

УДК 621.384.658

Импульсный ускоритель электронов ЭЛИТ-1Б

БАМБУРОВ Ю. Г., ВАССЕРМАН С. Б., ДОЛГУШИН В. М., КУЦЕНКО В. Ф.,
ХАВИН Н. Г., ЯСТРЕБА Б. И.

Ускоритель электронов ЭЛИТ-1Б (рис. 1) — один из разработанных в последние годы Институтом ядерной физики Сибирского отделения АН СССР высоковольтных импульсных ускорителей на основе трансформатора Тесла [1]. Прототипом его явился ускоритель ЭЛИТ-1 [2], построенный в Институте в 1966 г.

Все основные параметры ЭЛИТ-1Б (энергия электронов, импульсный и средний ток, средняя мощность) по сравнению с ЭЛИТ-1 при сохранении основных размеров ускорителя значительно повышены за счет улучшения конструкции установки и усовершенствования систем электропитания, вакуумной и др. В первую очередь это относится к средней мощности, которая увеличена на порядок.

Особое внимание было уделено вопросам надежности в целях обеспечения требований, предъявляемых к промышленным ускорителям. В результате длительных испытаний установлено, что наиболее ответственные узлы ускорителя — высоковольтная обмотка трансформатора и ускорительная трубка — работают без повреждений не менее 1000 ч. Срок службы катодного узла электронной пушки 400—500 ч.

Сочетание больших импульсной и средней мощностей электронного пучка, компактность ускорителя, простота конструкции и надежность в эксплуатации обеспечивают возможность использования ускорителя ЭЛИТ-1Б для различных промышленных целей. Международная кон-

ференция в Вене в апреле 1974 г. по вопросам стерилизации медицинских материалов облучением [3] и достижения различных организаций в области опыта облучения медицинских материалов, документально экспонируемые на стенде Института ядерной физики, показали особую перспективность использования этого ускорителя для стерилизации медицинских материалов электронным пучком.

Основные параметры ускорителя: энергия ускоренных электронов до 1,4 МэВ, импульсный ток до 50 А, импульсная мощность до 60 МВт, длительность импульса от 30 нс до 2,5 мкс, частота следования импульсов до 100 Гц. Средний ток пучка при длительном режиме работы до 4,5 мА, в форсированном режиме — до 6,5 мА. Параметры пучка могут регулироваться в широких пределах. Ускоритель прошел испытания в различных режимах, в том числе длительных (1000 ч), при энергии электронов 1,1—1,2 МэВ, частоте следования импульсов 100 Гц, средней мощности пучка 4—5 кВт.

Электрическая схема. Упрощенная структурная схема ускорителя показана на рис. 2. Первичный (L_1C_1) и вторичный (L_2C_2) контуры трансформатора Тесла имеют резонансные частоты 60 кГц и коэффициент связи, близкий к 0,6, при котором максимальное напряжение во вторичном контуре достигается на второй половине колебаний. Емкость C_1 (1,1 мкФ) заряжается до напряжения 15—25 кВ. Процесс заряда емкости колебательный. В зарядное устройство входят тиристорный регулятор напряжения типа РНТТ 330-250, промышленный силовой трансформатор с выпрямителем и зарядный дроссель. Колебания в контурах, начинающиеся при замыкании тиратронной ветви коммутатора, заканчиваются полным разрядом емкости C_1 . Прямая ветвь коммутатора состоит из двух тиратронов ТГИ1-2500/35, включенных параллельно, в обратной ветви использованы диоды типа ВЧ-160 (последовательно 40 шт.). В диодную ветвь коммутатора включено балластное сопротивление R_6 . Поскольку передача энергии во вторичный контур происходит в основном при работе прямой ветви коммутатора, на эффективность передачи энергии из первичного контура во вторичный балластное сопротивление практически не влияет, а вносимое

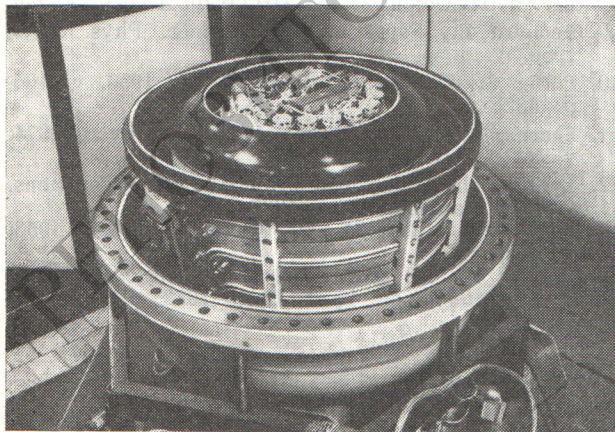
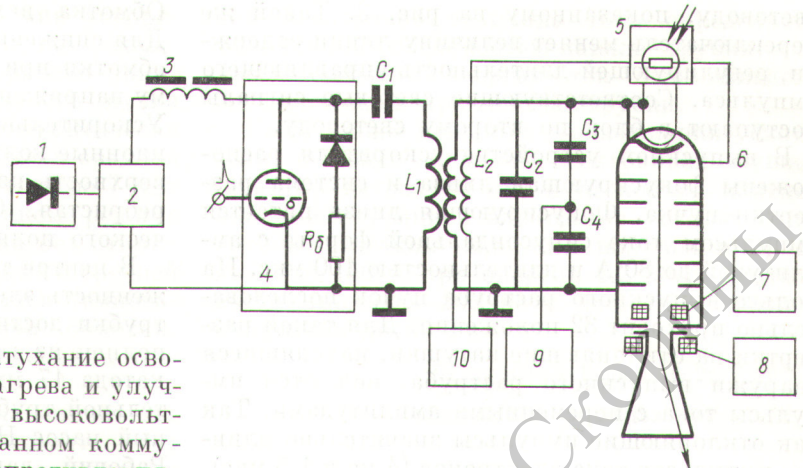


Рис. 1. Ускоритель ЭЛИТ-1Б

Рис. 2. Структурная электрическая схема:

1 — регулятор напряжения; 2 — выпрямитель; 3 — дроссель; 4 — коммутатор; 5 — блок управления электронной пушкой; 6 — сетка пушки; 7 — блок питания фокусирующей линзы; 8 — система развертки пучка; 9 — схема измерений и защиты от последующих пробоев; 10 — блок питания пушки



им впоследствии значительное затухание освобождает контуры от излишнего нагрева и улучшает электрическую прочность высоковольтного контура. Для принятой в данном коммутаторе величины балластного сопротивления, равной характеристическому сопротивлению контуров, амплитуда второй (синфазной ускоряющей) полуволны напряжения U_2 составляет всего 50% первой. Конструктивно балластное сопротивление представляет собой нихромовую проволоку, намотанную бифилярно на изоляционный каркас, с охлаждением проточной технической водой.

Рассеяние неиспользованной для ускорения электронов энергии в балластном сопротивлении снижает КПД установки по сравнению с режимом рекуперации [2], однако сохраняет остальные достоинства этого режима (малые потери энергии внутри ускорителя и малая длительность действия высокого напряжения). Схема коммутатора проста в настройке и надежна в эксплуатации. Прогресс промышленности в области создания мощных управляемых газоразрядных и полупроводниковых вентилях позволяет рассчитывать на возможность разработки в ближайшее время надежных коммутаторов с рекуперацией энергии для ускорителей этого типа.

Блок управления электронной пушкой, который устанавливается внутри высоковольтного электрода и имеет его потенциал, обеспечивает накал пушки и формирует подаваемый на сетку управляющий импульс с амплитудой до 5 кВ. Запуск генератора импульсов осуществляется частью высокого напряжения, снимаемого с емкостного датчика. Для обеспечения оптимального положения во времени управляющего импульса относительно ускоряющего напряжения в различных режимах работы запускающий импульс проходит через регулирующую линию задержки. Величину задержки линии изменяет переключатель (шаговый искатель), который срабатывает при подаче световых импульсов по

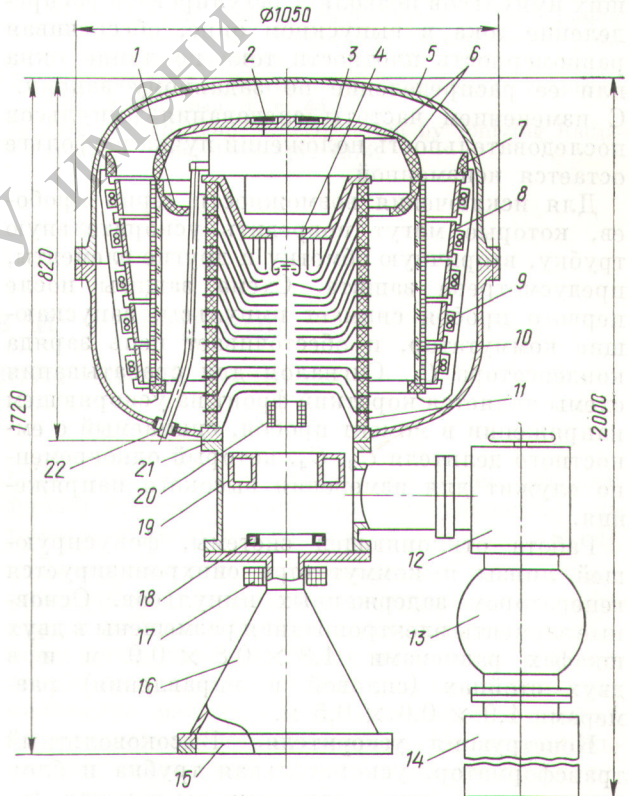


Рис. 3. Конструкция ускорителя:

1 — защитный электрод; 2 — емкостный датчик; 3 — блок управления пушкой; 4 — электронный пушка; 5 — котел; 6 — высоковольтный электрод; 7 — электрод; 8 — первичная обмотка; 9 — трубки для охлаждения первичной обмотки; 10 — вторичная обмотка; 11 — ускоряющая трубка; 12 — вентиль; 13 — азотная ловушка; 14 — вакуумный насос НОРД-250; 15 — титановая фольга; 16 — выпускной раструб; 17 — развертывающая система; 18 — пояс Роговского; 19 — азотная ловушка; 20 — фокусирующая линза; 21 — вакуумный объем; 22 — световод (2 шт.)

световоду, показанному на рис. 3. Такой же переключатель меняет величину линии задержки, регулирующей длительность управляющего импульса. Соответствующие световые сигналы поступают в блок по второму световоду.

В выпускном устройстве ускорителя расположены фокусирующая линза и система развертки пучка. Фокусирующая линза питается импульсом тока синусоидальной формы с амплитудой до 80 А и длительностью 100 мкс. На фольге выпускного раструба пучок последовательно проходит 32 положения. Для такой развертки на отклоняющие катушки, находящиеся снаружи выпускного раструба, подаются импульсы тока с переменными амплитудами. Так как отклоняющие импульсы значительно длиннее импульсов тока электронов (4 мс и 1,5 мкс), поле отклоняющих катушек квазипостоянно. Независимая коррекция амплитуд отклоняющих импульсов позволяет регулировать распределение тока в выпускном окне, обеспечивая равномерность плотности тока по длине окна или ее распределение по заданному закону. С изменением частоты следования импульсов последовательность положений пучка на фольге остается неизменной.

Для исключения возможности серии пробоев, которые могут повредить ускорительную трубку, вторичную обмотку и другие элементы, предусмотрена защита. Схема защиты после первого пробоя снимает импульсы, запускающие коммутатор, и обесточивает цепь заряда конденсатора C_1 . Сигналом для срабатывания схемы является короткий фронт на ускоряющем напряжении в момент пробоя, снимаемый с емкостного делителя C_3, C_4 , который одновременно служит для измерения высокого напряжения.

Работа отклоняющей системы, фокусирующей линзы и коммутатора синхронизируется генератором задержанных импульсов. Основные элементы электропитания размещены в двух шкафах размерами $1,8 \times 0,8 \times 0,9$ м и в двух стойках (силовой и управления) размерами $1,9 \times 0,6 \times 0,5$ м.

Конструкция ускорителя. Высоковольтный трансформатор, ускорительная трубка и блок управления пушкой расположены в котле, заполненном элегазом (SF_6) при давлении 10 ат (см. рис. 3).

Витки первичной обмотки, выполненные из медной шины, охлаждаются водой. Вторичная обмотка электрически однослойная, второй слой необходим для передачи питания по двум параллельным ветвям в блок управления пушкой.

Обмотка намотана на каркас из оргстекла. Для снижения перенапряжений между витками обмотки при электрических пробоях по полному напряжению установлен защитный электрод. Ускорительная трубка секционирована. Изоляционные кольца изготовлены из оргстекла. Поверхность изолятора, обращенная к вакууму, ребристая. Средняя напряженность электрического поля по изолятору 25 кВ/см.

В центре трубки электроды стянуты. Напряженность электрического поля в верхней части трубки достигает 100 кВ/см. Катод пушки выполнен из гексаборидланта (LaB₆). Диаметр катода 17 мм. Для вакуумной откачки ускорительной трубки используется магнитно-разрядный насос НОРД-250 с азотными ловушками. Рабочий вакуум в нижней части трубки 10^{-8} мм рт. ст.

Растроб выпускного устройства имеет окно размером 40×6 см с титановой фольгой толщиной 100 мкм. Диаметр пучка на фольге регулируется импульсной магнитной ливзой.

Масса ускорителя с выпускным устройством 1 т. Диаметр и высота котла 0,9 и 0,85 м.

Режимы работы ускорителя и результаты испытаний. Предусмотрено два режима работы ускорителя. В первом обеспечивается возможность максимального варьирования параметров, в частности длительности импульса тока пучка, которая оперативно (с пульта) может устанавливаться равной 30, 70, 100, 130, 160, 200, 240, 300, 500 и 1000 нс с фронтами около 10 нс. Во втором режиме работы, предназначенном главным образом для длительной работы при большой средней мощности, длительность импульса фиксированная, равная 2,5 мкс. Возможность регулирования остальных параметров (кроме длительности импульса) в этом режиме также обеспечена. Немонохроматичность пучка в этом случае (полный разброс энергии) составляет 15%. В обоих режимах энергия электронов может регулироваться в пределах 0,4—1,4 МэВ, импульсный ток от 0 до 50 А, частота следования импульсов от разовых до 100 Гц. Форма импульса тока в обоих режимах и при всех длительностях — прямоугольная. Переход с одного режима на другой требует замены внутри котла ускорителя блока управления электронной пушкой (см. рис. 1).

Длительные испытания ускорителя проводили, как указывалось, при средней мощности пучка 4—5 кВт. При мощности пучка 5 кВт и энергии 1,2 МэВ в среднем через 3—5 ч непрерывной работы происходит электрический пробой в трубке, после которого защита отключает

высокое напряжение. Через 1—2 мин ускоритель вновь может быть выведен на режим. Необратимых изменений в ускорителе такие пробои не вызывают. При мощности пучка 4 кВт и энергии 1,1 МэВ пробоев практически нет. На короткие промежутки времени средняя мощность пучка может увеличиваться до 7 кВт (за счет увеличения тока). В таком режиме ускоритель может работать 10 мин без отключений. При длительных испытаниях со средней мощностью пучка 5 кВт измерялась температура частей трубки и вторичной обмотки. Показания термоиндикаторов плавления не превышали 55 °С.

Ниже показана зависимость максимальных импульсного тока и мощности ускорителя от энергии электронов при частоте следования импульсов 1—2 Гц и длительности импульса 2,5 мкс.

<i>E</i> , МэВ	0,7;	0,8;	0,9;	1,0;	1,1;	1,2;	1,3;	1,4
<i>I</i> , А	38;	42;	48;	54;	56;	50;	40;	20
<i>P</i> , МВт	27,5;	33,5;	43;	54;	61;	60;	52;	28

Максимум тока ограничивается возможностями электронной пушки, при уменьшении энер-

гии электронов величина тока определяется пропускной способностью канала трубки, в области больших энергий ток ограничивается электрической прочностью трубки.

Была также испытана модификация ускорителя с более мощной электронной пушкой (диаметр катода 30 мм) и несколько измененной конфигурацией электродов ускорительной трубки. В таком виде был получен импульсный ток 150 А при энергии 1,2 МэВ, длительности импульса 200 нс и частоте следования импульсов до 50 Гц.

Поступила в Редакцию 26/V 1975 г.

В окончательной редакции 6/X 1975 г.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вассерман С. Б. и др. Высоковольтные импульсные ускорители электронов Института ядерной физики (Новосибирск) для промышленных и экспериментальных целей. IV Всесоюзное совещание по ускорителям заряженных частиц. М., 1974.
2. Абрамян Е. А., Вассерман С. Б. «Атомная энергия», 1967, т. 23, вып. 1, с. 44.
3. Proc. Intern. Conf. «Sterilization by Ionizing Radiation», Vienna, 1—4 Apr. 1974.

УДК 539.124.17.125.4.04

Сечения взаимодействия протонов и электронов с атомами водорода, углерода, азота, кислорода

Питкевич В. А., Виденский В. Г.

Для получения статистических функций распределения поглощенной энергии излучения в чувствительных объемах биологических объектов размерами ~ 10 — 100 Å целесообразно применять расчетные методы, в которых используются дифференциальные и полные сечения взаимодействия тяжелых заряженных частиц и электронов с атомами, входящими в состав биологической ткани. В опубликованной литературе информация по необходимым сечениям взаимодействия не обладает достаточной полнотой. Частичное восполнение недостающей информации, сбор и анализ литературных данных явились целью настоящей работы.

Для тяжелых заряженных частиц будем рассматривать область энергий, в которой существенны лишь процессы ионизации и возбуждения атомов среды. Например, для протонов такая область энергий будет начинаться

с 200 кэВ [1]. Для электронов будем рассматривать процессы ионизации, возбуждения и упругого рассеяния начиная с энергии 100 эВ.

Данные по сечениям возбуждения атомов заряженными частицами представлены, например, в работах [2—4]. Однако расчеты выполнены лишь для некоторых переходов, а полученные результаты служат для проверки применимости различных приближений в рамках квантовомеханической теории. Часто использование таких приближений связано со значительной вычислительной работой, которая порой не оправдывает затраченных усилий. Поэтому для получения систематических данных по сечениям возбуждения заряженными частицами наиболее интенсивных переходов в легких атомах использовали первое борновское приближение как наиболее простое. В этом приближении как для разрешенных, так и для