

ЛИНЕЙНЫЙ ИНДУКЦИОННЫЙ УСКОРИТЕЛЬ ЛИУ-2

© 2013 г. П. В. Логачев, Г. И. Кузнецов, А. А. Корепанов, А. В. Акимов,
С. В. Шиянков, О. А. Павлов, Д. А. Старостенко, Г. А. Фатькин

Институт ядерной физики им Г.И. Будкера СО РАН

Россия, 630090, Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 11

E-mail: o.a.pavlov@inp.nsk.su

Поступила в редакцию 25.02.2013 г.

Описан индукционный ускоритель ЛИУ-2, который будет использован как инжектор разрабатываемого большого линейного индукционного ускорителя с максимальной энергией электронного пучка 20 МэВ, предназначенного для малоразмерной импульсной рентгеновской томографии. Благодаря высокому качеству и большому току электронного пучка (2 кА), инжектор может работать как самостоятельный рентгеновский источник при энергии электронов 2 МэВ, с диаметром пучка на мишени менее 2 мм и длительностью импульса 200 нс. Полный выход энергии тормозного излучения равен 52.4 Дж, доля квантов с энергией выше 1 МэВ около 20% от полного выхода энергии. Разброс яркости излучения в телесном угле 10° составляет $\pm 5\%$, а поглощенная доза на расстоянии 1 м от мишени равна $32 \cdot 10^{-3}$ Гр, что позволяет использовать этот источник с ослаблением 10^3-10^4 для экспозиции на существующих рентгеновских пленках. Такой комплекс обладает хорошей просвечивающей способностью с максимальным пространственным разрешением рентгенограмм 0.5 мм и может использоваться в рентгенографической методике при газодинамической обработке изделий с оптической толщиной до 90 мм в свинцовом эквиваленте.

DOI: 10.7868/S0032816213060220

ВВЕДЕНИЕ

Для решения задач рентгенографии необходима регистрация быстропротекающих процессов с высоким пространственным разрешением при больших оптических толщинах исследуемого объекта. Выбор был сделан в пользу линейного индукционного ускорителя с магнитными сердечниками (ЛИУ-20) с энергией 20 МэВ и током 2 кА. Разработка проекта ускорителя ведется Институтом ядерной физики СО РАН по заданию РФЯЦ–ВНИИТФ. На первом этапе осуществления проекта был создан инжектор, который после изготовления и запуска в работу используется как самостоятельная рентгеновская установка ЛИУ-2. Ее основные технические характеристики: максимальное ускоряющее напряжение 2 МВ; максимальный ток пучка 2 кА; количество последовательных импульсов – 2; временной интервал между импульсами 2–30 мкс; размер рентгеновского источника (во всех режимах) – не более 2 мм (поперечный размер пучка на мишени, взятый на половине максимальной интенсивности); длительность импульса тока по плоской вершине (неоднородность $\pm 2\%$) – 200 нс; угол выхода излучения, формируемый коллиматором, 0.1 рад; среднее количество рабочих выстрелов по пластинам мишени до их полной замены – 150; максимальная частота повторения импульсов ускорителя в режиме непрерывной работы 0.1 Гц.

В состав ЛИУ-2 входят:

- электронно-оптическая система;
- система импульсного питания;
- система диагностики пучка;
- мишенный узел;
- система управления.

Общий вид конструкции инжектора линейного индукционного ускорителя показан на рис. 1.

1. ЭЛЕКТРОННО-ОПТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА

Электронно-оптическая система предназначена для формирования и фокусировки электронного пучка на мишень с энергией до 2 МэВ и током до 2 кА для получения тормозного рентгеновского излучения высокой яркости (рис. 2). Электронно-оптическая система включает в себя диодную электронную пушку с микропервееансом 2.16, установленную на первом проходном секционированном изоляторе, короткий канал между пушкой и ускоряющей секцией – вторым секционированным изолятором, транспортный канал до мишени, мишенный узел, 4 импульсные магнитные линзы, 3 корректирующие катушки, системы измерения тока и положения пучка, систему коррекции магнитного поля на катоде при старте пучка, системы вакуумной откачки и охлаждения. Первый и второй секционированные высоковольтные изоляторы идентичны и различаются лишь одним фланцем.

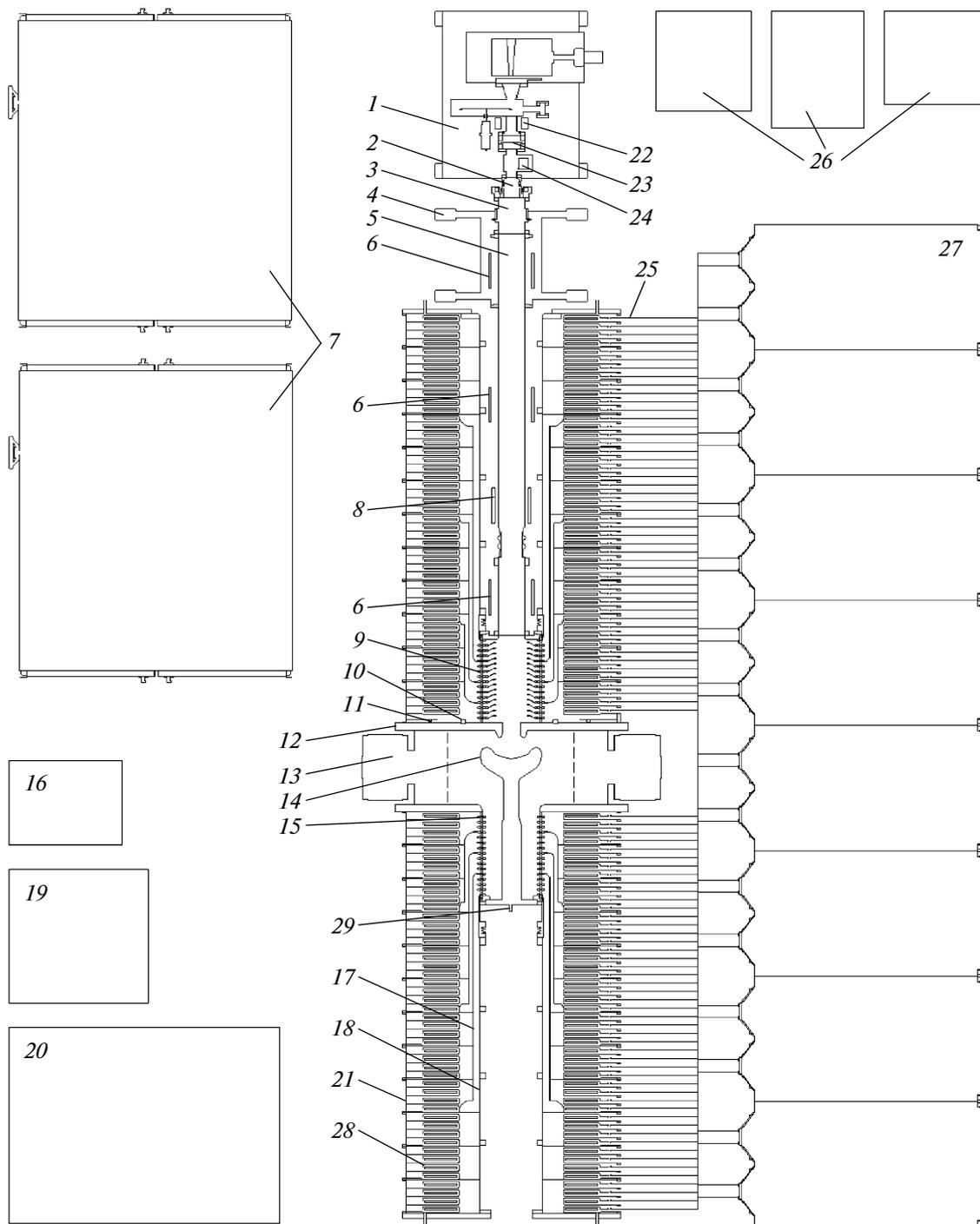


Рис. 1. Общий вид инжектора. 1 – мишенный узел; 2 – трансформатор тока на входе в мишенный узел; 3 – датчик положения пучка; 4 – опора вакуумной камеры; 5 – вакуумная камера; 6 – линза 1; 7 – зарядное устройство; 8 – корректор; 9 – второй секционированный изолятор; 10 – трансформатор тока на выходе пучка из анода; 11 – корректирующая катушка; 12 – центральный корпус с анодом; 13 – магниторазрядный вакуумный насос; 14 – катодный узел; 15 – первый секционированный изолятор; 16 – вакуумный пост откачки на форвакуум; 17 – соединительные трубы; 18 – внутренний кожух; 19 – система подачи воды; 20 – система подачи газа; 21 – корпус индукторов; 22 – линза 2; 23 – шиббер; 24 – цилиндр Фарадея; 25 – кабель; 26 – стойки управления; 27 – стойки модуляторов; 28 – индуктор; 29 – входной порт накала.

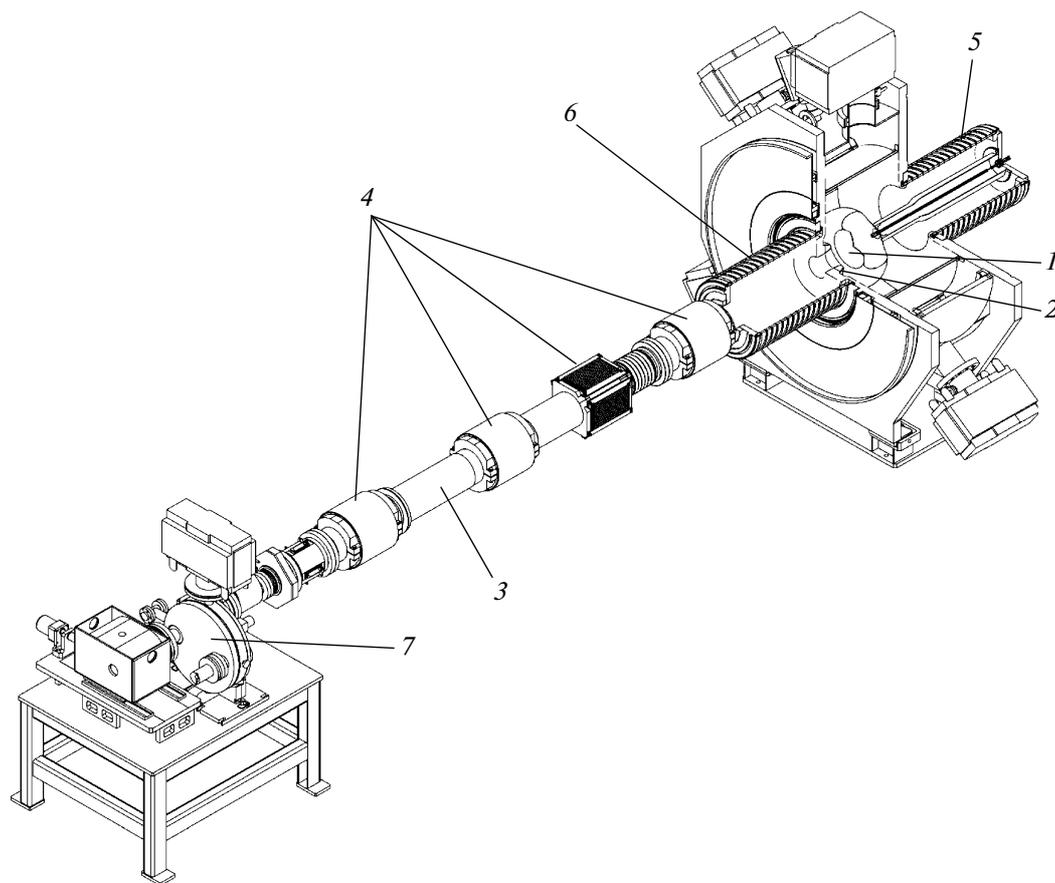


Рис. 2. Электронно-оптическая система. 1 — катодный узел; 2 — анодный блок; 3 — вакуумная камера; 4 — система магнитной фокусировки; 5 — первый секционированный изолятор; 6 — второй секционированный изолятор; 7 — мишенный узел.

Ускоряющее напряжение на пушке и втором секционированном изоляторе возникает при подаче напряжения на индукторы, которое в итоге суммируется. Напряжения на пушке и изоляторе могут меняться в зависимости от задачи в пределах 400 кВ—1 МВ.

Электронная пушка состоит из катодного узла с диспенсерным катодом, подогревателя из танталовой ленты, тепловых экранов и фокусирующего электрода, размещенных на катодном держателе длиной 850 мм. Анод пушки расположен на торцевой стенке центрального корпуса.

Катод нагревается до рабочей температуры в интервале 1100—1150°C с неоднородностью <math><10^\circ\text{C}</math>, мощность нагревателя до 3 кВт, сопротивление нагревателя при этой мощности ~1 Ом.

Питание нагревателя осуществляется переменным током с частотой 2 кГц. Перед включением импульса рабочего напряжения ускорителя нагрев катода отключается для исключения влияния магнитного поля нагревателя на качество формируемого электронного пучка. Катодный держатель крепится на первом секционирован-

ном изоляторе. Длина изолятора около 560 мм, рабочая длина 480 мм. Изолятор состоит из 16 керамических колец длиной 30 мм, между которыми впаяны медные электроды. Кольца изготовлены из высокоглиноземистой керамики. Электроды соединены с индукторами тонкими соединительными трубами для линейаризации потенциала вдоль секционированных изоляторов. Снаружи секционированных изоляторов размещены резисторы для удаления с электродов зарядов, появляющихся из-за рассеяния на остаточном газе и автоэмиссионных процессов. Резисторы также необходимы для удаления электронов, которые попадают на металлические электроды секционированного проходного изолятора при пробоях в вакуумной части изолятора, и электронов с энергией ниже номинальной, которые попадают на торец ускоряющей секции под влиянием магнитного поля линзы.

На фланцах центрального корпуса расположена система охлаждения корпуса от нагревания под воздействием излучения с катодного узла тепловой мощности до 3.5 кВт. Теплоносителем в

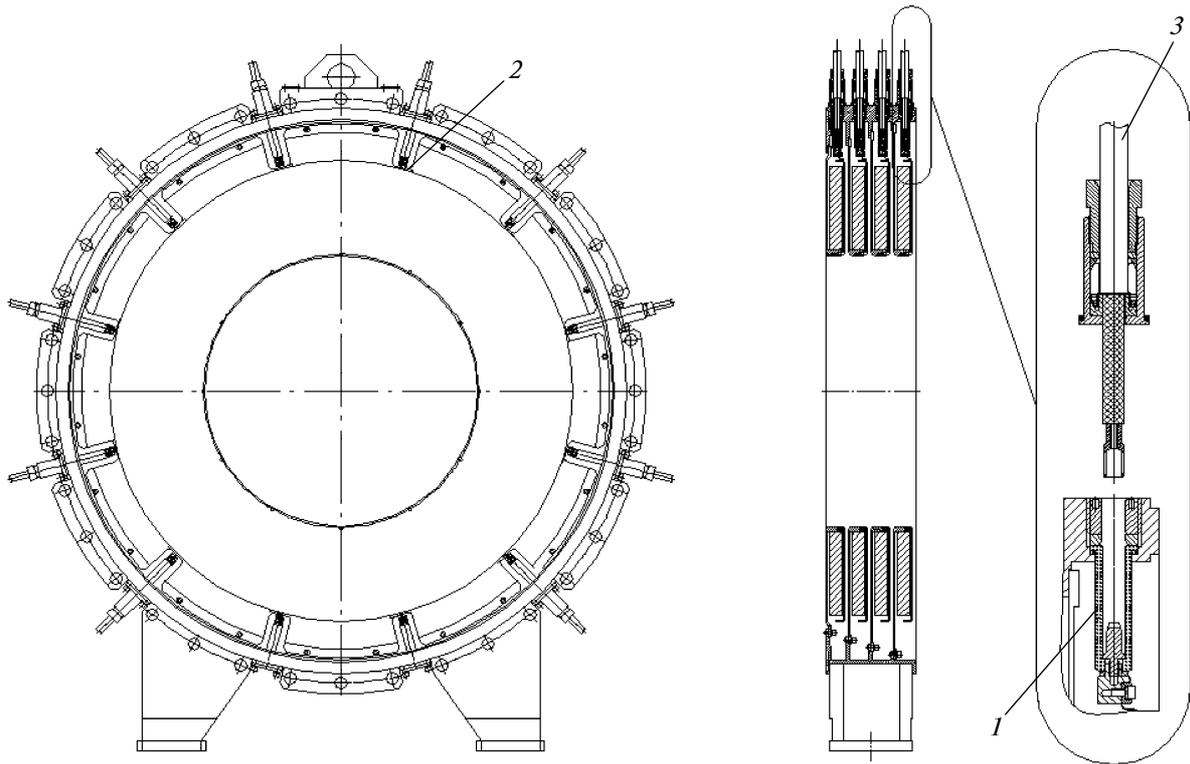


Рис. 3. Секция индукторов. 1 – изолятор; 2 – ввод; 3 – кабель.

системе является вода, которая охлаждается в теплообменнике с принудительной вентиляцией.

Второй секционированный изолятор соединен транспортным каналом с мишенным узлом. На канале расположены четыре импульсные магнитные линзы сопровождения пучка и его фокусировки на мишень. Три двухкоординатных корректора расположены в промежутках между линзами. Они питаются постоянным током и служат для компенсации влияния внешних магнитных полей.

Все линзы и корректоры имеют индивидуальное питание с долговременной стабильностью лучше 0.1%. Конструкция линз оптимизирована по величине сферической аберрации.

Контроль тока пучка осуществляется трансформаторами тока пучка, цилиндром Фарадея и датчиком положения пучка на полосковых линиях.

Первый трансформатор тока расположен на внешней стенке центрального корпуса вокруг ускорительной трубки, второй – перед мишенным узлом; там же находятся датчик положения пучка и цилиндр Фарадея.

Требования к вакуумной системе ЛИУ-2 определяются типом катода, используемого в ускорителе. Диспенсерный катод $\varnothing 180$ мм имеет рабочую температуру до 1150°C , при этом вакуум в ускорителе должен быть не хуже $5 \cdot 10^{-7}$ Торр. Эти

требования определяют тип вакуумной системы ускорителя. Она должна быть безмасляной – все элементы вакуумной камеры ускорителя перед сборкой должны проходить обезгаживающий отжиг в вакуумной печи. Сборка вакуумной системы производится в обеспыленном помещении. Для откачки и обдувки системы используются безмасляный откачной пост и гелиевый течеискатель. Все уплотнения на фланцевых соединениях вакуумной системы медные, основная откачка осуществляется магниторазрядными насосами типа НМД с суммарной производительностью 900 л/с.

2. ИМПУЛЬСНАЯ СИСТЕМА ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ПИТАНИЯ

Импульсная система высоковольтного питания предназначена для формирования двух прямоугольных импульсов ускоряющего напряжения с регулируемым временным интервалом между ними. Эта система состоит из импульсного высоковольтного трансформатора индукторного типа, кабельной системы, соединяющей импульсные высоковольтные источники питания (далее – модуляторы) с секциями импульсного высоковольтного трансформатора, 48 модуляторов, двух зарядных устройств и кабельной системы подключения зарядных устройств к модуляторам.

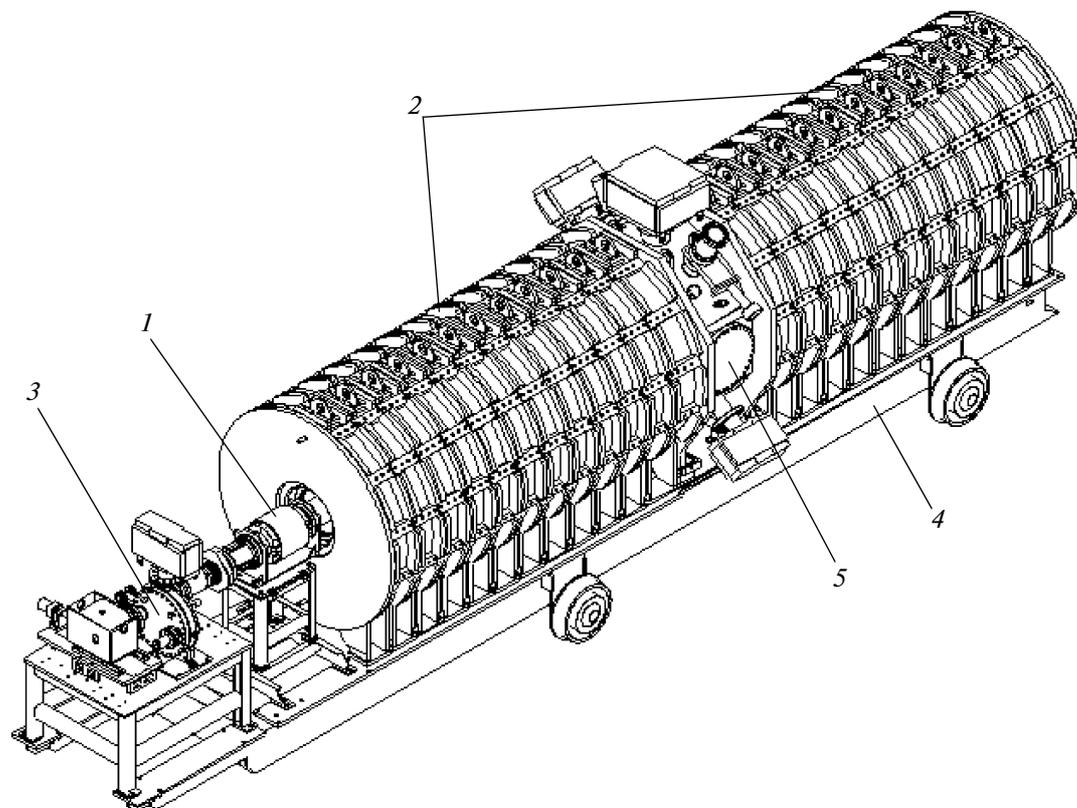


Рис. 4. Основной модуль ускорителя. 1 – электронно-оптическая система; 2 – импульсный высоковольтный трансформатор; 3 – мишенный узел; 4 – единая платформа; 5 – центральный корпус.

Импульсный высоковольтный трансформатор состоит из двух модулей по 1 МВ каждый. Для обеспечения электрической прочности индукторной системы оба модуля выполнены герметичными и заполнены элегазом. Каждый модуль имеет независимую газовую систему, испытанную при избыточном давлении 2.5 бар. Рабочее давление в системе 0.7 бар. Заполнение элегазом объемов индукторных модулей происходит через вентили, установленные на торцевых фланцах модулей. Контроль давления обеспечивается манометрами. Для заполнения модулей достаточно одного баллона объемом 40 л.

Модуль, в свою очередь, включает в себя 12 секций, в которых индукторы сгруппированы по 4 штуки [1]. Все секции (рис. 3) стягиваются между собой, образуя один общий объемный виток для каждой половины ускоряющей системы. Всего в индукторную систему входит 96 индукторов. Суммарное напряжение 48 индукторов первой половины системы высоковольтного питания инжектора прикладывается между катодом и центральным корпусом, а напряжение второй поло-

вины – к ускоряющей секции. Всего к модулям трансформатора подключено 960 силовых высоковольтных кабелей длиной 10 м каждый и 48 измерительных кабелей длиной 17 м каждый. Фланец катодного держателя имеет входной порт для подключения источника питания накала катодного узла (максимальные значения 60 В, 60 А, переменный ток 2 кГц).

Импульс напряжения, питающего индуктор, подается через герметичные изоляторы (1 на рис. 3), расположенные равномерно на внешней поверхности секции. Каждый индуктор имеет 12 высоковольтных вводов 2, расположенных равномерно по окружности, 10 из которых используются для подключения к индуктору питающих высоковольтных кабелей 3, идущих от модулятора, один служит для подключения измерительного высоковольтного делителя и один остается в резерве.

Все секции, кроме одной, идентичны. Нестандартная секция примыкает к корпусу вакуумного диода со стороны анодного отверстия и содержит в себе корректирующую катушку и измерительный трансформатор тока. Катушка позволяет коррек-

тировать нормальную компоненту магнитного поля от первой линзы на поверхности катода, трансформатор необходим для измерения тока пучка, прошедшего через анодное отверстие. Эта секция имеет дополнительные вводы для питания катушки коррекции и измерительного трансформатора тока электронной пушки.

Электронно-оптическая система, импульсный высоковольтный трансформатор и мишенный узел образуют основной модуль инжектора ускорителя, представленный на рис. 4. Он размещается на единой платформе.

На основном модуле размещены все высоковакуумные насосы, арматура газовой системы и системы водяного охлаждения центрального корпуса. Основной модуль имеет два порта вакуумной откачки, снабженных металлическими высоковакуумными шиберами. Первый порт расположен на центральном корпусе, второй — на мишенном узле.

Импульсные высоковольтные модуляторы установлены в восемь однотипных стоек, которые расположены около основного модуля ускорителя в один ряд. Каждая стойка укомплектована одним крейтом Comrac PCI с необходимой для работы системы электроникой. Зарядные устройства расположены в отдельном помещении по соседству с модуляторами и основным модулем. Каждое зарядное устройство соединяется с нужной группой модуляторов одним высоковольтным кабелем и системой разветвления зарядного тока, расположенной на стойках модуляторов. Управляется зарядное устройство независимо по каналу последовательной связи CAN.

Импульсная система высоковольтного питания разделена на несколько унифицированных импульсных источников (модуляторов), чтобы упростить схемотехнику получения двухимпульсного режима работы, упростить их конструктивное исполнение, использовать стандартные недорогие и надежные схемотехнические элементы. Каждый модулятор способен работать независимо и формировать на своей нагрузке (индукторе) импульсы требуемой формы [2].

Параметры модуляторов: напряжение и ток на выходе одного модулятора соответственно 21 кВ и до 9 кА; количество модуляторов — 48; число индукторов, запитываемых от одного модулятора, — 2; зарядное напряжение на формирующей линии модулятора 43 кВ; длительности плоской вершины (неоднородность $\pm 3\%$) импульса, его фронта и спада соответственно 200, 100 и 150 нс.

3. СИСТЕМА ДИАГНОСТИКИ ПУЧКА

Система диагностики пучка служит для измерения и оперативного контроля основных параметров электронного пучка, а именно, энергии и тока пучка, его поперечного положения и размера на входе в мишенный узел.

Система диагностики параметров электронного пучка содержит следующие элементы:

- 1) емкостные делители измерения напряжения на индукторах инжектора;
- 2) емкостный делитель измерения напряжения в вакуумном диоде;
- 3) трансформатор тока пучка за анодным отверстием;
- 4) трансформатор тока пучка на выходе из инжектора;
- 5) полосковый датчик положения пучка;
- 6) цилиндр Фарадея.

Емкостные делители позволяют измерять напряжение на входе индукторов. На четыре индуктора в модуле установлены два емкостных делителя на двух средних индукторах. Искажения формы импульса, связанные с отражениями от конца линии, восстанавливаются математически с точностью $\pm 2\%$. По сумме входных напряжений индукторов можно определить выходное напряжение на втором секционированном изоляторе. Сложение сигналов с индукторных делителей реализовано программно. Результирующее напряжение на втором секционированном изоляторе доступно в системе управления ускорителем.

Полное напряжение на вакуумном диоде измеряется независимо с помощью отдельного емкостного делителя напряжения. Верхнее плечо этого датчика представляет собой электрод сферической формы, установленный в вакуумном объеме диода (центральный корпус). Нижнее плечо делителя установлено на обечайке центрального корпуса непосредственно на вакуумном выводе.

Первый измерительный трансформатор тока расположен непосредственно за отверстием в анодном фланце и позволяет измерять ток пучка на выходе вакуумного диода.

На выходе инжектора установлен трансформатор тока для измерения полного тока пучка. Коаксиальная конструкция этого трансформатора вместе с малоиндуктивной конструкцией нагрузочного резистора позволила получить минимальное время нарастания выходного сигнала около 10 нс.

Полосковый датчик положения пучка, расположенный на выходе инжектора, представляет собой магнитоиндукционный датчик, от которого поступает информация о распределении тока и положении центра тяжести пучка. Калибровка датчика путем возбуждения его проводником с током, расположенным по центру датчика, показала, что погрешность определения поперечного положения центра тяжести пучка составляет < 0.7 мм.

Непосредственно перед мишенным узлом установлен цилиндр Фарадея специальной конструкции. Он состоит из четырех независимых приемников пучка — графитовых ламелей. Ток с каждой из ламелей выводится из вакуумного объема через герметичные высокочастотные разъемы,

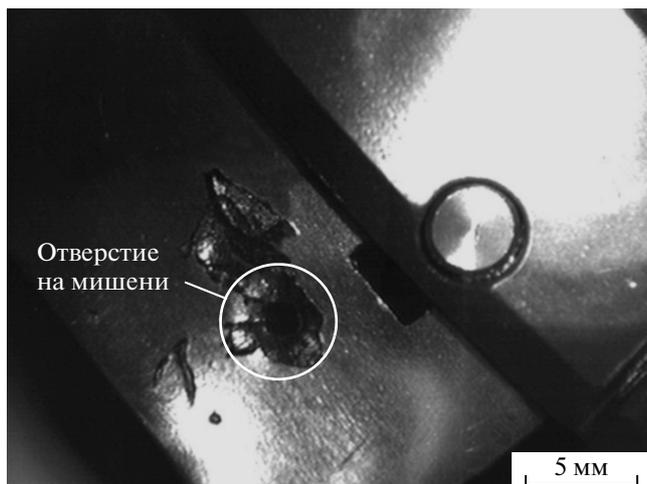


Рис. 5. Съемная пластина-мишень. Диаметр отверстия 1.45 мм.

что позволяет измерять ток пучка, попадающий на каждую из ламелей. По сигналам с периферийных ламелей можно оценивать фокусировку и центровку пучка относительно оси системы. Ток с выводов разъема цилиндра Фарадея измеряется трансформаторами тока.

4. УЗЕЛ МИШЕНИ-КОНВЕРТОРА

Основным параметром пучка электронов является его размер на мишени для конверсии в рентгеновское излучение. Оценить этот размер можно по отпечатку пучка на мишени. Мишенный узел в виде вращающегося колеса, на периферии которого закреплены съемные мишени-пластины из тантала толщиной от 0.4 до 1.2 мм, помещен в вакуумный объем. Вращение колеса обеспечивается шаговым двигателем через ввод вращения в вакуум магнитного типа. Встроенное в объем вакуумное окно позволяет регистрировать отпечаток пучка на мишени при помощи видеокамеры.

Плотность тока в фокусе на мишени составляет сотни тысяч ампер/см² и каждый выстрел оставляет на мишени отверстие. Плотность тока на краю отверстия при энергии 2 МэВ можно оценить в 2 кА/см², что, по крайней мере, в сто раз ниже плотности тока в центре отверстия и может считаться ореолом пучка. В предположении треугольного распределения плотности тока в отверстии и диаметра отверстия 1.45 мм (рис. 5) диаметр пучка на половине амплитуды плотности тока составит 0.7–0.8 мм, то же при гауссовом распределении плотности тока – 0.5–0.6 мм, что близко к полученному разрешению.

Мишенный узел отделен от ускорителя вакуумным шибером и имеет собственную независимую вакуумную откачку, что позволяет заменять

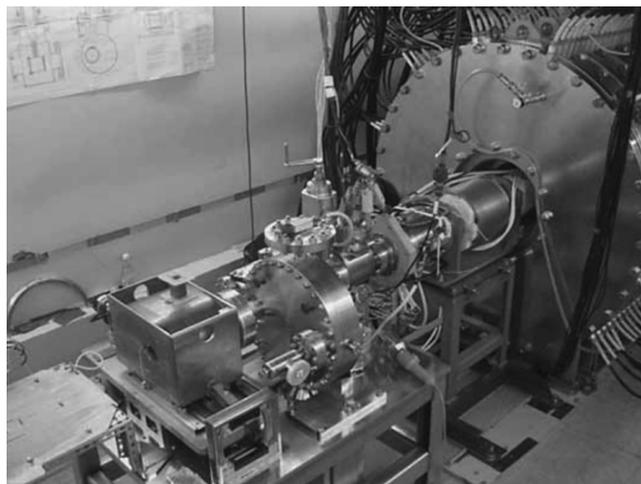


Рис. 6. Мишенный узел.

мишенные пластины без нарушения высокого вакуума в электронно-оптической системе ускорителя.

На рис. 6 показан внешний вид мишенного узла с коллиматором рентгеновского излучения.

Пучок с током 2 кА, энергией 2 МэВ, длительностью 200 нс (800 Дж в импульсе) направляется на мишень из тантала толщиной 0.4–1.2 мм. Пробег электронов с такой энергией в тантале по различным оценкам составляет 0.85–0.95 мм.

После падения пучка на мишень поток рентгеновского излучения через фильтры для низких энергий и коллиматор для нужного телесного угла поступает на исследуемый объект.

Полный выход тормозного излучения равен 52.4 Дж, доля квантов с энергией 1 МэВ около 24% от максимума. По направлению вперед в полном угле 10° разброс интенсивности излучения составляет ±5% и поглощенная доза на расстоянии 1 м от мишени равна $32 \cdot 10^{-3}$ Гр, что позволяет использовать этот источник с ослаблением 10^3 – 10^4 для экспозиции на существующих рентгеновских пленках. Источник просвечивает объекты с оптической толщиной до 90 мм в свинцовом эквиваленте.

5. СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ

Система управления предназначена для обеспечения согласованной работы всех подсистем ускорителя в соответствии с требованиями конкретного эксперимента. Узлы управления модуляторами, зарядными устройствами, источниками питания систем фокусировки и коррекции пучка, источником питания накала катода выполнены с применением встроенной электроники на основе цифровых сигнальных процессоров

и программируемых логических интегральных схем. Для управления перечисленными подсистемами используется последовательный CAN-интерфейс и специализированное программное обеспечение. Иерархически система управления построена на основе центрального крейта и отдельных крейтов, встроенных в стойки модуляторов и обеспечивающих синхронизацию работы и диагностику ее состояния.

Измерительная часть диагностики пучка, измерения временной зависимости токов и напряжений на выходе модуляторов, запусков и синхронизации основывается на электронике, разработанной в стандарте Compact PCI. Компьютеры и контроллеры системы управления работают под операционной системой Linux.

Система управления содержит оборудование, с помощью которого обеспечивается регистрация следующих выходных параметров ускорителя:

- форма импульса напряжения на вакуумном диоде;
- форма импульса тока на выходе вакуумного диода;
- формы импульсов рабочего напряжения на всех 96 индукторах;
- формы импульсов тока на всех 48 модуляторах;
- формы импульсов тока и напряжения на каждом зарядном устройстве;
- формы импульсов суммарного и разностного сигналов с датчика положения;
- форма импульса тока пучка на входе в мишенный узел;
- форма импульса тока пучка с цилиндра Фа-радея;
- ток накала и ток дуги для каждого из 96 тиратронов;
- напряжения на емкостях для каждого из 48 блоков размагничивания;
- токи и напряжения на всех 8 каналах магнитной коррекции;
- напряжения на емкостях для каждого из 4 источников питания линз;
- напряжения на формирующих линиях каждого из 48 модуляторов.

Все быстрые сигналы (длительностью 300–1000 нс) регистрируются цифровыми осциллографами ADC200-МЕ с частотой дискретизации 200 МГц. Медленные сигналы (длительностью более

10 мкс) регистрируются цифровыми осциллографами ADC812-МЕ с частотой дискретизации 4 МГц.

Постоянные напряжения и токи контролируются при помощи интегрирующих аналого-цифровых преобразователей, выполненных в стандарте CAN-BUS [3].

Вакуум в вакуумной камере контролируется по токам магниторазрядных насосов и показаниям вакуумметра основного объема. Более подробно система управления описана в [4].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основной целью разработки этого ускорителя было достижение предельно возможного качества пучка, что позволяет максимально уменьшить поперечный размер электронного пучка на конверсионной мишени. В результате, при энергии 2 МэВ, токе 2 кА, длительности импульса 200 нс, был получен размер отверстия на мишени равный 1.5 мм. По измерениям тока пучка трансформаторами тока можно говорить о токопрохождении пучка через электронно-оптическую систему, близком к 100%. Полученные параметры позволили использовать ЛИУ-2 в качестве самостоятельной рентгенографической установки, имеющей поперечный размер рентгеновского источника менее 2 мм (размер пучка на мишени, взятый на половине максимальной интенсивности). Просвечивающая способность установки достигает 90 мм в свинцовом эквиваленте. В настоящий момент ЛИУ-2 работает в составе рентгенографического комплекса по основной тематике исследований РФЯЦ–ВНИИТФ. Максимальное пространственное разрешение рентгенограмм, полученное на базе ЛИУ-2, равно 0.5 мм.

Работа была частично поддержана Министерством образования и науки РФ (контракты 14.740.11.0160, П2493).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Акимов А.В., Логачев П.В., Корепанов А.А. и др.* // ПТЭ. 2012. № 2. С. 129.
2. *Акимов А.В., Акимов В.Е., Бак П.А. и др.* // ПТЭ. 2012. № 2. С. 77.
3. *Козак В.Р.* Препринт ИЯФ 2008-18. Новосибирск, 2008.
4. *Бак П.А., Батраков А.М., Кадыров Р.А. и др.* // Автометрия. 2011. Т. 47. № 3. С. 120.