

# ФИЗИКА ПЛАЗМЫ

---

---

К.А. АЛАБИН<sup>1)</sup>, аспирант

П.В. БЕЛОУС<sup>2)</sup>, студент

А.О. БИРЮКОВ<sup>1)</sup>, аспирант

Г.И. ЖОТИКОВ<sup>3)</sup>, студент

А.А. ЛЕВАНОВ<sup>2)</sup>, студент

А.А. МАРКОЛИЯ<sup>4)</sup>, специалист

А.А. РУХАДЗЕ<sup>5)</sup>, доктор физ.-мат. наук,

профессор, гл. научн. сотрудник

Г.К. СТЕШЕНКО<sup>2)</sup>, студент

Л.И. УРУЦКОЕВ<sup>1)</sup>, доктор физ.-мат. наук,

профессор, зав. кафедрой

Д.В. ФИЛИПШОВ<sup>1)</sup>, доктор физ.-мат. наук,

вед. научн. сотрудник

Т.В. ШПАКОВСКИЙ<sup>2)</sup>, студент

<sup>1)</sup> МГУП имени Ивана Федорова

Москва, Российская Федерация

<sup>2)</sup> МФТИ (ГУ)

Долгопрудный, Российская Федерация

<sup>3)</sup> СПб ГУ

Санкт-Петербург, Российская Федерация

<sup>4)</sup> Государственное научно-производственное

объединение «СФТИ»

Сухум, Республика Абхазия

<sup>5)</sup> Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН

Москва, Российская Федерация

E-mail: urleon@yandex.ru

## ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДИКИ СКОРОСТНОЙ ФОТОСЪЕМКИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ДИНАМИКИ РАЗЛЕТА ПЛАЗМЫ, ОБРАЗУЮЩЕЙСЯ ПРИ ЭЛЕКТРОВЗРЫВЕ ВОЛЬФРАМОВОЙ ПРОВОЛОЧКИ В ВАКУУМЕ

*В работе была исследована роль предварительного прогрева вольфрамовой проволоочки и полярности высоковольтного электрода на динамику разлета плазмы низкой концентрации, также был исследован процесс образования приэлектродной плазмы и процесс иницирования пробоя вдоль взрывааемых проволоочек. Эксперимент по электрическому взрыву проводился с использованием вольфрамовых проволоочек диаметром от 10 до 200 мкм. В результате анализа снимков, полученных с помощью системы скоростного покадрового фотографирования, было обнаружено, что плазменные страты симметричны относительно оси проволоочки, а тип магнитно-гидродинамической неустойчивости плазмы не зависит от диаметра проволоочки. Нет качественных различий свечения плазмы между электровзрывом предварительно прогретых и непрогретых проволоочек, но видны значительные отличия характера свечения плазмы в зависимости от полярности высоковольтного электрода. С помощью методики скоростной видеосъемки было обнаружено, что kern взрывааемой проволоочки полностью диспергируется только через несколько миллисекунд от начала электрического взрыва.*

**Ключевые слова:** физика плазмы, электрический взрыв проволоочки, электровзрыв, ЭВП, вольфрам, скоростное покадровое фотографирование, скоростная видеосъемка, магнитно-гидродинамическая неустойчивость плазмы, МГД, полярность высоковольтного электрода.

**K.A. ALABIN**<sup>1)</sup>, postgraduate student  
**P.V. BELOUS**<sup>2)</sup>, student  
**A.O. BIRYUKOV**<sup>1)</sup>, postgraduate student  
**G.I. ZHOTIKOV**<sup>3)</sup>, student  
**A.A. LEVANOV**<sup>2)</sup>, student  
**A.A. MARKOLIA**<sup>4)</sup>, specialist  
**A.A. RUKHADZE**<sup>5)</sup>, Doctor of Phys.-Mat. Sciences,  
Professor, Principle Researcher  
**G.K. STESHENKO**<sup>2)</sup>, student  
**L.I. URUTSKOEV**<sup>1)</sup>, Doctor of Phys.-Mat. Sciences,  
Professor, the Head of the Department of Physics  
**D.V. FILIPPOV**<sup>1)</sup>, Doctor of Phys.-Mat. Sciences,  
Professor, Leading Researcher  
**T.V. SHPAKOVSKIJ**<sup>2)</sup>, student

<sup>1)</sup> Moscow State University of Printing Arts

<sup>2)</sup> Moscow Institute of Physics and Technology

<sup>3)</sup> Saint Petersburg State University

<sup>4)</sup> State Scientific and Production Association  
«Sukhumi Physical-Technical Institute»

Abkhazian Academy of Sciences

<sup>5)</sup> Prokhorov General Physics Institute RAS

E-mail: urleon@yandex.ru

*In this study we investigated the role of pre-heating of a tungsten wire and high-voltage electrode polarity on the dynamics of expansion of low-concentrated plasma. Was investigated the process of formation of near-electrode plasma and the process of initiating a breakdown along the exploding wires. The experiment on the electrical explosion of tungsten wires was carried out using wires with diameter from 10 to 200 microns. As the result of analysis of frames received with the help of high-speed single-frame photography, it was found that plasma strata are symmetrical about the axis of the wire, and the type of magneto-hydrodynamic instability of the plasma does not depend on the diameter of the wire. There are no qualitative differences between the plasma glow in electric explosion of preheated and unheated wires. Study shown significant differences in the nature of the plasma glow, depending on the polarity of the high-voltage electrode. Using high-speed video technique, it was found that the core of an exploding wire is completely dispersed only after a few milliseconds from the beginning of electrical explosion.*

## APPLICATION OF THE METHOD OF HIGH-SPEED PHOTOGRAPHY TO STUDY THE DYNAMICS OF EXPANSION OF THE PLASMA PRODUCED BY ELECTRIC EXPLOSION OF TUNGSTEN WIRES IN A VACUUM

**Key words:** plasma physics, electrical explosion of wires, electric explosion, tungsten, high-speed single-frame photography, high-speed video, magnetic-hydrodynamic instability of a plasma, polarity of the high-voltage electrode.

### Введение

Сильноточный электровзрыв многопроволочных вольфрамовых лайнеров широко используется для получения вспышек мягкого рентгеновского излучения [1, 2]. Однако, как следует из результатов многочисленных исследований, энергоклад в вольфрамовые проволочки, из которых сделан лайнер, распределяется неравномерно по толщине проволочки. Основной причиной, приводящей к неравномерному энергокладу, является возникновение вблизи поверхности вольфрамовой проволочки низкоплотной плазмы, обладающей высокой проводимостью. Эта плазменная оболочка перехватывает значительную часть тока, тем самым уменьшая энергоклад в центральную область проволочки. В работе [3] было высказано

предположение о том, что причиной образования плазмы на ранней стадии электровзрыва могут служить легкие примеси и газы, содержащиеся в приповерхностном слое проволочки. В работе [4] было проведено исследование влияния поверхностных примесей микропроводника на его энергетические характеристики при электровзрыве в вакууме. Показано, что предварительный прогрев проводника позволяет увеличить энергоклад в керн за счет увеличения длительности резистивной стадии его нагрева. В этой же работе была исследована роль полярности высоковольтного электрода на процесс образования приэлектродной плазмы и процесс инициирования пробоя вдоль взрывааемых проволочек.

Из результатов работы [5] следует, что параметры предимпульса оказывают существенное

влияние на однородность имплозии многопроволочных лайнеров при прохождении основного импульса. Так как в течение стадии предимпульса ток, приходящийся на одну проволочку, составляет, как правило, порядка 1 кА [6], то изучение динамики электровзрыва одиночных проволочек на небольших слаботочных установках до сих пор представляет определенный научный интерес.

В настоящей работе с помощью методики оптического покадрового фотографирования была предпринята попытка исследования влияния роли предварительного прогрева и полярности высоковольтного электрода на динамику разлета плазмы низкой концентрации, которая образуется на ранней стадии электровзрыва вольфрамовой проволочки.

## 2. Описание экспериментальной установки и диагностических методик

Эксперименты по электрическому взрыву вольфрамовой проволочки в вакууме проводились на установке под названием «ГЕЛИОС». Установка состояла из конденсаторной батареи емкостью  $C = 0,4$  мкФ, которая заряжалась от источника питания до напряжения  $U = 35 \dots 40$  кВ, газового разрядника, подводных кабелей, взрывной камеры и системы откачки. Общая индуктивность составляла  $L = 0,25$  мкГн, а характеристическое сопротивление  $Z = 0,8$  Ом. Электротехнические параметры импульса измерялись стандартными электротехническими диагностиками: делителем напряжения, поясом Роговского и магнитной петлей. Максимальный ток составлял  $I \approx 30$  кА, а время первого полупериода  $T = 1,2 \cdot 10^{-6}$  с. Типичные осциллограммы представлены на рисунке 1.

Вакуумная откачка разрядно-взрывной камеры осуществлялась с помощью безмасляного спирального вакуумного насоса VarianSH-110 и турбо-молекулярного насоса 01АБ-450-003 до давления  $P \sim 10^{-4}$  Па.

В экспериментах использовались вольфрамо-

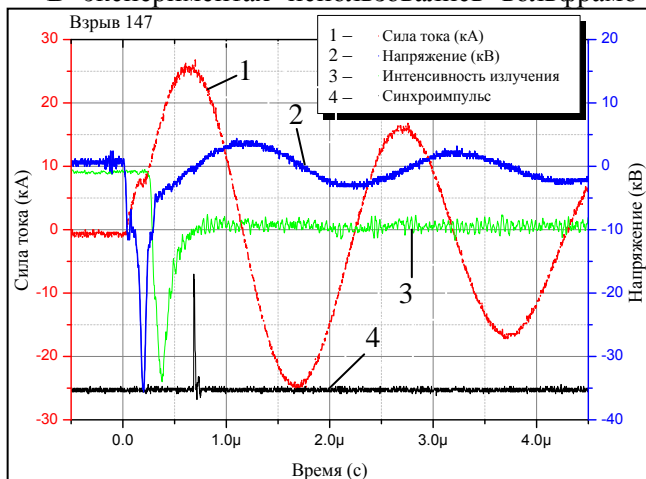


Рис. 1. Типичные осциллограммы

вые проволочки различного сечения (10, 50, 70, 130 и 200 мкм), длина которых могла варьироваться от 24 до 40 мм. Материалом разрядно-взрывной камеры служил тннутый кварц, что позволяло проводить исследования электрического взрыва тонких проволочек как спектроскопическими, так и фоторегистрирующими методиками. Более подробное описание электротехнических параметров установки, вакуумной системы, разрядно-взрывного узла и процесса подготовки к эксперименту проведено в работе [7].

Для регистрации поведения интенсивности интегрального (по длинам волн) света во времени применялся кремниевый фотодиод ФД-263-01 с усилителем. Детектор обладал линейной зависимостью выходного напряжения от интенсивности излучения. Область спектральной чувствительности фотодиода находилась в диапазоне  $400 \dots 1100$  нм. Временная переходная характеристика детектора составляла порядка 100 нс. Анализ сигналов с фотодиода позволял сопоставлять интенсивность свечения плазменного канала с временем открытия электронно-оптических затворов.

Для визуальной регистрации динамики свечения проволочки во время электрического взрыва применялась система скоростного покадрового фотографирования (далее по тексту СПФ) и камера высокоскоростной съемки ВИДЕОСПРИНТ [8]. Расположение этих устройств схематически показано на рисунке 2.

Система СПФ состояла из трех одинаковых подсистем, представляющих собой ЭОП (ЭП-19), к которому жестко крепился объектив Гелиос-44-2. ЭОПы располагались под различными азимутальными углами к взрывающейся проволочке (рис. 2), что позволяло получать более объективную информацию о топологии свечения плазменного канала. Изображение, получаемое с помощью объектива, проецировалось на фотокатод ЭОПа, после чего регистрировалось на пленке РФ-3, которая плотно прилегала к выходу ЭОПа. Экспозиция регулиро-

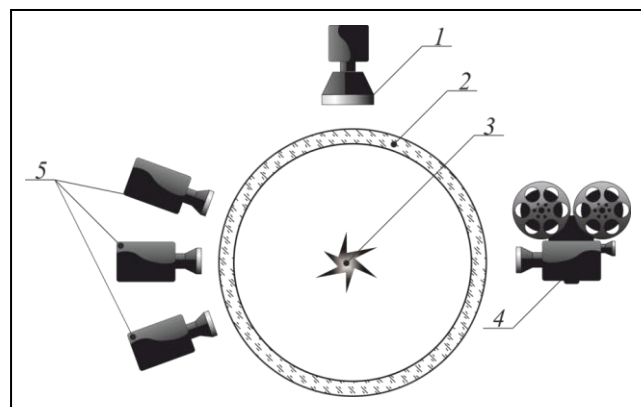


Рис. 2. Схема расположения диагностических методик: 1 – фотодиод; 2 – разрядно-взрывная камера; 3 – проволочка; 4 – высокоскоростная камера; 5 – система СПФ.

валась длительностью импульса напряжения подаваемого на ЭОП. В проведенных опытах фотографирование производилось со временем экспозиции  $\tau \sim 10$  нс. Для формирования высоковольтного импульса использовалась схема двойной формирующей линии Блюмлейна, реализованной на кабеле РК-50. Коммутация формирующей линии осуществлялась с помощью управляемого разрядника РУ-62. Синхронизация разрядника РУ-62 осуществлялась импульсом  $\sim 8$  кВ, который подавался от основного разрядника установки через делитель напряжения. Временная привязка срабатывания системы покадрового фотографирования осуществлялась с помощью сигнала напряжения питания последнего ЭОПа, который синхронно регистрировался на том же осциллографе, что и импульс напряжения (рис. 2). Временная задержка между кадрами могла варьироваться от 10 до 100 нс при помощи изменения длины кабелей, соединяющих ЭОПы. Столь небольшое, по сравнению с периодом импульса тока, время задержки между ЭОПами не позволяло следить за динамикой развития свечения на протяжении всего импульса, но зато позволяло практически в каждом опыте, получать информацию о свечении плазмы, за счет различия в диаметрах ограничивающих диафрагм, которые стояли перед каждым из ЭОПов.

Высокоскоростная камера ВИДЕОСПРИНТ использовалась в эксперименте для съемки процесса электровзрыва проволоочки с высокой кадровой частотой. При съемке частота кадров составляла 1000 кадров/с. Время экспозиции кадра – 994 мкс. Старт записи по внешней синхронизации осуществлялся импульсом 5 В за 4 мкс перед началом электрического взрыва.

«Видоискателем» камеры является монитор ПЭВМ, с помощью которого производилось ориентирование камеры на объект съемки, настраивалась оптика (диафрагмирование, наведение на резкость). С компьютера устанавливались также параметры съемки, режим работы камеры, параметры синхронизации. В зависимости от выбранного режима съемки, производилась видеозапись, которая располагалась в буферной памяти самой камеры. Видеозапись, хранящаяся в буферной памяти камеры, просматривалась без передачи в ПЭВМ, после чего интересующий фрагмент сохранялся на жестком диске ПЭВМ.

### 3. Экспериментальные результаты

Из анализа ЭОПграмм, полученных в экспериментах по электровзрыву проволоочек различных диаметров (при прочих равных условиях), следует, что поперечный оптический размер свечения плазменного канала и характер наблюдающихся неоднородностей очень слабо зависят от диаметра взрывающейся вольфрамовой проволоочки.

На рисунке 3 представлены ЭОПграммы свечения плазмы электровзрыва проволоочек длиной

$L=40$  мм и диаметром – 50 мкм (а) и 10 мкм (б), полученных через время  $T \sim 650$  нс после начала импульса. Из рисунка видно, что качественных отличий между этими двумя ЭОПграммами не наблюдается. Этот вывод справедлив как для начальных, так и для более поздних стадий ЭВП. Поскольку размер плазменного свечения в оптическом диапазоне определяется динамикой плазмы низкой плотности, которая образуется на ранней стадии ЭВП, то поведение керны, которое, конечно же, должно зависеть от диаметра проволоочки, слабо проявляется из-за этой своеобразной оптической «экранировки». Следует отметить, что предварительный прогрев проволоочек, имевший целью удалить растворенные вблизи поверхности проволоочки газы и поверхностные примеси, практически не оказал никакого видимого влияния на динамику свечения низкоплотной плазмы. Хотя в работе [4], где исследовалась роль предварительного прогрева вольфрамовых проволоочек, отмечалось, что предварительный прогрев приводит к увеличению энерговклада на резистивной стадии нагрева проводника.

В работе [9] на установке, очень близкой по своим электротехническим параметрам ( $U=25$  кВ,  $I=50$  кА,  $T \sim 2$  мкс) к описываемой в настоящей статье, также изучался электровзрыв вольфрамовых проволоочек диаметром  $\varnothing = 70$  мкм в вакууме. Размер плазменного свечения, измеренный по ЭОПграмме полученной на 700 нс (рис. 6(а) в работе [9]) составляет  $\sim 3$  мм, что почти в точности совпадает с размером свечения, измеренного из ЭОПграмм рисунка 3 настоящей статьи. Характер неоднородностей, отчетливо просматривающийся на

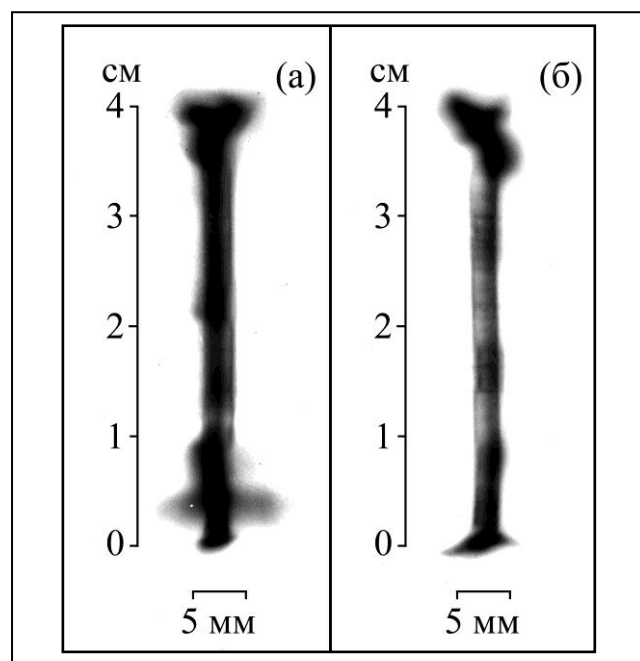


Рис. 3. ЭОПграммы для проволоочек различного диаметра: (а) – 50 мкм, взрыв № 120, полярность ВЭ положительная; (б) – 10 мкм, взрыв № 137, полярность ВЭ положительная.

всех ЭОПограммах, имеет характерный период масштаба  $\sim 3 \dots 5$  мм. Происхождение этих неоднородностей свечения связано с развитием магнитно-гидродинамической неустойчивости (МГД) релей-тейлоровского типа с модой  $m = 0$ . Следует отметить, что вне зависимости от диаметра взрывающейся проволоочки мы всегда наблюдали неустойчивость с модой  $m=0$ . По-видимому, неустойчивость с модой  $m \geq 1$  не успевает развиться при данной скорости энерговклада. В работе [9] было показано, что наложение продольного магнитного поля  $B_z \geq 10$  кГс стабилизирует МГД неустойчивость и свечение становится однородным вдоль длины проволоочки.

Эксперименты показали, что полярность высоковольтного электрода (далее по тексту ВЭ) заметно влияет на контрастность свечения плазмы во время ЭВП. На рисунке 4 представлены ЭОПограммы взрыва вольфрамовой проволоочки диаметром 70 мкм при различных полярностях ВЭ. Из рисунка видно, что при отрицательной полярности ВЭ образуются ярко выраженные, контрастные, симметричные плазменные страты. Свечение в области ВЭ гораздо ярче при отрицательной полярности. Такой же эффект наблюдался и в работе [4], в которой исследовался вопрос о влиянии полярности ВЭ на величину энерговклада в проволоочку. Из рисунка 4 также видно, что при положительной полярности ВЭ плазменные страты менее контрастны, а свечение плазменного канала носит более равномерный характер. Выявленная закономерность проявлялась при электрическом взрыве вольфрамовых проволоочек всех диаметров (10...200 мкм), которые использовались в наших экспериментах. В работе [4] отмечено, что при положительной по-

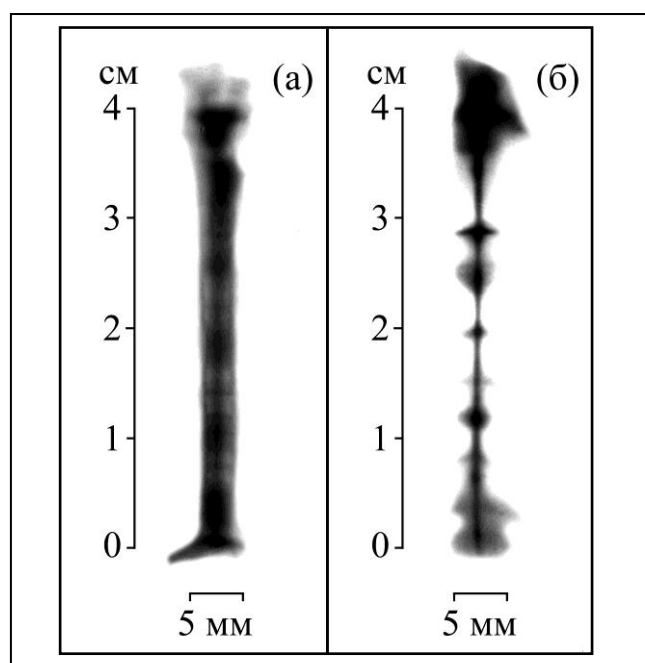


Рис. 4. ЭОПограммы для проволоочки диаметром 70 мкм: (а) – положительная полярность ВЭ, взрыв №93; (б) – отрицательная полярность ВЭ, взрыв №145.

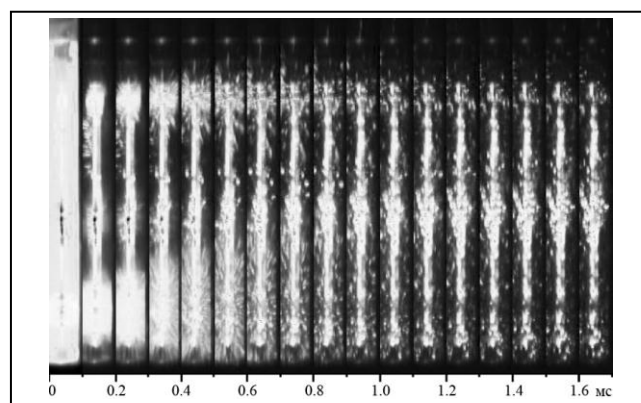


Рис. 5. Кадры скоростной видеосъемки с экспозицией 100 мкслярности ВЭ, энерговклад приблизительно в 1,7 раза выше, чем при отрицательной. Авторы объясняют этот факт разным характером образования плазмы в прикатодной области.

На рисунке 5 представлена серия кадров, полученная с помощью скоростной видеокамеры. Из рисунка видно, что полное разрушение керна проволоочки происходит лишь к концу второй миллисекунды. То, что kern проволоочки существует намного дольше длительности импульса тока, было известно достаточно давно, но применение скоростной видеокамеры позволило непосредственно измерить это время. С помощью этой же методики можно было судить о степени дисперсности вольфрамового порошка, образующегося при разрушении керна проволоочки. При уменьшении диаметра взрывающейся проволоочки, степень дисперсности увеличивалась.

## Заключение

Основываясь на анализе ЭОПограмм и киносъемок свечения плазмы, полученных в момент электровзрыва вольфрамовых проволоочек, можно сделать следующие качественные выводы:

- ✓ тип моды ( $m=0$ ) магнитно-гидродинамической неустойчивости, которая развивается при расширении плазменной оболочки, не зависит (в исследованных пределах от 10...100 мкм) от диаметра вольфрамовой проволоочки;
- ✓ методика оптического фотографирования не позволила выявить качественных различий в свечении плазмы между электровзрывами предварительно прогретых и непрогретых проволоочек;
- ✓ методика скоростной киносъемки показала, что kern проволоочки полностью диспергируется только через несколько миллисекунд от начала электровзрыва, а размер диспергирующих частиц зависит от исходного диаметра проволоочки.

Авторы выражают благодарность за помощь в проведении экспериментов своим коллегам Д. А. Войтенко и Г. И. Астапенко – сотрудникам Сухумского физико-технического института (Республика Абхазия), на базе которого и проводились настоящие исследования.

Работа была выполнена в рамках НИР Министерства образования и науки РФ регистрационный номер: 2.422.2011.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Александров В.В., Барсук В.А., Грабовский Е.В. и др. Исследование проникновения магнитного поля внутрь сжимаемого током лайнера на установке Ангара-5-1 // *Физика плазмы*. 2009. Т. 35. № 3. С. 229...250.
2. Калинин Ю.Г., Кингсеп А.С., Смирнов В.П. и др. Эксперименты по имплозии гетерогенных многопроволочных сборок на установке С-300 // *Физика плазмы*. 2006. Т. 32. № 8. С. 714...726.
3. Александров В.В., Алексеев А.Г., Амосов В.Н. и др. Экспериментальное исследование и численное моделирование процесса образования плазмы на начальной фазе токовой имплозии цилиндрической проволочной сборки // *Физика плазмы*. 2003. Т. 29. № 12. С. 1114...1121.
4. Русских А.Г., Бакшт Р.Б., Лабетский А.Ю. и др. Влияние полярности высоковольтного электрода и предварительного прогрева вольфрамового микропроводника на его энергетические характеристики при взрыве в вакууме // *Физика плазмы*. 2006. Т. 32. № 10. С. 893-906.
5. Cakamy H., Lassalle F., Loyer A. et al. Use of Microsecond Current Prepulse for Dramatic Improvements of Wire Array Z-pinch Implosion // *Phys. Plasmas*. 2008. Vol. 15. P. 012701.
6. Harvey-Thompson A.J., Lebedev S.V., Burdiak G. et al. Suppression of the Ablation Phase in Wire Array Z Pinches Using a Tailored Current Prepulse // *Phys. Rev. Lett.* 2011. Vol. 106. P. 205002.
7. Уруцкоев Л.И., Филиппов Д.В., Рухадзе А. А., Бiryukov A.O. и др. Разработка методики исследования газовой фазы электрического взрыва проводников // *Прикладная физика*. 2012. № 4. С. 60...69.
8. ЗАО «НПК ВИДЕОСКАН» Камера скоростной видеосъемки «ВидеоСпринт». 23 сентября 2012 г. <http://videoscan.ru/page/731>.
9. Волков А.А., Гребенев Е.В., Дадькин П.С. и др. Исследование электрического взрыва проволочек микросекундными импульсами тока в продольном магнитном поле // *Журнал технической физики*. 2002. Т. 72. № 5. С. 115...120.
10. [Studies of penetration of the magnetic field into electrically imploded loads in the Angara-5-1 facility]. *Fizika plazmy* [Plasma Physics Reports]. 2009. Vol. 35. № 3. PP. 229...250.
11. Kalinin Yu.G., Kingsep A.S., Smirnov V.P. et al. Eksperimenty po implozii geterogennykh mnogoprovodnykh sborok na ustanovke S-300 [Experiments on the implosion of heterogeneous wire arrays on the S-300 facility]. *Fizika plazmy* [Plasma Physics Reports]. 2006. Vol. 32. № 8. PP. 714...726.
12. Aleksandrov V.V., Alekseev A.G., Amosov V.N. et al. Eksperimentalnoe issledovanie i chislennoe modelirovanie protsessa obrazovaniya plazmy na nachalnoy faze tokovoy implozii tsilindricheskoy provolochnoy sborki [Experimental and Numerical Studies of Plasma Production in the Initial Stage of Implosion of a Cylindrical Wire Array]. *Fizika plazmy* [Plasma Physics Reports]. 2003. Vol. 29. № 12. PP. 1114...1121.
13. Russkikh A. G., Baksht R. B., Labetskiy A. Yu. et al. Vliyaniye polyarnosti vysokovoltного elektroda i predvaretil'nogo progreva vol'framovogo mikroprovodnika na ego energeticheskie kharakteristiki pri vzryve v vakuume [Effect of the High-Voltage Electrode Polarity and Wire Preheating on the Energy Characteristics of Electric Explosion of Fine Tungsten Wires in Vacuum]. *Fizika plazmy* [Plasma Physics Reports]. 2006. Vol. 32. № 10. PP. 893...906.
14. Cakamy H., Lassalle F., Loyer A. et al. Use of Microsecond Current Prepulse for Dramatic Improvements of Wire Array Z-pinch Implosion // *Phys. Plasmas*. 2008. Vol. 15. P. 012701.
15. Harvey-Thompson A.J., Lebedev S.V., Burdiak G. et al. Suppression of the Ablation Phase in Wire Array Z Pinches Using a Tailored Current Prepulse // *Phys. Rev. Lett.* 2011. Vol. 106. P. 205002.
16. Urutskoev L. I., Filippov D. V., Rukhadze A. A., Biryukov A. O. et al. Razrabotka metodiki issledovaniya gazovoy fazy elektricheskogo vzryva provodnikov [The Development of a Research Methodology for the Gas Phase of the Electric Explosion of Conductors ]. *Prikladnaya fizika* [Applied Physics]. 2012. № 4. PP. 60...69.
17. ЗАО «НПК ВИДЕОСКАН» Камера скоростной видеосъемки «ВидеоСпринт» [high-speed video camera «VideoSprint»]. September 23, 2012 <http://videoscan.ru/page/731>.
18. Volkov A.A., Grebenev Ye.V., Dadykin P.S. et al. Issledovanie elektricheskogo vzryva provolochek mikrosekundnymi impulsami toka v prodolnom magnitnom pole [The study of the electric explosion of wires microsecond pulses of current in a magnetic field]. *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki* [Journal of Applied Physics]. 2002. Vol. 72. № 5. PP. 115...120.

## REFERENCES

1. Aleksandrov V.V., Barsuk V.A., Grabovskiy Ye.V. et al. Issledovanie proniknoveniya magnitnogo polya vnutr szhimaемого tokom laynera na ustanovke Angara-5-1

---

## Сведения об авторах

**Алабин Кирилл Алексеевич**, аспирант

E-mail: [alabin.kirill@gmail.com](mailto:alabin.kirill@gmail.com)

**Бiryukov Артем Олегович**, аспирант

E-mail: [ar.biryukov@gmail.com](mailto:ar.biryukov@gmail.com)

**Уруцкоев Леонид Ирбекович**, доктор физ.-мат. наук, профессор, зав. кафедрой физики

E-mail: [urleon@yandex.ru](mailto:urleon@yandex.ru)

**Филиппов Дмитрий Витальевич**, д-р физ.-мат. наук, ведущий научный сотрудник

Московский государственный университет печати имени Ивана Федорова

127550, Москва, Российская Федерация, ул. Прянишникова, д. 2А

**Белоус Павел Витальевич**, студент

E-mail: p.v.belous@gmail.com

**Леванов Алексей Александрович**, студент

E-mail: seminlevanov@gmail.com

**Стещенко Георгий Константинович**, студент

E-mail: georgy.steshenko@phystech.edu

Московский физико-технический институт (государственный университет)

141700, г. Долгопрудный, Российская Федерация, Институтский пер., д. 9

**Шпаковский Тимофей Владимирович**, студент

E-mail: timofey.shpakovskiy@gmail.com

**Жотиков Глеб Игоревич**, студент

E-mail: zhotikov\_gleb@mail.ru

Санкт-Петербургский государственный университет

199034, Санкт-Петербург, Российская Федерация, Университетская наб., д.7-9.

**Марколия Алмасхан Анатольевич**, специалист

E-mail: almahushti@gmail.com

Государственное научно-производственное объединение «Сухумский физико-технический институт»

Академии Наук Абхазии

384912, г. Сухум, Республика Абхазия, Кодорское шоссе 665

**Рухадзе Анри Амвросьевич**, доктор физ.-мат. наук, профессор, гл. научн. сотрудник

E-mail: rukh@fpl.gpi.ru

Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН

119991, Москва, Российская Федерация, ул. Вавилова, 38

#### Information about authors

**Alabin Kirill Alekseevich**, postgraduate student

E-mail: alabin.kirill@gmail.com

**Biryukov Artem Olegovich**, postgraduate student

E-mail: ar.biryukov@gmail.com

**Urutskoev Leonid Irbekovich**, Doctor of Physics and Mathematics Sciences, Professor,

Head of the Department of Physics

E-mail: urleon@yandex.ru

**Filippov Dmitry Vitalievich**, Doctor of Physics and Mathematics Sciences, Leading Researcher

E-mail: filippov-atom@ya.ru

Moscow State University of Printing Arts

127550, Moscow, Russian Federation, Pryanishnikova street, 2A

**Belous Paul Vitalievich**, student

E-mail: pvbelous@gmail.com

**Levanov Alexey Alexandrovich**, student

E-mail: seminlevanov@gmail.com

**Steshenko Georgii Konstantinovich**, student

E-mail: georgy.steshenko@phystech.edu

**Shpakovskij Timofey Vladimirovich**, student

E-mail: timofey.shpakovskiy@gmail.com

Moscow Institute of Physics and Technology

141700, Moscow reg., Dolgoprudny, Russian Federation, Institute lane, 9

**Zhotikov Gleb Igorevich**, student

E-mail: zhotikov\_gleb@mail.ru

Saint-Petersburg University

199034, St. Petersburg, Russian Federation, University emb., 7-9

**Markolia Almaskhan Anatolyevich**, specialist

E-mail: almahushti@gmail.com

State Scientific and Production Association «Sukhumi Physical-Technical Institute» Abkhazian Academy of Sciences

384912, Republic of Abkhazia, Sukhum, Kodor highway 665

**Rukhadze Anri Amvrosyevich**, Doctor of Phys.-Mat. Sciences, Professor, Principle Researcher

E-mail: rukh@fpl.gpi.ru

Prokhorov General Physics Institute RAS

119991, Moscow, Russian Federation, Vavilova street 38