Физика высоких энергий, ускорителей и высокотемпературной плазмы

Научная статья

УДК 662.215.4, 621.384.6 DOI 10.25205/2541-9447-2024-19-4-5-19

Исследование струйных течений методом импульсной рентгенографии при взрывном нагружении полусферической оболочки

Александр Рамзисович Ахметов¹, Илья Вячеславович Крюков¹ Олег Альфредович Никитин¹, Илья Владимирович Пензин¹ Вадим Юрьевич Политов¹, Вячеслав Юрьевич Эверт¹ Кирилл Игоревич Живанков², Андрей Александрович Крылов³ Даниил Федорович Решетов⁴

¹ Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт технической физики им. акад. Е. И. Забабахина Снежинск, Россия

> 2.3.4 Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН Новосибирск, Россия

> > ¹ vniitf@vniitf.ru ² k.i.zhivankov@inp.nsk.su ³ a.a.krylov@inp.nsk.su ⁴ d.f.reshetov@inp.nsk.su

Аннотация

Приведены результаты расчетно-экспериментальных исследований струйных течений при нагружении полусферической стальной оболочки продуктами взрыва. На два характерных момента времени сравниваются экспериментальные рентгенографические изображения с рентгенограммами, полученными с помощью численного моделирования просвечивания методом Монте-Карло расчетных газодинамических разрезов объекта исследования. Эксперименты проведены с использованием рентгенографического комплекса на базе линейного индукционного ускорителя ЛИУ-20. Описаны основные элементы и характеристики рентгенографического комплекса. Моделирование осуществлялось с помощью программных комплексов ГРАД и ПРИЗМА.

Ключевые слова

рентгенографический комплекс, детектирующая станция, линейный индукционный ускоритель, объект исследования, рентгеновское изображение, газодинамический разрез

Для цитирования

Ахметов А. Р., Крюков И. В., Никитин О. А., Пензин И. В., Политов В. Ю., Эверт В. Ю., Живанков К. И., Крылов А. А., Решетов Д. Ф. Исследование струйных течений методом импульсной рентгенографии при взрывном нагружении полусферической оболочки // Сибирский физический журнал. 2024. Т. 19, № 4. С. 5–19. DOI 10.25205/2541-9447-2024-19-4-5-19

© Ахметов А. Р., Крюков И. В., Никитин О. А., Пензин И. В., Политов В. Ю., Эверт В. Ю., Живанков К. И., Крылов А. А., Решетов Д. Ф., 2024

Study of Jet Flows Using Pulsed Radiography at Explosive Loading of the Hemispherical Shell

Aleksandr R. Akhmetov¹, Ilia V. Kryukov¹, Oleg A. Nikitin¹, Ilia V. Penzin¹ Vadim Yu. Politov¹, Vyacheslav Yu. Evert¹ Kirill I. Zhivankov², Andrei A. Krylov², Daniil F. Reshetov²

> ¹ Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russia Research Institute of Technical Physics, Snezhinsk, Russian Federation

² Budker Institute of Nuclear Physics, SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation

¹vniitf@vniitf.ru ²k.i.zhivankov@inp.nsk.su ³a.a.krylov@inp.nsk.su ⁴d.f.reshetov@inp.nsk.su

Abstract

The paper presents the results of computational and experimental study of jet flows under loading of the hemispherical steel shell by explosion products. For two characteristic times, experimental radiographs are compared with X-ray patterns obtained by Monte-Carlo numerical simulation of the transmission of calculated gas-dynamic cuts of the object under study. The experiments are performed using X-ray facility based on linear induction accelerator LIA-20. The main elements and characteristics of the X-ray facility are given. Simulation was performed using GRAD and PRISMA software packages.

Keywords

X-ray facility, detecting station, linear induction accelerator, object under study, radiograph, gas-dynamic cut

For citation

Akhmetov A. R., Kryukov I. V., Nikitin O. A., Penzin I. V., Politov V. Yu., Evert V. Yu., Zhivankov K. I., Krylov A. A., Reshetov D. F. Study of jet flows using pulsed radiography at explosive loading of the hemispherical shell. *Siberian Journal of Physics*, 2024, vol. 19, no. 4, pp. 5–19 (in Russ.). DOI 10.25205/2541-9447-2024-19-4-5-19

Введение

Для исследования быстропротекающих процессов (единицы – десятки км/с) в плотных объектах (массовая толщина – свыше 300 г/см²) широко применяется метод импульсной рентгенографии [1; 2]. Метод основан на использовании проникающих свойств рентгеновского излучения, а устройство для его реализации включает источник излучения и систему регистрации рентгеновских изображений, между которыми располагается объект исследования. Излучение, проходя через объект исследования, формирует на системе регистрации теневое изображение, содержащее информацию о внутренней структуре объекта и о процессах, происходящих в нем. Полученные экспериментальные данные позволяют непосредственно изучать быстропротекающие процессы, такие как развитие и распространение детонации, положение и форму динамических объектов, струйные течения и верифицировать численные модели, описывающие их поведение. В целях развития метода импульсной рентгенографии в РФЯЦ – ВНИИТФ совместно с ИЯФ СО РАН создан не имеющий российских аналогов рентгенографический комплекс, источник излучения которого основан на линейном индукционном ускорителе электронов ЛИУ-20 [3], а система регистрации – на детектирующей станции (ДС) с матричным сцинтилляционным детектором [4]. В настоящее время комплекс введен в эксплуатацию и на нем проведены первые взрывные эксперименты с целью демонстрации его возможностей при проведении исследований на предельных значениях массовой толщины.

В данной работе представлены результаты расчетно-экспериментальных исследований формирования струйного течения в объекте исследования [5], полученные с помощью расчет-

ной методики, созданной на базе программного комплекса ГРАД [6], и созданного рентгено-графического комплекса.

1. Рентгенографический комплекс

Для проведения газодинамических экспериментов использовался рентгенографический комплекс на базе ускорителя ЛИУ-20 [3]. Общий вид и фотографии ускорителя ЛИУ-20 показаны на рис. 1.



Рис. 1. Общий вид ускорителя ЛИУ-20 (*a*), фотографии инжектора с ускорительным трактом (б) и транспортного канала (в)
Fig. 1. LIA-20 general view (a), the injector with the accelerating modules (б), and the transport channel (в)

Основными элементами ускорителя ЛИУ-20 являются: система управления; система импульсного питания; инжектор; ускорительный тракт, состоящий из ускоряющих модулей; транспортный канал; мишенный узел.

Система управления предназначена для обеспечения надежной и строго согласованной работы всех структурных элементов и устройств ускорителя в соответствии с требованиями конкретного эксперимента, а также для контроля и прогнозирования работоспособности этих

элементов и устройств [7–9]. Система управления построена на основе центрального процессора и отдельных крейтов, встроенных в модуляторные стойки импульсного питания и стойки управления, обеспечивающих синхронизацию работы ускорителя и диагностику его состояния. Система управления также включает в себя базу данных, содержащую всю историю работы всех подсистем ускорителя [10].

Система импульсного питания предназначена для формирования последовательных прямоугольных импульсов отрицательного напряжения с регулируемыми временными интервалами на индукторных секциях инжектора и ускоряющих модулях [11; 12]. Данная система состоит из стоек с зарядными устройствами (ЗУ) и стоек с модуляторами, основанными на формирующих линиях (ВИК) и коммутаторах (тиратронах) (рис. 2). В настоящее время система обеспечивает формирование двух последовательных импульсов напряжения амплитудой до 23 кВ и длительностью вершины 60 нс.



Puc. 2. Фотография стоек ЗУ и модуляторных стоек (*a*); фотография модулятора (δ) *Fig. 2.* Data storage racks, modulator racks (*a*), and a modulator (δ)

Инжектор предназначен для формирования электронных пучков со следующими параметрами: ток – до 2 кА, энергия – до 2 МэВ, длительность – 60 нс, нормализованный эмиттанс – ≈ 500 л·мм·мрад. Прототипом инжектора ускорителя ЛИУ-20 является ускоритель ЛИУ-2 [13]. Описание и принцип работы инжектора приведены в [14].

Ускорительный тракт состоит из последовательно расположенных ускоряющих модулей [14], в которых инжектированный электронный пучок последовательно увеличивает свою энергию до 20 МэВ. Основная задача транспортного канала – это проводка высокоэнергетичного качественного электронного пучка к мишени ускорителя. Основными элементами канала являются квадрупольные линзы, обеспечивающие удержание пучка в пределах апертуры канала. В мишенном узле происходит прецизионная фокусировка электронного пучка на мишень-конвертор и формирование рентгеновского излучения максимальной интенсивности в нужном телесном угле.

Для обеспечения ускорения, транспортировки и качества электронного пучка используются системы коррекции и диагностики электронного пучка, состоящие соответственно из элементов магнитной оптики и датчиков контроля параметров пучка. К элементам магнитной оптики относятся: соленоидальные линзы и корректоры. К датчикам контроля параметров электронного пучка: резистивно-емкостные делители напряжения, контролирующие параметры энергии электронного пучка [10]; датчики определения положения центроида электронного пучка [10]; трансформаторы тока [10]; датчики переходного излучения, применяемые для получения информации о профиле электронного пучка [16]. Для регистрации и обработки теневых изображений, полученных в результате рентгенографических исследований, используется детектирующая станция [4; 17–19]. Детектирующая станция комплекса состоит: из многоэлементного сцинтилляционного экрана (МСЭ) с системой термостабилизации (СТС); волоконно-оптических линий передачи информации (ВОЛПС); стоек измерительного комплекса (ИК); системы сбора, хранения и архивирования данных; системы управления и контроля. На рис. 3 показаны общий вид и фотография ДС, а на рис. 4 – структура матричного сцинтилляционного экрана ДС.



Рис. 3. Общий вид (а) и фотография (б) детектирующей станции: 1 – стойки ИК; 2 – источники бесперебойного питания (ИБП); 3 – МСЭ с системой термостабилизации. *Fig. 3.* General view (a) and photo (б) of the detecting station:

l – racks with measurement systems; 2 – uninterruptable power supply (UPS); and 3 – multi-element scintillation screen with thermal stabilization system



 Рис. 4. Структура матричного сцинтилляционного экрана ДС:
1 – сцинтилляционный кристалл; 2 – спектросмещающее волокно; 3 – оптоволокно; 4 – фотодиод; 5 – плата регистрации
Fig. 4. Structure of matrix scintillation screen of the detecting station:
1 – scintillation crystal; 2 – spectrum-shifting optical fiber; 3 – optical fiber; 4 – photo diode; and 5 – registration board

Чувствительная область (МСЭ) для уменьшения искажений набрана из отдельных оптически изолированных пикселей. Каждый оптически изолированный пиксель (единичный канал) представляет собой сцинтилляционный детектор – кристалл из ортогерманата висмута (BGO), в продольный паз которого вклеен отрезок спектросмещающего волокна, который состыкован с транспортным оптоволокном для передачи света к фотоприемнику платы регистрации.

Единичные каналы объединяются в сборку из 2×8 каналов, состоящую из 16 каналов, а передача света со спектросмещающего волокна на транспортное и с транспортного волокна на фотоприемники осуществляется при помощи специализированных многоканальных оптических разъемов. Сборки укладываются в модуль из 16×16 каналов, состоящий из 256 каналов. Многоэлементный сцинтилляционный экран состоит из 64 модулей (16 384 сцинтилляционных детекторов). Станция позволяет регистрировать до трех рентгеновских изображений. Основные характеристики комплекса приведены в таблице.

Основные характеристики комплекса

Main facility parameter	rs
-------------------------	----

Параметр	Величина	
ЛИУ-20		
Количество импульсов	2	
Граничная энергия электронов	до 20 МэВ	
Ток электронного пучка	до 2 кА	
Длительность вершины импульса тока	60 нс	
Размер фокусного пятна источника излучения на полу-	~ 1 MM	
высоте		
Просвечивающая способность (регистрация на ДС)	~300 г/см²	
Система регистрации (детектирующая станция)		
Материал сцинтиллятора	$(\mathrm{Bi}_{4}\mathrm{Ge}_{3}\mathrm{O}_{12})$	
Время высвечивания сцинтиллятора	300 нс	
Размер чувствительной области детектора	$512 \times 512 \text{ mm}^2$	
Количество регистрирующих каналов	16384 штук	
Поперечный размер единичного элемента	$4 \times 4 \text{ mm}^2$	
Длина единичного элемента	50 мм	
Динамический диапазон	5 · 10 ⁶ квант/элемент	
Количество регистрируемых импульсов	3	
Разрешение на объекте	~ 1 мм	
Поле изображения на объекте	He mehee $100 \times 100 \text{ mm}^2$	

Необходимо отметить, что в настоящее время комплекс работает в двухимпульсном одноракурсном режиме, а в перспективе позволит исследовать трехмерное течение быстропротекающих процессов в плотных объектах, так как будет оснащен девятиракурсной системой разводки и транспортировки электронного пучка, а также трехимпульсной системой питания [20].

2. Объект исследования и постановка эксперимента

Как отмечалось выше, созданный рентгенографический комплекс позволяет исследовать широкий спектр быстропротекающих процессов. Для демонстрации возможностей комплекса было решено провести исследования формирования кумулятивной струи. Для проведения взрывных экспериментов был собран объект исследования (ОИ), представляющий собой сферическую оболочку, состоящую из слоя железа, покрытого слоем алюминия, которая располагается внутри цилиндрической железной оболочки. Оси симметрии цилиндрической и сферической оболочек совпадают. Пространство между оболочками заполнено, с одной стороны, до середины сферы, взрывчатым веществом (BB), а с другой стороны, инертной смесью с аналогичной плотностью. Таким образом, кумулятивная струя будет формироваться только в одной из полусферических оболочек. Для достижения симметричного схлопывания полусферической оболочки (достижения принципа имплозии) и исключения возникновения эффекта «сомбреро» [21; 22] при формировании кумулятивной струи полусферическая оболочка изготовлена разноголщинной с утолщением в полюсе. ОИ, размещаемый в эксперименте в вертикальном направлении, совпадающем с осью симметрии, схематично показан на рис. 5.



Puc. 5. Объект исследования *Fig. 5.* Object under study

Просвечиваемый ОИ для рентгенографического комплекса является оптически прозрачным, максимальное значение его массовой толщины на разных стадиях газодинамической эволюции оценивается не более 25–80 г/см². Для исключения «перегрузки» регистрирующих каналов ДС, а также демонстрации предельной просвечивающей способности комплекса была применена аттенюация из пакетов стальных пластин. Схема проведения взрывных экспериментов приведена на рис. 6.



Рис. 6. Схема проведения экспериментов *Fig. 6.* Experimental setup

В схеме проведения экспериментов присутствует массивный свинцовый коллиматор (К) с внутренним квадратным отверстием 5 × 5 см², ограничивающий телесный угол выхода из-

лучения из ускорителя и, тем самым, снижая фон рассеянного излучения и определяя область воздействия гамма-квантов на детектор.

Для проведения взрывного эксперимента был разработан и введен в эксплуатацию комплекс подрыва (КП). КП формирует высоковольтный сигнал на подрыв в заданный момент времени. Перед запуском КП происходит проверка готовности всех систем ускорителя для инициирования рентгеновского излучения. Временная диаграмма работы КП и ЛИУ-20 представлена на рис. 7. При проведении газодинамических исследований запуск КП осуществляется в автоматическом режиме. Запуск КП и необходимое время регистрации теневого изображения *t* настраивается оператором на пульте управления ЛИУ-20 и осуществляется программно системой управления ЛИУ-20. Проверка синхронизации ЛИУ-20, ДС и КП осуществляась путем предварительного запуска ускорителя ЛИУ-20 с выдачей синхроимпульсов на КП и ДС.



Puc. 7. Временная диаграмма работы КП и ЛИУ-20 *Fig.* 7. Time operation diagram for the burst-producing complex and the LIA-20

Эксперименты проводились при следующих характеристиках ускорителя:

- энергия электронов до 20 МэВ;
- ток электронного пучка ~ 1,7 кА;
- длительность вершины импульса тока пучка 60 нс;
- мишень-тантал толщиной 1 мм;
- фокусное пятно источника излучения ~ 1 мм.

Поскольку это были первые взрывные эксперименты на ЛИУ-20, необходимо было проверить работу ДС на динамических экспериментах в широком диапазоне значений аттенюации, поэтому в первом эксперименте величина аттенюации составляла 180 мм, а во втором – 370 мм.

3. Результаты расчетно-экспериментальных исследований и их обсуждение

С целью выбора времен динамического эксперимента предварительно было проведено моделирование сжатия ОИ по специализированному двумерному программному комплексу (ПК), разработанному на ПК ГРАД [6]. Постановка расчетов учитывала подробную геометрию ОИ с учетом всех деталей конструкции, модель детонации ВВ, составы веществ системы, их уравнения состояния и упругопластические свойства. В результате численного моделирования были выбраны два момента времени – 27,6 и 30 мкс, соответствующие следующим состояниям ОИ: зарождение струйного течения; активное развитие кумулятивного процесса. Результаты численного моделирования состояния ОИ после детонации ВВ на два момента времени просвечивания представлены на рис. 8.



Рис. 8. Результаты численного моделирования развития струйного течения на два момента времени Fig. 8. Numerical simulation of the jet flow evolution at two times

На рентгенографическом комплексе были проведены взрывные эксперименты, при этом для момента времени 27,6 мкс (эксперимент № 1) массовая толщина просвечивания составляла ~ 200 г/см², а для момента времени 30 мкс (эксперимент № 2) – ~ 320 г/см². Рентгенограммы взрывных экспериментов и фотография сохраненной после эксперимента обжатой взрывом полусферической оболочки представлены на рис. 9.



Рис. 9. Рентгенограммы развития струйного течения на два момента времени,

полученные во взрывном эксперименте 27,6 мкс (a), 30 мкс (δ):

 1 – оболочка из алюминия; 2 – сталь; 3 – область струйного течения и фотография образовавшейся после эксперимента обжатой взрывом стальной полусферической оболочки (в)

Fig. 9. Radiographs of the jet flow evolution in the explosive experiment at 27.6 μ s (*a*) and 30 μ s (*b*), where *l* – aluminum shell; *2* – steel; and *3* – jet flow region. Post-experiment photo of the spherical steel shell compressed by explosion (*b*)

Как видно из рис. 8 и 9, результаты численного моделирования с хорошей точностью воспроизводят результаты эксперимента, при этом наблюдается схожесть форм сжатых стальных образцов; характер, размеры и скорость развития струйного течения в ОИ. Следует обратить внимание на высокое качество детектирования и низкий уровне шума для эксперимента № 1, где суммарная массовая толщина просвечивания по стали оценивается умеренной величиной ~ 200 г/см². В эксперименте № 2, где суммарная массовая толщина составляла ~320 г/см², несмотря на заметный уровень шума, удалось зарегистрировать информацию о состоянии ОИ на требуемый момент времени. Кроме того, рентгенограммы демонстрируют факт сохранения аксиальной симметрии комбинированной алюминиево-стальной оболочки в процессе ее сжатия продуктами взрыва (ПВ), что свидетельствует об однородном подрыве BB.

Для отработки технологии виртуальных рентгенографических экспериментов, в основе которой лежит газодинамический расчет [6] разрезов быстропротекающего процесса и их дальнейшее просвечивание численным моделированием (получение модельных рентгенограмм), основанным на методе Монте-Карло, были проведены расчеты по программе ПРИЗМА [24]. Численное моделирование просвечивания разрезов (рис. 8) проводилось с учетом постановки эксперимента (рис. 6) и параметров источника тормозного излучения, генерируемого ускорителем ЛИУ-20. Результатом расчетов являются полные энергии в единицах [эВ/электрон источника], поглощенные в каждом пикселе детектора. Эти величины пропорциональны сигналам, регистрируемым детектором в эксперименте. Полученные модельные рентгенограммы приведены на рис. 10.





Fig. 10. Monte-Carlo simulated X-ray patterns of the jet flow development at two times

На рис. 11 приводится сравнение профилей экспериментального и расчетного сигналов вдоль оси симметрии объекта (отмечены на рис. 9 и 10 красным цветом). Полученные для обоих опытов нормированные профили сигналов согласуются друг с другом. Наибольшее отличие расчетных и экспериментальных кривых наблюдается для времени регистрации t = 30 мкс (рис. 11, δ) в диапазоне координат Y = 10-30 см. Данные области расчетных и экспериментальных профилей соответствуют детонировавшему ВВ и стальному корпусу объекта. Такое отличие в поведении зависимостей может быть обусловлено неточностью численного моделирования разлета элементов ОИ на газодинамическом этапе (см. рис. 8, δ) по сравнению с экспериментом.



Рис. 11. Сравнение экспериментальных и расчетных профилей детекторного сигнала вдоль оси симметрии просвечиваемого объекта, полученные в двух опытах на моменты времени: 27,6 мкс (а) и 30 мкс (б) *Fig. 11.* Comparison of experimental and calculated profiles of the detector signal along the axis of symmetry of the transmitted object obtained in two experiments

at 27.6 μ s (*a*) and 30 μ s (*b*)

Выводы

1. Созданный рентгенографический комплекс, состоящий из ускорителя ЛИУ-20 и детектирующей станции, дает новое качество применения метода импульсной рентгенографии при исследовании быстропротекающих процессов в оптически плотных объектах, при этом предельные значения просвечиваемых массовых толщин составляют ~ 320 г/см².

2. Для демонстрации работоспособности комплекса проведены первые взрывные эксперименты по регистрации струйных течений в объекте исследования. Результаты исследований характеризуются высоким качеством рентгеновских изображений, полученных в двух экспериментах, как при умеренной аттенюации (~ 200 г/см²), так и при аттенюации, близкой к предельным значениям (~ 320 г/см²).

3. Отработана технология виртуальных рентгенографических экспериментов, включающая численное моделирование газодинамических процессов (получение газодинамических разрезов объекта исследования) и дальнейшее модельное просвечивание газодинамических разрезов методом Монте-Карло. Показано хорошее согласие модельных и экспериментальных рентгенограмм по величине потока энергии излучения на пикселе детектора.

Список литературы

- 1. Инструменты статической и импульсной рентгенографии: Сб. науч. тр. / Под ред. О. А. Никитина и Р. В. Протаса. Снежинск: Изд-во РФЯЦ – ВНИИТФ, 2023. 460 с.
- 2. **Козловский В. Н.** Информация в импульсной рентгенографии / Под ред. Б. В. Литвинова. Снежинск: Изд-во РФЯЦ ВНИИТФ, 2006.
- Батраков А. М., Сенченко А. И., Бак П. А. и др. Источник тормозного излучения на базе линейного индукционного ускорителя // Ядерные и электрофизические установки – источники мощных ионизирующих излучений: Сб. тр. научн.-технич. конференции 5–18 июня 2021. Снежинск: Изд-во РФЯЦ – ВНИИТФ, 2022. С. 428–431.

- Ахметов А. Р., Журавлев И. А., Колесников П. А. и др. Рентгенографический комплекс РФЯЦ – ВНИИТФ для исследования быстропротекающих процессов // VII Минский междунар. коллоквиум по физике ударных волн, горения и детонации / 2–5 октября 2023 г: Сб. докладов. Минск: Изд-во ИТМО НАН Беларуси, 2023.С. 13–19.
- 5. **Лаврентьев М. А.** Кумулятивный заряд и принципы его работы. УМН, 1957. Т. 12, вып. 4. С. 41–56.
- 6. **Брагин А. А., Сучков В. А.** Методика ГРАД для решения трехмерных нестационарных задач газовой динамики. РФЯЦ ВНИИТФ, препринт № 178, 2000.
- 7. Senchenko A., Fatkin G., Serednyakov S., Selivanov P. Software and computational infrastructure of LIA-20 control system // Proceedings of 25th Russian Particle Accelerator Conference (RuPAC 2016), St. Petersburg, Russia, November 21–25, 2016. P. 739–741.
- Fatkin G., Bekhtenev E., Kotov E. et al. Structure and hardware of LIA-20 control system // Proceedings of 25th Russian Particle Accelerator Conference (RuPAC 2016), St. Petersburg, Russia, November 21–25, 2016. P. 207–209.
- Kotov E., Batrakov A., Fatkin G. et al. VME based digitizers for waveform monitoring system of linear induction accelerator LIA-20// Proceedings of 25th Russian Particle Accelerator Conference (RuPAC 2016), St. Petersburg, Russia, November 21–25, 2016. P. 721–723.
- 10. Бак П. А., Батраков А. М., Бехтенёв Е. А. и др. Комплекс цифровой осциллографии ускорителя ЛИУ-20 // ПТЭ. 2021. № 2. С. 49–64.
- Akimov A., Bak P., Logachev P., Nikitin O. Triple-pulse modulator for 20-MeV, 2-kA linear induction accelerator power supply // Proceedings IEEE Pulsed Power Conference (PPC), Austin, Texas, USA, May 31 – June 4, 2015. P. 413–415.
- Akimov A., Akhmetov A., Bak P. et al. Single-Triple pulse power supply for 2 kA, 20 MeV linear induction accelerator // Proceedings IEEE 21st Pulsed Power Conference (PPC), Brighton, UK, June 18–22, 2017. P. 1–3. DOI: 10.1109/PPC.2017.8291335
- 13. Starostenko D. A., Akhmetov A. R., Nikitin O. A. et al. Status of the LIA-2. Double-pulse mode // Physics of Particles and Nuclei Letters. Dec. 2016. Vol. 13, iss. 7. P. 962–965.
- 14. Логачев П. В., Кузнецов Г. И., Корепанов А. А. и др. Линейный индукционный ускоритель ЛИУ-2 // ПТЭ. 2013. № 6. С. 42–49.
- Akimov A., Bak P., Batrakov A. et al. Development and testing of high-voltage cells for 2 kA, 20 MeV linear induction accelerator // Proceedings IEEE 21st Pulsed Power Conference (PPC), Brighton, UK, June 18–22, 2017. P. 1–3. DOI: 10.1109/PPC.2017.8291336
- 16. Никитин О. А., Ахметов А. Р., Хренков С. Д. и др. Профилометр сильноточного электронного пучка. Патент РФ № 2809944; опубл. 19.12.2023. Бюл. № 35. 11 с.
- 17. Афанасенко С. С., Ахметшин Р. Р., Григорьев Д. Н. и др. Детектор потоков жестких гамма-квантов с минимизированным шумом изображения и увеличенной эффективностью регистрации // Автометрия. 2021. Т. 57, № 2. С. 82–92.
- Ли Е. С., Ставриецкий Г. В., Сысков Д. В., Тимофеев А. В. Система регистрации теневых рентгенографических изображений. Патент РФ № 190405; опубл. 01.07.2019. Бюл. № 19.8 с.
- 19. Шепелев Д. Н., Сысков Д. В., Ставриецкий Г. В. и др. Система термостабилизации детектора излучения. Патент РФ № 2799105; опубл. 04.07.2023. Бюл. № 19. 14 с.
- 20. Комплекс импульсной томографии [Электронный pecypc]. URL: http://www.vniitf.ru/data/ files/video/2021/kit final 8m.webm
- 21. **Федоров С. В., Ладов С. В., Никольская Я. М.** Сравнительный анализ формирования кумулятивных струй из конических и полусферических облицовок // Инженерный журнал: Наука и инновации. 2018. Вып. 1.
- 22. Walters W. P., Zukas J. A. Fundamentals of Shaped Charges. New York, Wiley Publ., 1989. 398 p.

- 23. **Мартынюк А. В.** Введение в цифровую радиографию. Фосфорные пластины вместо рентгеновской пленки. Киев, 2012.
- 24. Kandiev Y. Z., Kashaeva E. A., Khatuntzev K. E. et al. PRIZMA status // Annals of Nuclear Energy. 2015. Vol. 82. P. 116–120.

References

- 1. The static and pulsed X-ray radiography tools. Collection of scientific papers. Ed. by O. A. Nikitin and R. V. Protas. Snezhinsk, RFNC-VNIITF Publ., 2023, p. 460 (in Russ.)
- 2. Kozlovsky V. N. Data in pulsed X-ray radiography. Ed. by B. V. Litvinov. Snezhinsk, RFNC-VNIITF Publ., 2006. (in Russ.)
- Batrakov A. M., Senchenko A. I., Bak P. A. et al. Linear induction accelerator-based bremsstrahlung source, in *Proceedings of Scientific and Technical Conference on Nuclear and Electrophysical Installations: High-power Ionizing Radiation Sources*, June 5–18, 2021. Snezhinsk, RFNC-VNIITF Publ., 2022, pp. 428–431. (in Russ.)
- Akhmetov A. R., Zhuravlev I. A., Kolesnikov P. A. et al. X-ray complex at RFNC-VNIITF for fast processes investigation, in *Proceedings of VII Minsk International Colloquium on Physics* of Shock Waves, Combustion, and Detonation, October 2–5, 2023. Minsk, Belorus ITMO NAN (Heat and Mass Transfer Institute of the National Academy of Sciences of Belorus) Publ., 2023, pp. 13–19. (in Russ.)
- 5. Lavrentiev M. A. Shaped charge and principles of its operation. J. Uspekhi matematicheskikh nauk [Advances in Mathematical Sciences], 1957, vol. 12, iss. 4, pp. 41–56. (in Russ.)
- 6. **Bragin A. A., Suchkov V. A.** The GRAD procedure to solve 3D non-stationary gas dynamics problems. RFNC-VNIITF Publ., preprint No.178 (2000) (in Russ.)
- Senchenko A., Fatkin G., Serednyakov S., Selivanov P. Software and computational infrastructure of LIA-20 control system. *Proceedings of 25th Russian Particle Accelerator Conference (RuPAC 2016)*, St. Petersburg, Russia, November 21–25, 2016, pp. 739–741. (in Russ.)
- 8. Fatkin G., Bekhtenev E., Kotov E. et al. Structure and hardware of LIA-20 control system. *Proceedings of 25th Russian Particle Accelerator Conference (RuPAC 2016)*, St. Petersburg, Russia, November 21–25, 2016, pp. 207–209. (in Russ.)
- 9. Kotov E., Batrakov A., Fatkin G. et al. VME based digitizers for waveform monitoring system of linear induction accelerator LIA-20. *Proceedings of 25th Russian Particle Accelerator Conference (RuPAC 2016)*, St. Petersburg, Russia, November 21–25, 2016, p. 721–723.
- Bak P. A., Batrakov A. M., Bekhtenev E. A. et al. Digital oscillographic complex of accelerator LIA-20. J. Pribory i tekhnika eksperimenta [Instruments and Experimental Techniques], 2021, no.2, pp. 49–64. (in Russ.)
- Akimov A., Bak P., Logachev P., Nikitin O. Triple-pulse modulator for 20-MeV, 2-kA linear induction accelerator power supply. *Proceedings IEEE Pulsed Power Conference (PPC)*, Austin, Texas, USA, May 31 – June 4, 2015, pp. 413–415. (in Russ.)
- Akimov A., Akhmetov A., Bak P. et al. Single Triple pulse power supply for 2 kA, 20 MeV linear induction accelerator. *Proceedings IEEE 21st Pulsed Power Conference (PPC)*, Brighton, UK, June 18–22, 2017, pp. 1–3. DOI: 10.1109/PPC.2017.8291335
- 13. Starostenko D. A., Akhmetov A. R., Nikitin O. A. et al. Status of the LIA-2. Double-pulse mode. *Physics of Particles and Nuclei Letters*, 2016, vol. 13, iss. 7, pp. 962–965.
- 14. Logachev P. V., Kuznetsov G. I., Korepanov A. A. et al. Linear induction accelerator LIA-2. *J. Pribory i tekhnika eksperimenta [Instruments and Experimental Techniques]*, 2013, no. 6, pp. 42–49. (in Russ.)

- Akimov A., Bak P., Batrakov A. et al. Development and testing of high-voltage cells for 2 kA, 20 MeV linear induction accelerator. *Proceedings IEEE 21st Pulsed Power Conference (PPC)*, Brighton, UK, June 18–22, 2017, pp. 1–3. DOI: 10.1109/PPC.2017.8291336
- 16. Nikitin O. A., Akhmetov A. R., Khrenkov S. D. et al. High-current electron beam profilometer. RF patent 2809944, published on December 19, 2023. Bulletin No. 35, p. 11. (in Russ.)
- 17. Afanasenko S. S., Akhmetshin R. R., Grigoriev D. N. et al. Hard gamma flux detector with minimized image noise and enhanced registration efficiency. J. Avtometria [Optoelectronics, Instrumentation, and Data Processing], 2021, vol. 57, no. 2, pp. 82–92. (in Russ.)
- 18. Li E. S., Stavrietsky G. V., Syskov D. V., Timofeev A. V. X-ray shadow image registration system. RF patent 190405, published on July 01, 2019. Bulletin No. 19, p. 8. (in Russ.)
- 19. Shepelev D. N., Syskov D. V., Stavrietsky G. V. et al. Radiation detector temperature stabilization system. RF patent 2799105, published on July 04, 2023, bulletin No. 19, p. 14. (in Russ.)
- 20. Pulsed X-ray tomography complex. URL: http://www.vniitf.ru/data/files/video/2021/kit_final_8m.webm
- Fedorov S. V., Ladov S. V. Nikolskaya Ya. M. Comparative analysis of the shaped-charge jet formation from conical and semispherical liners. *Engineering Journal: Science and Innovation*, 2018, iss. 1. (in Russ.)
- 22. Walters W. P., Zukas J. A. Fundamentals of Shaped Charges. New York, Wiley Publ., 1989, 398 p.
- 23. Martynuk A. V. Introduction to digital radiography. Phosphor plates instead of X-ray film. Kiev, 2012. (in Russ.)
- 24. Kandiev Y. Z., Kashaeva E. A., Khatuntzev K. E. et al. PRIZMA status. *Annals of Nuclear Energy*, 2015, vol. 82, pp. 116–120.

Сведения об авторах

Ахметов Александр Рамзисович, начальник лаборатории

- Крюков Илья Вячеславович, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник
- Никитин Олег Альфредович, кандидат технических наук, начальник отдела

Пензин Илья Владимирович, инженер-исследователь

Политов Вадим Юрьевич, кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник

Эверт Вячеслав Юрьевич, инженер-исследователь

Живанков Кирилл Игоревич, научный сотрудник

Крылов Андрей Александрович, научный сотрудник

Решетов Даниил Федорович, инженер-исследователь

Information about the Authors

Aleksandr R. Akhmetov, Head of Laboratory

Ilia V. Kryukov, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Senior Scientist

Oleg A. Nikitin, Candidate of Technical Sciences, Head of Department

Ilia V. Penzin, Research Engineer

Vadim Yu. Politov, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Leading Scientist

Viacheslav Yu. Evert, Research Engineer Kirill I. Zhivankov, Scientist Andrei A. Krylov, Scientist Daniil F. Reshetov, Research Engineer

Статья поступила в редакцию 05.06.2024; одобрена после рецензирования 08.07.2024; принята к публикации 11.07.2024

The article was submitted 05.06.2024; approved after reviewing 08.07.2024; accepted for publication 11.07.2024