

# ХАРЬКОВСКИЙ УСКОРИТЕЛЬ ЭЛЕКТРОНОВ ВО ВНИИЭФ

Ю. М. МАКАРОВ

Ускоритель электронов ЛУЭ-5, разработанный в ХФТИ по заказу Ю. Б. Харитона, прибыл в 1956 г. на «объект» автотранспортом, когда еще не было закончено строительство каземата на лесной полигонной площадке для его размещения и использования во взрывных исследованиях. Поэтому решено было ускоритель сначала смонтировать в небольшом одноэтажном домике на территории завода ВНИИЭФ (ныне в этом домике находится медпункт и аптека). Мы этот ускоритель называли ЛИУ — линейный импульсный ускоритель, так как главной его особенностью был именно импульсный характер генерируемого проникающего рентгеновского излучения.

Поперечные габариты резонаторов ЛИУ составляли около 2 м. Чтобы внести их в помещение, понадобилось полностью разрушить одну из стен домика. Потом ее опять сложили из кирпича, уже большей толщины, так как именно в эту сторону выводился электронный пучок и рентгеновское излучение. Внутри домика была вырыта и обложена кирпичом яма глубиной 1,7 м с поперечными размерами 1,2×3 м. для размещения двух паромасляных диффузионных насосов М-1000, висящих под «брюхом» ускорителя и необходимых для создания в полостях резонаторов разрежения  $10^{-6}$  мм рт. ст. Здесь же в яме стояла фреоновая холодильная установка для вымораживания паров вакуумного масла на выходе из указанных насосов.

Разработчики В. В. Чечкин и Н. Н. Назаров в течение полутора месяцев помогали монтировать ускоритель и настраивать его, передавая нам свой опыт. Мы — это группа сотрудников газодинамического отделения (ныне Институт физики взрыва, ИФВ) из отдела Д. М. Тарасова: инженеры О. В. Федоровский, Ю. М. Макаров, А. Н. Поспелов, Т. И. Петрова, техники и лаборанты Г. В. Зубков, М. Л. Стайцов, В. М. Жалостников, А. Г. Балеевский, М. Г. Коротких.

Оба резонатора были связаны друг с другом шестью отверстиями диаметром 110 мм для синхронного формирования в резонаторах стоячей электромагнитной волны 12 генераторами высокочастотной энергии. В каждом генераторном шкафу работали две генераторные лампы типа Г-465, настроенные на частоту 137 МГц (длина

волны  $\approx 2,2$  м). Лампы включались на импедансы отрезков коаксиальных волноводов диаметром 120 мм, один конец из которых обеспечивал согласованную нагрузку, а второй вводился в виде петли внутрь резонатора для его запитки мощностью примерно 1,2 МВт, отбираемой из сеточного контура каждой лампы. Катодный и анодный узлы служили для настройки генераторов. Вот с этими-то настроечными элементами и приходилось «биться» большую часть времени, чтобы обеспечить синхронную работу 12 генераторов на общую нагрузку. Оказалось, что это очень сложно.

Сначала харьковчане, а потом и мы потратили несколько дней, чтобы получить эффект ускорения электронов. Правда, когда был приобретен опыт, стало легче. Подстройка занимала уже только часы. Она производилась непосредственно в ускорительном зале. Дистанционного управления не было. Поэтому приходилось плавно вращать две ручки (анодного и катодного контуров) на каждом из 12 генераторов по очереди. Часто это делали одновременно двое или трое операторов, находясь около тех генераторных шкафов, которые, как нам казалось, были в данный момент ответственными за успех настройки. После отъезда Чечкина и Назарова такими операторами были А. Н. Поспелов, Т. И. Петрова и Ю. М. Макаров. Кроме этой настройки, мы пользовались еще одним эффективным приемом: с помощью механического рычага прогибали внутрь второго резонатора его заднюю торцевую стенку. Но этот способ мы применяли только в крайних случаях, когда уже вообще ничего не получалось.

Остальное оборудование ускорителя тоже было очень громоздким. Кроме генераторов (шкафы высотой 2,2 м), стояли еще 12 модуляторных шкафов такой же высоты сечением 0,8×0,8 м и 12 шкафов управления с реле, трансформаторами, блоками питания, кнопочными пультами и др. Специалистам, наверное, ясна необходимость этих узлов. А вот модуляторы на мощных тиратронах высотой каждый более 1 м нужны были для формирования импульсов напряжения амплитудой 20 кВ и длительностью 250–300 мкс для запитки ламп Г-465. В течение этого промежутка времени как раз и длилась генерация высокочастотных импульсов, закачиваемых в резонаторы.

Одной из задач взаимной настройки генераторов и резонаторов являлось возбуждение в резонаторах так называемых  $\pi$ -колебаний, когда в каждый момент времени электрические поля в резонаторах находились в противофазе. Длина каждого резонатора равнялась примерно половине длины волны высокочастотных колебаний. Поэтому электрон, пролетев в ускоряющем поле по оси первого резонатора со скоростью, близкой к скорости света, попадал во второй резонатор, когда в нем тоже возникало ускоряющее поле. Электрон, тем самым, приобретал суммарную энергию 5 МэВ. При указанной частоте 137 МГц длительность каждого высокочастотного импульса, когда электрон ускоряется, составляет 7–10 нс, так что каждый импульс тормозного излучения длительностью 200 нс состоял из 20–30 таких высокочастотных импульсов (банчей). На осциллографе с хорошим временным разрешением мы видели эти банчи, похожие на зубчики пилы, на гребне импульса.

В конце 1956 г. технология настройки ЛИУ нами была усвоена, и он был выведен на проектные параметры: энергия электронов ~ 5 МэВ, ток пучка электронов — 5 А, длительность импульса ~ 0,2 мкс. При падении пучка электронов на танталовую мишень возникало рентгеновское излучение, которое на расстоянии 1 м от мишени «просвечивало» 75 мм свинца при использовании наиболее чувствительной рентгеновской пленки и усиливающих экранов (конвертер «рентген-свет») типа УФД.

В 1957 г. каземат на полигонной площадке был построен с перспективным запасом по площадям и другим параметрам, и мы начали перевоз узлов ЛИУ. Этот каземат в газодинамическом отделении около 50 лет оставался самым большим и престижным. После монтажа ЛИУ сюда

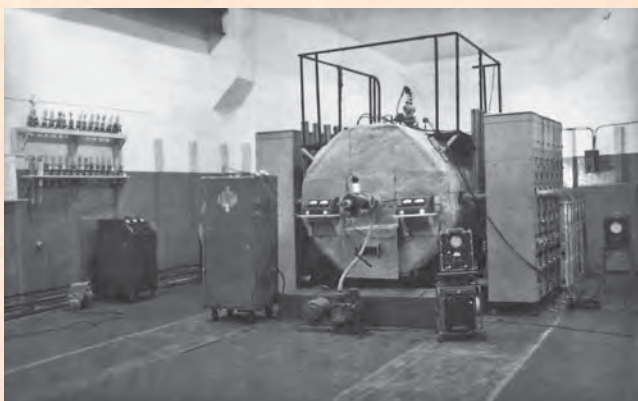


Рис. 1. ЛУЭ-5. Торцевая сторона резонатора облицована слоем свинца толщиной 5 мм

опять приезжали из Харькова Чечкин и Назаров на период его новой настройки.

После получения проектных параметров ЛИУ измеренный размер фокусного пятна на мишени составил  $3,5 \times 4$  мм, что было допустимо. Мы научились оперативно менять вольфрамовую спираль (диаметр провода 0,7 мм, длина 14 см) катода инжектора — источника электронов. Спираль всегда работала с перекалом и требовала частой смены. Так же, как и харьковчане, мы пытались найти ей замену, в том числе, недавно появившимися L-катодами. Но ничего лучше вольфрама с перекалом не подобрали.

На рис. 1 фотография ЛУЭ-5 внутри каземата. Надо признаться, что защите от рассеянного рентгеновского и высокочастотного электромагнитного излучения мы тогда не уделяли должного внимания. На рис. 2 приведены огибающие высокочастотных колебаний в первом и втором резонаторах. Во время прохождения электронного пучка через резонаторы происходит «подсадка» запасенной там энергии, которая фиксируется на огибающей в виде острого пика, направленного к оси X на осциллограмме. Форма фокуса электронного пучка на выходе ускорителя показана на рис. 3.

Остановимся на временной последовательности процессов, реализующихся при проведении взрывного эксперимента. После подстройки генераторов ЛИУ и возбуждения в резонаторах  $\pi$ -колебаний, устойчиво повторяющихся при периодическом запуске всех систем, начинали к этому режиму добавлять по временной программе новые операции: включали накал спирали инжектора; подавали через 2 с одновременно с запуском модуляторов сигнал на линию задержки; шел с линии задержки через ~ 80 мкс сигнал на подрыв исследуемой сборки; еще через ~ 40 мкс инициировалось срабатывание инжектора; готовые к ускорению резонаторы пропускали пучок электронов до мишени, тем самым генерируя рентгеновское излучение. Электроны вводились в резонаторы через  $(80 + 40)$  мкс = 120 мкс в момент достижения в них максимального электрического ускоряющего поля, а исследуемый процесс регистрировался на 40-й мкс после его начала. Длительности первых двух интервалов можно было менять в любую сторону в зависимости от решаемой задачи.

На рис. 4 фотография зарегистрированного подрыва так называемой «палочки», т. е. длинного, узкого и тонкого слоя химического взрывчатого вещества, инициируемого с одного торца (в данном случае — справа). Виден фронт разлета-

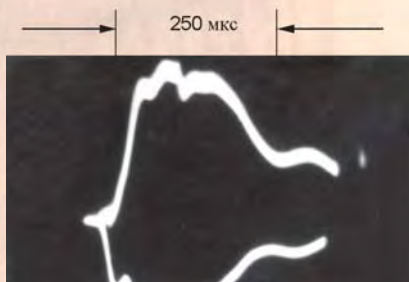


Рис. 2. Вид огибающей высокочастотных колебаний



Рис. 3. Снимок фокусного пятна

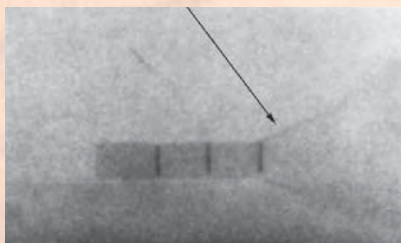


Рис. 4. Рентгеновский снимок подрыва стандартного заряда (стрелкой указан фронт продуктов взрыва)

ющихся под углом продуктов взрыва и то место на «палочке», куда дошла детонационная волна. Три черные полоски на «палочке» — это свинцовые реперы, по которым можно определить путь, пройденный волной.

В связи с проблемой определения на изображении границ объекта возникал вопрос о разрешении по толщине объекта, которое может обеспечить тормозное излучение. Получено, что можно разрешить, т. е. отличить друг от друга два участка, если изображения сформированы предметами, отличающимися по толщине на 1 мм железа и расположенными за общей преградой, равной 30 мм свинца.

В работах ИФВ по основной тематике ускоритель в период 1958–1965 гг. дал возможность получить много новых и интересных результатов. Дело в том, что энергия электронов, равная 5 МэВ, позволяла генерировать такой спектр квантов излучения, которые сравнительно легко «просвечивали» детали из «тяжелых» металлов. Поэтому использовались модельные газодинамические образцы небольшого габарита, но зато ме-

таемые детали были из «тяжелых» материалов. Это позволяло наблюдать их внутреннюю конфигурацию, что было очень важно.

Полученными нашей группой результатами пристально интересовалось руководство газодинамического отделения и всего ВНИИЭФ. Б. В. Литвинов, который был в те годы заместителем по ОКР директора ИФВ, получал результаты опытов в первую очередь. Постепенно наша группа (А. Н. Поспелов, Т. И. Петрова, Ю. М. Макаров) стала не только обеспечивать нормальное функционирование ЛИУ, но и вести тематические и научно-исследовательские работы по основному плану ИФВ. В таком статусе, зная и то и другое, было легче обеспечивать качественное проведение экспериментов и оперативное получение результатов. Вспоминаю, что в тех работах, о которых я пишу, наш ЛИУ называли установкой «Блок».

Одной из интересных задач было исследование сжимаемости различных газов ( $N_2$ ,  $H_2$ ,  $CO_2$ ,  $He$ ,  $Cl_2$ ,  $SF_6$ ,  $NH_3$ ), помещенных в сферические сосуды при разных начальных давлениях. Кроме научных целей, получаемые результаты имели фундаментальное и прикладное значение. К многоплановой газодинамической тематике мы добавили исследования научно-физические.

Так как за выходом из ускорителя электронный поток обеспечивал дозу  $10^5$  рад, то мы изучали закономерности пробоя воздушных промежутков разной конфигурации при воздействии на них электронов в зависимости от разности потенциалов между электродами. Например, были измерены времена задержки пробоя при пониженных напряжениях в широком диапазоне изменения их величин. Немало исследований проведено при облучении диэлектриков разного состава. Особенно много нового и интересного было получено с диэлектриком типа ЦТС, который хорошо поляризуется в электрическом поле при облучении.

ЛУЭ-5 был демонтирован в 1965 г. в связи с созданием других импульсных рентгеновских установок, обеспечивающих «просвечивание» более 75 мм свинца на 1 м от мишени. Но «вклад» этого ускорителя в понимание процессов, происходящих внутри «труднодоступных» газодинамических объектов, которое было приобретено в нужное время, невозможно переоценить.

**МАКАРОВ Юрий Михайлович** —  
заместитель директора ИФВ РФЯЦ-ВНИИЭФ,  
начальник отдела, доктор технических наук,  
профессор, лауреат Государственных премий