

## Сильноточные импульсные ускорители электронов

В. С. ГОРДЕЕВ, Г. А. МЫСКОВ, К. В. СТРАБЫКИН

У ИЯРФ есть все основания гордиться своим вкладом в мировую науку создания ускорителей и формирование принципов физического моделирования воздействия поражающих факторов ЯВ.

При создании ускорителей в некоторых случаях надо было находить и практически реализовывать новые инженерные и технические решения, преодолевая сложившиеся в мире сомнения в их реализации. Довольно часто сложность и новизна задач по выявлению закономерностей впервые полученных данных выводила исполнителей на новый уровень профессиональных знаний.

Задачами создания лабораторных источников ионизирующего излучения на основе ускорителей электронов занимались большие коллективы специалистов и по нескольким направлениям.

Создание ускорителей электронов прямого действия начиналось с идеи использования их в качестве источников ионизирующего излучения в импульсных рентгенографических исследованиях, инициатором и руководителем которых был В. А. Цукерман. Идея себя оправдала, была экспериментально подтверждена и лучшие образцы ускорителей (МИГ-5000) обеспечивали рентгенографирование свинцовых деталей толщиной до 180–200 мм.

Испытания первых образцов ядерных зарядов, работы по их совершенствованию и созданию средств доставки выявили и потребовали соответствующего методического и приборного обеспечения исследований по радиационной стойкости аппаратуры автоматики и электро-радиоэлементов. Эти требования, усиленные пониманием ограничений, а потом и близящимся запретом натуральных испытаний, мотивировали развитие работ по созданию для исследований радиационной стойкости лабораторных источников ионизирующих излучений и аппаратуры, регистрирующей излучения. Обращение к ускорителям прямого действия было органически естественным и целесообразным. На ускорителе МИГ-5000 было выполнено свыше 200 первых НИР по исследованию радиационной стойкости материалов, элементов и узлов радиоэлектронной аппаратуры. Активно развивались методы измерений параметров импульсов рентгеновского излучения подобных ускорителей.

Для расширения возможностей ускорителей прямого действия (прежде всего, повышения



*Создатели рентгеновских установок. 1-й ряд (слева направо): К. Ф. Зеленский, В. А. Цукерман, Н. К. Плехов; 2-й ряд: В. И. Григорьев, И. А. Трошкин, А. В. Пилипенко, Н. И. Завада, Г. Г. Геворкян, 1970-е гг.*

мощности) их стали дополнять формирующими линиями (ФЛ). Было разработано несколько ускорителей такого типа: ОРИОН-1, РИУС-ЗВ, РИУС-5, ИЛТИ. Проведены исследования различных ключевых конструкторских решений (различные варианты диэлектрика в ФЛ – деионизованная вода, глицерин, газ; способы вывода излучения и варианты согласования диода с ФЛ, оптимизация режимов и др.). На ускорителях выполнен большой объем исследований по созданию регистрирующей аппаратуры как для выходного излучения, так и для объектов испытаний. За работы по созданию новых ускорителей, выходные параметры которых на порядок превосходят параметры МИГ-5000, лауреатами Государственной премии СССР стали К. Ф. Зеленский, В. А. Балакин, О. П. Печерский.

Анализ зарубежных разработок и теоретические выкладки показывали, что дальнейшее увеличение параметров в предложенных ускорителях прямого действия было не возможно. Повышение значимости лабораторных исследований и испытаний радиационной стойкости (особенно для крупногабаритных объектов вооружений и военной техники) требовало увеличения площадей облучения, доз и мощностей. Под руководством А. И. Павловского был начат активный поиск новых, обоснованных научно-технических решений, которые позволили бы обеспечить создание мощных ускорителей заряженных частиц и даже обойти США.

Ключевым стартовым моментом явилось предложение (1965 г., В. С. Босамыкин, А. И. Герасимов, А. П. Клементьев, А. И. Павловский) по созданию безжелезного импульсного сильноточного линейного ускорителя (ЛИУ) с «совмещенными индукторами» (так названо авторами). Кроме того, В. С. Босамыкиным, А. И. Герасимовым и А. И. Павловским было предложено техническое решение по транспортировке сильноточных пучков на расстояние 10 м и более. При этом следовало решить сложную техническую задачу – создать многоканальные разрядники, которые бы при большом их количестве (тысячи штук) стабильно и управляемо срабатывали с временным разбросом не более нескольких наносекунд. Предложения вызвали интерес руководства ВНИИЭФ, и при его поддержке направление начало активно развиваться.

В ЛИУ не требуется изоляция на полное ускоряющее напряжение, соответствующее выходной энергии заряженных частиц, что создает значительные преимущества перед ускорителями прямого действия. Максимальная энергия частиц в ЛИУ не имеет принципиальных ограничений, а предельная – определяется габаритами, стоимостью установки и эффективностью транспортировки сильноточных пучков на большие расстояния. ЛИУ собирается из одинаковых ускорительных модулей – индукторов или блоков из них, что упрощает разработку, изготовление и эксплуатацию установки.

В 1967 г. впервые в мире был введен в действие экспериментальный образец ускорителя ЛИУ-2 (руководитель – А. И. Павловский, основные разработчики – А. И. Герасимов, В. С. Босамыкин, Д. И. Зенков, А. П. Клементьев, В. П. Царев, В. А. Тананакин). Ускоритель стабильно и устойчиво работал с момента ввода в действие, подтвердив теоретические предпосылки, схемные и технические решения, положенные в основу его реализации. На ЛИУ-2 выполнен широкий комплекс экспериментальных исследований возможностей таких установок. Главное, была практически подтверждена реализуемость новых предложений: наносекундный разброс группового (48 шт.) включения многоканальных разрядников и эффективная проводка сильноточного пучка электронов на расстояние до 5 м.

Дальнейшим шагом в развитии ЛИУ явилось предложение А. И. Павловского и В. С. Босамыкина (1968 г.) о применении в индукторах радиальных линий. Это техническое решение позволило (1971 г., А. И. Павловский, Г. Д. Ку-

лешов, А. И. Герасимов) обосновать разработку нового мощного ускорителя ЛИУ-30 (30 МэВ, 100 кА, 20–40 нс). Такая установка должна была стать базовой для облучательного комплекса (ускоритель, реактор, ударные стенды), обеспечивающего испытания крупногабаритных объектов военного назначения (вплоть до ракетных отсеков и бронетанковой техники). Положительные результаты исследований, подтверждающих реализуемость предложения (проведены под руководством Г. Д. Кулешова), а также проработки вопросов выполнения проектных работ и создание такого комплекса показали необходимость строительства специальных зданий. Но на международных уровнях уже активно обсуждались вопросы моратория на ядерные испытания, что и мотивировало в 1974 г. Постановление ЦК КПСС и СМ СССР о создании во ВНИИЭФ облучательного комплекса ПУЛЬСАР.

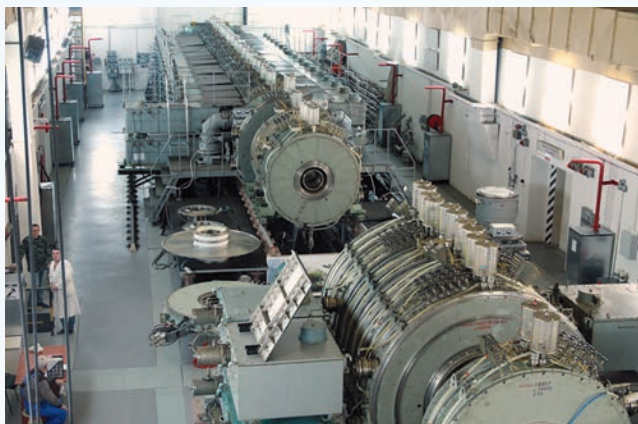
С целью ускорения начала проведения испытаний и для детальной проработки предложений (одновременно с работами по проекту «Пульсар») во ВНИИЭФ было принято решение создать уменьшенный образец ускорителя (ЛИУ-10). К концу 1977 г. ЛИУ-10 (14 МэВ, 40 кА, 20–40 нс) был сдан в опытную эксплуатацию, достаточно быстро на нем были получены расчетные параметры тормозного излучения, и он стал использоваться в качестве облучательной установки. Это был бесспорный успех напряженного труда большого коллектива сотрудников сектора (отмечен Ленинской премией).

В 1984 г. установка ЛИУ-10 была оснащена импульсным ядерным реактором ГИР. На облучательном комплексе ЛИУ-10-ГИР экспериментально подтверждена возможность моделирования комплексного воздействия. На ЛИУ-10 с



Лауреаты Ленинской премии 1982 г. 1-й ряд (слева направо): А. П. Клементьев, А. И. Герасимов, А. И. Павловский (научный руководитель работ), В. С. Босамыкин; 2-й ряд: К. А. Морунов, В. А. Савченко, В. Ф. Басманов





*Базовая установка комплекса ПУЛЬСАР —  
ускоритель ЛИУ-30*

1978 по 1990 г. проведено 5 тысяч экспериментов по отработке радиационной стойкости изделий 15 институтов и КБ, с последующей оценкой стойкости (по ряду изделий) в подземных ядерных испытаниях.

ЛИУ-30 был принят в эксплуатацию в 1988 г. Он показал рекордную для установок такого типа энергию ускорения электронов 40 МэВ и максимальную дозу тормозного излучения 10 кР на 1 м от мишени при длительности импульса 20 нс. На ЛИУ-30 сразу же начались исследования и отработка радиационной стойкости компонентов крупногабаритной военной техники (ВТ), а затем и образцов ВТ в целом.

Ускоритель использовался в автономном режиме и в составе облучательного комплекса совместно с ядерным импульсным реактором с компактной металлической активной зоной БР-1.

За период 1988–2001 гг. проведено более 6 тысяч рабочих включений ЛИУ. Минимальный интервал между его запусками составил 5 минут. С таким интервалом производилось до 3-х последовательных срабатываний ЛИУ в одной серии.

В период 2005–2013 гг. при непосредственном руководстве С. А. Горностай-Польского проведены обширные работы по модернизации ускорителя ЛИУ-30 с целью повышения его надежности и стабильности параметров: увеличен осевой зазор в одной из радиальных линий; проведена замена элементов, выработавших ресурс; выполнена модернизация магнитной системы транспортировки и фокусировки сильноточного электронного пучка.

В процессе работы на ускорителях ЛИУ-10 и ЛИУ-30 выявилась возможность (предложение В. С. Гордеева, 1979 г.) замены водоизолированных радиальных линий в индукторах линиями со ступенчатым изменением волнового сопротив-

ления – ступенчатыми формирующими линиями (СФЛ). Это позволяло в несколько раз увеличить амплитуду ускоряющего напряжения, по сравнению с величиной напряжения зарядки этих линий, и снизить количество коммутирующих разрядников. Предложение было поддержано В. С. Босамыкиным и стало активно развиваться. Были последовательно разработаны, изготовлены и исследованы ускорители И-3000, СТРАУС и СТРАУС-2. Наиболее мощным из этих ускорителей был СТРАУС-2 (1989 г.). Он нашел применение как автономная облучательная установка с дозой тормозного излучения около 20 Р на площади диаметром 0,8 м на расстоянии 1 м от мишени.

Таким ускорителем дооснащены комплексы ПУЛЬСАР (1999 г.) и ЛИУ-10М-ГИР2 (2000 г.).

Успехи в разработке СФЛ позволили начать в 1990 г. проектирование (для замены ускорителя ЛИУ-10) более совершенного ускорителя ЛИУ-10М с индукторами на ступенчатых линиях (аналог СТРАУС-2).

Новый ускоритель (20 МэВ, 50 кА, 20 нс) был введен в действие в 1994 г. Ускоритель содержит всего 16 индукторов, число тригатронов в которых уменьшено на 20 % по сравнению с их количеством в ЛИУ-10; упрощена система высоковольтной синхронизации. Как и прежде, высокие результаты были обеспечены увлеченностью и многолетним самоотверженным трудом большого коллектива специалистов физического сектора. Ускоритель создавался под научным руководством (на начальном этапе) А. И. Павловского, а после его кончины (1993 г.) – под руководством В. С. Босамыкина. Коллектив лаборатории во главе с В. С. Гордеевым, несмотря на большие материально-технические трудности, работал над созданием ускорителя с энтузиазмом. Основными ответственными исполнителями работ по этой установке являлись: В. Ф. Басманов, А. П. Гридасов – разработка конструкторской документации; О. Н. Сютин, А. В. Будаков, Г. А. Мысков, А. В. Косачев, А. Н. Петров, М. В. Загускин, Н. Н. Сулин, В. С. Никольский, В. О. Филиппов, А. С. Федоткин.

После запрещения подземных ядерных испытаний и сокращения ядерного потенциала РФ в начале 1990-х гг. стала актуальной проблема создания мощных импульсных установок для рентгенографических комплексов (РГК) и мультитераваттных установок для генерации жесткого короткоимпульсного рентгеновского излучения.

С целью создания РГК был предложен проект (В. С. Гордеев, Г. А. Мысков, Е. С. Михайлов,

1997 г.) ускорителя ЛИУ-Р, представляющий собой лабораторную установку – источник ионизирующего излучения высокой интенсивности с малым фокусным пятном.

С 2000 г. работы выполнялись в отделении В. С. Гордеева в отделе Г. А. Мыскова. В 2007 г. в новом здании начались экспериментальные исследования по отработке режимов функционирования макета ускорителя с инжектором и четырьмя индукторами. Ускоритель ЛИУ-Р-Т запущен в работу в конце 2015 г. Он генерирует одиночные импульсы тормозного излучения высокой интенсивности с малым фокусным пятном на мишени и предназначен для применения в импульсной радиографии быстропротекающих процессов. Как и в случае ЛИУ-10М, инжектор и индукторы ЛИУ-Р-Т созданы на основе ступенчатых формирующих линий с распределенными параметрами. Это позволило вдвое повысить темп ускорения и увеличить в 5–10 раз ток электронного пучка по сравнению с наиболее мощными зарубежными рентгенографическими установками (DARHT, AIRIX, Dragon), выполненными по схеме классических ЛИУ с индукторами на ферромагнитных сердечниках. По дозовым параметрам ускоритель ЛИУ-Р-Т на порядок превосходит аналогичные отечественные установки для импульсной радиографии и сопоставим с лучшими зарубежными установками подобного класса. Благодаря характерной для ЛИУ модульной конструкции, дозовые и энергетические параметры ускорителя, в случае необходимости, могут быть значительно повышены путем добавления индукторов в состав его ускоряющей системы. Большой вклад в создание ускорителя внесли Г. А. Мысков, С. Т. Назаренко, В. С. Никольский, Е. С. Михайлов, В. В. Хвостов, Н. Н. Сулин, О. В. Забелин, Д. Ю. Гарин, Н. Н. Утюмов, И. А. Бабков, Н. П. Наумов и др.

С целью получения мощных коротких импульсов жесткого рентгеновского излучения В. С. Гордеевым, Г. А. Мысковым, Е. С. Михайловым и В. В. Шевченко в 1998 г. выполнено расчетно-теоретическое обоснование шестнадцатимодульной установки ГАММА. В конце 2005 г. под руководством А. В. Гришина и В. С. Гордеева были завершены работы по изготовлению и монтажу сильноточного импульсного ускорителя электронов ГАММА-1 (2 МэВ, 750 кА, 45 нс). Ускоритель создан на базе пятикаскадной формирующей линии и двухкаскадного преобразователя длительности импульса. Данная схема позволяет сформировать достаточ-



Ускоритель ЛИУ-Р-Т

но короткий электромагнитный импульс на низкоимпедансную нагрузку с высоким КПД. Ускоритель может использоваться как самостоятельная установка, так и в составе многомодульной установки, подобно американской установке ДЕКАДА. В 2015 г. для полномасштабной установки было завершено строительство

здания, и в 2020 г. введена в эксплуатацию установка ГАММА-4, состоящая из четырех типовых модулей.

Таким образом, в ИЯРФ впервые в мире предложен и реализован ряд эффективных уникальных сильноточных ускорителей электронов и на их основе – облучательных комплексов с импульсными ядерными реакторами, позволяющих моделировать в лабораторных условиях действие мгновенного гамма-излучения, нейтронов и других видов воздействия поражающих факторов ядерного взрыва на военную технику. В условиях запрещения ядерных испытаний установки служат экспериментальным средством для решения актуальных проблем обеспечения надежности и боеспособности существующей и разрабатываемой ВТ. За прошедшие 70 лет на установках физического отделения отработаны и испытаны на радиационную стойкость системы многих ракетных комплексов. По результатам разработки исследований ускорителей типа ЛИУ с радиальными линиями и СФЛ получено более 80 свидетельств и патентов на изобретения.

За работы по созданию и развитию облучательных комплексов, а также по результатам испытаний техники специального назначения лауреатами премии Правительства РФ (2005 г.) стали: В. С. Гордеев, А. П. Гридасов, А. В. Гришин, А. В. Грунин, В. Ф. Колесов, А. С. Кошелев, В. А. Савченко, В. Д. Селемир.

**ГОРДЕЕВ Вячеслав Серафимович –**

главный научный сотрудник, доктор физ.-мат. наук,  
лауреат премии Правительства РФ

**МЫСКОВ Геннадий Алексеевич –**

начальник научно-исследовательского отдела

**СТРАБЫКИН Кирилл Валерьевич –**

начальник научно-исследовательского отдела