

## ЭЛЕКТРОННЫЕ ВЕРСИИ ПЕРИОДИЧЕСКИХ ИЗДАНИЙ, В КОТОРЫХ ПОМЕЩЕНЫ НИЖЕПЕРЕЧИСЛЕННЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ОФТП

«Физики плазмы»

- русская версия:

<http://www.maikonline.com/maik/showIssues.do?juid=REO8GGOH3&lang=ru>

- английская версия:

<http://link.springer.com/journal/volumesAndIssues/11452>

Instruments and Experimental Techniques

<http://link.springer.com/journal/10786>

ВАНТ (Россия)

<http://vant.iterru.ru/vant.html>

ВАНТ (Украина)

<http://vant.kipt.kharkov.ua/TABFRAME.html>

Plasma Physics and Controlled Fusion

<http://iopscience.iop.org/0741-3335/>

EPL

<http://iopscience.iop.org/0295-5075/>

## ИЗБРАННЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ОФТП

**1.** Айвазов И.К., Вихарев В.Д., Волков Г.С., Никандров Л.Б., Смирнов В.П., Царфин В.Я. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ ОСЕВОГО ФОРПЛАЗМЕННОГО КАНАЛА НА НАЧАЛЬНОМ ЭТАПЕ СЖАТИЯ МНОГОПРОВОЛОЧНОЙ СИСТЕМЫ МЕГААМПЕРНЫМ ТОКОМ. Физика плазмы, 1988, Т. 14, № 2, С. 197-202.

Целью данной работы было получение дополнительных экспериментальных данных о формировании плазменного предвестника на оси в медных цилиндрических проволочных сборках.

**2.** Бехтев М.Б., Вихарев В.Д., Захаров С.В., Смирнов В.П., Тулупов М.В., Царфин В.Я. ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОЕ СЖАТИЕ МНОГОПРОВОЛОЧНЫХ ЛАЙНЕРОВ. ЖЭТФ, 1989, Т. 95, С. 1653-1667.

M.V. Bekhtev, V.D. Vikharev, S.V. Zakharov, V.P. Smirnov, M.V. Tulupov, V. Ya. Tsarfin

ELECTRODYNAMIC CONTRACTION OF MULTIWIRE LINERS

JETP, VOL. 68, NO. 5, MAY 1989

Results of experiments and theoretical calculations of electrodynamic contraction of multiwire liners are reported. It is shown that collapse of a multiwire array produces on its axis a high-temperature radiating plasma pinch. Wire liners permit adequate matching to a high-power electric-pulse generator; an appreciable fraction (up to 25%) of the electric energy fed to the liner (up to 100 kJ per pulse) is converted into radiation. Experiments and a theoretical analysis have shown, however, that the contraction dynamics of such liners does not ensure a compact collapse of the arrays to the axis; the soft x-ray flashes generated by the axial-pinch plasma are therefore not shorter than 30 ns. An important

feature of such systems is the jetlike flow, due to the action of MHD tidal forces, of plasma from the wires to the liner axis.

[http://www.jetp.ac.ru/cgi-bin/dn/e\\_068\\_05\\_0955.pdf](http://www.jetp.ac.ru/cgi-bin/dn/e_068_05_0955.pdf)

**3.** Айвазов И.К., Бехтев М.Б., Булан В.В. и др.

СЖАТИЕ МНОГОПРОВОЛОЧНЫХ ЛАЙНЕРОВ НА МНОГОМОДУЛЬНОМ КОМПЛЕКСЕ «АНГАРА-5-1».

Физика плазмы, 1990, Т. 16, № 6, С. 645-654.

Приведены результаты экспериментальных и теоретических исследований ускорения многопроволочных лайнеров на многомодульном импульсном генераторе «Ангара-5-1» на уровне выходной мощности  $P \sim 6$  ТВт. Эксперименты проводились с алюминиевыми, медными и вольфрамовыми лайнерами с погонной массой 100-300 мкг/см. Определены режимы наиболее «компактного» сжатия многопроволочных лайнеров. Установлены закономерности нарушения «компактного» ускорения оболочек, вызванные эффектом «предвестника». Экспериментально и теоретически показано, что в случае сильноизлучающих проволочных лайнеров (вольфрам) удастся улучшить «компактность» оболочки и повысить мощность излучения. При схлопывании вольфрамового лайнера получена конверсия электрической энергии генератора в энергию мягкого рентгеновского излучения с мощностью  $\sim 2$  ТВт и энергией до 100 кДж за импульс.

**4.** Альбикиов З. А., Велихов Е. П., Веретенников А. И., Глухих В. А., Грабовский Е. В., Грязнов Г. М., Гусев О. А., Жемчужников Г.Н., Зайцев В.И., Золотовский О. А., Истомин Ю. А., Козлов О. В., Крашенинников И. С., Курочкин С. С., Латманизова Г. М., Матвеев В. В., Минеев Г. В., Михайлов В. Н., Недосеев С. Л., Олейник Г. М., Певчев В. П., Перлин А. С., Печерский О. П., Письменный В. Д., Рудаков Л. И., Смирнов В. П., Царфин В. Я., Ямпольский И. Р.  
ИМПУЛЬСНЫЙ ТЕРМОЯДЕРНЫЙ КОМПЛЕКС «АНГАРА-5-1»

Атомная энергия, 1990, Т. 68, Вып. 1, С. 26-35.

В данной работе описан созданный в ИАЭ им. И. В. Курчатова комплекс «Ангара-5-1», предназначенный для исследований по лайнерной программе УТС. Комплекс передан в эксплуатацию для проведения физических экспериментов в декабре 1984 г. Его основа - 8-модульный генератор сверхвысокой электрической мощности, сокращенный вариант установки «Ангара-5», предложенной в 1976 г. Экспериментальный образец модуля («Ангара-5-01») был смонтирован в ИАЭ им. И. В. Курчатова.

**5.** А.В.Батюнин, А.Н.Булатов, В.Д.Вихарев и др.

Исследование сверхбыстрого дейтериевого Z- пинча на установке "Ангара-5-1".

Физика плазмы т.16, в.9, 1990, с.1027-1035.

**6.** Smirnov V.P.

FAST LINERS FOR INERTIAL FUSION

Plasma Phys. Controlled Fusion. 1991. V. 33. N.13. P. 1697.

Theoretical and experimental investigations of xenon cylindrical shell collisions with inner axial liners are presented. The implosion was driven by a current of 3.5 MA. X-ray emission with a 3 ns rise time was obtained. The Angara-5-1 experiments with superfast Z-pinches are described.

<http://iopscience.iop.org/0741-3335/33/13/014>

DOI:10.1088/0741-3335/33/13/014

**7.** Е.В.Грабовский, Ю.К.Земцов, С.А.Комаров и др.

Свечение газовых смесей под воздействием мягкого рентгеновского излучения.

ЖЭТФ, том 101, вып.3, с.878-894, 1992.

**8.** S.V.Zakharov, V. P.Smirnov, V. Ya.Tsarfin  
Angara-5 high intensity soft x ray source with imploding liner cascade for inertial confinement fusion.  
Proc. of 14-th Intern. Conference on Plasma Physics and Controlled nuclear Fusion Research held by  
the IAEA in Wurzburg, 1992, Volume 3, IAEA, Vienna, 1993, IAEA-CN-56/G-3-9, pp.481-484.

**9.** Е.В.Грабовский, О.Ю.Воробьев, К.С.Дябилин и др.  
Теоретическое и экспериментальное исследование плазмы Z-пинча как источника мощного  
импульса мягкого рентгеновского излучения для генерации ударных волн в конденсированных  
мишенях.  
ЖЭТФ, том 109, вып.3, с.1-11, 1996.

**10.** В.В.Александров, А.В.Браницкий, Г.С. Волков и др.  
Динамика гетерогенного лайнера с затянутым плазмообразованием.  
"Физика плазмы", т.27, №2, 2001, с.99-120.

**11.** V.V.Aleksandrov, A.V.Branitskii, G.V.Volkov, E.V.Grabovskii, et al.  
[Dynamics of Heterogeneous Liners with Prolonged Plasma Creation.](#)  
Plasma Physics Reports, Vol.27, No.2, pp.89-109.

**12.** Э.А. Азизов, С.Г. Алиханов, Е.П. Велихов и др.  
Проект "Байкал". Отработка схемы генерации электрического импульса.  
ISSN 0202-3822, РИЦ "Курчатовский институт", ВАНТ, серия Термоядерный синтез, выпуск 3,  
с.3-17, 2001.

**13.** V.V.Alexandrov, I.N.Frolov, E.V.Grabovsky, et al.  
Prolonged plasma production at current-driven implosion of wire arrays on Angara-5-1 facility.  
IEEE Transactions on PLASMA SCIENCE. Vol.30, No2, APRIL 2002, pp.559-566.

**14.** В.В.Александров, Е.В.Грабовский, Г.Г.Зукакишвили, и др.  
[Токовое самосжатие многопроволочной сборки как радиальный плазменный ливень.](#)  
ЖЭТФ, 2003, т.124, в.10, с.829-839.

**15.** Е.В.Грабовский, К.Н.Митрофанов, Г.М. Олейник, И.Ю.Порофеев Рентгеновское  
просвечивание периферийной области сжимаемой током многопроволочной сборки на установке  
Ангара-5-1  
"Физика плазмы", 2004, Т.30, №2, С.139-146

Описана методика просвечивания периферийной части лайнеров на установке "Ангара-5-1"  
посредством точечного рентгеновского источника X-пинча. Пространственное разрешение  
методики не хуже чем 4 мкм. Излучение X-пинча, поглощенное в плазме регистрируется на  
фотопленку. Переход от плотности почернения фотоматериала к плотности плазмы  
обеспечивается использованием ступенчатого ослабителя из того же материала, что и лайнер.  
Представлены результаты просвечивания периферийной части многопроволочного лайнера на  
70-ю нс после начала тока через лайнер. Сделаны выводы о том, что к этому времени керны  
проволочек лайнера неодинаково истощились; они расширились по диаметру примерно в 3 раза  
и содержат до 70% от исходной массы. Наблюдается аксиальная стратификация с шагом 200  
мкм плотности плазмы, срывающейся с кернов проволочек. В некоторых случаях фиксируется  
аксиальная неоднородность плотности вещества внутри керна с масштабом 20 мкм.

E. V. Grabovskii, K. N. Mitrofanov, G. M. Oleinik, I. Yu. Porofeev X-ray backlighting of the periphery  
of an imploding multiwire array in the Angara-5-1 facility  
Plasma Physics Reports, February 2004, Volume 30, Issue 2, pp 121-127  
<http://link.springer.com/article/10.1134/1.1648936>

Backlighting diagnostics for studying the peripheral region of an imploding liner in the Angara-5-1 facility by using X-ray emission from an X-pinch is described. The spatial resolution of the diagnostics was no worse than 4  $\mu\text{m}$ . The X-pinch emission passed through the plasma was recorded with a photofilm. The plasma density was reconstructed from the photofilm blackening density with the help of a step attenuator made of the same material as the liner. Results are presented from experiments on X-ray backlighting of the peripheral region of a multiwire liner at the 70th ns after the beginning of the discharge. It was found that, by this time, the wire cores were depleted to different extent, their masses totalled 70% of the original wire mass, and their diameters had increased approximately threefold. The plasma ejected from the wire cores was found to be axially stratified with a spatial period of 200  $\mu\text{m}$ . Sometimes the axial nonuniformity of the core material with a characteristic scale length of 20  $\mu\text{m}$  was observed.

**16.** Г.С.Волков, Е.В.Грабовский, К.Н.Митрофанов, Г.М. Олейник Рентгеновское зондирование приосевой области плазмы многопроволочного лайнера на установке Ангара-5-1 "Физика плазмы", 2004, Т.30, №2, С.115-128

В работе приведены результаты экспериментов по рентгеновскому зондированию приосевой области лайнера, сжимаемого током сильноточного генератора. Для просвечивания лайнера использовался источник мягкого рентгеновского излучения X-пинч, а излучение регистрировалось р-і-п диодами. Использование нескольких фильтров с разными окнами пропускания перед р-і-п диодами позволило обеспечить интерпретацию результатов измерений в экспериментах с каскадными лайнерами сложного элементного состава. Нижний предел чувствительности методики составляет величину  $\approx 125 \text{ мкг/см}^2$  для плазмы тяжелых элементов (W) и  $\approx 220 \text{ мкг/см}^2$  для плазмы легких элементов (C, O, N), при энергии квантов зондирующего излучения  $1.0 \div 1.5 \text{ кэВ}$ . Достоинства метода заключаются в высоком временном разрешении ( $\approx 1 \text{ нс}$ ) и возможности разграничить по времени вспышки излучения с оси лайнера от Z-пинча и излучения X-пинча. Метод не налагает ограничений на длительность импульса излучения источника, используемого для просвечивания плазмы.

G. S. Volkov, E. V. Grabovskii, K. N. Mitrofanov, G. M. Oleinik X-ray backlighting of the axial region of a multiwire liner plasma in the angara-5-1 facility  
Plasma Physics Reports, February 2004, Volume 30, Issue 2, pp 99-110  
<http://link.springer.com/article/10.1134/1.1648934>  
DOI: 10.1134/1.1648934

Results are presented from experiments on the X-ray backlighting of the axial region of an imploding high-current multiwire liner. Backlighting was performed with the use of an X-pinch serving as a source of soft X-ray emission, which was recorded by pin diodes. The use of several filters with different passbands in front of the pin diodes allowed the interpretation of the results of measurements in experiments with cascade composite liners. The sensitivity of the diagnostics was  $\approx 125 \text{ }\mu\text{g/cm}^2$  for a plasma of high-Z elements (W) and  $\approx 220 \text{ }\mu\text{g/cm}^2$  for a plasma of low-Z elements (C, O, N) at a photon energy of the probing radiation of 1.0–1.5 keV. An advantage of the method is its high time resolution ( $\approx 1 \text{ ns}$ ) and the possibility of the separation in time of the emission bursts from Z- and X-pinch on the liner axis. The method does not impose restrictions on the pulse duration of the backlighting radiation source.

**17.** Г.С.Волков, Е.В.Грабовский, В.И. Зайцев, Г.Г. Зукакишвили, М.В.Зурин, К.Н. Митрофанов, С.Л. Недосеев, Г.М. Олейник, И.Ю. Порофеев, В.П. Смирнов, И.Н. Фролов Диагностика плазмы на установке Ангара-5-1 ПТЭ, 2004г, №2, С.74-81

Представлен используемый на установке Ангара-5-1 комплекс диагностических методик, позволяющий исследовать процессы при сверхбыстром токовом сжатии лайнеров. Комплекс включает электротехнические методы, методы регистрации различных излучений. Визуализация формы плазмы лайнеров осуществляется путем регистрации собственного излучения лайнеров в различных диапазонах и активным зондированием в видимом и рентгеновском диапазонах. Приведены примеры результатов исследования токового сжатия цилиндрических сборок из вольфрамовых проволок на установке Ангара-5-1.

G. S. Volkov, E. V. Grabovskii, V. I. Zaitsev, G. G. Zukakishvili, M. V. Zurin, K. N. Mitrofanov, S. L. Nedoseev, G. M. Oleinik, I. Yu. Porofeev, V. P. Smirnov, I. N. Frolov Plasma Diagnostics at the Angara-5-1 Facility

Instruments and Experimental Techniques, March 2004, Volume 47, Issue 2, pp 201-208

<http://link.springer.com/article/10.1023/B%3AINET.0000025202.65725.c5>

DOI: 10.1023/B:INET.0000025202.65725.c5

The set of diagnostic techniques used at the Angara-5-1 facility that make it possible to study the processes which accompany the ultrafast current-driven implosion of liners is described. This set includes electric methods and methods for the detection of various radiations. The liner-plasma shapes are visualized by detecting the intrinsic liner radiation in various wavelength ranges and actively probing liners in the visible and X-ray regions. Examples of the results of studying the current-driven implosion of cylindrical arrays of tungsten wires at the Angara-5-1 facility are presented.

**18.** Г.С.Волков, Е.В.Грабовский, М.В.Зурин, К.Н. Митрофанов, Г.М. Олейник, И.Ю. Порофеев Методика рентгеновского зондирования излучением хпинча плазмы многопроволочных сжимающихся лайнеров на установке «Ангара-5-1»

ПТЭ, 2004г, №3, С.110-124

Описан метод нахождения распределения плотности вещества в плазме, образующейся при токовой имплозии многопроволочных вольфрамовых лайнеров на установке Ангара-5-1. Метод основан на зондировании плазмы рентгеновским излучением от точечного источника. В качестве источника рентгеновского излучения использовался Хпинч. Временное разрешение (менее 2 нс) определяется Хпинчем. Отдельно рассмотрено зондирование периферийной и приосевой области лайнеров. Регистрация ослабленного плазмой излучения Хпинча для первого случая осуществлялась на фотоплёнку, для второго - р-і-п диодами. Пространственное разрешение (по объекту) для первого случая определяется размером Хпинча и составляет 4 мкм, для второго - размером р-і-п диода и составляет 44 мкм. Описана конструкция Хпинча, зависимость его излучательных характеристик (время вспышки, длительность и мощность излучения) от электрических и конструктивных параметров цепи и нагрузки. Приведены экспериментальные данные о спектре излучения Хпинча в диапазоне энергий квантов от 1 до 20 кэВ. Приведены результаты исследований распределения плотности вещества внутри лайнеров при протекании по ним тока установки Ангара-5-1.

G. S. Volkov, E. V. Grabovskii, M. V. Zurin, K. N. Mitrofanov, G. M. Oleinik, I. Yu. Porofeev An X-ray Backlighting Technique Based on Using X-Pinch Radiation for Probing the Plasma of Multiwire Imploding Liners at the Angara-5-1 Facility

Instruments and Experimental Techniques, May 2004, Volume 47, Issue 3, pp 376-389

<http://link.springer.com/article/10.1023/B%3AINET.0000032907.93202.b3>

DOI: 10.1023/B:INET.0000032907.93202.b3

A method for determining the substance density distribution in the plasma produced by a current-driven implosion of multiwire tungsten liners at the Angara-5-1 facility is described. This method is based on the X-ray probing of plasma with radiation from a point source. As a source of this radiation, an X pinch is used. The time resolution (<2 ns) was determined by the X pinch. The probing

of both the liner peripheral and near-axial regions is considered. The plasma-attenuated X-pinch radiation was detected using photographic film and p-i-n diodes in the first and second approach, respectively. The spatial resolutions (over the object) in both cases were determined by the sizes of the X pinch and p-i-n diodes and amounted to 4 and 44  $\mu\text{m}$ , respectively. The design of the X-pinch and the dependence of its radiation characteristics (the burst time moment and the radiation-pulse power and duration) on the electric and design parameters of the circuit and load are described. The experimental data on the X-pinch radiation spectrum in the range of photon energies of 1–20 keV and the results of studying the substance-density distribution inside liners during the current-driven implosion at the Angara-5-1 facility are presented.

**19.** В.В.Александров, Г.С.Волков, Е.В.Грабовский, Г.Г. Зукакишвили, М.В.Зурин, К.Н. Митрофанов, С.Л. Недосеев, Г.М. Олейник, И.Ю. Порофеев, А.А. Самохин, П.В. Сасоров, В.П. Смирнов, И.Н. Фролов Интерферометрические измерения плотности плазмы на периферии z-пинча на установке Ангара51  
"Физика плазмы", 2004, Т.30, №3, С.245-255

Для понимания физики сжатия проволочныхборок током мегаамперного уровня важно знать пространственные распределения массы внутри сборки в течение этого процесса. В этой работе было проведено исследование распределения электронной плотности на периферии исходной сборки из вольфрамовых проволок вблизи момента максимального сжатия методом лазерной интерферометрии на длине волны 0.69 мкм. Получено, что к моменту максимального сжатия (через  $\sim 100$  нс после начала тока) оценка локальной максимальной электронной плотности внутри исходной проволочной сборки на расстоянии от 0.3 до 3 мм от исходного положения проволок может достигать  $\sim 10^{18}$  см $^{-3}$ . В предположении среднего заряда ядра 10 для вольфрама это дает до 30 мкг/см локальной погонной массы лайнера, что составляет около 10% начальной погонной массы лайнера. Часть тока генератора протекает по этой плазме. При этом длительность импульса мягкого рентгеновского излучения 5–8 нс, что свидетельствует о хорошем качестве сжатия.

V. V. Aleksandrov, G. S. Volkov, E. V. Grabovskii, G. G. Zukakishvili, M. V. Zurin, K. N. Mitrofanov, S. L. Nedoseev, G. M. Oleinik, I. Yu. Porofeev, A. A. Samokhin, P. V. Sasorov, V. P. Smirnov, I. N. Frolov Interferometric measurements of the plasma density at the Z-pinch periphery in the angara-5-1 facility  
Plasma Physics Reports, March 2004, Volume 30, Issue 3, pp 218-227  
<http://link.springer.com/article/10.1134/1.1687023>  
DOI: 10.1134/1.1687023

Knowledge of spatial mass distribution is important for understanding the physics of implosion of megaampere-current wire arrays. The paper presents results from studying the electron density distribution at the periphery of a tungsten wire array near the instant of maximum compression by using laser interferometry at  $\lambda=0.69$   $\mu\text{m}$ . It is found that, at the instant of maximum compression ( $\sim 100$  ns after the beginning of the discharge), the estimated maximum local electron density inside the wire array reaches  $\sim 10^{18}$  cm $^{-3}$  at a distance of 0.3–3 mm from the initial wire positions. Assuming the average tungsten ion charge to be 10, the local linear mass density in this region turns out to be 3  $\mu\text{g}/\text{cm}$ , which amounts to about 10% of the total linear mass density of the liner. A fraction of the generator current flows through this plasma. The duration of the soft X-ray pulse is 5–8 ns, which indicates the achievement of a fairly high compression ratio.

**20.** В.В.Александров, Е.В.Грабовский, К.Н.Митрофанов, Г.М. Олейник, В.П. Смирнов, П.В. Сасоров, И.Н. Фролов ИССЛЕДОВАНИЕ СВЯЗИ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ Z-ПИНЧЕВОГО РАЗРЯДА С ПРОЦЕССАМИ ПЛАЗМООБРАЗОВАНИЯ В НАГРУЗКЕ ПРИ ТОКОВОМ СЖАТИИ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ПРОВОЛОЧНЫХ СБОРОК  
"Физика плазмы", 2004, Т.30, №7, С.615-629

Электротехническими и оптическими методами показано, что процесс токового сжатия цилиндрической полой сборки из вольфрамовых проволок состоит из двух фаз. В течение первой фазы под действием потока тепла из токнесущей плазмы происходит наработка плазмы из плотных ядер проволок и заполнение этой плазмой внутреннего пространства лайнерной сборки. На этой фазе измеренное значение индуктивности лайнера и диаметр его видимого изображения почти не меняются. В течение второй фазы происходит сжатие всего вещества на ось и увеличивается индуктивность разрядного промежутка. В данной работе на основе анализа электротехнических параметров нагрузки на установке Ангара-5-1 (ток, напряжение) проводится исследование процесса токового сжатия проволочныхборок и определяются зависимости от времени индуктивности нагрузки, среднего радиуса распределения тока и момент начала сжатия. Сопоставление моментов начала сжатия лайнера, определяемых по его видимому размеру и путем электротехнических измерений, свидетельствует об их хорошем соответствии друг другу. Коэффициент сжатия среднего радиуса распределения тока оказался меньше, чем регистрируемый другими методами, что связано с тем, что на периферии исходной проволочной сборки к моменту максимального сжатия протекает часть тока.

V. V. Aleksandrov, E. V. Grabovskii, K. N. Mitrofanov, G. M. Oleinik, V. P. Smirnov, P. V. Sasorov, I. N. Frolov Relation between the electric parameters of a Z-pinch discharge and plasma production in the load during the implosion of a cylindrical wire array  
Plasma Physics Reports, July 2004, Volume 30, Issue 7, pp 568-581  
<http://link.springer.com/article/10.1134/1.1778432>  
DOI: 10.1134/1.1778432

A study of the process of implosion of a cylindrical tungsten wire array by electrical and optical methods shows that it involves two phases. In the first phase, the plasma is produced from the dense wire cores under the action of the heat flux from the current-carrying plasma. This plasma then fills the internal space of the liner array. The measured inductance of the liner and its visible diameter vary only slightly in this phase. During the second phase, the total material of the liner is compressed toward the axis and the inductance of the discharge gap increases. The process of the implosion of wire arrays is studied by analyzing the electric parameters (current and voltage) of the load in the Angara-5-1 facility. The time behavior of the load inductance, the average current radius, and the start time of the liner compression are determined. The compression start time determined from the visible size of the liner is found to coincide with that determined from electric measurements. The compression ratio of the liner in terms of the average current radius turns out to be lower than that measured by optical and X-ray diagnostics. The reason is that, by the instant of maximum compression, only a portion of the current flows at the periphery of the initial wire array.

**21.** Xu R.K., Li Z.H., Ning J.M., Guo C., Xu Z.P., Yang J.L., Li L.B., Xia G.X., Hua X.S., Ding N., Liu Q., Gu Y.C., Grabovsky E.V., Oleynic G.M., Nedoseev S.L., Alexandrov V.V., Mitrofanov K.N., Zurin M.V., Volkov G.S., Porofeev, I.A. I. N. Frolov and V. P. Smirnov X-ray radiation characteristics of nested-wire array implosion in sino-Russian joint Z-pinch experiments on Angara-5-1  
Chinese Physics Letters. 2005. V. 22. N 2. P. 413-415.  
[doi:10.1088/0256-307X/22/2/040](https://doi.org/10.1088/0256-307X/22/2/040)  
<http://iopscience.iop.org/0256-307X/22/2/040/>

We report and discuss the results of x-ray radiation measurements in the Sino-Russian joint Z-Pinch experiments on Angara-5-1 facility with a load current of 2.5–3.6 MA. The measurements were conducted by using an x-ray power meter (XRPM) and a time-resolved one-dimensional x-ray imaging system developed in China Academy of Engineering Physics. The experimental results indicate that an x-ray power-platform prior to a main peak and a less intensive sub-peak after the main peak in the waveform exist for the nested-wire array implosions, and the radiation process is relatively faster than that in the case of the single array. Laser shadowgraph of the imploding plasma suggests that the prior

power-platform is a result of the collision of the inner-outer plasma layers. The faster radiation process of nested array implosion can be explained by analysing the corresponding result of the time-resolved one-dimensional imaging system, which demonstrates a better axial imploding uniformity and synchronization. In comparison with x-ray diode, the XRPM yields a higher height of x-ray power-platform due to its flat energy response. The sub-peak after the main peak is proposed to be a result of the later-time additional implosion of plasma.

**22.** Г.Г.Зукакишвили, К.Н.Митрофанов, В.В.Александров, Е.В.Грабовский, Г.М.Олейник, И.Ю.Порофеев, П.В.Сасоров, И.Н.Фролов Измерение распределения азимутальных магнитных полей в сжимающихся многопроволочных сборках на установке «Ангара-5-1» Физика плазмы, 2005, Т.31, №11, С.978-988.

В работе излагаются результаты измерения распределения азимутального магнитного поля при сжатии многопроволочныхборок на установке «Ангара5-1», состоящих из тонких вольфрамовых проволочек при токе 2.5-4.5 МА. Показано, что проникновение магнитного поля на ось сборки происходит с небольшой задержкой относительно момента начала прохождения тока через сборку, измерен ток предвестника, образующегося на оси проволочной сборки до сжатия основной массы. Показано, что магнитное поле азимутально неоднородно на начальной стадии имплозии проволочной сборки. По величине магнитного поля внутри сборки рассчитано распределение массы.

G. G. Zukakishvili, K. N. Mitrofanov, V. V. Aleksandrov, E. V. Grabovskii, G. M. Oleinik, I. Yu. Porofeev, P. V. Sasorov, I. N. Frolov Measurements of the azimuthal magnetic field within imploding multiwire arrays in the Angara-5-1 facility  
Plasma Physics Reports, November 2005, Volume 31, Issue 11, pp 908-918  
<http://link.springer.com/article/10.1134/1.2131127>  
DOI: 10.1134/1.2131127

Results are presented from measurements of the azimuthal magnetic fields within imploding multiwire tungsten arrays in the Angara-5-1 facility at currents of 2.5–4 MA. It is shown that the penetration of the magnetic field into the axial region of the wire array lags behind the discharge current pulse. The current of a precursor produced at the array axis prior to the implosion of the bulk array mass is measured. It is found that the magnetic field in the initial stage of implosion is azimuthally nonuniform. The mass distribution inside the array is calculated from the measured magnetic field.

**23.** Г.Г. Зукакишвили, К.Н. Митрофанов, Е.В. Грабовский, Г.М. Олейник Измерение аксиальных магнитных полей во время имплозии многопроволочныхборок на установке «Ангара-5-1» Физика плазмы, 2005, Т.31, №8, С.707-720

В работе излагаются результаты измерения аксиального магнитного поля при сжатии проволочныхборок на установке «Ангара-5-1», состоящих из тонких вольфрамовых проволочек при токе 2.5-4.5 МА. Для диагностики пространственной азимутальной структуры плазмы сборки, использован эффект сжатия этой плазмой аксиального магнитного потока. Показано, что проникновение первых порций плазмы на ось сборки происходит на начальной стадии имплозии. Предложен механизм переноса внешнего аксиального магнитного поля в центральную область сборки, не связанный с образованием замкнутой токовой оболочки.

G. G. Zukakishvili, K. N. Mitrofanov, E. V. Grabovskii, G. M. Oleinik Measurements of the axial magnetic field during the implosion of wire arrays in the Angara-5-1 facility  
Plasma Physics Reports, August 2005, Volume 31, Issue 8, pp 652-664  
<http://link.springer.com/article/10.1134/1.2031626>  
DOI: 10.1134/1.2031626



Results are presented from measurements of the axial magnetic field during the implosion of tungsten wire arrays in the Angara-5-1 facility at currents of 2.5–4.5 MA. The azimuthal structure of the plasma produced from the wires is examined using the effect of the compression of the axial magnetic flux by this plasma. It is shown that the plasma starts to penetrate into the axial region of the wire array at the very beginning of implosion. A mechanism other than the formation of a closed current-carrying shell is proposed for describing the transfer of the external axial magnetic field to the central region of the array.

**24.** E. V. Grabovsky, K. N. Mitrofanov, S. L. Nedoseev, G. M. Oleinik, I. Yu. Porofeev, A. A. Samokhin, and I. N. Frolov Heterogeneous Plasma-Producing Structures at Current Implosion of a Wire Array

Contrib. Plasma Phys., 2005, Vol.45, No. 8, P.553–567.

<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/ctpp.200510061/abstract>

DOI: 10.1002/ctpp.200510061

Characteristic properties of the plasma production process have been considered for the case of megampere currents flowing through hollow cylindrical wire arrays of the Angara-5-1 facility. In 3–4 nanoseconds after voltage applying to the wire surfaces there appear a plasma layer. The system becomes heterogeneous, i.e. consisting of a kernel of metal wires and a plasma layer. In several nanoseconds the current flow goes from metal to plasma, which results in reducing the electric field strength along the wire.

The Joule heat energy delivered to the metal before the moment of complete current trapping by plasma is insufficient for the whole mass transition to a hot plasma state. The X-ray radiography techniques made it possible to detect and study dense clusters of substance of  $\sim 1\text{g/cm}^3$  at a developed discharge stage. The radial expansion velocity of  $\sim 10^4$  cm/s measured at the 70-th nanosecond after the current start allows treating the dense core at a late stage in the form of a submicron heterogeneous structure from its liquid and slightly ionized gas phase.

**25.** Грабовский Е.В., Зукакишвили Г.Г., Митрофанов К.Н., Олейник Г.М., Фролов И.Н., Сасоров П.В. Исследование магнитных полей и излучения в зпинчах из двойных многопроволочных сборок

"Физика плазмы", 2006, Т. 32, № 1, С.33-48.

В статье обсуждаются результаты измерения азимутальных магнитных полей при имплозии двойных (вложенных друг в друга) вольфрамовых многопроволочныхборок на установке «Ангара5-1» при токе  $\sim 3$  МА. Обнаружено влияние внутренней сборки на распределение тока в пространстве между сборками. Показано, что существует оптимум количества проволок (массы) во внутренней сборке, соответствующий минимуму длительности импульса МРИ на полувысоте (в энергиях квантов  $>100$  эВ). В среднем вложенные сборки обеспечивают лучшую повторяемость, более высокую мощность и меньшую длительность импульса, чем одиночные.

E. V. Grabovskii, G. G. Zukakishvili, K. N. Mitrofanov, G. M. Oleinik, I. N. Frolov, P. V. Sasorov  
STUDY OF THE MAGNETIC FIELDS AND SOFT X-RAY EMISSION GENERATED IN THE  
IMPLOSION OF DOUBLE WIRE ARRAYS

Plasma Physics Reports, January 2006, Volume 32, Issue 1, pp 32-46

<http://link.springer.com/article/10.1134/S1063780X06010041>

DOI: 10.1134/S1063780X06010041

Results are presented from measurements of the azimuthal magnetic field generated during the implosion of double (nested) tungsten wire arrays in the Angara-5-1 facility at currents of  $\sim 3$  MA. It is found that the inner array affects the current distribution in the interarray space and that there is an optimal mass (an optimal number of wires) of the inner array at which the full width at half-maximum

of the soft X-ray pulse (in the photon energy range of  $>100$  eV) is minimal. On the average, double wire arrays provide a better reproductibility, higher power, and shorter duration of the soft X-ray pulse in comparison to single arrays.

**26.** Oleinik G.M., Alexandrov V.V., Frolov I.N., Grabovsky E.V., Gribov A.N., Mitrofanov K.N., Porofeev I.Yu., Samokhin A.A., Smirnov V.P., Sasorov P.V., Sarkisov G.S., Struve K.W. INFLUENCE OF A RADIAL ELECTRICAL FIELD ON IMPLOSION OF WIRE ARRAY

J. Phys. IV France, Volume 133, Juin 2006, p. 779 - 781

[http://jp4.journaldephysique.org/index.php?option=com\\_article&access=doi&doi=10.1051/jp4:2006133157&Itemid=129](http://jp4.journaldephysique.org/index.php?option=com_article&access=doi&doi=10.1051/jp4:2006133157&Itemid=129)

DOI: 10.1051/jp4:2006133157

The effect of polarity on implosion of wire liners on the Angara-5-1 facility has been investigated. The electrode configuration provided creation of a radial electric field of up to 5000 kV/cm and of different direction on various sections of initial wires. The plasma production process was found to proceed in a distinctive manner in the wire sections where the radial electric field has different direction. The polarity effect at implosion of the wire liners on the Angara-5-1 facility becomes notable at increasing the rate of rising the electric field strength.

**27.** Грабовский Е.В., Грибов А.Н., Митрофанов К.Н., Олейник Г.М., И.Ю. Порофеев, И.Н. Фролов

ВЛИЯНИЕ СКОРОСТИ НАРАСТАНИЯ ТОКА НА ЭФФЕКТ ПОЛЯРНОСТИ В СБОРКЕ НА УСТАНОВКЕ АНГАРА51

"Физика плазмы", 2007, Т.33, №11, С. 1006–1013.

<http://www.maikonline.com/maik/showArticle.do?auid=VAF9838TGO>

Показано, что при быстром нарастании тока возникает существенное влияние радиальных электрических полей в сборке на начальную стадию имплозии. Конфигурация электродов обеспечивала создание на различных частях исходных проволок радиального электрического поля разного направления и величиной до 5 МВ/см. Обнаружено, что процесс плазмообразования протекает по-разному для участков проволок, на которых исходные радиальные электрические поля имеют противоположные направления. Этот эффект полярности при имплозии цилиндрическихборок из вольфрамовых проволок на установке Ангара-5-1 становится существенным при увеличении скорости роста напряжения на проволоках.

E. V. Grabovskii, A. N. Gribov, K. N. Mitrofanov, G. M. Oleinik, I. Yu. Porofeev, I. N. Frolov  
INFLUENCE OF THE CURRENT GROWTH RATE ON THE POLARITY EFFECT IN A WIRE ARRAY IN THE ANGARA-5-1 FACILITY

Plasma Physics Reports, Volume 33, Issue 11, pp 923-929

DOI: 10.1134/S1063780X07110049

<http://link.springer.com/article/10.1134/S1063780X07110049>

It is shown that, at a sufficiently high current growth rate, the initial stage of implosion of a wire array is significantly affected by the radial electric fields. Due to the specific electrode configuration of wire arrays, the magnitude of the oppositely directed radial electric fields in different wire segments can reach 5 MV/cm. It is found that the process of plasma formation proceeds in different ways in segments with oppositely directed initial radial electric fields. The influence of this effect (the so-called "polarity effect") on the implosion of cylindrical tungsten wire arrays in the Angara-5-1 facility becomes significant when the load voltage grows at a sufficiently high rate.

**28.** ЭМИССИЯ ЖЕСТКОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПРИ СЖАТИИ МНОГОПРОВОЛОЧНЫХ ЛАЙНЕРОВ

Александров В.В., Грабовский Е.В., Грибов А.Н., Грицук А.Н., Медовщиков С.Ф., Олейник Г.М., Сасоров П.В.  
Физика плазмы. 2008. Т. 34. № 4. С. 311-317.

Представлены результаты экспериментов по исследованию жесткого рентгеновского излучения с энергией квантов свыше 20 кэВ при имплозии многопроволочных сборок на установке «Ангара-5-1». С помощью анализа рентгеновских изображений Z пинча были зарегистрированы различия пространственного распределения и характерных размеров областей светимости в жестких и мягких квантах. Обнаружена задержка пика импульса жесткого излучения относительно пика мягкого рентгена. Определена зависимость мощности эмиссии Z пинча в жестких квантах от материала проволочныхборок, начального диаметра и массы (времени имплозии). Показано, что интенсивность эмиссии жесткого рентгена, зарегистрированная в области с энергиями квантов > 50 кэВ, на несколько порядков превышает тепловой уровень процессов, обеспечивающих эмиссию импульса мягкого рентгена в этой области энергий квантов. Таким образом, на основе сравнительного анализа динамики эмиссии и областей локализации источников жесткого и мягкого рентгена обнаружено свидетельство развития при имплозии проволочныхборок нового надтеплового явления, отличного от тех, которые обеспечивают пиковую мощность выходного импульса мягкого рентгена. Рассмотрены возможные механизмы, которые могут быть ответственны за генерацию импульсов жесткого рентгена.

<http://www.maikonline.com/maik/showArticle.do?auid=VAFEB8DQO5>

#### HARD X-RAY EMISSION FROM IMPLODING WIRE ARRAYS

Plasma Physics Reports, 2008, Vol. 34, No. 4, pp. 278–283.

Results are presented from experimental studies of the generation of hard X-ray (HXR) emission with photon energies above 20 keV during the implosion of wire arrays in the Angara-5-1 facility. An analysis of X-ray images of the Z-pinch shows that the dimensions and spatial structures of the emitting regions are different for hard and soft X rays. It is found that the HXR emission peak is delayed with respect to the soft X-ray (SXR) one. The dependence of the HXR power on the material, initial diameter, and mass (implosion time) of the wire array is determined. It is shown that the HXR intensity in the spectral range >50 keV is several orders higher than the emission intensity in the high-energy tail of the SXR spectrum (assuming that this spectrum is thermal). A comparison of the time evolution and spatial localization of the HXR and SXR sources during the implosion of wire arrays indicates the presence of a new superthermal phenomenon that differs qualitatively from the processes determining the peak power of the SXR pulse. Possible mechanisms that can be responsible for the generation of HXR pulses are considered.

<http://link.springer.com/article/10.1134/S1063780X0804003X>

#### **29. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОНУСНЫХ ПРОВОЛОЧНЫХ СБОРОК ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ТРЕХМЕРНЫХ ЭФФЕКТОВ МГД-СЖАТИЯ**

Грабовский Е.В., Александров В.В., Волков Г.С., Гасилов В.А., Грибов А.Н., Грицук А.Н., Дьяченко С.В., Зайцев В.И., Медовщиков С.Ф., Митрофанов К.Н., Лаухин Я.Н., Олейник Г.М., Ольховская О.Г., Самохин А.А., Сасоров П.В., Фролов И.Н.

Физика плазмы. 2008. Т. 34. № 10. С. 885-900.

Приведены результаты экспериментальных и расчетно-теоретических исследований трехмерной динамики плазмы, которая создается при токовой имплозии конусных проволочныхборок (лайнеров) в режиме Z-пинчевого разряда при токах разряда до 3 МА на установке Ангара-5-1. В качестве нагрузок использовались конусные проволочные сборки из вольфрамовых проволок диаметром 6–8 мкм с углом между осью и образующей поверхностью конуса в диапазоне 15–42°. Показано, что при таких углах форма несущего ток плазменного слоя по мере приближения к оси начинает отличаться от конической формы. Проведено сравнение результатов двумерных МГД-расчетов с экспериментом. Обнаружены отличия динамики формирования плазменного предвестника при имплозии цилиндрических и конусных

лайнеров. Длительность импульса рентгена монотонно растет с увеличением угла конуса, а высота излучающей части пинча монотонно уменьшается.

<http://www.maikonline.com/maik/showArticle.do?aid=VAFLO9DQP7>

#### USE OF CONICAL WIRE ARRAYS FOR MODELING THREE-DIMENSIONAL MHD IMPLOSION EFFECTS

Plasma Physics Reports, 2008, Vol. 34, No. 10, pp. 815–829.

Results are presented from experimental studies and numerical simulations of three-dimensional dynamics of the plasma produced in the Angara-5-1 facility by the electrical implosion of conical wire arrays at currents of up to 3 MA. The arrays were made of 6- to 8- $\mu\text{m}$ -diameter tungsten wires, the inclination angle of the generatrix with respect to the axis being from  $15^\circ$  to  $42^\circ$ . The results of two-dimensional MHD simulations are compared with experimental data. The formation dynamics of the plasma precursor is found to be different for cylindrical and conical arrays. As the cone angle increases, the duration of the X-ray pulse increases, while the height of the pinch radiating zone decreases.

<http://link.springer.com/article/10.1134/S1063780X08100024>

#### 30. ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ СТРУКТУРА И ДИНАМИКА РЕНТГЕНОВСКОЙ ЭМИССИИ Z-ПИНЧА НА ОСНОВЕ ПРОВОЛОЧНЫХ СБОРОК В ОБЛАСТИ ЭНЕРГИИ КВАНТОВ СВЫШЕ 20 КЭВ

Александров В.В., Грабовский Е.В., Грибов А.Н., Грицук А.Н., Медовщиков С.Ф., Митрофанов К.Н., Олейник Г.М.

Физика плазмы. 2009. Т. 35. № 2. С. 161-173.

Рассматриваются результаты исследований эмиссии жесткого рентгеновского излучения с энергией квантов свыше 50 кэВ из плазмы плотных излучающих Z пинчей. Работа выполнена с целью выяснения природы генерации быстрых электронов (электронного пучка) при сжатии цилиндрических и конических многопроволочных сборок (лайнеров) при токе до 3 МА на установке Ангара-5-1. При сжатии коническихборок обнаружено влияние на временной профиль жесткого излучения явления zippering плазмы, обусловленного наклоном проволок. Показано, что генерация жесткого рентгеновского излучения во всех случаях коррелирует с распадом плазменного столба у катода в финальной фазе сжатия пинча. Природа изображений пинча в квантах жесткого рентгеновского излучения обусловлена эмиссией тормозного излучения быстрых электронов, генерируемых при распаде плазменного столба на ионах плазмы и в анодной мишени. Обнаружено, что использование конусныхборок позволяет контролировать направление zippering плазмы, регулировать пространственно-временные и энергетические характеристики рентгеновской эмиссии пинча, в частности менять выход жесткого рентгеновского излучения. Для многопроволочныхборок диаметром 12 мм с линейной массой 200–400 мкг/см получены оценки тока и энергии пучка быстрых электронов, соответственно: 20 кА и 60 Дж, что составляет 0.002 от энергии импульса мягкого рентгеновского излучения.

<http://www.maikonline.com/maik/showArticle.do?aid=VAFQTBHVVBV>

#### SPATIOTEMPORAL BEHAVIOR OF X-RAY EMISSION ABOVE 20 KEV FROM A Z-PINCH PRODUCED BY WIRE-ARRAY IMPLOSION

V. V. Aleksandrov, E. V. Grabovski, A. N. Gribov, A. N. Gritsuk, S. F. Medovshchikov, K. N. Mitrofanov, G. M. Oleinik

Plasma Physics Reports 2009, Vol. 35, No. 2, pp 136-148

Results are presented from experimental studies of hard X-ray (HXR) emission in the photon energy range above 20 keV from dense radiating Z-pinch plasmas. The work is aimed at revealing the nature of fast-electron (electron beam) generation during the implosion of cylindrical and conical wire arrays in the Angara-5-1 facility at currents of up to 3 MA. It is found that the plasma implosion zippering caused by the inclination of wires affects the parameters of the HXR pulse emitted during the implosion of a conical array. It is shown that HXR emission correlates well with the decay of the plasma column near the cathode in the stagnation phase. HXR images of the pinch are produced by the

bremstrahlung of fast electrons generated during plasma column decay and interacting with plasma ions and the anode target. It is found that the use of conical arrays makes it possible to control the direction of plasma implosion zipping and the spatiotemporal and energy parameters of the pinch X-ray emission, in particular the X-ray yield. For wire array with diameters of 12 mm and linear masses of 200–400  $\mu\text{g}/\text{cm}$ , the current of the fast electron beam is 20 kA and its energy is 60 J, which is about 1/500 of the energy of the main soft X-ray pulse.

<http://link.springer.com/article/10.1134/S1063780X09020056>

### **31. ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОНИКНОВЕНИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ВНУТРЬ СЖИМАЕМОГО ТОКОМ ЛАЙНЕРА НА УСТАНОВКЕ АНГАРА-5-1**

Александров В.В., Барсук В.А., Грабовский Е.В., Грицук А.Н., Зукакишвили Г.Г., Медовщиков С.Ф., Митрофанов К.Н., Олейник Г.М., Сасоров П.В.

Физика плазмы. 2009. Т. 35. № 3. С. 229-250.

Обсуждаются результаты измерений распределений азимутальных магнитных полей при сжатии многопроволочныхборок на установке Ангара-5-1, состоящих из тонких проволочек из различных веществ (алюминий, медь, молибден, вольфрам и др.) при токе до 3 МА. Показано, что проникновение магнитного поля на ось сборки происходит с небольшой задержкой относительно момента начала прохождения тока через сборку. Эта задержка зависит от вещества проволок или их покрытия. Измерен ток предвестника, образующегося на оси проволочной сборки до сжатия основной массы. Показано, что существует принципиальное отличие проникновения вещества с магнитным полем внутрь объема пенного лайнера (из полимерной пены агар-агар) по сравнению со случаем проволочной сборки. Показано, что скорость переноса тока на ось сборки максимальна для проволочныхборок из вольфрама. Было проведено сравнение относительных скоростей производства плазмы при имплозии лайнеров из разных веществ.

<http://www.maikonline.com/maik/showArticle.do?aid=VAFS4J38HY>

### **STUDIES OF PENETRATION OF THE MAGNETIC FIELD INTO ELECTRICALLY IMPLoded LOADS IN THE ANGARA-5-1 FACILITY**

V. V. Aleksandrov, V. A. Barsuk, E. V. Grabovski, A. N. Gritsuk, G. G. Zukakishvili, S. F. Medovshchikov, K. N. Mitrofanov, G. M. Oleinik, P. V. Sasorov

Results are presented from measurements of the distributions of the azimuthal magnetic field in aluminum, copper, molybdenum, tungsten and other wire arrays electrically imploded at currents of up to 3 MA in the Angara-5-1 facility. It is shown that the time during which the magnetic field of the current pulse reaches the array axis depends on the material of the wires or wire coating. The current of the precursor formed on the array axis before the implosion of the main load mass is measured. It is shown that the penetration of the load material with the frozen-in magnetic field into a polymer (agar-agar) foam liner is drastically different from that in the case of a wire array. It is found that the rate of current transfer to the array axis is maximum for tungsten wire arrays. The rates of plasma production during implosion of loads made of different materials are compared.

<http://link.springer.com/article/10.1134/S1063780X09030039>

### **32. ТОКОВАЯ ИМПЛОЗИЯ КВАЗИСФЕРИЧЕСКИХ ПРОВОЛОЧНЫХ ЛАЙНЕРОВ**

Грабовский Е.В., Грицук А.Н., Смирнов В.П., Александров В.В., Олейник Г.М., Фролов И.Н., Лаухин Я.Н., Грибов А.Н., Самохин А.А., Сасоров П.В., Митрофанов К.Н., Медовщиков С.Ф.

Письма в "Журнал экспериментальной и теоретической физики". 2009. Т. 89. № 7. С. 371-374.

С помощью электростатического растягивания цилиндрического проволочного лайнера дополнительным электродом формируются квазисферические лайнеры с радиусом 8-12 мм и массой 200-400 мкг из 30-60 вольфрамовых проволок толщиной 6 мкм. Сжатие Z-пинчей, образованных такими лайнерами, проводилось током 3-4 МА с фронтом нарастания 100 нс на установке Ангара-5-1. Показано, что центральная часть этого лайнера формирует более горячую область, чем края такого лайнера, и более горячую, чем в случае цилиндрических лайнеров.

[http://www.jetpletters.ac.ru/ps/1867/article\\_28462.shtml](http://www.jetpletters.ac.ru/ps/1867/article_28462.shtml)

### CURRENT IMPLOSION OF QUASISPHERICAL WIRE ARRAYS

E. V. Grabovskii, A. N. Gritsuk, V. P. Smirnov, V. V. Aleksandrov, G. M. Oleinik, I. N. Frolov, Ya. N. Laukhin, A. N. Gribov, A. A. Samokhin, P. V. Sasorov, K. N. Mitrofanov, and S. F. Medovshchikov

JETP Letters, 2009, Vol. 89, No. 7, pp. 315–318.

By means of the electrostatic expansion of a cylindrical wire array by an additional electrode, quasi-spherical arrays with a radius of 8–12 mm and a mass of 200–400  $\mu\text{g}$  consisting of 30–60 tungsten wires 6  $\mu\text{m}$  in thickness are formed. The compression of Z pinches formed by these arrays was performed by a current of 3–4 MA with a rise time of 100 ns in the Angara-5-1 facility. It has been shown that the central part of this array forms a region hotter than its edges and that for cylindrical arrays.

<http://link.springer.com/article/10.1134%2FS0021364009070017?LI=true#>

### 33. X-RAY EMISSION OF MULTIWIRES Z-PINCHES IN ENERGY RANGE OVER 20 KEV

Gribov A.N., V.V., Aleksandrov V.V., Grabovskiy E.V., Gritsuk A.N., Medovshchikov S.F., Mitrofanov K.N., Oleinik G.M.

IEEE Transactions on Plasma Science. 2009. T. 37. № 10. C. 1981-1986.

The results concerning the emission of hard X-rays (HXR) with an energy over 20 keV from the plasma of dense radiating Z-pinches are considered. The work aims at identifying the nature of the fast-electron (electron-beam) generation at the implosion of cylindrical and conical multiwire arrays (liners) at a current up to 3 MA on the Angara-5-1 installation. An effect of zippering on a time profile of HXR at the implosion of conical arrays that is caused by an inclination of wires was revealed. It was shown that the generation of HXR always correlates with the disruption of a plasma column near the cathode in the final phase of pinch compression. The pinch images in HXR are attributed to the emission of bremsstrahlung of fast electrons generated at the plasma column disruption on the plasma ions and in the anode target. It was also found that using conical arrays makes it possible to control the plasma zippering direction, to regulate the space-temporal and power characteristics of X-ray emission, and, in particular, to change the HXR yield. For multiwire arrays that were 12 mm in diameter with a mass on the length unit of 200–400  $\mu\text{g}/\text{cm}$ , the current and energy of the fast electron were found to be 20 kA and 60 J, respectively, which make  $\sim 0.002$  of the energy of the soft-X-ray pulse.

[http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?tp=&arnumber=5247062&contentType=Journals+%26+Magazines&sortType%3Dasc\\_p\\_Sequence%26filter%3DAND%28p\\_IS\\_Number%3A5280462%29](http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?tp=&arnumber=5247062&contentType=Journals+%26+Magazines&sortType%3Dasc_p_Sequence%26filter%3DAND%28p_IS_Number%3A5280462%29)

### 34. И.В. Глазырин\*, Е.В. Грабовский, Г.Г. Зукакишвили, А.В. Карпеев\*, К.Н. Митрофанов, Г.М. Олейник, Самохин А.А. ИЗМЕРЕНИЕ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ В ПЛАЗМЕ СЖИМАЮЩИХСЯ ЛАЙНЕРОВ ПРИ ПОТОКАХ МОЩНОСТИ $\sim 1$ ТВт/см<sup>2</sup>

ВАНТ, 2009, Сер. Термоядерный синтез, Вып.2, С.67-82.

[http://vant.iterru.ru/vant\\_2009\\_2.htm](http://vant.iterru.ru/vant_2009_2.htm) – full text

В данной работе описана зондовая методика измерения магнитных полей внутри и вблизи сжимаемого током лайнера на установке Ангара51. Сконструированы и испытаны быстродействующие магнитные зонды для диагностирования динамики токовой плазмы многопроволочного лайнера. Измерения проводились при токе в нагрузке до 4 МА и потоке мощности мягкого рентгеновского излучения до 1 ТВт/см<sup>2</sup>. Проведены исследования сжатия аксиального магнитного потока плазмой, образованной многопроволочным лайнером. Изучена радиальная и азимутальная структура распределения тока.

A magnetic probes method for magnetic field measurement inside and outside of current compressed liner on the installation Angara-5-1 is presented. Fast-response magnetic probes were constructed and

were tested. The measurements were executed at a level of a current up to 4 MA and at a level of a soft xray radiation up to 1 TW/cm<sup>2</sup>. The experiments on an axial magnetic flux compression were carried out. The radial and azimuthal structure of a current distribution was investigated.

### **35. ИССЛЕДОВАНИЕ ИМПЛОЗИИ ВОЛОКОННЫХ ЛАЙНЕРОВ НА УСТАНОВКЕ АНГАРА-5-1**

Александров В.В., Грабовский Е.В., Грицук А.Н., Лаухин Я.Н., Медовщиков С.Ф., Митрофанов К.Н., Олейник Г.М., Сасоров П.В., Федулов М.В., Фролов И.Н.

Физика плазмы. 2010. Т. 36. № 6. С. 520-547.

<http://www.maikonline.com/maik/showIssueContent.do?puid=VIG3MJO195>

В работе представлены результаты исследований имплозии и сжатого состояния цилиндрическихборок (лайнеров) из капроновых волокон с добавками проволок из веществ с высоким и средним атомным номером (вольфрам, алюминий), проведенных на установке Ангара-5-1 при токе 3-4 МА. Получена оценка скорости производства плазмы в полых цилиндрических бороках из капроновых волокон и проведено сравнение с вольфрамовыми проволочными бороками.

V. V. Aleksandrov, E. V. Grabovski, A. N. Gritsuk, Ya. N. Laukhin, S. F. Medovshchikov, K. N. Mitrofanov, G. M. Oleinik, P. V. Sasorov, M. V. Fedulov, I. N. Frolov Studies of the implosion of cylindrical fiber arrays on the Angara-5-1 facility

Plasma Physics Reports, June 2010, Volume 36, Issue 6, pp 482-506

<http://link.springer.com/article/10.1134/S1063780X1006005X>

DOI: 10.1134/S1063780X1006005X

Results are presented from experimental studies of the implosion of cylindrical kapron fiber arrays with addition of high- and medium-Z metal wires (tungsten, aluminum). The experiments were carried out on the Angara-5-1 facility at currents of 3–4 MA. The ablation rate in kapron fiber arrays is estimated and compared with that in tungsten wire arrays.

### **36. Крауз В.И., Митрофанов К.Н., Мялтон В.В., Виноградов В.П., Виноградова Ю.В., Грабовский Е.В., Зукакишвили Г.Г., Койдан В.С., Мокеев А.Н. МАГНИТОЗОНДОВЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТОКОВОЙ ОБОЛОЧКИ НА УСТАНОВКЕ ПФ-3**

Физика плазмы, 2010, Т. 36, № 11, С.997-1012.

<http://www.maikonline.com/maik/showIssueContent.do?puid=VIG3MNIA58>

Целью работы являлось исследование распределения тока и динамики токонесущей плазменной оболочки в разряде на установке плазменный фокус ПФ-3. Для измерений параметров оболочки использовались абсолютно калиброванные магнитные зонды, установленные в различных положениях относительно оси установки и поверхности анода. Исследована динамика токовой оболочки в разрядах в аргоне и неоне, определена толщина скин-слоя на различных стадиях разряда. Один из зондов вводился на расстояние  $\approx 2$  см от оси установки, что позволило также определить эффективность транспортировки тока в область формирования пинча. Получены режимы, в которых динамика тока, регистрируемого магнитными зондами на различных радиусах от оси, хорошо соответствует динамике полного разрядного тока вплоть до момента особенности. В то же время показана возможность формирования замкнутых токовых контуров в результате развития шунтирующих пробоев. Такое шунтирование разрядного тока остаточной плазмой непосредственно связано с эффективностью «сгребания» рабочего газа токовой оболочкой при ее движении от изолятора к оси установки.

V. I. Krauz, K. N. Mitrofanov, V. V. Myalton, V. P. Vinogradov, Yu. V. Vinogradova, E. V. Grabovski, G. G. Zukakishvili, V. S. Koidan, A. N. Mokeev Magnetic probe measurements of the current sheath on the PF-3 facility

Plasma Physics Reports, November 2010, Volume 36, Issue 11, pp 937-952

<http://link.springer.com/article/10.1134/S1063780X10110036>

DOI: 10.1134/S1063780X10110036

Results are presented from experimental studies of the dynamics of the current sheath (CS) on the PF-3 plasma focus facility. The parameters of the sheath, including the current distribution in it, were measured using absolutely calibrated magnetic probes installed at different positions with respect to the facility axis and the anode surface. The CS dynamics in discharges operating in argon and neon was investigated, and the skin depth in different stages of the discharge was determined. One of the probes was installed at a distance of  $\approx 2$  cm from the facility axis, which made it possible to estimate the efficiency of current transfer to the region of pinch formation. Operating modes were obtained in which the current dynamics detected by magnetic probes at different distances from the axis agreed well with the dynamics of the total discharge current until the instant of singularity in the current time derivative. It is shown that shunting breakdowns can lead to the formation of closed current loops. The shunting of the discharge current by the residual plasma is directly related to the efficiency of snowplowing of the working gas by the CS as it propagates from the insulator toward the facility axis.

**37.** V.I. Krauz, K.N. Mitrofanov, V.V. Myalton, E.V. Grabovski, V.S. Koidan, V.P. Vinogradov, Yu.V. Vinogradova and G.G. Zukakishvili Dynamics of the Current Distribution in a Discharge of the PF-3 Plasma Focus Facility

IEEE Transactions on PLASMA SCIENCE, V.38, Issue 2, 2010, Pp.92-99.

IEEE Transactions on PLASMA SCIENCE

[http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?tp=&arnumber=5382582&contentType=Journals+%26+Magazines&sortType%3Dasc\\_p\\_Sequence%26filter%3DAND%28p\\_IS\\_Number%3A5410033%29](http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?tp=&arnumber=5382582&contentType=Journals+%26+Magazines&sortType%3Dasc_p_Sequence%26filter%3DAND%28p_IS_Number%3A5410033%29)

DOI: 10.1109/TPS.2009.2036916

In this paper, results are presented from studies of the dynamics of the plasma-current sheath and current distribution in the PF-3 facility, one of the largest plasma focus machines in the world. The experiments were done at input energy of  $W = 290$  kJ and discharge current of  $I \sim 2$  MA, with the chamber being stationary filled with the working gas. The current sheath parameters were measured with absolutely calibrated magnetic probes installed at different distances from the system axis and at different heights above the anode plane. The possibility is demonstrated of the formation of closed current loops due to the development of shunting breakdowns in the insulator region. The maximum residual plasma density at which the electrode gap remains magnetically self-insulated is estimated.

**38.** ОПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТИ ПЛАЗМЫ ВНУТРИ СЖИМАЮЩЕГОСЯ ЛАЙНЕРА ПО ИЗМЕРЕНИЮ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ГРАДИЕНТНЫМ ЗОНДОМ

Грабовский Е.В., Митрофанов К.Н., Кошелев А.Ю., Самохин А.А., Александров В.В., Грицук А.Н., Лаухин Я.Н., Олейник Г.М., Фролов И.Н.

Физика плазмы. 2011. Т. 37. № 7. С. 631-647.

<http://www.maikonline.com/maik/showIssueContent.do?puid=VIGHON0FIN>

В работе описана методика измерений градиента индукции магнитного поля внутри плазмы многопроволочной сборки во время ее имплозии. Представлены экспериментальные результаты измерений магнитного поля и градиента индукции в вольфрамовой проволочной сборке на установке Ангара-5-1 при токе  $\sim 3$  МА. Предложен метод вычисления скорости токнесущей плазмы в рамках системы МГД-уравнений в точке измерения по данным напряжённости и градиента индукции магнитного поля. Показано, что градиентный магнитный зонд может быть



применён для исследования структуры токово-плазменной оболочки на установках типа плазменный фокус.

E. V. Grabovski, K. N. Mitrofanov, A. Yu. Koshelev, A. A. Samokhin, V. V. Aleksandrov, A. N. Gritsuk, Ya. N. Laukhin, G. M. Oleinik, I. N. Frolov Determination of the plasma velocity in an imploding wire array from magnetic field measurements by a gradient probe

Plasma Physics Reports, July 2011, Volume 37, Issue 7, pp 586-602

<http://link.springer.com/article/10.1134/S1063780X11060092>

DOI: 10.1134/S1063780X11060092

A method for measuring the gradient of the magnetic field in the plasma of an imploding wire array is described. Results from measurements of the magnitude and gradient of the magnetic field in a tungsten wire array on the Angara-5-1 facility at currents of  $\sim 3$  MA are presented. A novel method for calculating the velocity of the current-carrying plasma in the framework of MHD equations from data on the magnitude and gradient of the magnetic field at a certain point inside the array is proposed. It is demonstrated that a gradient magnetic probe can be used to investigate the plasma current sheath in plasma focus facilities.

### **39. РАССЕЙЯНИЕ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ПРОВОЛОКАХ И ВОЛОКНАХ ПРИ СЖАТИИ ЛАЙНЕРОВ НА УСТАНОВКЕ АНГАРА-5-1**

Грабовский Е.В., Грицук А.Н., Смирнов В.П., Александров В.В., Олейник Г.М., Орешкин В.И., Фролов И.Н., Лаухин Я.Н., Грибов А.Н., Самохин А.А., Сасоров П.В., Митрофанов К.Н., Медовщиков С.Ф., Хищенко К.В., Рупасов А.А., Болховитинов Е.А.

Физика плазмы. 2011. Т. 37. № 11. С. 1023-1033.

<http://www.maikonline.com/maik/showIssueContent.do?puid=VIGHONS5TE>

Разработана методика регистрации рассеяния лазерного излучения на проволоках и волокнах лайнеров различных типов при их имплозии в начальный период производства плазмы (плазмообразования) в диапазоне разрядного тока на проволоку до 2 кА для алюминиевых лайнеров и до 8 кА для вольфрамовых. Опыты проведены на установке Ангара-5-1 при плотности тока через проволоки  $10e8$  А/см<sup>2</sup> и скорости нарастания тока  $10e13$  А/с. Обнаружено, что при протекании по проволокам и волокнам тока в диапазоне 0.1–10 кА/проволоку происходит изменение индикатрисы отражения лазерного излучения от их поверхности для цилиндрических и конических лайнеров. На основании сравнения экспериментальных данных по отражению и рассеянию лазерного излучения от проволок и волокон с результатами численного моделирования свойств проволок при их электровзрыве в вакууме предложено объяснение для изменения характеристик индикатрисы отражения лазерного излучения. Причина изменения характеристик индикатрисы отражения лазерного излучения – развитие перегревных неустойчивостей. Характерный размер неоднородностей плотности и температуры на поверхности проволок в диапазоне 10–20 мкм, по-видимому, приводит к переходу от зеркального отражения лазерного излучения к диффузному. Экспериментально обнаружено, что резкое уменьшение в течение 2–3 нс интенсивности отражения одновременно от нескольких проволок лайнера может свидетельствовать о равномерном распределении разрядного тока по облучаемым проволокам, и снимает вопрос о качестве контакта проволок с электродами. Полученная информация необходима при разработке расчетных кодов токовой имплозии проволочных лайнеров для уточнения параметров состояния проволок в начальный период производства плазмы (плазмообразования).

E. V. Grabovski, A. N. Gritsuk, V. P. Smirnov, V. V. Aleksandrov, G. M. Oleinik, V. I. Oreshkin, I. N. Frolov, Ya. N. Laukhin, A. N. Gribov, A. A. Samokhin, P. V. Sasorov, K. N. Mitrofanov, S. F. Medovshchikov, K. V. Khishchenko, A. A. Rupasov, E. A. Bolkhovitinov Laser radiation scattering from the wires and fibers of imploding arrays on the Angara-5-1 facility

A method is developed for measurements of laser radiation scattering by wires and fibers in different types of imploding arrays in the initial stage of plasma production at discharge currents per wire of up to 2 kA for aluminum arrays and up to 8 kA for tungsten arrays. The experiments were carried out on the Angara-5-1 facility at a current density in the wires of  $10e8 \text{ A/cm}^2$  and current growth rate of  $\sim 10e13 \text{ A/s}$ . It is found that the indicatrix of laser radiation reflected from the wires (fibers) in cylindrical and conical arrays is modified at currents of 0.1–10 kA per wire (fiber). The experimental data on the reflection and scattering of laser radiation from wires and fibers are compared with the results of numerical simulations of their electric explosion in vacuum. It is proposed that the change in the reflection indicatrix of laser radiation is caused by the onset of thermal instabilities. The typical size of density and temperature inhomogeneities on the wire surface is in a range of 10–20  $\mu\text{m}$ , which probably results in a transition from specular to diffuse reflection of laser radiation. A simultaneous abrupt (over 2–3 ns) reduction in the reflection intensity from several wires of an array indicates a homogeneous distribution of the discharge current over the irradiated wires. This closes the issue of the quality of the contact between the wires and the electrodes. The obtained experimental information is of considerable importance for the development of numerical codes for simulations of the implosion of wire arrays and the refinement of the wire parameters in the initial stage of plasma production.

**40.** Крауз В.И., Митрофанов К.Н., Мялтон В.В., Виноградов В.П., Виноградова Ю.В., Грабовский Е.В., Койдан В.С. ДИНАМИКА СТРУКТУРЫ ТОКОНЕСУЩЕЙ ПЛАЗМЕННОЙ ОБОЛОЧКИ ПЛАЗМОФОКУСНОГО РАЗРЯДА

Физика плазмы, 2011, Т. 37, № 9, С. 797-810.

<http://www.maikonline.com/maik/showIssueContent.do?puid=VIGHONS3G2>

Целью работы являлось исследование тонкой структуры токово-плазменной оболочки (ТПО) разряда в плазмофокусной установке ПФ-3. Выполнены исследования динамики оболочки при разряде в дейтерии. Для измерений токовых параметров оболочки использовались абсолютно калиброванные магнитные зонды, установленные в различных положениях относительно оси установки и поверхности анода. Для анализа структуры ТПО впервые применен магнитооптический зонд, регистрирующий помимо магнитного сигнала также и оптическое свечение плазмы оболочки. Это позволило пространственно разделить область протекания тока и область ударной волны. Показано, что распределение тока зависит от стадии разряда. Исследована динамика оболочки в приосевой области в корреляции с нейтронным излучением. Показано, что величина нейтронного выхода определяется не максимальной величиной полного разрядного тока, а величиной тока, сжимаемого к оси.

V. I. Krauz, K. N. Mitrofanov, V. V. Myalton, V. P. Vinogradov, Yu. V. Vinogradova, E. V. Grabovski, V. S. Koidan Dynamics of the structure of the plasma current sheath in a plasma focus discharge

Plasma Physics Reports, September 2011, Volume 37, Issue 9, pp 742-754

<http://link.springer.com/article/10.1134/S1063780X11080058>

DOI: 10.1134/S1063780X11080058

The study is aimed at investigating the fine structure of the plasma current sheath (PCS) in the PF-3 plasma focus facility. The PCS dynamics in a deuterium discharge was studied. The PCS parameters were measured using absolutely calibrated magnetic probes installed at different positions with respect to the facility axis and the anode surface. A magneto-optical probe recording both the magnetic signal and the PCS optical luminosity was first applied to analyze the PCS structure. This made it possible to spatially resolve the current and shock-wave regions. It is demonstrated that the current distribution is

different in different discharge stages. It is shown that the neutron yield is determined by the value of the current compressed toward the axis, rather than the amplitude of the total discharge current.

**41. ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ИМПЛОЗИИ КВАЗИСФЕРИЧЕСКИХ ПРОВОЛОЧНЫХ ЛАЙНЕРОВ НА УСТАНОВКЕ АНГАРА-5-1 ПРИ ТОКЕ ДО 4 МА**

Александров В.В., Волков Г.С., Грабовский Е.В., Грибов А.Н., Грицук А.Н., Лаухин Я.Н., Митрофанов К.Н., Олейник Г.М., Сасоров П.В., Фролов И.Н.

Физика плазмы. 2012. Т. 38. № 4. С. 345-369.

<http://www.maikonline.com/maik/showIssueContent.do?puid=VIGUORMYIL>

Представлены результаты исследования трехмерной пространственной концентрации вещества в центральной части разрядного промежутка и формирования временного профиля мощности рентгеновского излучения (РИ) в процессе имплозии квазисферических многопроволочных лайнеров при токе разряда до 4 МА. В качестве характеристик имплозии квазисферических многопроволочных лайнеров использованы пространственное распределение свечения РИ в центральной части разрядного промежутка и временной профиль мощности РИ. Начальная пространственная структура квазисферического лайнера формировалась при растяжении по радиусу ненатянутых проволок исходных цилиндрических и конусных многопроволочных лайнеров под действием электростатического поля. Показано, что временной профиль выходного импульса РИ в диапазоне энергий квантов 0.1–1 кэВ зависит как от геометрических параметров квазисферического лайнера, так и пространственного распределения массы лайнера вдоль его высоты. Обнаружено, что увеличение массы вещества на 40% за счет напыления в экваториальной части квазисферического лайнера приводит к увеличению среднего токового радиуса пинча на 15% и снижает выход энергии РИ на 30%. Проведены эксперименты с квазисферическими лайнерами из капроновых волокон, на поверхность которых наносились проводящие слои из Al и Bi. Показано, что использование таких лайнеров позволяет, варьируя массу, материал и область напыления проводящих слоев, формировать импульс РИ с управляемыми профилем и длительностью. Обнаружено, что нанесение дополнительной массы в виде полосы тонкого слоя Bi на вольфрамовые проволоки у катода сборок обеспечивает компенсацию влияния катодного зиппер-эффекта на сжатие пинча и формирование импульса РИ в W-лайнерах.

V. V. Aleksandrov, G. S. Volkov, E. V. Grabovski, A. N. Gribov, A. N. Gritsuk, Ya. N. Laukhin, K. N. Mitrofanov, G. M. Oleinik, P. V. Sasorov, I. N. Frolov Study of the implosion characteristics of quasi-spherical wire arrays on the Angara-5-1 facility at currents of up to 4 MA

Plasma Physics Reports, April 2012, Volume 38, Issue 4, pp 315-337

<http://link.springer.com/article/10.1134/S1063780X12030014>

DOI: 10.1134/S1063780X12030014

Results are presented from experimental studies of the spatial distribution of the density of matter in the central part of the discharge gap and the formation of the temporal profile of the X-ray power in the course of implosion of quasi-spherical wire arrays at discharge currents of up to 4 MA. The spatial distribution of the X-ray intensity in the central part of the discharge gap and the temporal profile of the X-ray power are used as implosion characteristics of quasi-spherical wire arrays. The quasi-spherical arrays were formed by the radial stretching of unstrained wires of initially cylindrical and conical wire arrays under the action of the electrostatic field. The temporal profile of the output X-ray pulse in the photon energy range of 0.1–1 keV is shown to depend on both the geometrical parameters of the quasi-spherical array and the longitudinal distribution of its mass. It is found that a 40% increase in the wire mass due to deposition of an additional mass in the equatorial region of a quasi-spherical array leads to a 15% increase in the average current radius of the pinch and a 30% decrease in the X-ray yield. Experiments with quasi-spherical arrays made of kapron fibers with deposited Al and Bi conducting layers were also carried out. It is demonstrated that application of such arrays makes it possible to control the profile and duration of the generated X-ray pulse by varying the

mass, material, and location of the deposited layer. It is found that deposition of an additional mass in the form of a thin Bi stripe on tungsten wires near the cathode end of the array allows one to mitigate the influence of the cathode zipper effect on the pinch compression and formation of the X-ray pulse in tungsten arrays.

**42. ИССЛЕДОВАНИЕ РАДИАЛЬНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ В ПЛАЗМЕ МНОГОПРОВОЛОЧНЫХ СБОРОК НА УСТАНОВКЕ АНГАРА-5-1**

К. Н. Митрофанов, Е. В. Грабовский, Г. М. Олейник, В. В. Александров, А. Н. Грицук, И. Н. Фролов, Я. Н. Лаухин, П. В. Сасоров, А. А. Самохин

Физика плазмы. 2012. Т. 38. № 10. С. 1-24.

<http://www.maikonline.com/maik/showIssueContent.do?puid=VIGUQRPWPE>

В настоящей работе представлены результаты исследований имплозии проволочных (вольфрам, алюминий, молибден) и волоконных сборок (капрон) на установке Ангара-5-1 при токе до 4 МА. Впервые подробно измерены радиальные распределения азимутального магнитного поля на стадии плазмообразования при сжатии такихборок. Рассчитаны радиальные распределения плотности тока. Проведено сравнение с данными оптической щелевой развертки и электротехнических измерений тока и напряжения. На основании полученных экспериментальных результатов сделана оценка интенсивности плазмообразованияборок, изготовленных из различных веществ.

K. N. Mitrofanov, E. V. Grabovski, G. M. Oleinik, V. V. Aleksandrov, A. N. Gritsuk, I. N. Frolov, Ya. N. Laukhin, P. V. Sasorov, A. A. Samokhin Study of the radial distribution of the magnetic field in the wire array plasma at the Angara-5-1 facility

Plasma Physics Reports, October 2012, Volume 38, Issue 10, pp 797-819

<http://link.springer.com/article/10.1134/S1063780X12100091>

DOI: 10.1134/S1063780X12100091

Results are presented from experimental studies of the implosion of wire (tungsten, aluminum, and molybdenum) and fiber (kapron) arrays at the Angara 5-1 facility at currents of up to 4 MA. The radial distributions of the azimuthal magnetic field in the stage of plasma production in such arrays are measured in detail for the first time, and the radial profiles of the current density are evaluated. The data obtained using an optical streak camera are compared with the results of measurements of the current and voltage. Using the obtained experimental results, the rate of plasma production in the arrays made of different materials is estimated.

**43. ИССЛЕДОВАНИЯ СПЕКТРОВ ИЗЛУЧЕНИЯ БЫСТРЫХ Z-ПИНЧЕЙ, ОБРАЗУЮЩИХСЯ ПРИ СЖАТИИ МНОГОПРОВОЛОЧНЫХ СБОРОК НА УСТАНОВКЕ АНГАРА-5-1**

Е. А. Болховитинов\*, Г. С. Волков, И. Ю. Вичев\*\*, Е. В. Грабовский, А. Н. Грицук, В. И. Зайцев, В. Г. Новиков\*\*, Г. М. Олейник, А. А. Рупасов\*, Е. В. Светлов, А. С. Шиканов\*, М. В. Федулов

Физика плазмы. 2012. Т. 38. № 10. С. 894-902.

<http://www.maikonline.com/maik/showIssueContent.do?puid=VIGUQRPWPE>

Приведены результаты измерений спектров излучения вольфрамовой плазмы Z-пинчей, образующихся при сжатии цилиндрических многопроволочныхборок током 3 МА с погонной массой 200–400 мкг/см и начальным диаметром 12–20 мм в экспериментах на сильноточной установке Ангара-5-1. Зависимость интенсивности излучения от энергии квантов в интервале 50–900 эВ получена спектрографом с пропускающей решеткой и регистрацией излучения на рентгеновскую фотопленку УФ-4. В интервале энергий квантов 1–3 кэВ спектр излучения был получен кристаллическим обзорным спектрографом. Для защиты пропускающей решетки от быстрых микрочастиц, возникающих при эрозии высоковольтных электродов, использован электромагнитный штормный затвор. Полный выход энергии излучения измерялся термометрическим

калориметром. Показано, что основная доля энергии излучения вольфрамовой плазмы находится в интервале энергии квантов 80–300 эВ. Измерения спектральной интенсивности излучения с пространственным разрешением по радиусу пинча показали, что эффективный поперечный диаметр пинча не превышает 2 мм, что совпадает с независимыми токовыми измерениями размера пинча. Проведено сравнение результатов измерений спектральной интенсивности излучения с расчетами, выполненными в предположении стационарности и однородности плазмы.

E. A. Bolkhovitinov, G. S. Volkov, I. Yu. Vichev, E. V. Grabovski, A. N. Gritsyk, V. I. Zaitsev, V. G. Novikov, G. M. Oleinik, A. A. Rupasov, E. V. Svetlov, A. S. Shikanov, M. V. Fedulov Study of the radiation spectra of fast Z-pinch formed during the implosion of wire arrays in the Angara-5-1 facility

Plasma Physics Reports, October 2012, Volume 38, Issue 10, pp 824-832

<http://link.springer.com/article/10.1134/S1063780X12090024>

DOI: 10.1134/S1063780X12090024

Results are presented from measurements of the radiation spectra of the Z-pinch tungsten plasma produced during the implosion of cylindrical wire arrays with a linear mass of 200–400  $\mu\text{g}/\text{cm}$  and an initial diameter of 12–20 mm at a current of  $\sim 3$  MA in the experiments performed at the Angara-5-1 facility. The radiation spectra in the photon energy range of 50–900 eV were recorded on a UF-4 X-ray film by using a spectrograph with a transmission grating. The radiation spectrum in the photon energy range of 1–3 keV was recorded using a crystalline panoramic spectrograph. A curtain shutter was used to protect the transmission grating from fast microparticles produced due to the erosion of high-voltage electrodes. The total radiation yield was measured with a thermocouple calorimeter. It is shown that most of the tungsten plasma radiation energy is emitted in the photon energy range of 80–300 eV. Measurements of the spectral intensity of pinch radiation with a spatial resolution along the pinch radius showed that the effective transverse diameter of the pinch did not exceed 2 mm, which agrees with independent current measurements of the pinch size. The results of measurements of the spectral intensity of pinch radiation were compared with calculations performed under the assumption of a stationary homogeneous plasma.

#### 44. ИССЛЕДОВАНИЕ ИМПЛОЗИИ ПЕНО-ПРОВОЛОЧНЫХ СБОРОК НА УСТАНОВКЕ АНГАРА-5-1

К. Н. Митрофанов, Е. В. Грабовский, В. В. Александров, И. Н. Фролов,  
Г. М. Олейник, Я. Н. Лаухин, А. Н. Грицук, П. В. Сасоров, С. Ф. Медовщиков  
Физика плазмы. 2012. Т. 38. № 12. С. 1022-1041.

<http://www.maiconline.com/maik/showIssueContent.do?puid=VIGUORO01W>

Проведены эксперименты по имплозии лайнеров типа двухкаскадных вложенных конструкций, целью которых было исследование компактности их сжатия. В качестве индикаторов компактного сжатия пинча использовались динамика пространственного распределения тока (магнитного поля) и временной профиль генерируемого импульса мягкого рентгеновского излучения (МРИ). В работе представлены результаты измерения пространственного распределения магнитного поля (тока) и профиля импульса мощности МРИ при имплозии двухкаскадных вложенных лайнеров - пено-проволочных (П-П) конструкций при токе до 4 МА на установке Ангара-5-1. Такие лайнеры состоят из двух вложенных друг в друга каскадов, один из которых представляет собой многопроволочную сборку, а второй - полый/сплошной цилиндрический лайнер из пены малой плотности (пенный лайнер). Пенный лайнер изготавливался из агар-агаровой пены в виде сплошного цилиндра или полого с толщиной стенки 100 - 200 мкм. В ряде опытов один из каскадов П-П конструкции был изготовлен из пены в твердой фазе органической кислоты  $\text{C}_{20}\text{H}_{17}\text{O}_6$ . С помощью методики миниатюрных магнитных зондов исследовано радиальное распределение магнитного поля, возникающего во внутреннем пространстве вложенных каскадов при имплозии лайнеров П-П конструкции, как в пространстве между каскадами, так и во внутреннем каскаде. Измеренные радиальные

распределения магнитного поля сравниваются с расчетами структуры магнитного поля по одномерной МГД программе, моделирующей процесс имплозии двухкаскадных вложенных лайнеров П-П конструкции. Показано, что развитие режимов сверхзвукового и дозвукового течения плазмы с магнитным полем в двух каскадах лайнеров П-П конструкции определяет пространственную структуру тока и распределения магнитного поля при имплозии таких лайнеров. Рассмотрены экспериментальные особенности формирования пинча и компенсации неодновременности сжатия пинча между анодом и катодом (зиппер-эффекта) при имплозии вложенных лайнеров П-П конструкции.

K. N. Mitrofanov, E. V. Grabovski, V. V. Aleksandrov, I. N. Frolov, G. M. Oleinik, Ya. N. Laukhin, A. N. Gritsuk, P. V. Sasorov, S. F. Medovshchikov Study of the implosion of foam-wire loads at the Angara-5-1 facility

Plasma Physics Reports, December 2012, Volume 38, Issue 12, pp 941-959

<http://link.springer.com/article/10.1134/S1063780X12110098>

DOI: 10.1134/S1063780X12110098

Results are presented from experiments on studying the compactness of compression of imploding nested foam-wire loads at currents of up to 4 MA at the Angara-5-1 facility. The degree of pinch compression was estimated from the dynamics of the spatial distribution of the current (magnetic field) and the shape of the soft X-ray pulse. The load consisted of nested cascades, one of which being a wire array and the other being a hollow or solid low-density cylinder made of agar-agar foam with a wall thickness of 100–200  $\mu\text{m}$ . In some experiments, one of the cascades was made of C20H17O6 solid-state organic acid foam. The radial distribution of the magnetic field inside the nested cascades of the imploding foam-wire load (both between the cascades and inside the inner cascade) was measured using tiny magnetic probes. The measured radial distributions of the magnetic field are compared with the magnetic field configuration calculated using a one-dimensional MHD code simulating the implosion of a nested foam-wire load. It is shown that the spatial structure of the current and magnetic field during the implosion of such a load is determined by the development of supersonic and subsonic magnetized plasma flows in its cascades. The specific features of pinch formation and methods for the compensation of the nonsimultaneous pinch compression between the anode and the cathode (the zipper effect) during the implosion of a nested foam-wire load are analyzed.

**45.** P. Kubes, V. Krauz, K. Mitrofanov, M. Paduch, M. Scholz, T. Piszarczyk, T. Chodukowski, Z. Kalinowska, L. Karpinski, D. Klir, J. Kortanek, E. Zielinska, J. Kravarik and K. Rezac CORRELATION OF MAGNETIC PROBE AND NEUTRON SIGNALS WITH INTERFEROMETRY FIGURES ON THE PLASMA FOCUS DISCHARGE

Plasma Physics and Controlled Fusion, 2012, V. 54, N. 10. P. 105023.

<http://iopscience.iop.org/0741-3335/54/10/105023>

DOI:10.1088/0741-3335/54/10/105023

In this paper the results of temporally resolved measurements using calibrated azimuthal and axial magnetic probes are presented, together with interferometry and neutron diagnostics performed on the PF-1000 (IPPLM, Warsaw, 2 MA) device with a deuterium filling and  $10^{11}$  neutron yield. The probes located in the anode front at three different radial positions allow determination of the dominant part of the discharge current flows behind the imploding dense plasma layer. The current sheath is composed of both the axial and azimuthal components of the magnetic field. After reaching the minimum diameter, the current sheath continues in a radial motion to the axis and then penetrates into the dense plasma column. At the final phase of stagnation, the dominant current passes through the dense column. The probes located on the axis of the anode front registered an increase and a decrease in the pulse of the axial component of the magnetic field in correlation with the formation and decay of the dense plasmoidal structure. The estimated values of the axial component of the magnetic field at the center of the plasmoids in the first neutron pulse and close before its decay and dominant neutron

production can reach 2 and 10 T; it is 10–30% of the value of the azimuthal magnetic field of the dense column boundary.

**46.** V. Krauz, K. Mitrofanov, M. Scholz, M. Paduch, L. Karpinski, E. Zielinska and P. Kubes  
EXPERIMENTAL STUDY OF THE STRUCTURE OF THE PLASMA CURRENT SHEATH ON  
THE PF-1000 FACILITY

Plasma Physics and Controlled Fusion, 2012, V. 54, N. 2 P. 025010.

<http://iopscience.iop.org/0741-3335/54/2/025010>

DOI:10.1088/0741-3335/54/2/025010

The results of studies of the plasma-current sheath structure on the PF-1000 facility in the stage close to the instant of pinch formation are presented. The measurements were performed using various modifications of the calibrated magnetic probes. Studies of the influence of the probe shape and dimensions on the measurements accuracy were done. The current flowing in the converging sheath at a distance of 40 mm from the axis of the facility electrodes was measured. In the optimal operating modes, this current is equal to the total discharge current, which indicates the high efficiency of current transportation toward the axis. In such shots a compact high-quality sheath forms with shock wave in front of the magnetic piston. It is shown that the neutron yield depends on the current compressed onto the axis. This dependence agrees well with the known scaling,  $Y_n \sim I^4$ . The use of the total discharge current in constructing the current scaling, especially for facilities with a large stored energy, is unjustified.

**47.** V. Krauz, K. Mitrofanov, M. Scholz, V. Myalton, M. Paduch, E. Grabovski, L. Karpinski, V. Koidan, V. Vinogradov, Yu. Vinogradova, E. Zielinska  
MAGNETIC FIELD MEASUREMENTS ON  
PF-1000 AND PF-3 FACILITIES: CURRENT SHEATH STRUCTURE AND NEUTRON  
SCALING

Nukleonika. 2012. V. 57. N. 2. P.201-204

[http://www.nukleonika.pl/www/back/abstract/vol57\\_2012/v57n2p201.htm](http://www.nukleonika.pl/www/back/abstract/vol57_2012/v57n2p201.htm) - abstract

<http://www.nukleonika.pl/www/back/conts12n2.htm> – full text

The comparative analysis of the magnetic field distribution, the dynamics and structure of the plasma current sheath, and the neutron yield scaling in two largest plasma focus facilities, PF-3 and PF-1000 is done. The power-law dependence of the neutron yield on the current in the imploding plasma sheath has been demonstrated experimentally. For the first time the presence of the  $B_z$  magnetic field components is experimentally shown.

**48.** V.I. Krauz, K.N. Mitrofanov, M. Scholz, M. Paduch, P.Kubes, L. Karpinski and E. Zielinska  
EXPERIMENTAL EVIDENCE OF EXISTENCE OF THE AXIAL MAGNETIC FIELD IN A  
PLASMA FOCUS

EPL (Europhysics Letters), 2012. V. 98. Issue 4. P. 45001.

<http://iopscience.iop.org/0295-5075/98/4/45001>

DOI:10.1209/0295-5075/98/45001

The magnetic field distribution substantially affects mechanisms for the generation of radiation in Z-pinches. Investigation of the axial component of the magnetic field is one of the important problems in plasma focus studies. The measurements of the  $B_z$ -component of the magnetic field on the PF-1000 facility were done with the multichannel absolutely calibrated probe both at the stage of plasma-current sheath radial compression and in the dense-pinch stage. In the compression stage, the axial component of the magnetic field reaches several kG that comprises ~10% of the azimuthal component. The presence of the  $B_z$  field is a powerful argument in favor of the existence of closed magnetic configurations, which play an important role in the generation of neutrons.

#### 49. ОСОБЕННОСТИ СТРУКТУРЫ ИЗЛУЧАЮЩЕЙ ОБЛАСТИ Z-ПИНЧА ПРИ СЖАТИИ ПЕНО-ПРОВОЛОЧНЫХ СБОРОК НА УСТАНОВКЕ АНГАРА-5-1

К. Н. Митрофанов\*, Е. В. Грабовский\*, А. Н. Грицук\*, Я. Н. Лаухин\*, В. В. Александров\*, Г. М. Олейник\*, С. Ф. Медовщиков\*, А. П. Шевелько\*\*

Физика плазмы. 2013. Т. 39. № 1. С. 51-76.

<http://www.maikonline.com/maik/showIssueContent.do?puId=VIN9I5XFT6>

Приведены результаты экспериментальных исследований особенностей структуры сжатого состояния Z-пинча лайнеров типа пено-проволочных (П-П) конструкций при токе до 3 МА. П-П конструкция представляла собой два вложенных друг в друга полых цилиндрических лайнера, один из которых представлял собой пенный лайнер, а другой – многопроволочную сборку. Пенный лайнер изготовлялся из малоплотной пены агар-агара в виде сплошного цилиндра или полый цилиндрической оболочки с толщиной стенки 100 - 200 мкм. Проанализированы изображения пинча и его спектра, полученные при помощи многокадровых рентгеновских камер и с использованием дифракционного спектрографа скользящего падения (GIS - grazing incidence spectrograph) с пространственным разрешением. На финальной стадии сжатия лайнеров П-П конструкций получены данные о пространственной структуре излучающих областей и спектра Z-пинча в области мягкого рентгеновского излучения (МРИ). Обнаружены режимы имплозии с формированием горячих областей при имплозии лайнеров такого типа. Измерены характерные масштабы горячих областей. Показано, что энергетическое распределение квантов в спектре МРИ в диапазоне от 80 эВ до 1 кэВ формирует пространственную структуру изображений при сжатии Z-пинча П-П конструкций. Обнаружено, что спектральная плотность МРИ в диапазоне энергии квантов 300-600 эВ из горячих областей Z-пинча более чем на порядок превышает спектральную плотность излучения из соседних областей пинча. Из анализа пространственного распределения спектров МРИ многозарядных ионов Z-пинча впервые зарегистрированы группы линий, обусловленные поглощением и испусканием излучения атомами и многозарядными ионами углерода и кислорода пенного лайнера во внешнем каскаде П-П конструкции. Идентифицированы группы линий поглощения ионов (C III, O III, O IV, O VI), соответствующие поглощению в спектре МРИ Z-пинча вольфрамовой проволочной сборки, как внутреннего каскада лайнера П-П конструкции. Измеренная по зарядовому составу ионов углерода и кислорода электронная температура плазмы во внешнем пенном лайнере из агар-агара составила 10-40 эВ. При имплозии током до 3 МА лайнеров исследованных П-П конструкций получены импульсы МРИ (с  $h\nu > 100$  эВ) при пиковой мощности 3 ТВт с длительностью 10 нс. Показано, что временной профиль мощности МРИ можно контролировать, формируя как однопиковую, так и двухпиковую структуру за счет изменения параметров внешнего и внутреннего каскадов лайнера П-П конструкции.

K. N. Mitrofanov, E. V. Grabovski, A. N. Gritsuk, Ya. N. Laukhin, V. V. Aleksandrov, G. M. Oleinik, S. F. Medovshchikov, A. P. Shevel'ko Specific features of the structure of the Z-pinch emitting region formed during the implosion of a foam-wire load at the ANGARA-5-1 facility

Plasma Physics Reports, January 2013, Volume 39, Issue 1, pp 62-85

<http://link.springer.com/article/10.1134/S1063780X12120045>

DOI: 10.1134/S1063780X12120045

Results are presented from experimental studies of the structure of the compressed plasma of a Z-pinch produced during the implosion of a foam-wire load at the current of up to 3 MA. The foam-wire load consisted of two nested cylindrical cascades, one of which was a solid or hollow cylinder made of low-density agar-agar foam, while the other was a wire array. The wall thickness of a hollow foam cylinder was 100–200  $\mu\text{m}$ . The images of the pinch and its spectrum obtained with the help of multiframe X-ray cameras and a grazing incidence spectrograph with a spatial resolution were analyzed. Data on the spatial structure of the emitting regions and the soft X-ray (SXR) spectrum of the Z-pinch in the final stage of compression of a foam-wire load were obtained. The implosion modes



characterized by the formation of hot regions during implosion of such loads were revealed. The characteristic scale lengths of the hot regions were determined. It is shown that the energy distribution of SXR photons in the energy range from 80 eV to 1 keV forms the spatial structure of Z-pinch images recorded during the implosion of foam-wire loads. It is revealed that the spectral density of SXR emission in the photon energy range of 300–600 eV from hot Z-pinch regions exceeds the spectral density of radiation from the neighboring Z-pinch regions by more than one order of magnitude. Groups of lines related to the absorption and emission of radiation by atoms and multicharged ions of carbon and oxygen in the outer foam cascade of a foam-wire load were recorded for the first time by analyzing the spatial distribution of the SXR spectra of multicharged ions of the Z-pinch. The groups of absorption lines of ions (C III, O III, O IV, and O VI) corresponding to absorption of SXR photons in the Z-pinch of a tungsten wire array, which served as the inner cascade of a foam-wire load, were identified. The plasma electron temperature measured from the charge composition of carbon and oxygen ions in the outer agar-agar foam cascade was 10–40 eV. During the implosion of foam-wire loads at currents of up to 3 MA, SXR pulses ( $h\nu > 100$  eV) with a duration of 10 ns and peak power of 3 TW were detected. It is shown that the temporal profile of single-peak and double-peak SXR pulses can be controlled by varying the parameters of the outer and inner cascades of the foam-wire load.

**50.** P. Kubes, D. Klir, J. Kravarik, K. Rezac, J. Kortanek, V. Krauz, K. Mitrofanov, M. Paduch, M. Scholz, T. Pisarczyk, T. Chodukowski, Z. Kalinowska, L. Karpinski and E. Zielinska SCENARIO OF PINCH EVOLUTION IN PLASMA FOCUS DISCHARGE  
Plasma Physics and Controlled Fusion, 2013. V. 55. N. 3. P. 035011.  
<http://iopscience.iop.org/0741-3335/55/3/035011>  
DOI:10.1088/0741-3335/55/3/035011

In this paper, the possible evolution of a pinched plasma column is presented from the results of temporally resolved measurements using a magnetic probe, interferometry and neutron diagnostics performed on the plasma focus PF-1000 device with deuterium as the filling gas. Together with the discharge axial current of about 1.5 MA a toroidal current component of the order of 100 kA was estimated in the toroidal, helical and plasmoidal structures formed within the dense plasma column. The mass inside these structures increases due to injection of the plasma from the neighborhood regions with a higher pinching pressure. This injected plasma increases the intensity of the internal magnetic field, probably through turbulent motion and the magnetic dynamo effect. The neutrons from the D–D fusion reaction, produced during the formation and decay of plasmoidal structures and constrictions, are accompanied by changes in the axial component of the magnetic field. Then, the transformation and decay of internal closed currents can contribute to the acceleration of high-energy electrons and ions.

**51.** V. Krauz, K. Mitrofanov, M. Scholz, P. Kubes V. Myalton, M. Paduch, L. Karpinski, V. Koidan, A. Mokeev, V. Vinogradov, Yu. Vinogradova, E. Zielinska RECENT RESULTS OF STUDIES OF MAGNETIC FIELD DISTRIBUTION AND NEUTRON SCALING ON PF-1000 AND PF-3 FACILITIES  
PROBLEMS OF ATOMIC SCIENCE AND TECHNOLOGY(PAST). BAHT. 2013. № 1(83) C. 114.  
<http://vant.kipt.kharkov.ua/TABFRAME.html>

The recent results of studies of the magnetic field distribution and the neutron yield scaling in two largest plasma focus facilities, PF-3 and PF-1000 is done. The power-law dependence of the neutron yield on the current in the imploding plasma sheath has been demonstrated experimentally. For the first time the presence of the  $B_z$  magnetic field components is experimentally shown. In the compression stage, the axial component of the magnetic field reaches several kG that comprises ~10 % of the azimuthal component. The presence of the  $B_z$  field is a powerful argument in favor of the existence of closed magnetic configurations, which play an important role in the generating of neutrons.

