

# Новое поколение малогабаритных импульсных ускорителей электронов типа АРСА и «Аргумент»

**Н. В. Завьялов, С. М. Лашманов,  
Д. П. Николаев, А. Ф. Поколев,  
Г. А. Полиенко, С. П. Пухов,  
А. В. Родигин, П. С. Самородов,  
А. В. Тельнов, С. Л. Эльяш,  
А. Л. Юрьев, Ю. Ф. Глазкова**

*Завершена разработка автоматизированного рабочего места на базе малогабаритных импульсных ускорителей электронов нового поколения типа АРСА и «Аргумент» для проведения радиационных испытаний электронной компонентной базы. Ускорители отличаются высокой производительностью при небольших массогабаритных параметрах, относительно низкой стоимостью, транспортабельностью, достаточно низким уровнем электромагнитного излучения.*

## **Введение**

Широкое применение в составе радиоэлектронной аппаратуры специального назначения разнообразных изделий электронной компонентной базы (ЭКБ) требует обеспечения их высокой надежности, в частности радиационной стойкости. Рост номенклатуры исследуемых электронных компонентов и, соответственно, объемов испытаний заставляет экспериментаторов искать пути увеличения производительности, снижения издержек и упрощения проведения работ. Одним из путей решения этих задач является автоматизация проведения экспериментов с помощью создания автоматизированных рабочих мест (АРМ), в том числе на базе малогабаритных импульсных ускорителей (МИУ). Разработанные в РФЯЦ-ВНИИЭФ МИУ нового поколения типа АРСА [1, 2] и «Аргумент» [3] отличаются высокой производительностью, небольшими массогабаритными параметрами и относительно низкой стоимостью.

## **Малогабаритный импульсный ускоритель «Аргумент»**

МИУ «Аргумент» – ускоритель электронов прямого действия с максимальной энергией квантов 1 МэВ. Высоковольтный блок МИУ «Аргумент» создан на основе коаксиальной двойной фор-

мирующей линии (ДФЛ) [4, 5] с газовой изоляцией, заряжаемой резонансным импульсным трансформатором с разомкнутым сердечником. Принципиальная схема высоковольтного блока показана на рис. 1.

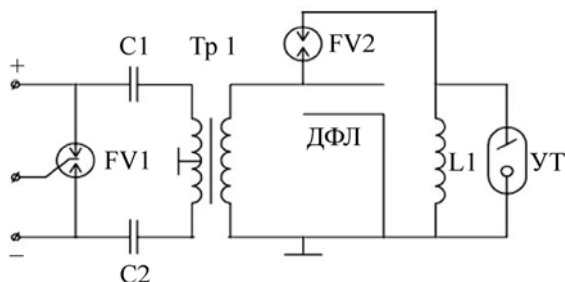


Рис. 1. Принципиальная электрическая схема высоковольтного блока МИУ «Аргумент»

Традиционно в качестве основного диэлектрика в высоковольтном блоке МИУ и рентгеновских аппаратов используется минеральное трансформаторное масло. Но разработка 1 МэВ ускорителя на основе принципиальной схемы, показанной на рис. 1, с масляной изоляцией высоковольтного блока представляется проблематичной, так как требует применения отпаянного разрядника в качестве обострителя FV2 на напряжение 1 МВ. Диаметр такого разрядника – около 200 мм, длина – до 350 мм, масса – от 7 до 10 кг. Высоковольтный блок ускорителя на основе такого разрядника имел бы весьма внушительные массу и габариты. Поэтому в высоковольтном блоке МИУ «Аргумент» нового поколения применена газовая изоляция на основе SF<sub>6</sub> и N<sub>2</sub>. Такое техническое решение позволяет отказаться от отпаянного разрядника-обострителя и заменить его разрядным промежутком, расположенным непосредственно в среде газового диэлектрика [6, 7]. Это существенно упростило конструкцию высоковольтного блока.

Первичный контур резонансного трансформатора состоит из первичной обмотки, конденсаторов C1-C2 и управляемого разрядника FV1 (см. рис. 1). Конденсаторы C1, C2 заряжаются разнополярно. При подаче на разрядник FV1 пускового импульса происходит его срабатывание, и в обмотках трансформатора Tr1 возникают электромагнитные колебания. Импульс высокого напряжения во вторичной обмотке трансформатора заряжает ДФЛ до напряжения 1 МВ, при котором происходит пробой обострителя FV2. В результате на электродах ускорительной трубки (УТ) возникает короткий импульс ускоряющего напряжения и происходит генерирование тормозного излучения (ТИ).

ДФЛ с газовой изоляцией, заряжаемая высоковольтным резонансным трансформатором, способна обеспечить генерацию короткого (несколько наносекунд) высоковольтного импульса. ДФЛ имеет следующие параметры: волновое сопротивление наружной линии 20 Ом, электрическая емкость 60 пФ; волновое сопротивление внутренней линии 32 Ом, емкость 40 пФ. Нагрузкой ДФЛ служит отпаянная ускорительная трубка, отделенная от основного объема высоковольтного блока разделительным изолятором. Ускорительная трубка шунтируется катушкой индуктивности L1.

Для зарядки ДФЛ применен резонансный трансформатор с разомкнутым сердечником [8, 9], коэффициент связи которого составляет примерно 0,6. Полная передача энергии реализуется на второй полуволне. Такие трансформаторы надежны в работе, просты и технологичны в изготовлении и настройке, способны обеспечивать работу с высокой частотой повторения импульсов.

Ускорительная трубка МИУ «Аргумент», получившая название ОНИКС-М (рис. 2), разработана на базе рентгеновской трубки аппарата «Аргумент-700» [3]. Края катода трубки ОНИКС-М

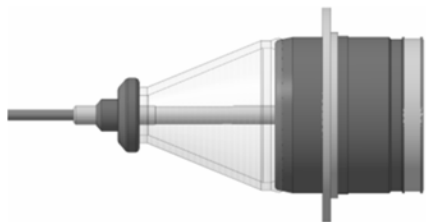


Рис. 2. Ускорительная трубка ОНИКС-М

отформованы специальным образом с помощью изготовленной пресс-формы. Это позволило стабилизировать работу ускорительной трубки и увеличить срок службы катода за счет более равномерного распределения эмиссии электронов вдоль его рабочей поверхности. Эксперименты с ускорительной трубкой ОНИКС-М показали, что благодаря применению новой конструкции катодного узла, а также замене материала электродов с вольфрама на тантал удалось повысить ресурс ускорительной трубки с 200 до ~1500 импульсов.

Основной задачей при разработке зарядного устройства для МИУ «Аргумент» нового поколения было максимальное упрощение прибора и, как следствие, повышение его надежности. Зарядное устройство разработано на основе схемы с единым двухтактным преобразователем [10] с одним выходным трансформатором промышленного изготовления, используемым в телевизионных приемниках цветного изображения, и отдельными умножителями напряжения для каждой полярности выходного напряжения. Такое решение позволило отказаться от изготовления специального высоковольтного трансформатора. Зарядное устройство размещено в пластмассовом серийно изготавливаемом корпусе RZ-15.



Рис. 3. МИУ «Аргумент»

Конструктивно МИУ «Аргумент» выполнен в виде переносной конструкции, состоящей из двух частей – высоковольтного блока и зарядного устройства, соединяемых при помощи комплекта кабелей (рис. 3). Масса высоковольтного блока 50 кг, масса зарядного устройства 2,5 кг.

### ***Малогабаритный импульсный ускоритель АРСА***

МИУ АРСА нового поколения – ускоритель электронов прямого действия на напряжение 1,1 МВ с масляной изоляцией высоковольтного блока (рис. 4). Он изготовлен в виде переносной конструкции, состоящей из трех отдельных блоков. Блочная конструкция обеспечивает его мобильность, упрощает ремонт и обслуживание, снижает влияние сопутствующего электромагнитного излучения на низковольтные цепи управления. Масса высоковольтного блока МИУ АРСА 80 кг, масса зарядного устройства 16 кг.

На рис. 5 приведена электрическая схема МИУ АРСА. С зарядного устройства (ЗУ) по команде с пульта управления (ПУ) ускорителя на первичную обмотку трансформатора ИТ1 подается импульс напряжения амплитудой около 10 кВ. Источником высокого импульсного напряжения, подаваемого на ускорительную трубку, является 10-каскадный генератор импульсов напряжения (ГИН), выполненный по схеме Аркадьева – Маркса [11]. Коммутация тока в каскадах ГИН осуществляется при помощи металлокерамических разрядников Р1 высокого давления. В результате накопительные конденсаторы С1 оказываются соединенными последовательно и на выходе ГИН формируется импульс высокого напряжения амплитудой более 1,1 МВ. Нагрузкой ГИН является отпаянная ускорительная трубка (вакуумный диод с холодным катодом и анодом прострельного типа). Ускорительная трубка служит для преобразования высоковольтных импульсов напряжения в электронное излучение.

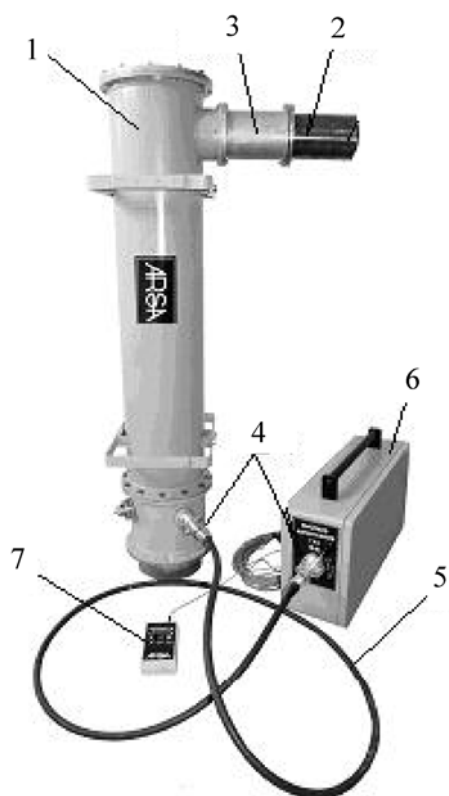


Рис. 4. МИУ АРСА: 1 – высоковольтный блок; 2 – ускорительная трубка; 3 – формирующий LC-контур; 4 – высоковольтный разъем РВИ-10; 5 – соединительный силовой кабель; 6 – зарядное устройство; 7 – пульт управления

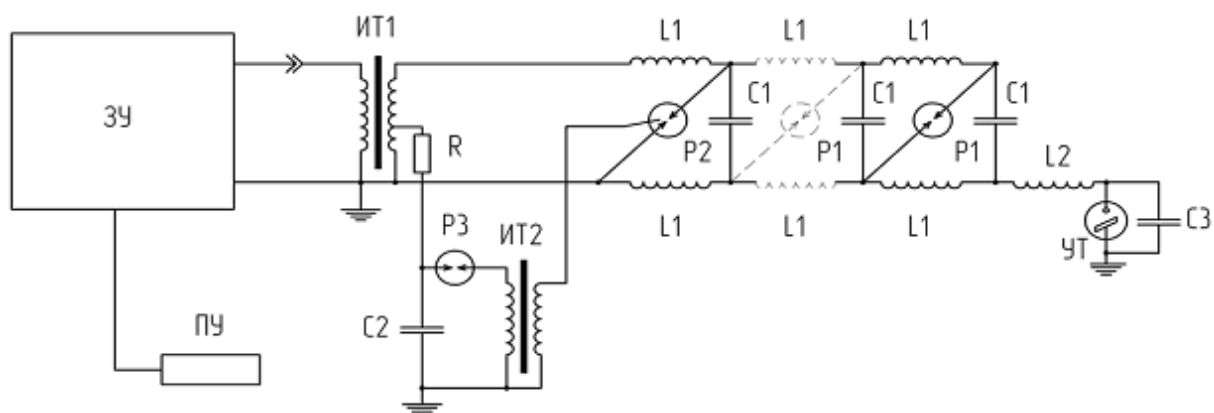


Рис. 5. Принципиальная электрическая схема МИУ АРСА

Одна из схемных особенностей МИУ АРСА нового поколения – применение в первом каскаде ГИН управляемого разрядника P2; это позволило улучшить стабильность дозы электронного или тормозного излучения. В качестве разрядника P2 применен разработанный металлокерамический разрядник тригatronного типа УРИМ-200 (рис. 6,а).



Рис. 6. Разрядник УРИМ-200 (а), ускорительная трубка ТСН-1200 (б)

Для МИУ АРСА нового поколения была разработана новая отпаянная ускорительная трубка ТСН-1200 прострельного типа (рис. 6,б). По сравнению с прототипом – трубкой ТКН-1000 – в трубке ТСН-1200 с коническим изолятором из электротехнического стекла увеличены габариты изолятора и использованы экраны для защиты большого и малого оснований изолятора, что позволило увеличить электропрочность трубки в  $\sim 2$  раза. Эксперименты с ускорительной трубкой ТСН-1200 показали, что благодаря новой конструкции предельное ускоряющее напряжение увеличилось с 1 до 1,5 МВ.

Для генерации ТИ на наружную поверхность окна трубки устанавливается мишень из танталовой фольги толщиной 90 мкм и алюминиевый фильтр для поглощения электронов толщиной 2,5 мм.

Для коррекции формы и увеличения длительности импульса ТИ последовательно с ускорительной трубкой включен формирующий LC-контур (рис. 7,а). Контур является Г-образным фильтром, подавляющим прохождение токов высокой частоты и таким образом формирующим на ускорительной трубке импульс напряжения большей длительности. Подстраивая значения  $L2$  и  $C3$  (см. рис. 5), можно регулировать длительность импульса излучения ускорителя на полувысоте в пределах от 3 до 10 нс.

В ускорителях серии АРСА для соединения высоковольтного блока с зарядным устройством использовались разъемы типа АФА. Они предназначены для коммутации высоковольтных, но слаботочных цепей и поэтому не удовлетворяют требованиям надежности работы МИУ АРСА нового поколения. Разъем должен иметь электропрочность не менее 10 кВ и обеспечивать надежное электрическое соединение при амплитуде тока до 5 кА. Для повышения надежности соединения высоковольтного блока с зарядным устройством был разработан и изготовлен высоковольтный силовый разъем РВИ-10 (рис. 7,б). Испытания разъема на испытательном стенде показали, что его

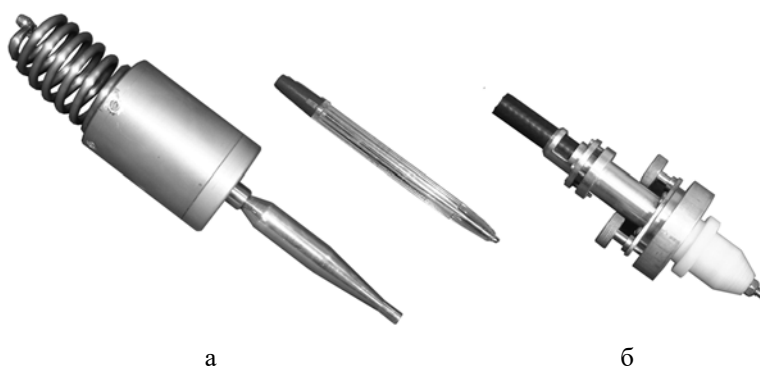


Рис. 7. LC-контур (а), разъем РВИ-10 (б)

электропрочность превышает 40 кВ. Разъем РВИ-10 выдержал 1000 включений с амплитудой тока 15 кА без каких-либо признаков нарушения контакта.

В каскадах ГИН МИУ АРСА в качестве емкостных накопителей энергии применены керамические конденсаторы типа UHV-12A (1700 пФ, 50 кВ) фирмы TDK, что позволило увеличить энергозапас ускорителя АРСА нового поколения не менее чем в 2 раза по сравнению с прототипом [1].

При разработке зарядного устройства, входящего в состав МИУ АРСА, были приняты схемотехнические меры для обеспечения его устойчивости к электромагнитным помехам, возникающим при срабатывании высоковольтного блока ускорителя: в межплатные соединения были введены оптронная и трансформаторная гальванические развязки; в плате силового преобразователя использован развязывающий трансформатор силовых ключей по постоянному току МИТ-4; использована помехоустойчивая элементная база (хорошо зарекомендовавший себя контроллер силовых ключей TL494 фирмы «Texas Instruments»).

Для снижения уровня помех от зарядного устройства, а также помех от высоковольтного блока, проникающих в зарядное устройство, применен литой алюминиевый корпус HALP-316018 с лабиринтной крышкой.

### ***Основные параметры малогабаритных импульсных ускорителей АРСА и «Аргумент»***

Измерения экспозиционной дозы рентгеновского излучения проводились с помощью стандартных детекторов ПСТ на основе стекла ИС-7 в стандартных контейнерах для экспериментальных работ и измерительного прибора – дозиметра гамма-излучения ИКС-А.

Измерения поглощенной дозы электронного излучения проводилось с помощью государственного стандартного образца (ГСО) поглощенной дозы фотонного и электронного излучений (сополимер с феназиновым красителем) СО ПД(Ф)Р-5/50.

Осциллограммы импульсов тормозного излучения МИУ АРСА и «Аргумент», зарегистрированные с помощью алмазного дозиметра САД1М (чувствительность  $2,2 \cdot 10^{-10}$  Кл/Р, временное разрешение не хуже 0,3 нс) и осциллографа LeCroy Wave Pro 715Zi (полоса пропускания 1,5 ГГц), приведены на рис. 8. Длительность импульсов ТИ на полувысоте амплитуды МИУ АРСА и «Аргумент» составила  $\sim 7,2$  и  $\sim 2,5$  нс, а эффективная длительность импульсов – 8 и 3,2 нс соответственно.

Мощность экспозиционной дозы ТИ в каждом импульсе определяли как отношение экспозиционной дозы ТИ в импульсе к эффективной длительности импульса. Максимальные значения

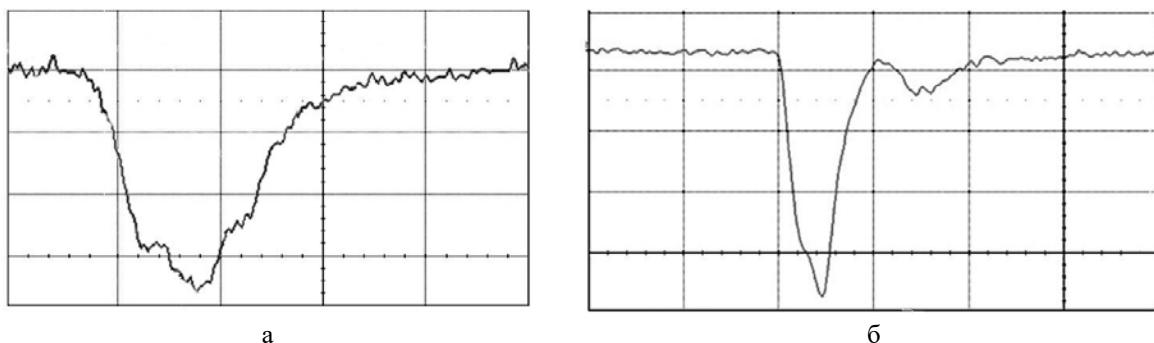


Рис. 8. Осциллограммы импульсов тормозного излучения МИУ:  
а – АРСА, б – «Аргумент» (развертка – 5 нс/клетку)

дозы и мощности дозы ТИ вблизи выходного окна ускорительной трубки в пятне диаметром 1 см составили:

- на МИУ АРСА –  $D_\gamma = 400 \text{ Р}$ ,  $P_\gamma = 5 \cdot 10^{10} \text{ Р/с}$ ;
- на ускорителе «Аргумент» –  $D_\gamma = 220 \text{ Р}$ ,  $P_\gamma = 2 \cdot 10^{10} \text{ Р/с}$ .

Стабильность дозы тормозного излучения за импульс МИУ АРСА и «Аргумент» составляет  $\pm 4,4$  и  $\pm 2,7$  % соответственно.

Без мишени и поглощающего фильтра на выходном окне ускорительной трубки мощность поглощенной дозы электронного излучения вблизи выходного окна в пятне диаметром 1 см МИУ АРСА составляет  $\sim 1 \cdot 10^{13} \text{ Гр/с}$ .

### Заключение

Для оснащения АРМ, предназначенного для проведения радиационных исследований, были разработаны и изготовлены МИУ нового поколения типа АРСА и «Аргумент». Модернизированные МИУ имеют следующие параметры:

– АРСА: при длительности импульса излучения на полувывоте амплитуды  $\sim 7,2 \text{ нс}$  мощность поглощенной дозы электронного излучения в пятне диаметром 10 мм вблизи выходного окна трубки составляет  $\sim 1 \cdot 10^{13} \text{ Гр (Si)/с}$ , мощность экспозиционной дозы ТИ  $\sim 5 \cdot 10^{10} \text{ Р/с}$ .

– «Аргумент»: при длительности импульса излучения на полувывоте амплитуды  $\sim 2,5 \text{ нс}$  мощность экспозиционной дозы ТИ в пятне диаметром 10 мм вблизи выходного окна трубки составляет  $\sim 2 \cdot 10^{10} \text{ Р/с}$ .

Использование таких ускорителей и АРМ на их базе позволяет:

- проводить исследования радиационного отклика в процессе разработки ЭКБ;
- осуществлять предварительную отработку систем измерений полей нагружения, схем регистрации параметров ЭКБ, а также проводить оценку критичных уровней воздействия, приводящих к искажению режима функционирования ЭКБ, для последующих испытаний с использованием мощных стационарных моделирующих установок;
- оперативно вырабатывать рекомендации и проверять решения по повышению радиационной стойкости изделий ЭКБ на стадиях их проектирования и всех технологических этапах изготовления;
- снизить затраты на проведение радиационных испытаний ЭКБ.

### Список литературы

1. Эльяш С. Л., Александрин А. И., Донской Е. Н. и др. Ускоритель АРСА – малогабаритный источник импульсов рентгеновского и электронного излучений // Сборник научных трудов ядерных центров России. 1996. № 5. С. 229–237.

2. Эльяш С. Л., Профе Л. П. Применение малогабаритного ускорителя АРСА для оперативного контроля показателей стойкости элементной базы к воздействию импульсного ионизирующего излучения // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика радиационного воздействия на РЭА. 2002. Вып. 3. С. 132–136.

3. Завьялов Н. В., Канунов И. М., Полиенко Г. А., Хорошайло Е. С. Переносные импульсные рентгеновские аппараты «Аргумент-700» и «Аргумент-1000» с газовой изоляцией высоковольтных блоков // Труды РФЯЦ-ВНИИЭФ. 2005. Вып. 10. С. 80–87.

4. Месяц Г. А., Иванов С. А., Комяк Н. И., Пеликс Е. А. Мощные наносекундные импульсы рентгеновского излучения. – М.: Энергоатомиздат, 1982.

5. Кремнев В. В., Месяц Г. А. Методы умножения и трансформации импульсов в высоковольтной электронике. – Новосибирск: Наука, 1987.

6. Авилов Э. А., Балтаков Ф. Н., Завьялов Н. В. и др. Портативные импульсные рентгеновские аппараты с газовой изоляцией // Вопросы атомной науки и техники. Украина. 2001. № 5. С. 77–79.

7. А. с. 396850 СССР, МКИ Н 05G 1/22. Импульсный рентгеновский аппарат / В. А. Цукерман, Н. В. Белкин, В. И. Колесов, Н. И. Комяк, Е. А. Пеликс // Открытия. Изобретения. Промышленные образцы. Товарные знаки. 1973. № 36.

8. Heise W. Tesla-transformatoren // ETZ. 1964. № 1. S. 7–14.

9. Вассерман С. Б. Трансформатор Тесла в высоковольтных ускорителях заряженных частиц. – Новосибирск: Наука, 1977.

10. Моругин Л. А., Глебович Г. В. Наносекундная импульсная техника. – М.: Сов. радио, 1964. С. 21–24.

11. Месяц Г. А., Насибов А. С., Кремнев В. В. Формирование наносекундных импульсов высокого напряжения. – М.: Энергия, 1970. С. 34–42.

## **New Generation of Small-Sized Pulsed Electron Accelerators of ARSA and «Argument» Types**

N. V. Zavyalov, S. M. Lashmanov, D. P. Nikolaev, A. F. Pokolev, G. A. Polienko, S. P. Pukhov,  
A. V. Rodigin, P. S. Samorodov, A. V. Tel'nov, S. L. Elyash, A. L. Yuriev, Yu. F. Glazkova

*The development of a workstation on the basis of small-sized pulsed electron accelerators (MIU) meant for ECB radiation testing has finished. Within the frames of the work fulfilled a new generation MIU of ARSA and «Argument» type have been developed. Accelerators of this category are remarkable for their high performance at small mass-dimension parameters, relatively low cost, transportability, rather a low level of electromagnetic radiation.*