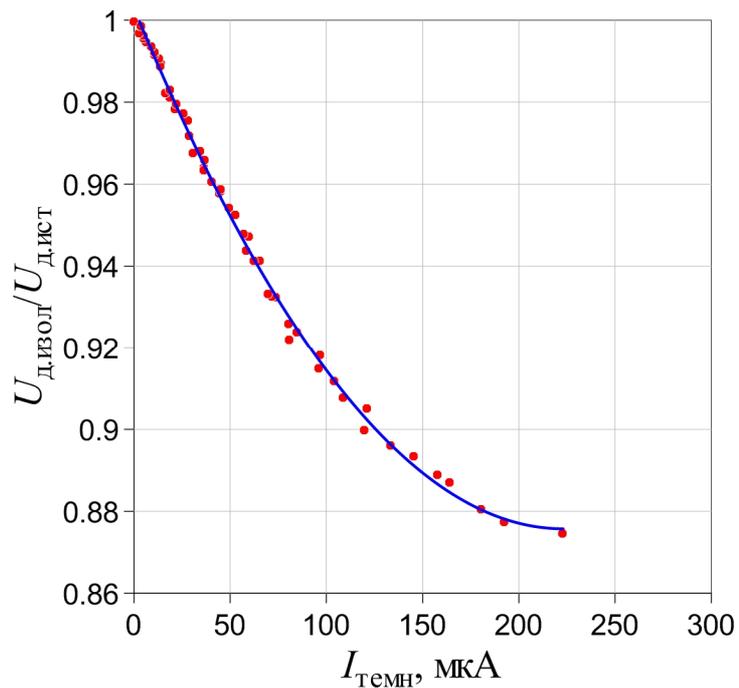


Рисунок 54. Зависимость отношения $U_{\text{д.изол.}}/U_{\text{д.ист.}}$ от величины темновых токов в шестом зазоре.

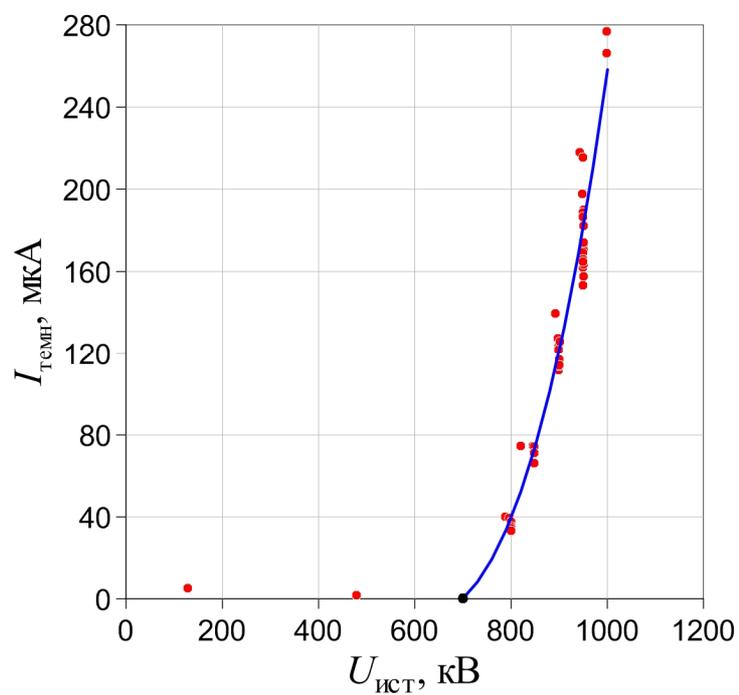


Рисунок 55. Экспериментальная зависимость темновых токов в ускоряющих зазорах ускорителя-тандема до тренировки от напряжения источника.

§ 5.2. Оценка величины темновых токов в ускоряющих зазорах

Для оценки этих токов рассмотрим схему делителей напряжения высоковольтного источника и проходного изолятора с дополнительными переменными сопротивлениями, моделирующими появление проводимости вакуумной изоляции ускоряющих зазоров (рисунок 56).

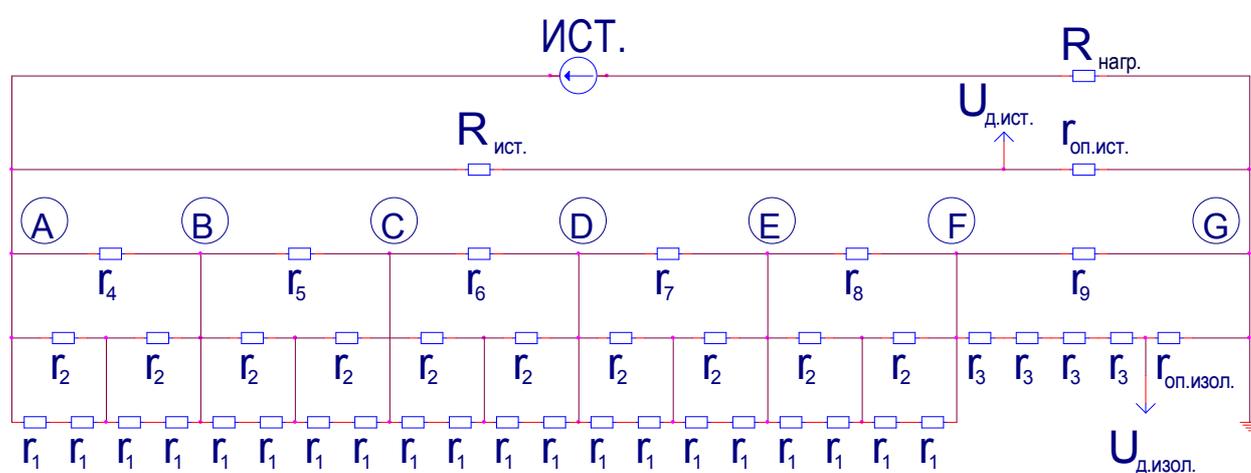


Рисунок 56. Схема активных делителей напряжения высоковольтного источника и проходного изолятора: r_1 – сопротивления делителя вакуумной части изолятора; r_2 и r_3 – сопротивления делителя газовой части изолятора; $r_{оп.изол.}$ – опорное сопротивление делителя изолятора; $R_{ист}$ и $r_{оп.ист}$ – плечи делителя источника; $U_{д.изол}$ и $U_{д.ист}$ – сигналы с делителей изолятора и источника, умноженные на соответствующие коэффициенты деления; $r_4 \div r_9$ – сопротивления утечки при возникновении темнового тока в вакуумных зазорах.

Делитель мощного источника напряжения, расположенный внутри вторичного контура выпрямителя, находится в равномерном электростатическом поле. Изолирующая среда – элегаз. Одним концом делитель соединён с высоковольтным электродом источника, а другим концом

– с корпусом бака. Промежуточные точки соединения делителя с элементами установки отсутствуют. Показания делителя источника считались основными.

Делитель проходного изолятора расположен в элегазе. Элементы делителя закреплены на электродах как вакуумной, так и газовой частей изолятора. Основная функция делителя – равномерное распределение потенциалов по электродам ускоряющих зазоров. Все сопротивления делителя, обозначенные на схеме, состоят из набора последовательно-параллельно соединённых резисторов.

Сопротивления делителя изолятора соединены с электродами вакуумных ускоряющих зазоров ускорителя-тандема в точках А, В, С, D, Е, F, G, причём точке А соответствует высоковольтный электрод ускорителя-тандема, а G – `земляной` электрод. Нумерация электродов и ускоряющих зазоров начинается от высоковольтного электрода. Сопротивления $r_4 \div r_9$ моделируют появление проводимости и, соответственно, темновых токов между ускоряющими электродами. В случае отсутствия темновых токов $r_4 \div r_8 \rightarrow \infty$, как видно из схемы, значение тока, протекающего через сопротивление r_9 , можно определить как разность между током нагрузки источника напряжения и суммой токов резистивных делителей ускорителя-тандема. Такой способ определения тока по шестому ускоряющему зазору и использовался в эксперименте.

При появлении тока только в шестом зазоре или превышении этого тока над остальными уменьшается $U_{\text{д.изол.}}/U_{\text{д.ист.}}$ и одновременно возрастает напряжение на каждом из остальных пяти ускоряющих зазоров ускорителя-тандема. 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 шестого ускоряющего зазора, показания делителя изолятора будут превышать показания делителя источника.

В случае отсутствия в системе иных темновых токов, кроме фиксируемого в шестом зазоре, напряжение делителя изолятора ($U_{\text{д.изол.}}$) вычислялось бы, согласно схеме, как

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

Экспериментальные значения напряжения $U_{\text{д.изол}}$ отличаются от вычисленных по указанной формуле (рисунок 57), что говорит о невозможности объяснения наблюдаемого в эксперименте расхождения показаний делителей изолятора и высоковольтного источника наличием темнового тока только в шестом ускоряющем зазоре.

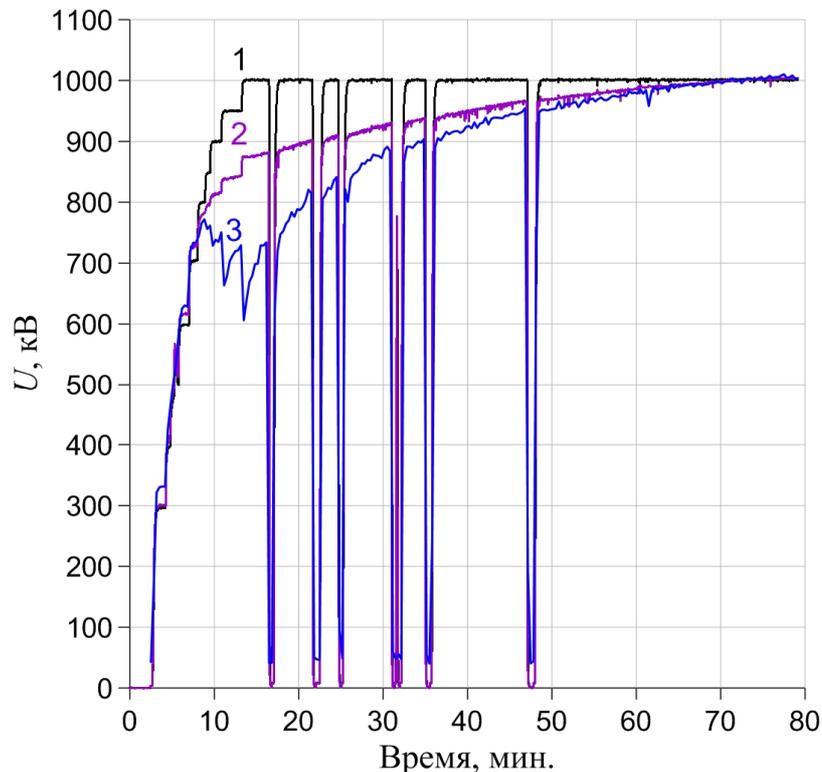


Рисунок 57. Временная зависимость напряжения на делителях высоковольтного источника (1), проходного изолятора (2) и расчетная кривая напряжения на изоляторе при наличии темновых токов только в шестом зазоре(3).

Диаметры жалюзи, сквозь щели которых происходит основная откачка газа из внутреннего объема ускорителя-тандема, геометрия электродов всех

ускоряющих зазоров, кроме шестого, и рабочая напряжённость электрического поля во всех зазорах отличаются мало. Тогда и величины токов утечки в пяти зазорах тоже не должны существенно отличаться.

Геометрия шестого 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 шестого 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 первых пяти ускорительных зазорах использовалась упрощенная эквивалентная схема (рисунок 58) делителей напряжения высоковольтного источника и проходного изолятора.

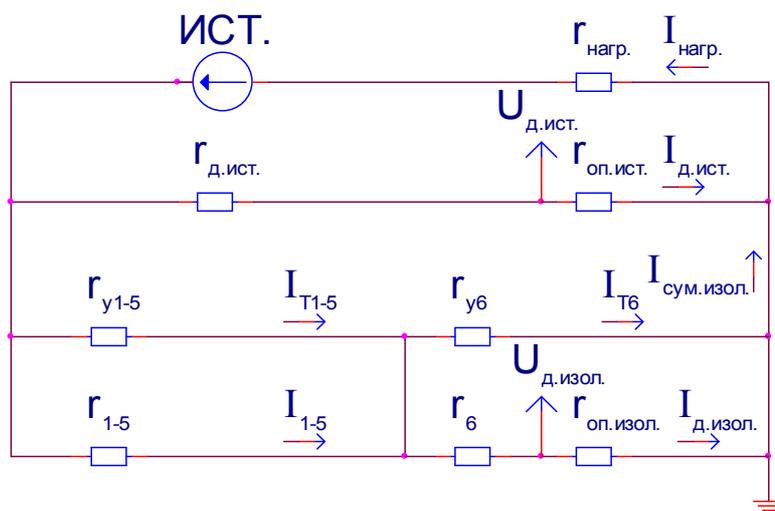


Рисунок 58 Упрощенная эквивалентная схема делителей напряжения высоковольтного источника и проходного изолятора.

Суммарный ток через шестой ускоряющий зазор и соответствующий ему участок делителя изолятора:

$$I_{\text{сум.изол.}} = I_{\text{Т6}} + I_{\text{д.изол.}},$$

напряжение на шестом зазоре:

$$U_6 = I_{T6} \cdot r_{y6} = I_{д.изол.} \cdot (r_6 + r_{оп.изол.}).$$

Следовательно, общее напряжение на первых пяти зазорах и соответствующих им участках делителя изолятора:

$$U_{1-5} = U_{ист} - U_6,$$

темновой ток первых пяти вакуумных зазоров можно теперь записать как

$$I_{T1-5} = I_{сум.изол.} - \frac{U_{1-5}}{r_{1-5}}.$$

На рисунке 59 представлены результаты вычислений для одного из проведенных экспериментов.

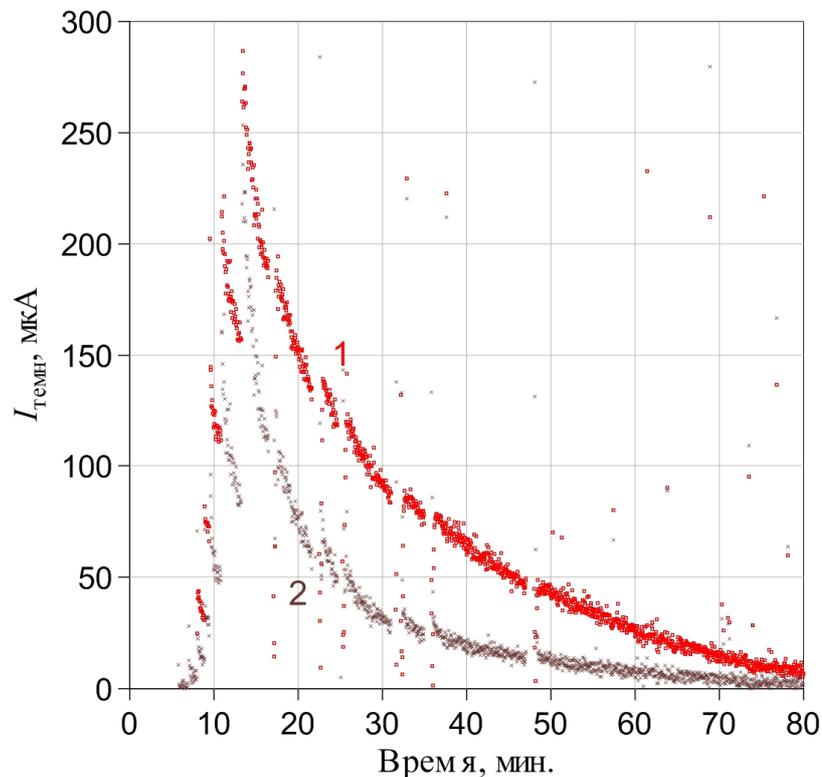


Рисунок 59. Изменение темнового тока в 6-м зазоре (1) в ходе эксперимента и расчетная кривая темнового тока в первых пяти зазорах (2).

Видно, что значение среднего тока по первым пяти зазорам I_{T1-5} меньше почти в 2 раза, чем темновой ток, фиксируемый в шестом зазоре. Кроме того, I_{T1-5} в ходе эксперимента спадает до минимального значения быстрее, чем ток в шестом зазоре. Это можно объяснить отличающимся от остальных качеством

обработки поверхности “земляного” электрода, а также особенностями его геометрии, такими как наличие отверстия для криогенного насоса и отверстий бóльшего, чем в остальных электродах, радиуса, для ввода-вывода пучка.

В дальнейшем эту методику можно использовать для определения осаждения тока пучка на ускоряющие высоковольтные электроды.

§ 5.3. Регистрация автоэмиссионного тока большой интенсивности после увеличения апертуры ускорительного канала

В проведенных в 2008-10 гг. экспериментах был получен протонный пучок с током в сотни микроампер, а эпизодически в течение короткого времени – до 1 мА. Такого тока пучка вполне хватало для демонстрации генерации нейтронов [24] и для исследований по генерации монохроматических гамма-квантов [25], но явно недостаточно для планируемых *in vitro* исследований БНЗТ и других приложений.

В начале 2011 г. были предложены и реализованы два изменения, нацеленные на увеличение тока протонного пучка. Во-первых, была изготовлена и установлена новая обдирочная мишень с бóльшим внутренним диаметром – 16 мм вместо 10 мм [26]. Во-вторых, в ускорительном тракте отрицательных ионов водорода были увеличены отверстия входных диафрагм всех электродов с 20 мм до 58 мм в диаметре, за исключением высоковольтного электрода, в котором диаметр отверстия остался 20 мм.

Обычно в течение часа тренировки величина темнового тока уменьшалась вплоть до единиц микроампер. В данном случае при подъеме напряжения (рисунок 60) темновой ток (рисунок 61) не только не уменьшился, а, наоборот, через 100 минут резко увеличился до $3 \div 4$ мА. Такое поведение темнового тока было зарегистрировано несколько раз.

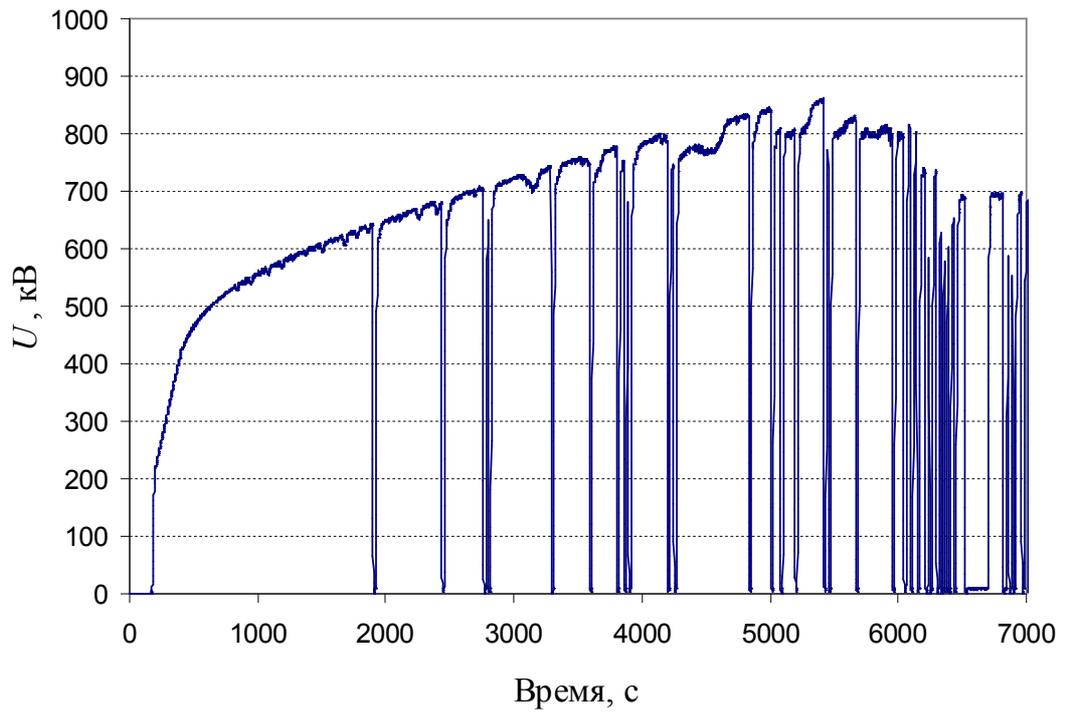


Рисунок 60. Характерная зависимость напряжения при тренировке ускорителя.

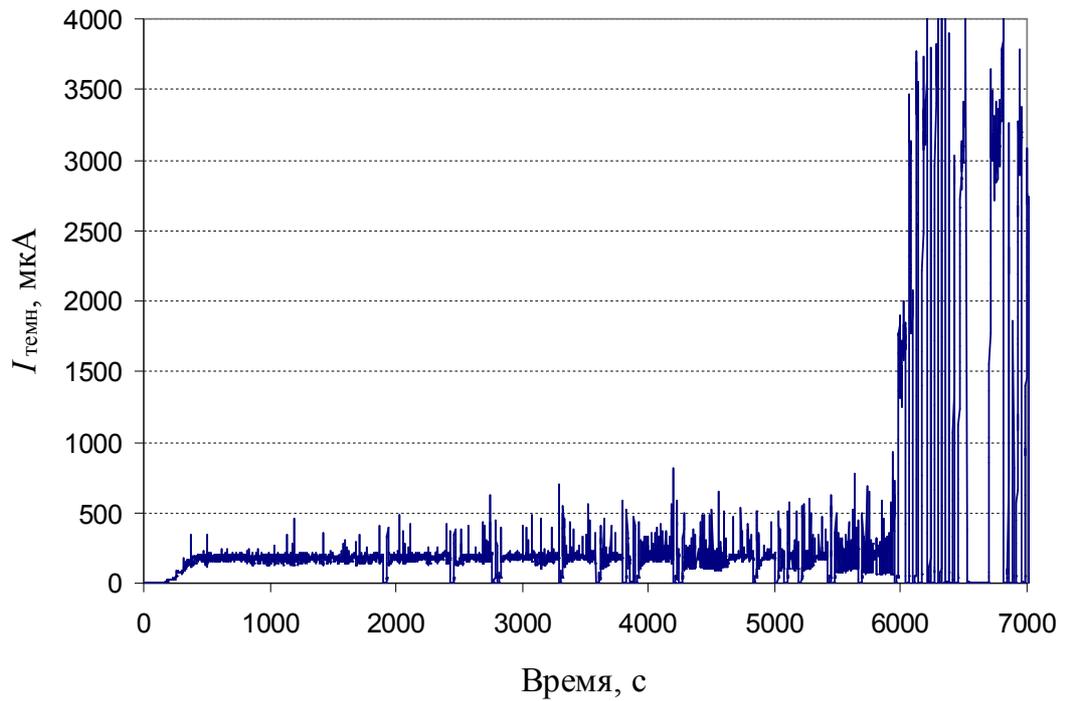


Рисунок 61. Характерная зависимость темнового тока при тренировке ускорителя.

На рисунках 62 и 63 видно, что при напряжении 790 ± 25 кВ в течение 500 с в зазоре между землей и ускоряющим электродом течет темновой ток 180 ± 70 мкА. В омическом делителе проходного изолятора через опорное сопротивление течет ток 460 ± 10 мкА. Уменьшение напряжения делителя изолятора относительно напряжения ускорителя на 18 % (рисунок 62) указывает на бóльший ток в верхней части делителя, распределяющего потенциал между электродами, и, соответственно, меньший, чем в шестом зазоре, темновой ток в других пяти зазорах. Если предположить равенство тока в этих пяти зазорах, то получим, что в этой части омического делителя течет ток, на 100 мкА больший, т.е. равный 560 мкА, и, соответственно, темновой ток в зазорах между электродами на 100 мкА меньше темнового тока в зазоре между землей и первым электродом, т.е. равен 80 мкА.

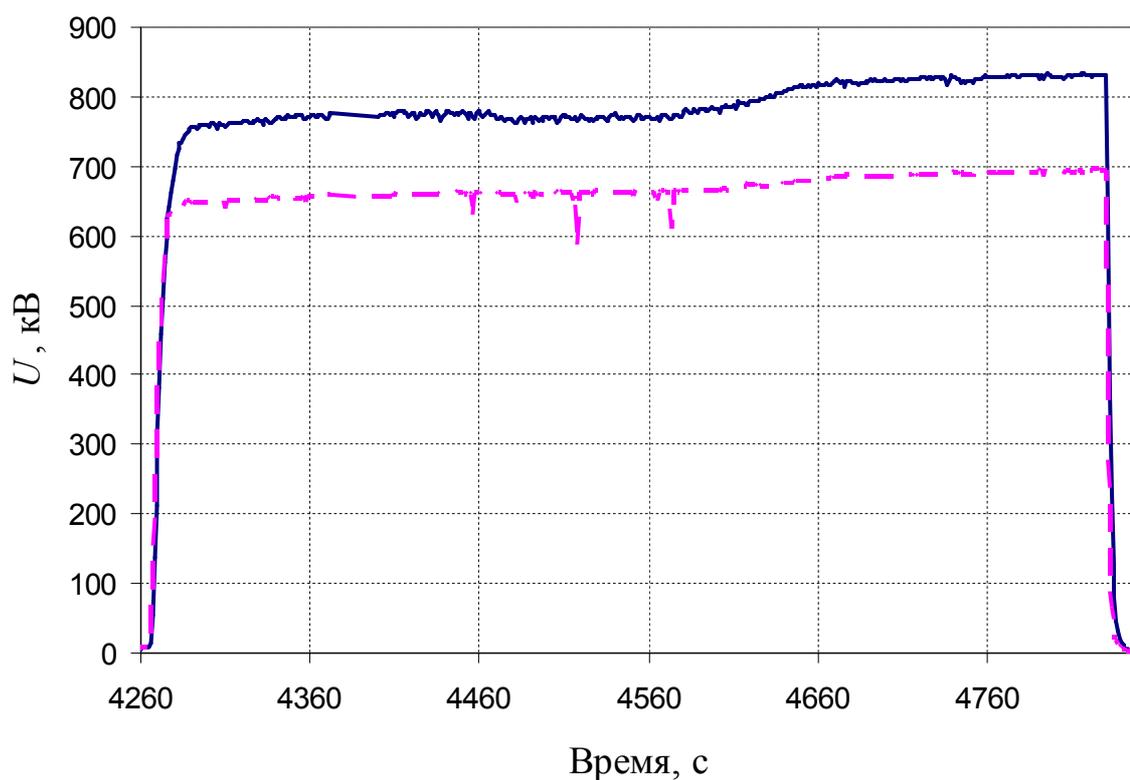


Рисунок 62. Временная зависимость напряжения ускорителя (сплошная линия, сверху) и напряжения делителя изолятора (пунктирная).

На рисунке 63 видно интересное явление, когда ухудшение вакуума примерно в 2 раза (с $4 \cdot 10^{-3}$ до $7 \cdot 10^{-3}$ Па вблизи насоса) привело к уменьшению мощности рентгеновского излучения.

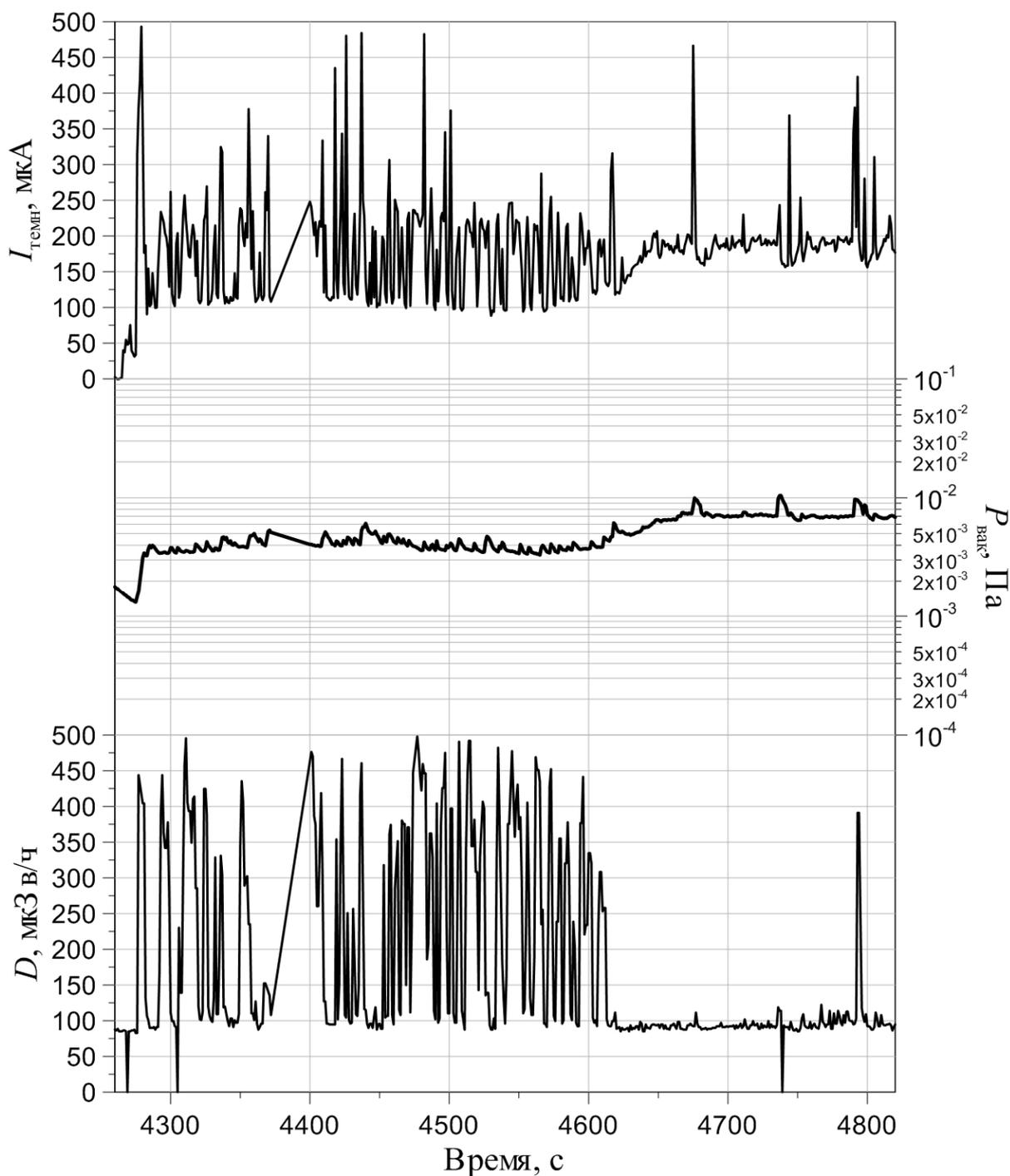


Рисунок 63. Временные зависимости темнового тока, вакуума и рентгеновского излучения.

В процессе дальнейшей тренировки ускорителя шли частые пробои, и напряжение уже не поднималось до первоначального. На рисунках 64 и 65 видно, что в течение 100 с при напряжении 690 ± 30 кВ течет темновой ток величиной 3.2 ± 0.5 мА. В данном случае через опорное сопротивление омического делителя проходного изолятора течет ток 560 ± 10 мкА. Поскольку напряжение делителя изолятора теперь уже не уменьшилось, а, наоборот, увеличилось на 18 % относительно равновесного, то это указывает на то, что темновой ток между электродами теперь несколько больше темнового тока с земли. Если предположить равенство тока во всех зазорах между электродами, то получим, что в этой части омического делителя течет ток, на 100 мкА меньший, т.е. 460 мкА, и, соответственно, темновой ток в зазорах между электродами на 100 мкА больше, т.е. равен 3.3 ± 0.5 мА.

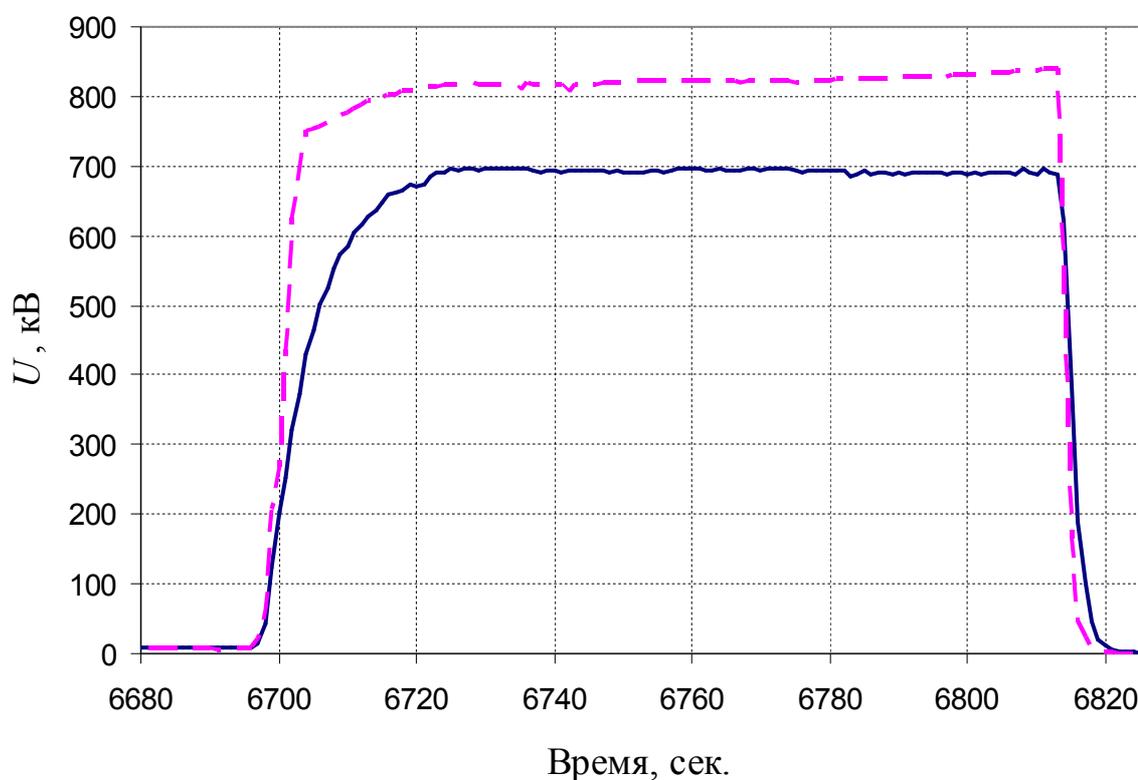


Рисунок 64. Временная зависимость напряжения ускорителя (сплошная линия, снизу) и напряжения делителя изолятора (пунктирная).

Значительно больший ток по сравнению со стандартным режимом тренировки (в 14 раз) приводит к увеличению газоотделения в 2.2 раза, зато мощность дозы возрастает в 75 раз. Последнее обстоятельство более сильного возрастания радиации указывает на возможность возникновения разряда в зазоре не между соседними электродами, а между, например, корпусом вакуумного бака или первым электродом и высоковольтным.

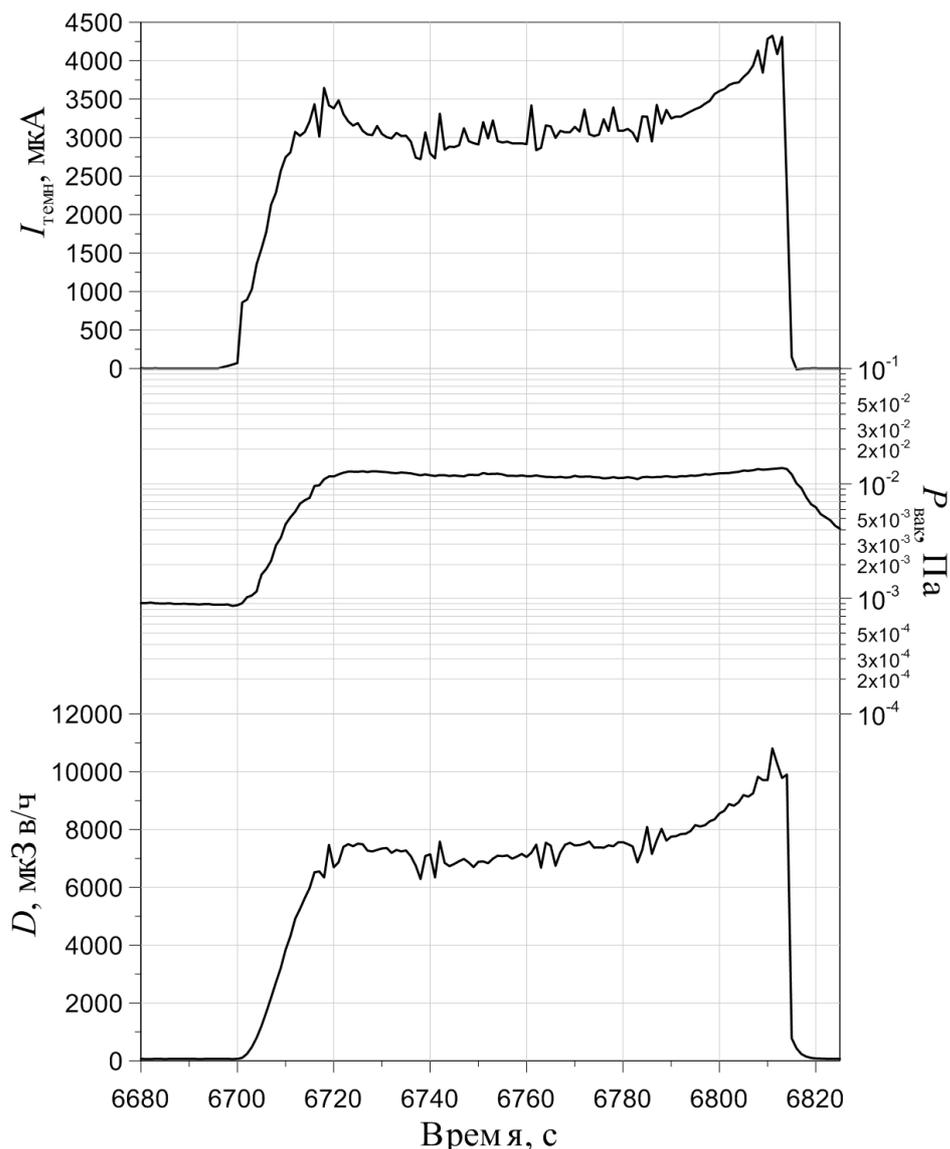


Рисунок 65. Временные зависимости темнового тока, вакуума и рентгеновского излучения.

Измеренный энергетический спектр рентгеновского излучения при протекании данного тока большой интенсивности представлен на рисунке 66.

Видно, что распределение сместилось в область больших значений энергий, что подтверждает сделанный в работе вывод о том, что эмитированные электроны попадают в ускорительный канал и ускоряются вплоть до полного напряжения.

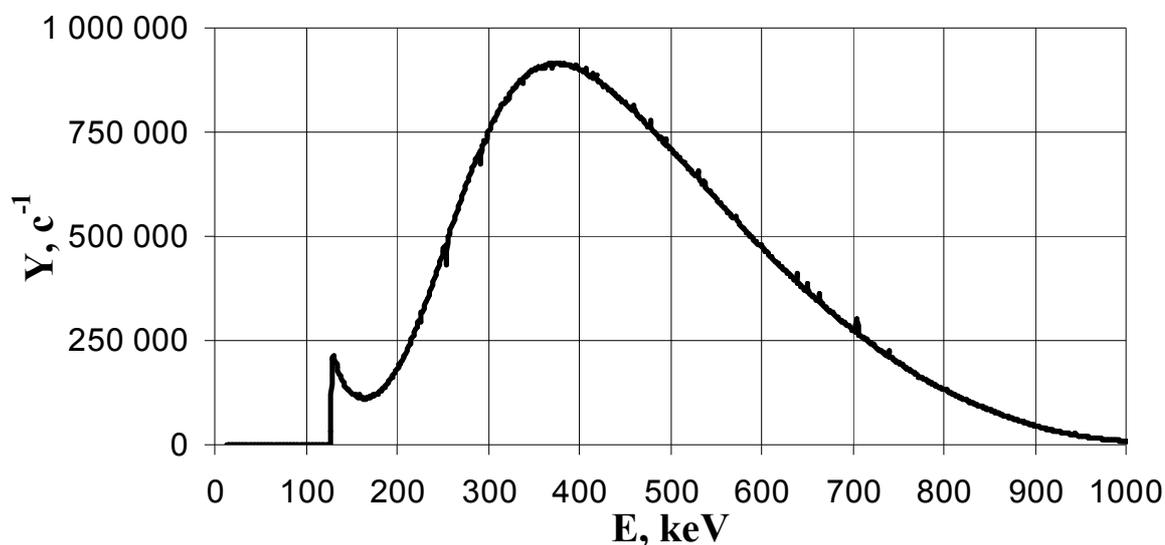


Рисунок 66. Регистрируемый энергетический спектр рентгеновского излучения при протекании темнового тока большой интенсивности.

После вскрытия вакуумной камеры ускорителя обнаружено расплавление части диафрагмы высоковольтного электрода (рисунок 67).



Рисунок 67. Фотография диафрагмы высоковольтного электрода.

Проведенный численный расчет электростатических полей в ускорителе показал, что в рамке крепления диафрагмы имеются места повышенной напряженности электрического поля, с которых может идти усиленная эмиссия электронов. На рисунках 68 и 69 они отмечены стрелкой.

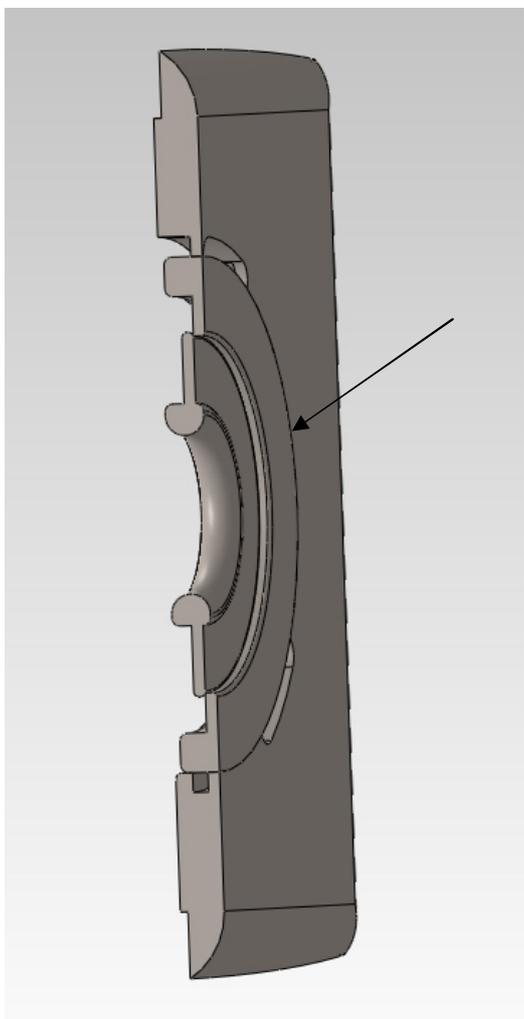


Рисунок 68. Разрез диафрагмы, вставленной в рамку крепления: диаметр отверстия диафрагмы 20 мм.

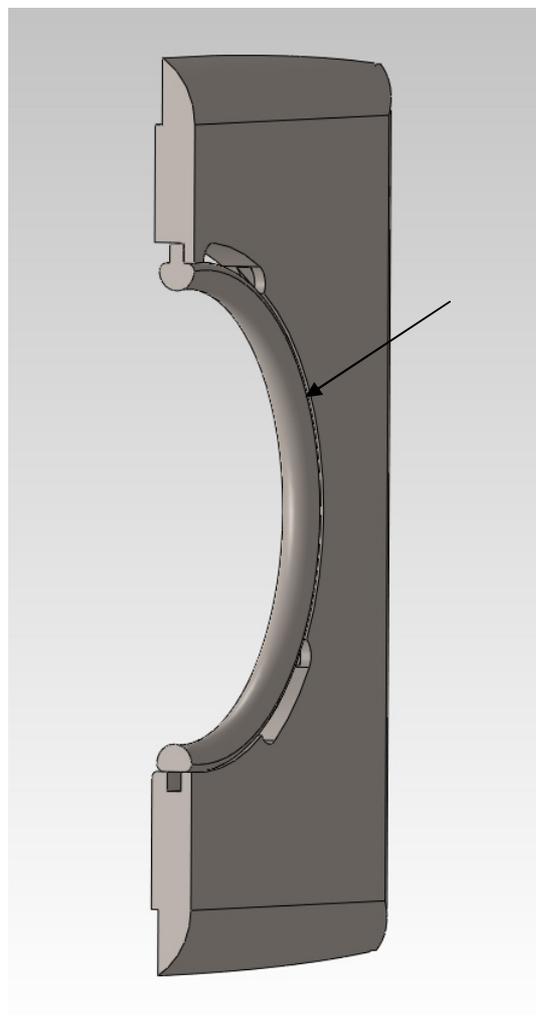


Рисунок 69. Разрез диафрагмы, вставленной в рамку крепления: диаметр отверстия диафрагмы 58 мм.

Этим местом является острый край отверстия катодной части рамки с радиусом закругления 0.3 мм, в которое вставляется диафрагма. В случае диафрагмы диаметром 20 мм напряженность электрического поля достигает

величины 42 кВ/см, а при увеличении диаметра отверстия до 58 мм возрастает до 51 кВ/см.

Еще одним важным обстоятельством возникновения темного тока повышенной интенсивности является то, что при диафрагмах диаметром 20 мм эмитированные с этой поверхности электроны попадают только на следующий соседний электрод, а при диафрагмах диаметром 58 мм эмитированные электроны попадают непосредственно на высоковольтный электрод и обдирочную трубку. Траектории этих электронов представлены на рисунках 70 и 71.

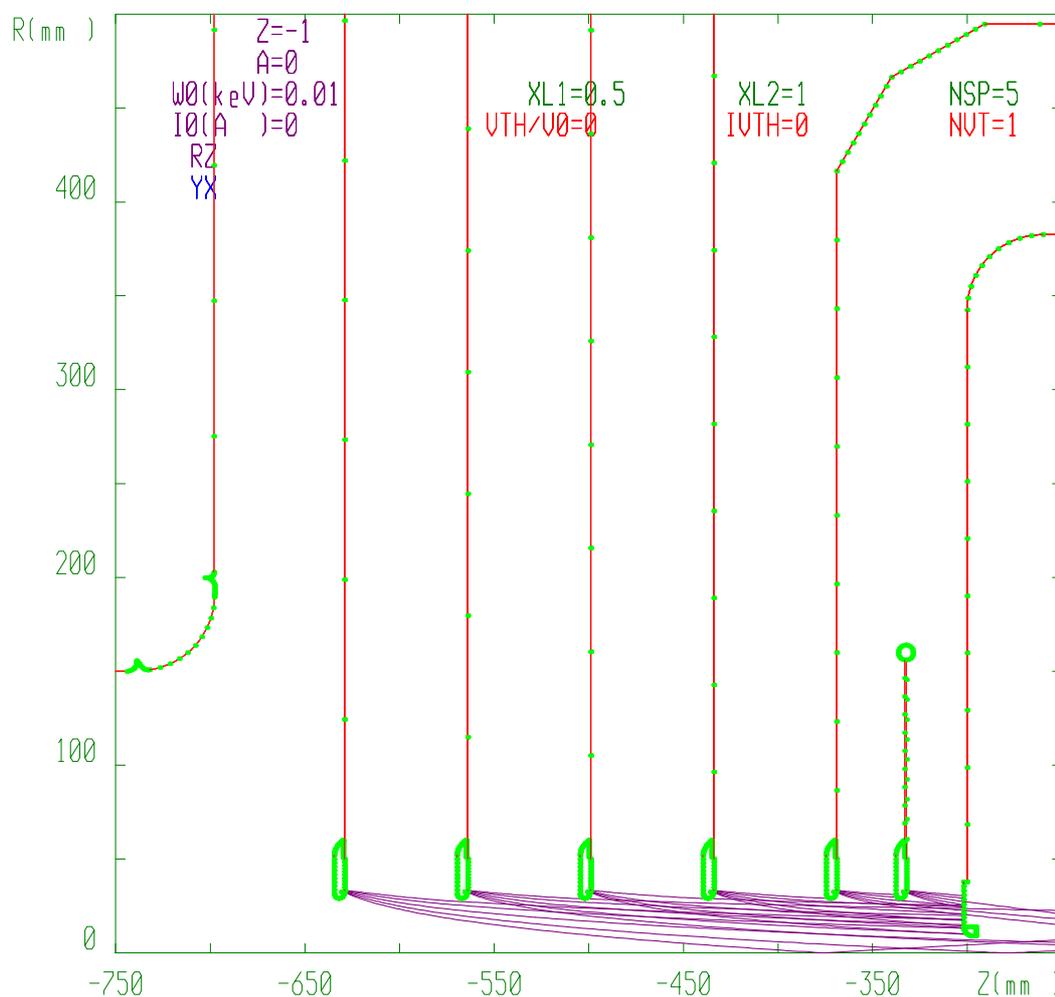


Рисунок 70. Траектории электронов, эмитированных с поверхности повышенной напряженности электрического поля в канале ускорения отрицательных ионов водорода с диафрагмами диаметром 58 мм.

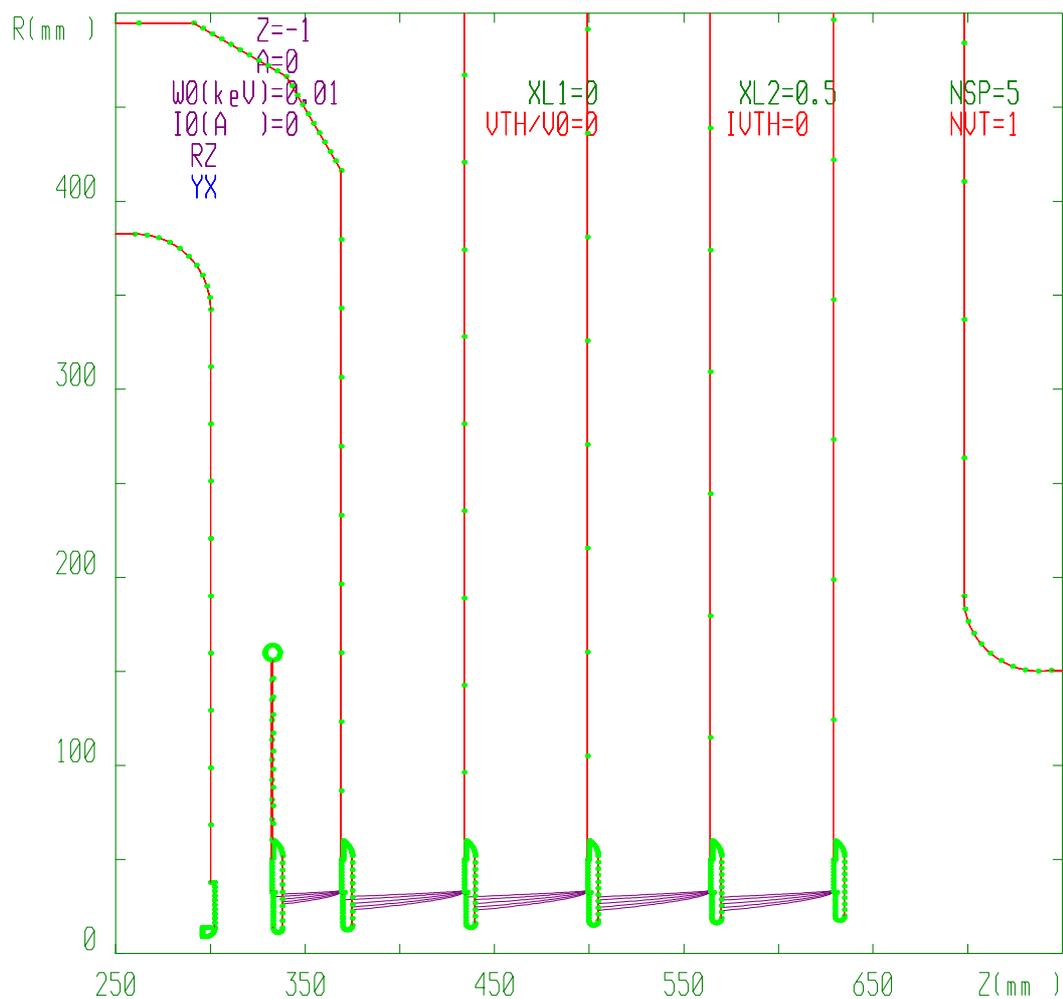


Рисунок 71. Траектории электронов, эмитированных с поверхности повышенной напряженности электрического поля в канале ускорения протонов с диафрагмами диаметром от 20 до 40 мм.

Данный эффект возникновения темнового тока повышенной интенсивности является безусловно опасным для работоспособности ускорителя и требует проведения мер по его устранению. Такими мерами, которые позволили избавиться от темнового тока большой интенсивности, явились установка диафрагм с отверстиями диаметром от 20 до 40 мм и изменения в конструкции рамки крепления диафрагм.

Глава 6

Расчетная и экспериментальная оценка уровня рентгеновского излучения

§ 6.1 Расчетная оценка выхода тормозного излучения

Исходные данные для расчетных оценок, при которых может возникнуть рентгеновское излучение, следующие.

1. Исходя из зафиксированных в экспериментах данных, максимальное значение темнового тока с поверхностей ускоряющих электродов с торможением в материале электродов не превысило 600 мкА, при этом энергия, достигаемая электронами, не превысила значения 200 кэВ, определяемого разностью потенциалов между соседними электродами ускоряющих зазоров.

2. Напряжение пробоя между электродами по вакуумной поверхности отдельных колец проходного изолятора при максимальном ускоряющем напряжении не превысило ~50 кВ, запасенная энергия в ёмкости ускорителя-тандема ~ 70 Дж. Максимальная доза излучения возникнет при последовательном пробое всех поверхностей проходного изолятора в вакууме.

3. Алгоритм подъёма напряжения на ускорителе не позволяет достичь задаваемого значения напряжения в течение 2 минут после пробоя, что ограничивает частоту повторения таких пробоев.

Все источники тормозного излучения располагаются внутри вакуумного бака, и выходящее излучение ослабляется стальными стенками бака. При характерной толщине стенки 6 мм рентгеновское излучение при $E_0 = 200$ кэВ ослабляется в 12 раз, а при $E_0 = 50$ кэВ – в $\sim 10^8$ раз [27].

6.1.1 Радиационный вклад темного тока

В соответствии с уровнем возможных значений мощности дозы разобьем пространство, окружающее установку, на две зоны: внутри защищенного зала и вне его (рисунок 72).

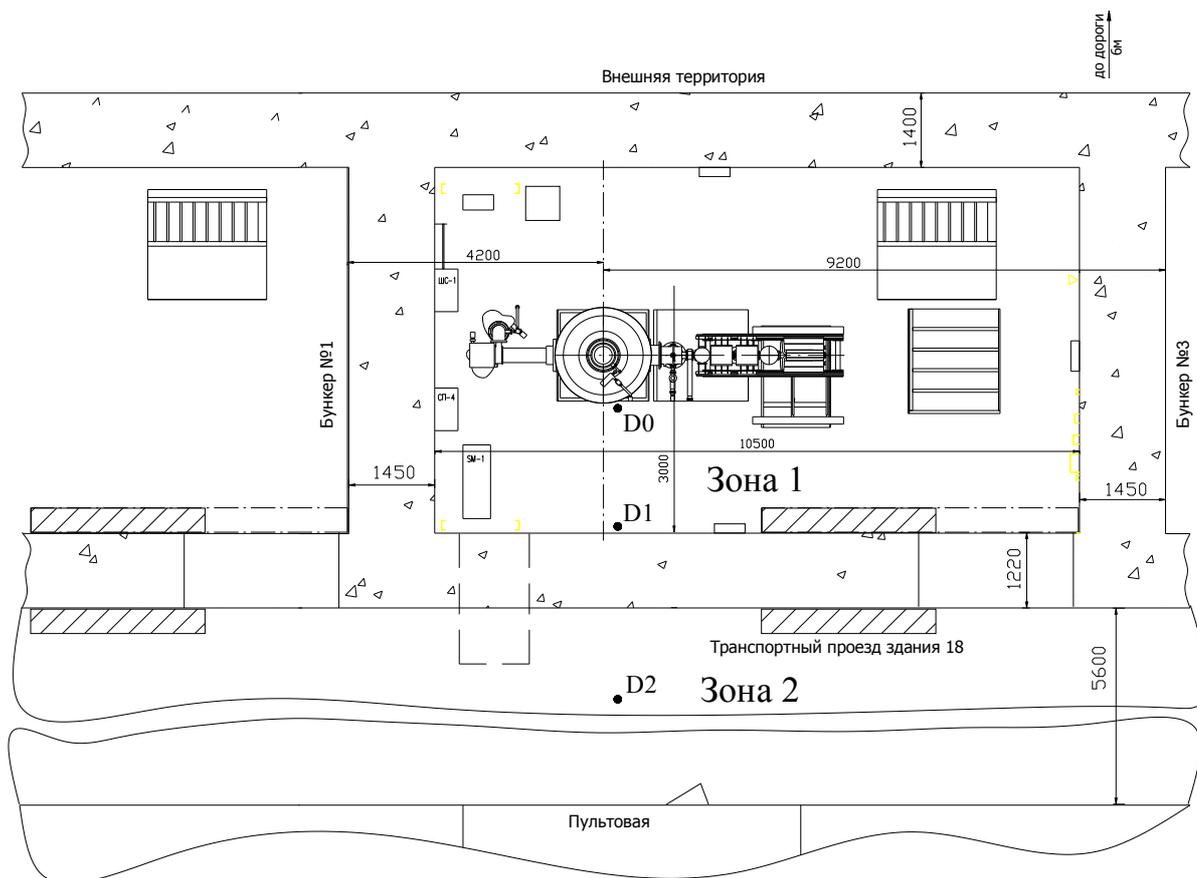


Рисунок 72. План размещения установки.

Зона 1 – территория внутри защищённого зала, в котором установлен ускоритель. В соответствии с данными работы [27] удельная мощность экспозиционной дозы на расстоянии 1 м от рентгеновской трубки при анодном напряжении 200 кВ равна $1.4 P \times m^2 / (mA \cdot min)$. Минимальное расстояние от ускорителя до ближайшей стены защищенного зала $R \approx 3$ м. Предположим, что поток электронов, падающих на наружный ускоряющий электрод, распределяется равномерно по его поверхности. Тогда в направлении стены

при $R \approx 3$ м эффективный вклад в поток излучения будет создаваться примерно только половиной полного темнового тока, обусловленной эмиссией из той части внутренней поверхности бака, которая обращена в сторону стены. Излучение, обусловленное эмиссией с остальной поверхности бака, будет практически полностью ослаблено совокупностью ускоряющих электродов, суммарная толщина которых составляет 8 мм нержавеющей стали. Поскольку электроны тормозятся в железе, а не в вольфраме, то при токе 0.6 мА имеем (без учёта ослабления стенкой бака)

$$\dot{D}_0 \approx 1.4 \frac{\text{P} \cdot \text{м}^2}{\text{мА} \cdot \text{мин}} \cdot 0.6 \text{ мА} \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{Z_{\text{Fe}}}{Z_{\text{W}}} = 0.42 \cdot \frac{26}{74} = 0.148 \frac{\text{P} \cdot \text{м}^2}{\text{мин}}$$

Выход с учётом ослабления стальной стенкой бака:

$$\dot{D}_1 \approx 0.148 \cdot 0.08 = 1.18 \cdot 10^{-2} \frac{\text{P} \cdot \text{м}^2}{\text{мин}} \Rightarrow 7.1 \frac{\text{мЗв} \cdot \text{м}^2}{\text{ч}}$$

Таким образом, при $R = 3$ м максимально возможное значение мощности эквивалентной дозы на внутренней поверхности стены защищенного зала:

$$\dot{D}_{1R} = \frac{\dot{D}_1}{R^2} = 0.79 \frac{\text{мЗв}}{\text{ч}}$$

Зона 2 - территория вне защищенного зала. В соответствии с [27] 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

$$K \approx 10^{122/10} \approx 1.6 \cdot 10^{12}$$

Таким образом, на расстоянии $R_2 = 4.5$ м от ускорителя (граница зоны 2) мощность дозы составит:

$$\dot{D}_2 \approx \frac{\dot{D}_1}{R_2^2 \cdot K} \approx \frac{7.1}{4.5^2 \cdot 1.6 \cdot 10^{12}} \approx 2 \cdot 10^{-13} \frac{\text{мЗв}}{\text{ч}},$$

что на много порядков ниже пределов чувствительности дозиметрической аппаратуры.

6.1.2 Радиационный вклад пробоев по вакуумной поверхности проходного изолятора

Оценка производится по методике, аналогичной использованной в предыдущем разделе.

При максимальной частоте пробоев между кольцами проходного изолятора 1 раз в 2 мин при запасённой энергии $W = 70$ Дж и $E_0 = 50$ кэВ средний ток будет:

$$\bar{i} = \frac{W}{T_{\min} \cdot E_0} = \frac{70}{120 \cdot 5 \cdot 10^4} \approx 12 \text{ мкА}.$$

Здесь T_{\min} – минимальный период времени между пробоями ($2 \times 60 = 120$ с). Удельная мощность экспозиционной дозы на расстоянии 1 м от рентгеновской трубки при анодном напряжении 50 кВ в соответствии с [27] равна $0.15 \text{ Р} \times \text{м}^2 / (\text{мА} \cdot \text{мин})$. В пересчёте на железную мишень при токе 12 мкА имеем:

$$\dot{D}_0 \approx 0.15 \frac{\text{Р} \cdot \text{м}^2}{\text{мА} \cdot \text{мин}} \cdot 12 \text{ мкА} \cdot \frac{26}{74} = 6.3 \cdot 10^{-4} \frac{\text{Р} \cdot \text{м}^2}{\text{мин}}.$$

Выход с учётом ослабления стальной стенкой бака

$$\dot{D}_1 = 6.3 \cdot 10^{-4} \cdot 10^{-8} \approx 6 \cdot 10^{-12} \frac{\text{Р} \cdot \text{м}^2}{\text{мин}} \Rightarrow 3.6 \cdot 10^{-6} \frac{\text{мкЗв} \cdot \text{м}^2}{\text{ч}},$$

что намного ниже порога чувствительности дозиметрической аппаратуры.

Приведённые выше оценки показывают, таким образом, что уровни рентгеновского излучения вне защищённого зала не только ниже норм, установленных ОСПОРБ 99/2010 [28] и НРБ-99/2009 [29], 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 $100 \div 1000$ раз) превышать допустимые уровни для персонала группы А.

§ 6.2. Экспериментально измеренные значения мощности дозы рентгеновского излучения вблизи ускорителя

Для оперативного наблюдения за уровнями ионизирующих излучений вокруг экспериментальной установки и за её биологической защитой в интересах контроля радиационной безопасности ускоритель-тандем был оборудован автоматизированной системой радиационного мониторинга (АСРМ) [30], разработанной в ИЯФ СО РАН.

Измерения мощности дозы рентгеновского излучения в системе осуществляются четырьмя блоками детектирования (рисунок 73). Блок представляет собой сферическую камеру объёмом 0.85 л с воздушным заполнением и со стенкой из полиамида толщиной 1.1 мм, покрытой тонким слоем коллоидного графита.

Использование 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 — $1 \div 12000$ мкЗв/ч.

Все детекторы могут снимать показания средней мощности дозы с периодичностью, варьируемой от долей секунды до нескольких минут.

Первая часть экспериментов проводилась для определения равномерности излучения в азимутальной плоскости. Для этого четыре датчика размещались через 90° вокруг ускорителя-тандема (рисунок 74а) на расстоянии 1 м от наружной поверхности бака. После записи данных все датчики поворачивали на 45° (рисунок 74б) и измерения повторялись.

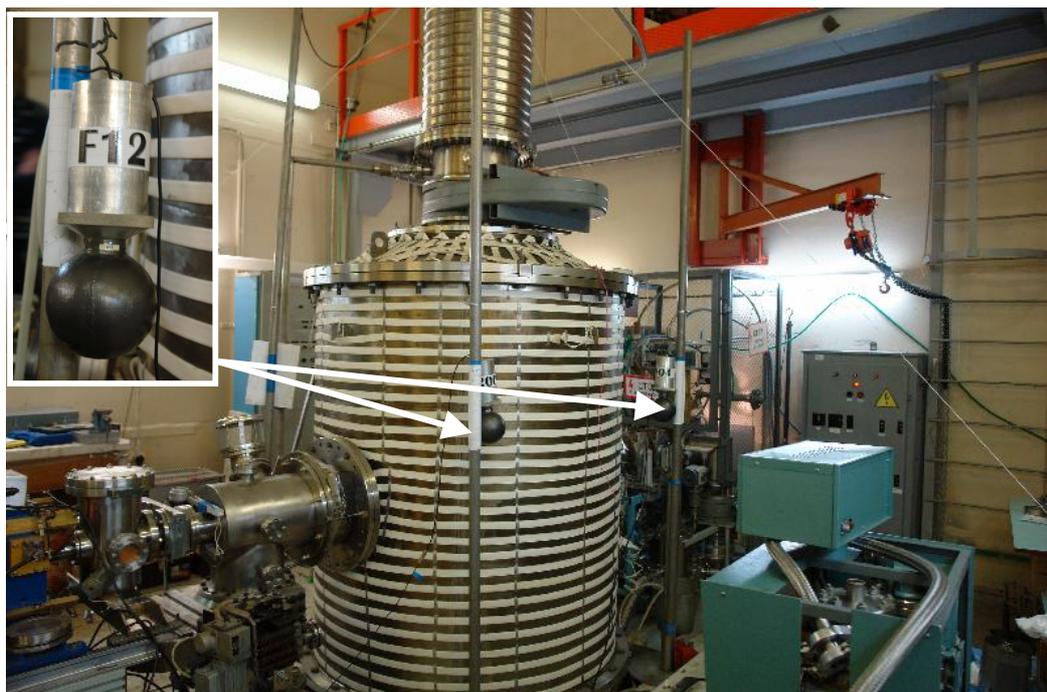


Рисунок 73. Блок детектирования мощности дозы рентгеновского излучения (вверху слева) и размещение блоков детектирования вокруг ускорителя

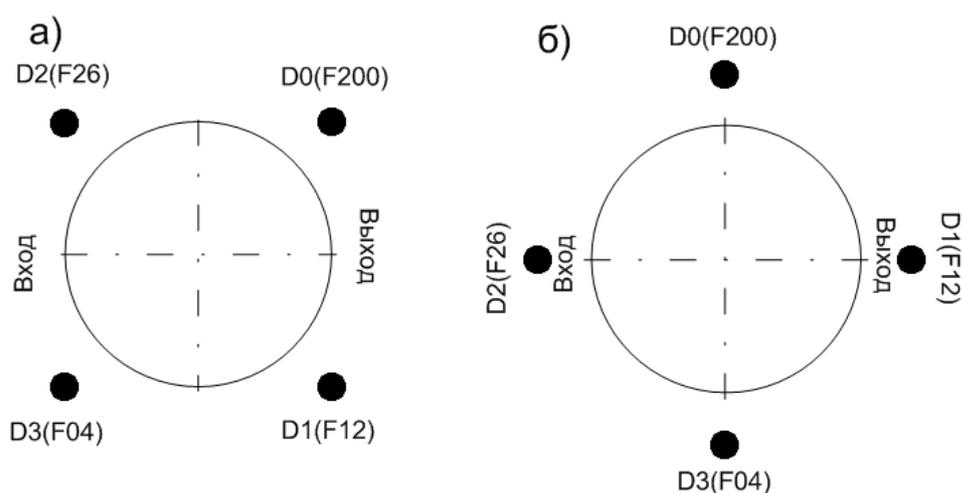


Рисунок 74. Азимутальное расположение датчиков вокруг ускорителя-тандема.

Необходимо было отсеять значения, явно связанные с пробойными и предпробойными токами. Их можно определить по показаниям делителей напряжения источника и изолятора по резкому ухудшению остаточного

вакуума в ускорителе-тандеме, по броскам темнового тока I и мощности дозы рентгеновского излучения (рисунок 75).

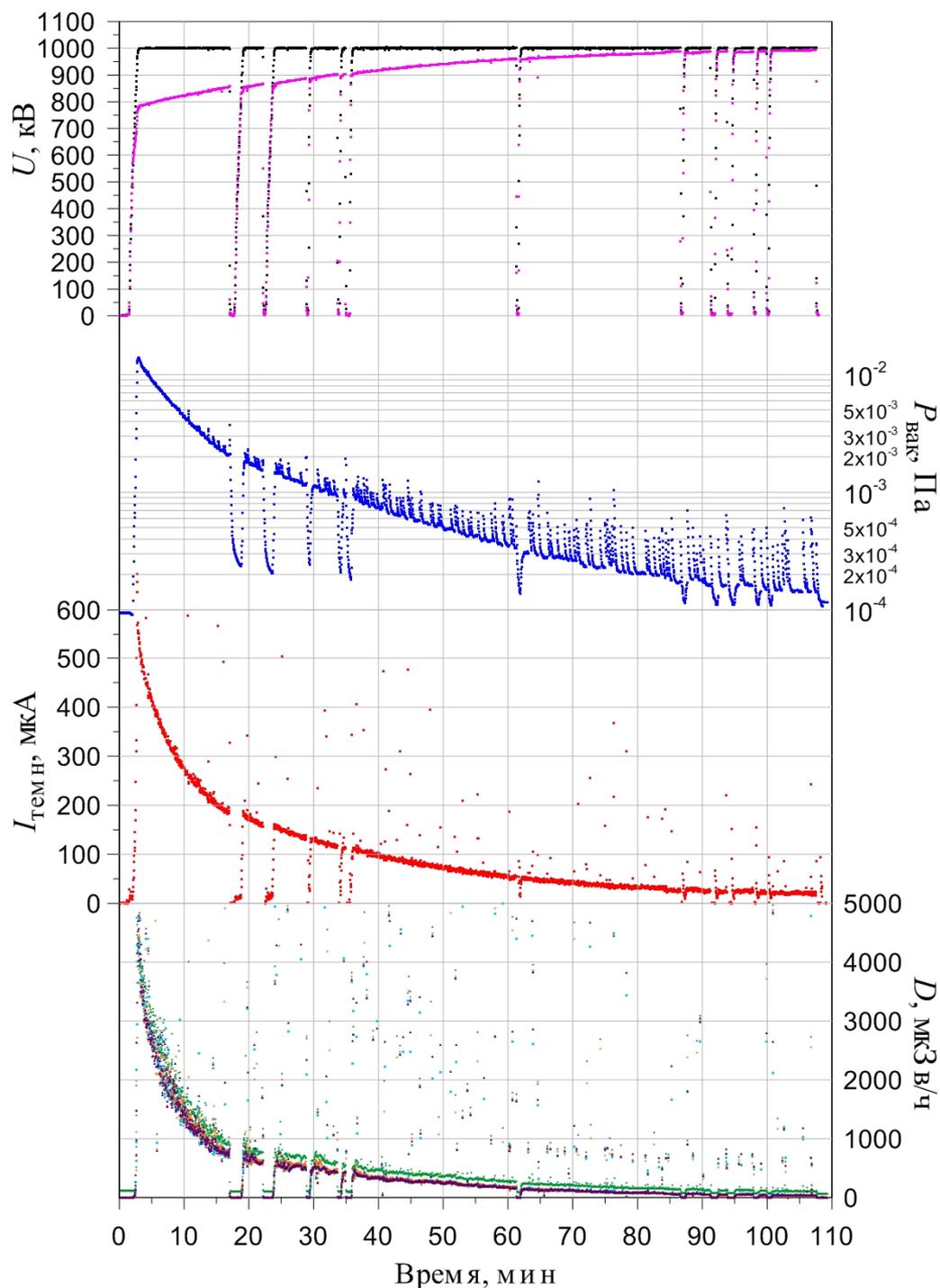


Рисунок 75. Графики зависимости напряжения с делителей источника (1) и проходного изолятора (2), вакуума, темнового тока и мощности дозы рентгеновского излучения с четырех детекторов от времени одного из экспериментов на ускорителе без пучка.

Результаты измерений рентгеновского излучения во всех экспериментах обрабатывались с помощью программно реализованного алгоритма статистической обработки данных. Обработанные данные усреднялись по интервалам темнового тока, затем строилась упорядоченная выборка $D(I)$.

На рисунке 76 представлена зависимость мощности дозы рентгеновского излучения, измеренная детекторами, от темнового тока. Видно, что мощность дозы излучения приблизительно пропорциональна темновому току.

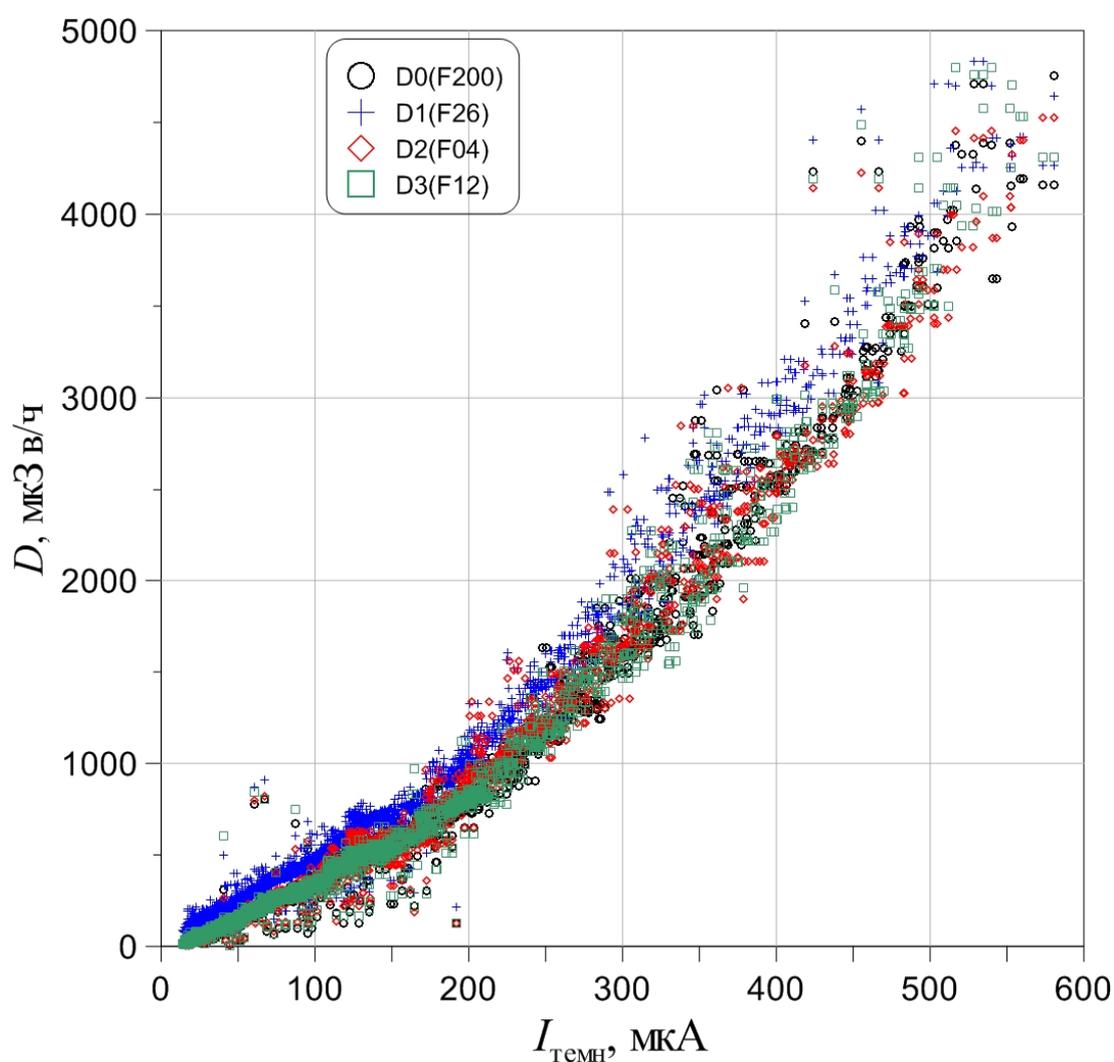


Рисунок 76. Зависимость уровня рентгеновского излучения от величины темнового тока.

На рисунке 77 представлены усредненные данные трех последовательных измерений для значений темнового тока 300 ± 10 мкА и напряжения на высоковольтном электроде 1 МВ. Видно, что излучение можно считать равномерным с точностью до 20 %, что говорит о существовании более чем одного канала протекания тока в ускоряющих зазорах и об относительно равномерном распределении темновых токов по поверхности электродов.

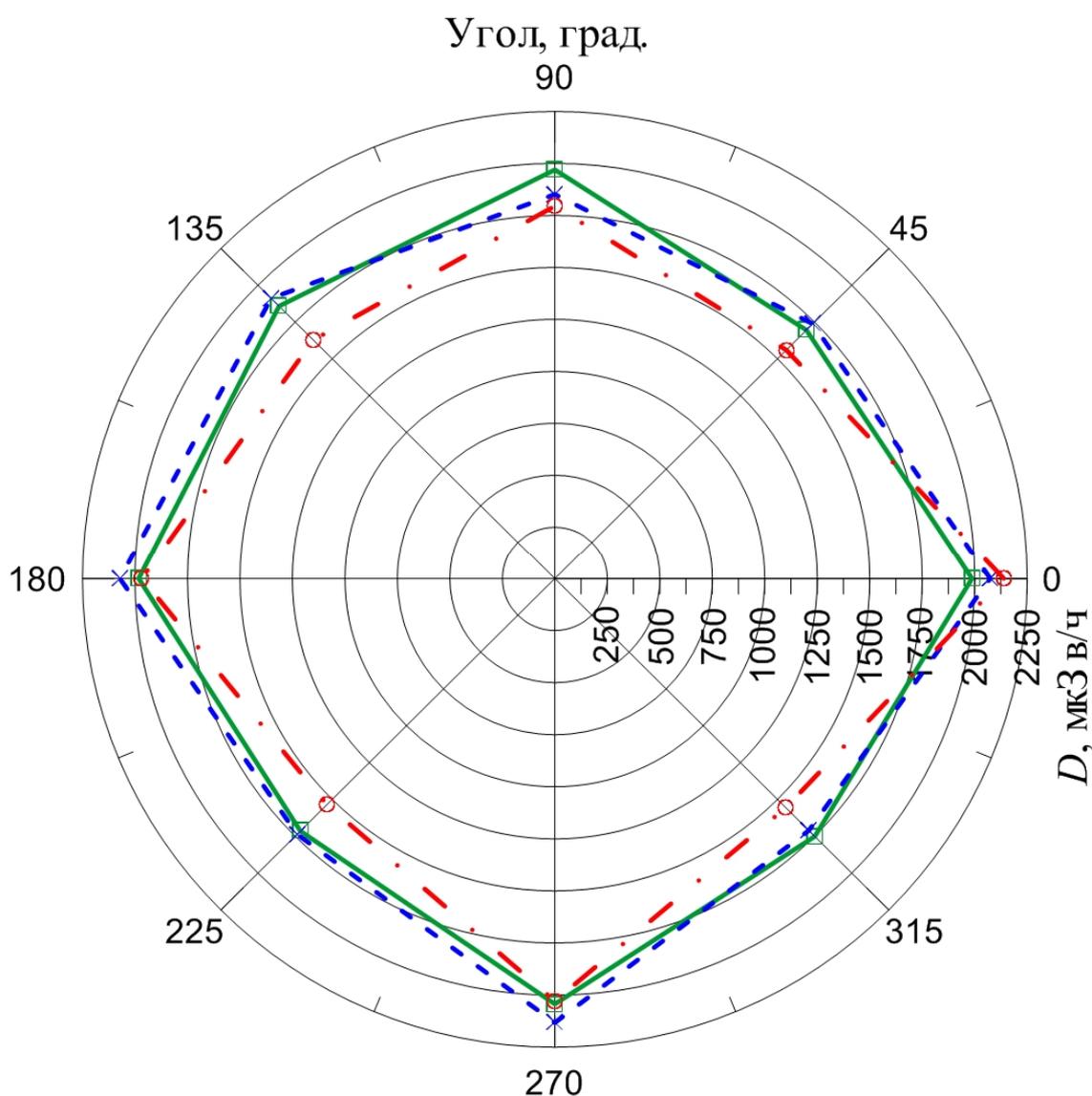


Рисунок 77. Угловое распределение излучения ускорителя-тандема.

Для выяснения более полной картины распределения рентгеновского излучения вокруг ускорителя были проведены последующие измерения.

Распределение рентгеновского излучения по высоте измерялось по схеме, представленной на рисунке 78. Расстояние от бака до датчиков L составляло в разных экспериментах 1.3, 2.6 и 3.5 м.

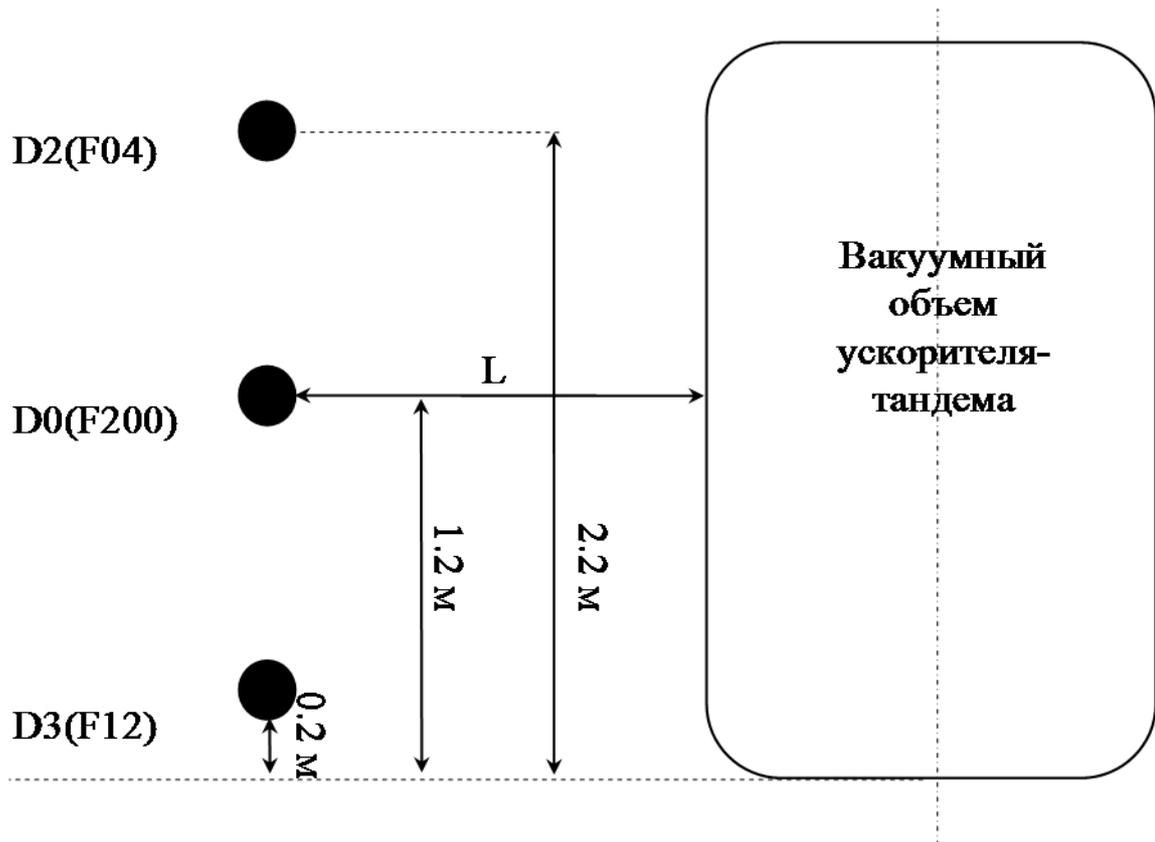


Рисунок 78. Схема измерения распределения излучения по высоте.

Результаты этих измерений представлены на рисунке 79. Видно, что зависимость мощности дозы рентгеновского излучения от высоты изменяется с расстоянием до бака. При этом наибольшие значения регистрировались датчиком, расположенным на высоте 1.2 м. Максимальное расхождение показаний датчиков было зафиксировано на расстоянии 1.3 м от бака и составляло $\sim 30\%$.

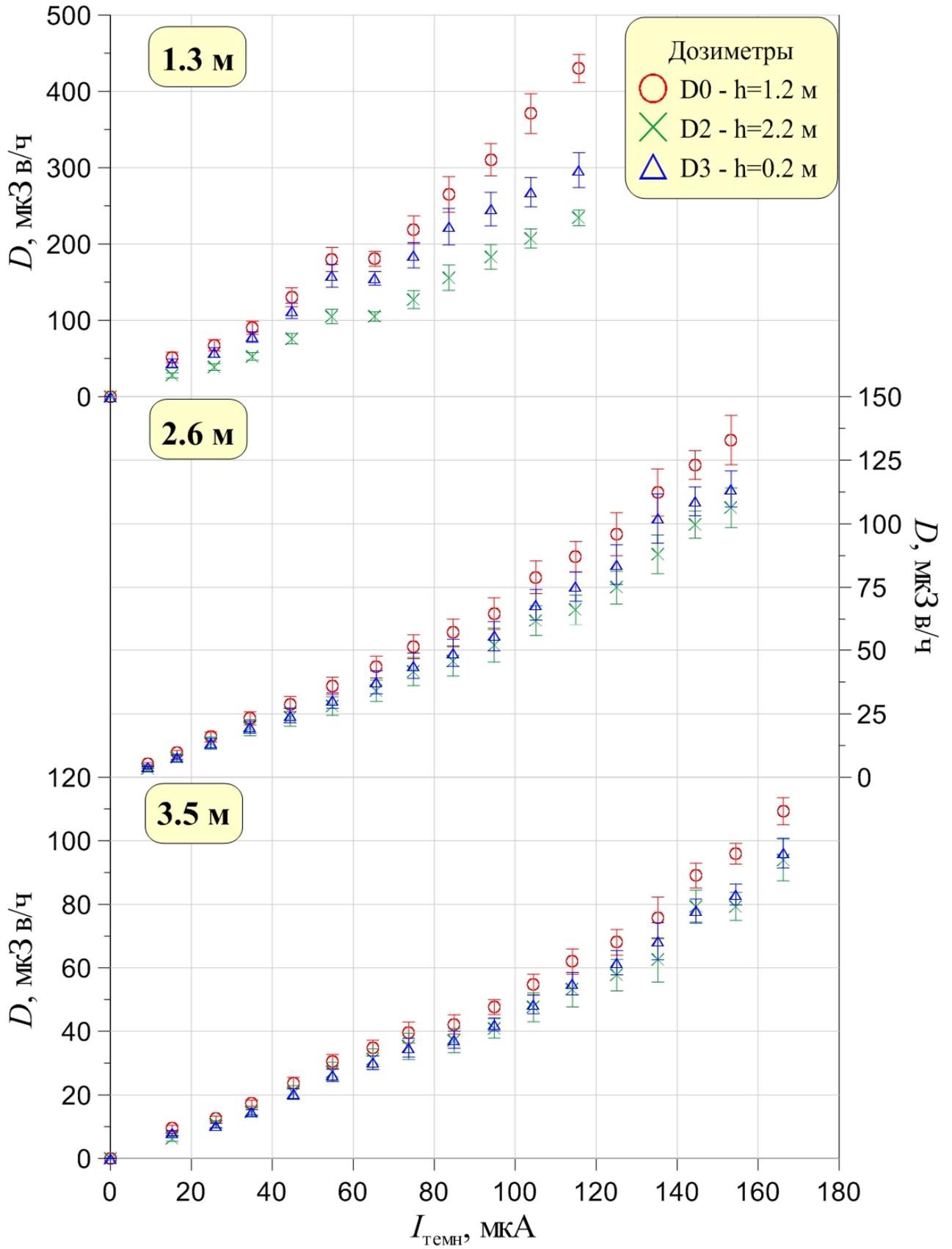


Рисунок 79. Зависимость мощности дозы рентгеновского излучения от темнового тока на разных высотах и расстояниях относительно ускорителя.

Также были проведены эксперименты для определения зависимости мощности дозы рентгеновского излучения от расстояния до бака и динамики изменения величины тормозного излучения ускорителя в ходе работы. Датчики располагались так, как это показано на рисунке 80.

По результатам экспериментов (рисунок 81) проведено сравнение расчетной величины кратности ослабления рентгеновского излучения расстоянием для точечного источника и значения этой величины, полученной экспериментально. Результаты, представленные в табл. 1, демонстрируют хорошее согласие.

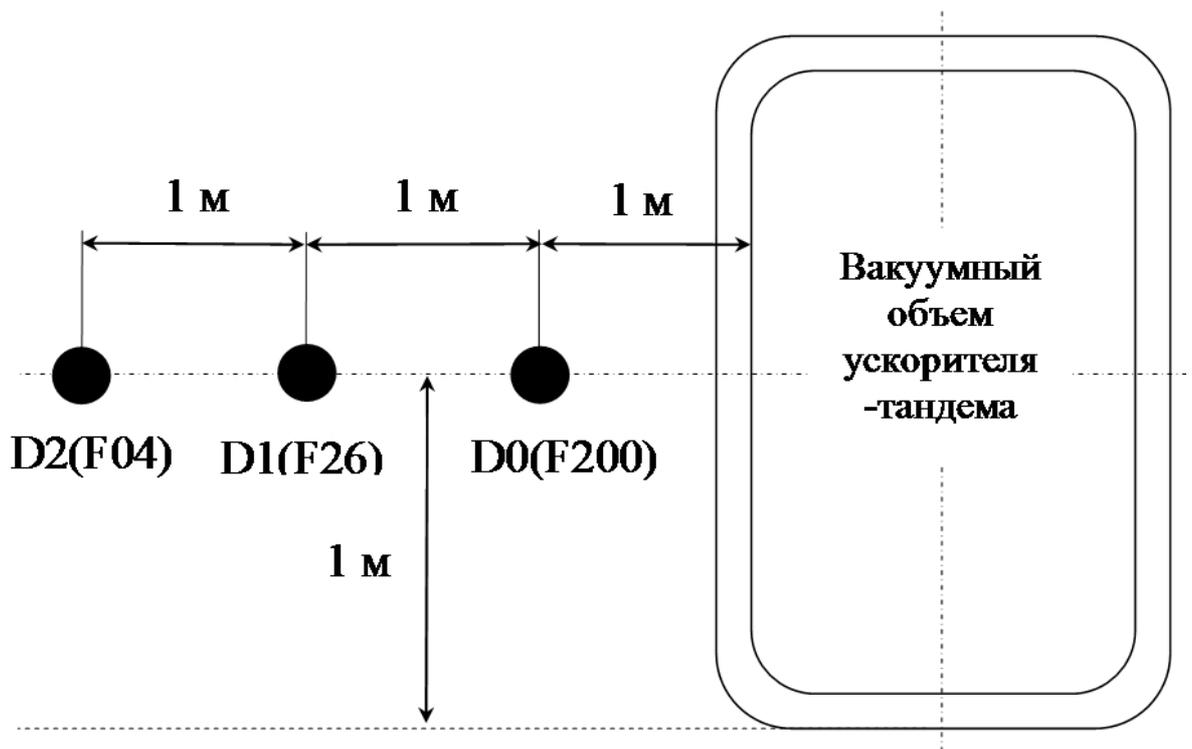


Рисунок 80. Схема измерения зависимости мощности дозы рентгеновского излучения от темнового тока и от расстояния до ускорителя-тандема.

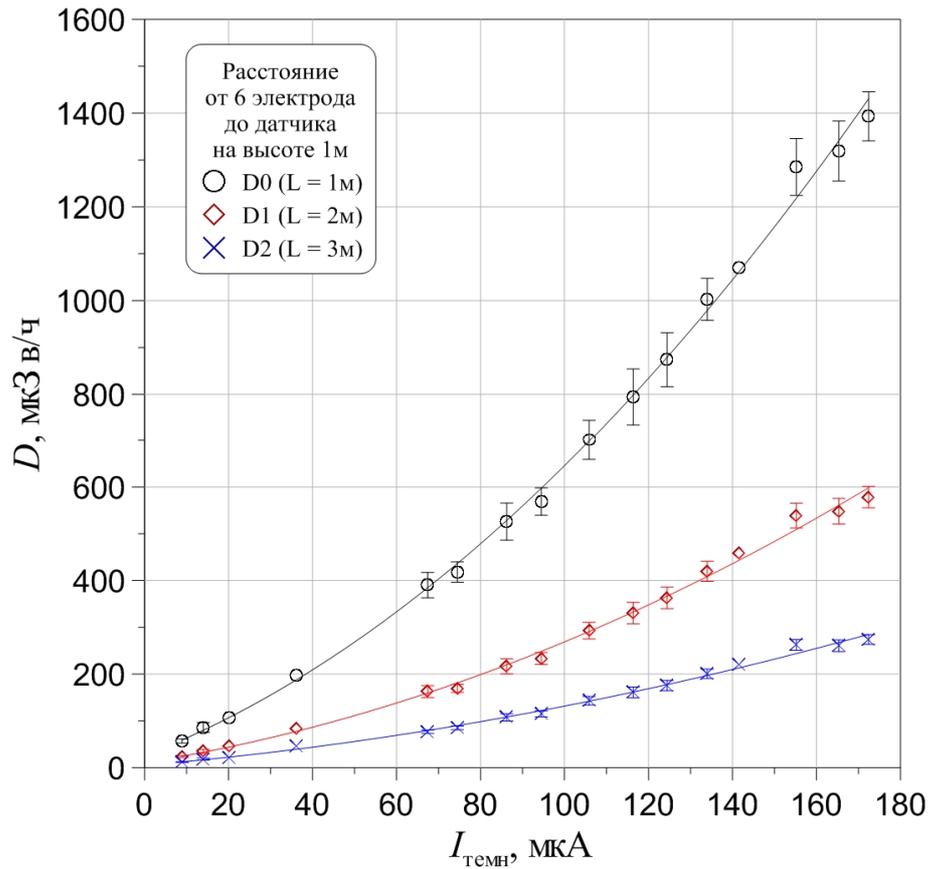


Рисунок 81. Зависимость мощности дозы рентгеновского излучения от темнового тока для различных расстояний.

Таблица 6.

	Кратность ослабления расчетная (из центра ускорителя)	Кратность ослабления измеренная
D0/D1	2.52	2.5
D0/D2	4.74	5
D1/D2	1.88	2.03

Все проведенные эксперименты показали, что за время $\sim 1 \div 2$ ч в зависимости от величины темнового тока в ускоряющих зазорах ускорителя при напряжении 1 МВ мощность дозы рентгеновского излучения снижается практически до нулевого значения. При этом значение давления составило

$\sim 10^{-4}$ 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.

§ 6.3. 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 (рисунок 82). В момент измерения спектра давление остаточного газа было 4×10^{-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 пункт исходных данных о том, что достигаемая электронами энергия не должна превышать значения 200 кэВ, определяемого разностью потенциалов между соседними электродами ускоряющих зазоров.

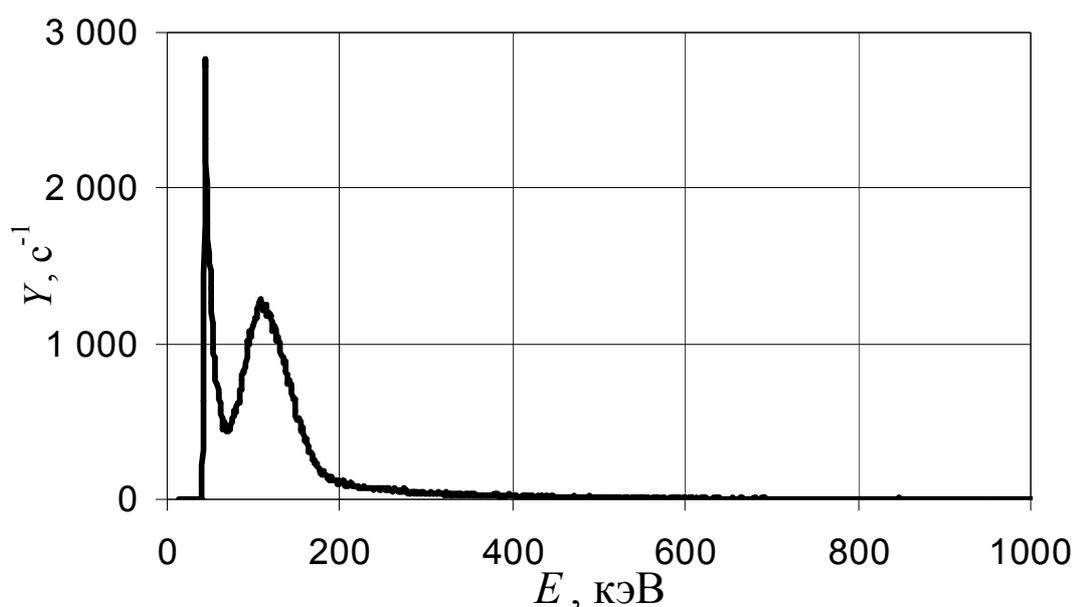


Рисунок 82. Регистрируемый энергетический спектр рентгеновского излучения.

Экспериментально измерена величина рентгеновского 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 рентгеновского излучения 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 радиационно-защищенного зала, в котором располагается ускоритель, мощность дозы излучения ниже предела чувствительности дозиметрической аппаратуры.

BGO-спектрометром измерен спектр рентгеновского 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.

Этот результат позволит упростить систему радиационной защиты на установке при ее использовании в медицине.

Заключение

Основные результаты диссертационной работы состоят в следующем.

- Проведены оценочные расчеты и анализ величины запасенной энергии и уровней перенапряжения при пробоях в ускоряющих высоковольтных вакуумных зазорах, и сделан выбор более технологически простого и наименее дорогостоящего для производства 6-зазорного варианта ускорителя-тандема с вакуумной изоляцией.
- На испытательном стенде с площадью цилиндрической поверхности высоковольтного электрода 0.71 м^2 изучена электрическая прочность 45-мм зазора. Доказано, что пробои при запасенной энергии в зазоре до 50 Дж и при напуске перезарядного газа не приводят к потере электрической прочности зазора, и величина темнового тока приемлемо мала до напряженности электрического поля 60 кВ/см.
- Предложен и реализован способ как позазорной тренировки, так и тренировки с последовательным подключением высоковольтных вакуумных зазоров ускорителя-тандема. Получено требуемое напряжение 1 МВ.
- Предложен и реализован способ определения величины темнового тока в ускоряющих вакуумных зазорах. Изучено поведение темнового тока. Доказано, что с течением времени при постоянно приложенном напряжении темновой ток уменьшается до единиц микроампер и не влияет на равномерность распределения напряжения в ускоряющих зазорах.

- Обнаружен автоэмиссионный ток повышенной интенсивности, установлена причина его возникновения и внесены изменения в конструкцию ускорителя для его предотвращения.
- Установлено, что рентгеновское излучение обусловлено темновыми токами в вакуумных зазорах. Мощность дозы рентгеновского излучения падает до единиц микрозиверт в час на расстоянии 2 м от ускорителя в процессе длительной выдержки под напряжением. Получены данные, необходимые для проектирования оптимальной радиационной защиты ускорителя.
- Результаты проведенных исследований послужили основанием выбора основных параметров созданного ускорителя-тандема с вакуумной изоляцией, запущенного и успешно используемого для генерации нейтронов и γ -квантов.

В заключение автор выражает глубокую благодарность научному руководителю работы Иванову Александру Александровичу за помощь в выборе направления данной работы, постоянную поддержку и внимание, Широкову Валерию Васильевичу за многолетнюю плодотворную совместную работу.

Автор должен отметить, что данная работа была бы невозможна без постоянной поддержки С.Ю. Таскаева, без консультаций и конструктивной критики со стороны А.В. Бурдакова, без помощи В.И. Алейника, В.Т. Астрелина, А.Г. Башкирцева, Б.Ф. Баянова, Ю.И. Бельченко, В.И. Давыденко, А.С. Дони́на, И.В. Кандаурова, В.А. Капитонова, Д.А. Касатова, С.Г. Константинова, А.С. Кривенко, А.С. Кузнецова, А.Н. Макарова, А.Л. Санина, М.А. Тиунова, В.Я. Чудаева, И.М. Щудло, В.И. Эделя и всех сотрудников

лаборатории 9-0, принимавших участие в разработке, создании и запуске ускорителя-тандема с вакуумной изоляцией.

При создании системы автоматизации и программного обеспечения автор постоянно обращался за помощью и советом к А. Д. Хильченко, А.Н. Квашнину, П.В. Зубареву, всегда встречая понимание и практическую помощь.

В процессе создания ускорителя и его систем управления автор использовал опыт и идеи, накопленные в лабораториях Института ядерной физики, и искренне благодарен Р.А. Салимову, Н.К. Куксанову, П.И. Немытову, Ю.И. Голубенко, В.В. Прудникову, А.Н. Самойловичу и всем сотрудникам лаборатории 12, принимавшим непосредственное участие в работе, за поддержку и помощь.

Процесс проектирования и конструкторской проработки был бы невозможен без участия В.П. Белова, В.М. Долгушина, В.Н. Зайцева, В.В. Кобеца, И.Е. Коренева, Г.С. Крайнова, А.М. Крючкова и всех сотрудников НКО, принимавших участие в работе.

Особую признательность и благодарность хотелось бы выразить Григорию Ивановичу Сильвестрову, который заразил нас идеей создания уникального ускорителя-тандема.

Литература

1. B.F. Bayanov, V.P. Belov, E.D. Bender, M.V. Bokhovko, G.I. Dimov, V.N. Kononov, O.E. Kononov, N.K. Kuksanov, V.E. Palchikov, V.A. Pivovarov, R.A. Salimov, G.I. Silvestrov, A.N. Skrinsky, S.Yu. Taskaev, Accelerator based neutron source for the neutron-capture and fast neutron therapy at hospital // Nuclear Instr. and Methods in Physics Research A 413/2-3. – 1998, p. 397-426.
2. Trump J.O., Van de Graaff R.J. / Appl. Phys. – 1947. – № 18, – P. 327.
3. K.W. Arnold, Vacuum breakdown phenomena at 1 Million volts: a postscript // In: Proc. II IS DEIV. – Boston, 1966. – P. 73-82.
4. В.А. Ергаков, И.И. Крючков, Ю.В. Требуховский, Электроизоляция в электростатических анализаторах // Приборы и техника эксперимента. – 1971. – № 6. – С. 20-31.
5. П.Н. Чистяков, Н.П. Дубинин, Пробой вакуума при электрическом поле в диапазоне $(5\div 7)\times 10^6$ В/см // Изв. вузов. Радиофизика. – 1979, – Т. 22, – № 8, – С. 1020-1025.
6. E.M. Lyman, D.A. Lee, H.E. Tomaschke, The effect of gas pressure on electrical breakdown and field emission // In: II ISDEIV. – Boston, 1966. – P. 33-39.
7. A.S. Denholm, The electrical breakdown of small gaps in vacuum // Canad. J. Phys., – 1958. – Vol. 36. – № 14, – P. 476-478.
8. П.Н. Чистяков, А.Л. Радионовский, Н.В. Татарина, Пробой вакуума при контролируемом состоянии поверхности электродов // Журнал технической физики. – 1969. – Т. 39. – №6. – С. 1075 - 1079; – 1972. – Т. 42. – № 4. – С.821-825.

9. И.Н. Сливков, О механизме электрического пробоя в вакууме // Журнал технической физики. – 1957. – Т. 27, – № 2, – С. 2081.
10. А.А. Jemelyanov, I.I. Kalyatskij, G.M. Kassirov, Problems of the forecasting of the electrical strength on pulse voltage vacuum gaps // In: Proc. VII ISDEIV, – Novosibirsk, 1976. – P. 130-133.
11. В.А. Ергаков, П.П. Крючков, Ю.В. Треуховский, В.А. Хараюзов, Электрический сепаратор с катодом из проводящего стекла // Приборы и техника эксперимента. – 1969. – № 4. – С. 30 - 36.
12. И.Н. Сливков, Электроизоляция и разряд в вакууме // М.: Атомиздат. – 1972. – 305 с.
13. R. Tinguely, L. Jeannerot, M. Thivent, Les nouveaux separateur court d'CERX // In: Proc. III ISDEIV, – Paris, 1968. – P. 254-262.
14. D.J. Simon, R. Michelier, Developpenments lies a letude d'un separatetir electrostatiaques a plaques multiples // In: Proc. III ISDEIV. – Paris, 1968. – P. 263-273.
15. Н.Ф. Олендзская, Влияние площади поверхности электродов на напряжение вакуумного пробоя. — В кн.: Пробой диэлектриков и полупроводников (сборников докладов) // М. Л.: Энергия. –1964. – С. 94-95.
16. М.Е.Вейс, С.Н. Фадеев., Н.К. Куксанов, П.И. Немытов, В.В. Прудников, Р.А. Салимов, С.Ю. Таскаев, Стабилизация ускоряющего напряжения в высоковольтном ускорителе-тандеме для нейтронозахватной терапии // Препринт ИЯФ 2002-17. – Новосибирск. – 2002. – 15 с.
17. Г.Е. Деревянкин, Г.И. Димов, В.М. Долгушин, А.Н. Драничников, Г.С. Крайнов, А.С. Кривенко, В.Е. Пальчиков, М.В. Петриченков, Е.И. Пехлебенин, Р.А. Салимов., Г.И. Сильвестров, С.Ю. Таскаев, В.В. Широков, Перезарядная мишень 40 мА 2 МэВ ускорителя тандема // Препринт ИЯФ 2001-23. – Новосибирск. – 2001. – 18 с.

18. В.В. Широков, Исследование электрической прочности высоковольтных вакуумных зазоров // Приборы и техника эксперимента. – 1990. – № 5. – С. 148-152.
19. С.Б. Вассерман, И.И. Глазков, В.М. Радченко Н.И. Сапутин, В.В. Широков, Ускорительная трубка генератора электронного пучка ЭЛИТ-3А // Препринт ИЯФ СО АН СССР 83-111. – Новосибирск. – 1983. – 58 с.
20. А.М. Крючков, И.Н. Сорокин, В.В. Широков, Работы по исследованию и созданию ускорительных трубок высоковольтных ускорителей заряженных частиц // Препринт ИЯФ СО РАН 94-54, – Новосибирск. – 1994. – 40 с.
21. Г.Е. Деревянкин, Г.С. Крайнов, А.М. Крючков, Г.И. Сильвестров, С.Ю. Таскаев, М.А. Тиунов, Ионно-оптический тракт 2.5 МэВ 10 мА ускорителя-тандема // Препринт ИЯФ СО РАН 2002-24. – Новосибирск. – 2002. – 26 с.
22. И.Н. Сливков, В.И. Михайлов, В.И. Сидоров, Электрический пробой и разряд в вакууме // М.: Атомиздат. – 1966.
23. В. Эспе, Технология электровакуумных материалов // Москва, Государственное энергетическое издательство. – 1962. – 634 с.
24. А.С. Кузнецов, Г.Н. Малышкин, А.Н. Макаров, И.Н. Сорокин, Ю.С. Суляев, С.Ю. Таскаев, Первые эксперименты по регистрации нейтронов на ускорительном источнике для бор-нейтронозахватной терапии // Письма в ЖТФ. – 2009. – Т. 35. – Вып. 8. – С. 1-6.
25. A.S. Kuznetsov, Yu.I. Belchenko, A.V. Burdakov, V.I. Davydenko, A.S. Donin, A.A. Ivanov, S.G. Konstantinov, A.S. Krivenko, A.M. Kudryavtsev, K.I. Mekler, A.L. Sanin, I.N. Sorokin, Yu.S. Sulyaev, S.Yu. Taskaev, V.V. Shirokov, Yu.I. Eidelman, The detection of nitrogen using nuclear resonance absorption of mono-energetic gamma rays // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 606. – 2009. – P. 238-242.

26. В.И. Алейник, А.С. Кузнецов, И.Н. Сорокин, С.Ю. Таскаев, М.А. Тиунов, И.М. Щудло, Калибровка обдирочной мишени ускорителя-тандема с вакуумной изоляцией // Препринт ИЯФ 2012-4. – Новосибирск. – 2012. – 16 с.
27. E. Dale Trout, J.P. Kelley, G.L. Herbert, X-ray attenuation in steel – 50 to 300 kVp // Health Phys. – 1975. – Vol. 29. – P. 163-169.
28. Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности (ОСПОРБ 99/2010). СП 2.6.1.2612-10.
29. Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009). СП 2.6.1.2523–09.
30. В.Г. Баркова, О.М. Корябкин, А.В. Репков, В.Я. Чудаев, Автоматизированная система радиационного контроля электрон-позитронного ускорительно-накопительного комплекса ВЭПП-4 // Труды девятого Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. – Дубна, 1985. – Т. 2. – 318 с.
31. B. Bayanov, V. Belov, G. Dimov, G. Derevyankin, V. Dolgushin, A. Dranichnikov, V. Kononov, G. Kraynov, A. Krivenko, N. Kuksanov, V. Palchikov, R. Salimov, V. Savkin, V. Shirokov, G. Silvestrov, I. Sorokin, S. Taskaev, High-current electrostatic accelerator-tandem for the neutron therapy facility // Proc. 9th International Symposium on Neutron Capture Therapy for Cancer. – Osaka, 2000. – P. 251-252.
32. Б.Ф. Баянов, В.П. Белов, Г.И. Димов, Г.Е. Деревянкин, В.М. Долгушин, А.Н. Драничников, Г.С. Крайнов, А.С. Кривенко, В.Н. Кононов, Н.К. Куксанов, В.Е. Пальчиков, В.Я. Савкин, Р.А. Салимов, Г.И. Сильвестров, И.Н. Сорокин, С.Ю. Таскаев, М.А. Тиунов, В.В. Широков, Сильноточный электростатический ускоритель-тандем для генерации нейтронов для БНЗТ //XVII Совещание по ускорителям заряженных частиц: Сборник докладов в 2-х томах. – Протвино, 2000. – Т. 2. – С. 336-339.

33. Yu. Belchenko, G. Derevyankin, G. Dimov, A. Dranichnikov, G. Kraynov, A. Krivenko, N. Kuksanov, V. Palchikov, M. Petrichenkov, V. Prudnikov, R. Salimov, V. Savkin, V. Shirokov, G. Silvestrov, I. Sorokin, S. Taskaev, M. Tiunov, Status of high-current electrostatic accelerator-tandem for the neutron therapy facility // II Asian Particle Accelerator Conference (APAC`2001). – Beijing, 2001. – Proceedings. – P. 849-851.

34. А.М. Крючков, В.Е. Пальчиков, И.Н. Сорокин, В.М. Цуканов, Е.Г. Мигинская, В.В. Широков, Электрическая прочность высоковольтных элементов ускорителя-тандема для генерации нейтронов для бор-нейтронозахватной терапии // XIV международная конференция по электростатическим ускорителям и пучковым технологиям. - Обнинск, 2001. – Издательство ГНЦ-РФ. – 2002. – С. 228-232.

35. Л.М. Барков, Б.Ф. Баянов, В.П. Белов, Ю.И. Бельченко, М.А. Боховко, Г.Е. Деревянкин, Г.И. Димов, А.С. Донин, А.Н. Драничников, В.Н. Карасюк, В.Н. Кононов, О.Е. Кононов, Н.К. Куксанов, Г.С. Крайнов, А.С. Кривенко, В.Е. Пальчиков, М.В. Петриченков, В.В. Прудников, В.Я. Савкин, Р.А. Салимов, Г.И. Сильвестров, А.Н. Скринский, Г.Г. Смирнов, И.Н. Сорокин, А.С. Сысоев, С.Ю. Таскаев, М.А. Тиунов, С.Н. Фадеев, В.В. Широков, Основанный на ускорителе источник нейтронов для нейтронозахватной терапии злокачественных опухолей // Сборник трудов научной сессии МИФИ-2002. – Москва: МИФИ, 2002. – Т. 5. – С. 52-53.

36. Л.М. Барков, Б.Ф. Баянов, В.П. Белов, Ю.И. Бельченко, Г.С. Виллевалд, Г.Е. Деревянкин, Г.И. Димов, В.М. Долгушин, А.С. Донин, А.Н. Драничников, В.Н. Кононов, О.Е. Кононов, Н.К. Куксанов, Г.С. Крайнов, А.С. Кривенко, Ю.С. Мардынский, В.Е. Пальчиков, М.В. Петриченков, В.А. Пидяков, В.В. Прудников, В.В. Рачков, В.Я. Савкин, Р.А. Салимов, Г.И. Сильвестров, А.Н. Скринский, Г.Г. Смирнов, И.Н. Сорокин, А.С. Сысоев., С.Ю. Таскаев, М.А. Тиунов, С.Н. Фадеев, В.В. Широков, Источник нейтронов

для бор-нейтронозахватной терапии на основе ускорителя // Труды X Международной конференции по новым информационным технологиям в медицине и экологии. – Гурзуф, 2002. – С. 257-259.

37. L. Barkov, G. Derevyankin, G. Dimov, G. Kraynov, A. Krivenko, S. Fadeev, V. Shirokov, G. Silvestrov, I. Sorokin, S. Taskaev, M. Tiunov, V. Mashinin, High Current Tandem Accelerator for Intense Monochromatic Gamma Rays Generation // Proceedings of 8th European Particle Accelerator Conference. – Paris, 2002, – P. 852-854.

38. B. Bayanov, Yu. Belchenko, V. Belov, G. Derevyankin, G. Dimov, A. Donin, A. Dranichnikov, V. Kononov, O. Kononov, G. Kraynov, A. Krivenko, N. Kuksanov, V. Palchikov, M. Petrichenkov, P. Petrov, V. Prudnikov, R. Salimov, V. Savkin, G. Silvestrov, V. Shirokov, I. Sorokin, S. Taskaev, M. Tiunov, Vacuum insulation tandem accelerator for NCT // Research and Development in Neutron Capture Therapy: Proc. of the 10th Intern. Congress on Neutron Capture Therapy. - Ed. by W. Sauerwein, R. Moss, A. Wittig. Bologna. – Essen, 2002. – P. 273-276.

39. И.Н. Сорокин, В.В. Широков, Высоковольтные зазоры электростатического ускорителя-тандема с вакуумной изоляцией // Труды XVIII российской ускорительной конференции (RUPAC-2002). – Обнинск, 2002.

40. Г.И. Димов, Ю.И. Бельченко, Г.С. Крайнов, Р.А. Салимов, Н.К. Куksанов, Г.И. Сильвестров, И.Н. Сорокин, С.Ю. Таскаев, М.А. Тиунов, Д.К. Топорков, В.В. Широков, Ускоритель-тандем с вакуумной изоляцией для применения в целях БНЗТ и для обнаружения взрывчатых веществ методом резонансного поглощения гамма-излучения // Атомная энергия. – Т. 94. – Вып. 2. – 2003. – С. 155-159.

41. И.Н. Сорокин, В.В. Широков, Высоковольтные зазоры электростатического ускорителя-тандема с вакуумной изоляцией // Приборы и техника эксперимента. – 2003. – № 1. – С. 5-9.

42. Д.И. Гамзенок, А.С. Кривенко, И.Н. Сорокин, В.В. Широков, Влияние газа перезарядной мишени электростатического ускорителя-тандема с вакуумной изоляцией на электрическую прочность высоковольтных зазоров // Приборы и техника эксперимента. – Т. 6. – 2004. – С. 51-55.
43. G.S. Kraynov, A.S. Krivenko, V.V. Shirokov, I.N. Sorokin, The gas charge-exchange target of the tandem accelerator with vacuum insulation // XIX всероссийская конференция по ускорителям заряженных частиц. – Дубна, 2004.
44. V. Dolgushin, G. Kraynov, E. Pokhlebenin, V. Shirokov, I. Sorokin, Status of high-current tandem accelerator for the neutron therapy facility // Proceedings of International Symposium on Boron Neutron Capture Therapy. – Novosibirsk, 2004. – P. 26-30.
45. Yu. Belchenko, A. Burdakov, V. Davydenko, V. Dolgushin, A. Dranichnikov, A. Ivanov, A. Khilchenko, V. Kobets, S. Konstantinov, A. Krivenko, A. Kudryavtsev, M. Tiunov, V. Savkin, V. Shirokov, I. Sorokin, J. P. Farrell, Initial High Voltage Tests and Beam Injection Experiments on BINP Proton Tandem-Accelerator // Proceedings of RuPAC 2006. - Novosibirsk, 2006. - P. 135-137.
46. И.Н. Сорокин, В.В. Широков, Высоковольтные элементы ускорителя-тандема с вакуумной изоляцией // Приборы и техника эксперимента. – Т. 6. – 2007. – С. 5-10.
47. V. Aleynik, A. Burdakov, A. Ivanov, A. Kuznetsov, A. Makarov, I. Sorokin, S. Taskaev, Vacuum-insulation Tandem Accelerator for Boron Neutron Capture Therapy // Proc. 2nd International Particle Accelerator Conference (IPAC-2011). – San Sebastian, 2011. – P. 3615-3617.
48. В.И. Алейник, А.А. Иванов, А.С. Кузнецов, И.Н. Сорокин, Статистические высоковольтные процессы при работе ускорителя-тандема с вакуумной изоляцией // Препринт ИЯФ 2011-19. – Новосибирск. – 2011. – 15 с.

49. В.И. Алейник, А.С. Кузнецов, И.Н. Сорокин, С.Ю. Таскаев, М.А. Тиунов, Регистрация темнового тока большой интенсивности в ускорителе-тандеме с вакуумной изоляцией после увеличения апертуры ускорительного канала // Препринт ИЯФ СО РАН 2012-2. – Новосибирск. – 2012. – 15 с.

50. А.Г. Башкирцев, А.А. Иванов, Д.А. Касатов, А.С. Кузнецов, И.Н. Сорокин, С.Ю. Таскаев, В.Я. Чудаев, Расчетные и экспериментальные оценки поля рентгеновского излучения, создаваемого высоковольтными элементами установки "Ускоритель-тандем БНЗТ" // Препринт ИЯФ 2012-8. – Новосибирск. – 2012. – 19 с.

51. А.Г. Башкирцев, А.А. Иванов, Д.А. Касатов, А.С. Кузнецов, И.Н. Сорокин, С.Ю. Таскаев, В.Я. Чудаев, Рентгеновское излучение высоковольтных элементов тандемного ускорителя с вакуумной изоляцией // Медицинская физика. – 2012. – № 2. – С. 5-11.

52. A.G. Bashkirtsev., V.Ya. Chudaev, A.A. Ivanov, D.A. Kasatov, A.S. Kuznetsov, I.N. Sorokin, S.Yu. Taskaev, X-ray Radiation High-Voltage Elements of the Tandem Accelerator With Vacuum Insulation // Proceedings of XXIII Russian Particle Accelerator Conference RUPAC2012. – Saint-Petersburg, 2012. – P. 299-301.

53. А.Г. Башкирцев, А.А. Иванов, Д.А. Касатов, А.С. Кузнецов, И.Н. Сорокин, С.Ю. Таскаев, В.Я. Чудаев, Рентгеновское излучение высоковольтных элементов ускорителя-тандема с вакуумной изоляцией // Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации. – 2013. – № 1 (20). – С. 56-62.

54. В.И. Алейник, А.А. Иванов, А.С. Кузнецов, И.Н. Сорокин, С.Ю. Таскаев, Темновые токи ускорителя-тандема с вакуумной изоляцией // Приборы и техника эксперимента. – Т. 5. – 2013. – С. 5-13.

55. И.Н. Сорокин, С.Ю. Таскаев, Подъем напряжения на высоковольтных вакуумных зазорах ускорителя-тандема с вакуумной изоляцией // Приборы и техника эксперимента. – Т. 4. – 2014. – С. 5-8.