



**Багдасаров Г.А., Гасилов В.А.,
Долгачев Г.И., Калинин Ю.Г.,
Ольховская О.Г., Ткаченко С.И.,
Чукбар К.В., Шведов А.А.**

Экспериментальные и
численные исследования
динамики плазмы в
плазменном прерывателе
тока на основе взрыва
проволочки

Рекомендуемая форма библиографической ссылки: Экспериментальные и численные исследования динамики плазмы в плазменном прерывателе тока на основе взрыва проволочки / Г.А.Багдасаров [и др.] // Препринты ИПМ им. М.В.Келдыша. 2012. № 56. 16 с. URL: <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2012-56>

Ордена Ленина
ИНСТИТУТ ПРИКЛАДНОЙ МАТЕМАТИКИ
имени М.В.Келдыша
Российской академии наук

Г.А. Багдасаров, В.А. Гасилов, Г.И. Долгачев,
Ю.Г. Калинин, О.Г. Ольховская, С.И. Ткаченко,
К.В. Чукбар, А.А. Шведов

Экспериментальные и численные
исследования динамики плазмы
в плазменном прерывателе тока
на основе взрыва проволочки

Москва — 2012

Багдасаров Г.А., Гасилов В.А., Долгачев Г.И., Калинин Ю.Г., Ольховская О.Г., Ткаченко С.И., Чукбар К.В., Шведов А.А.

Экспериментальные и численные исследования динамики плазмы в плазменном прерывателе тока на основе взрыва проволоочки

Изучается заполнение промежутка плазменного прерывателя тока (ППТ) при взрыве проволоочки во внешнем аксиальном магнитном поле с целью подбора параметров для оптимальной работы ППТ.

Предлагается заменить инжектор плазмы тонкой проволокой (или набором проволок), соединяющими электроды ППТ, и наложить внешнее магнитное поле, направленное вдоль электродов. Электровзрыв проволоки может осуществляться током ППТ. Параметры плазмы, необходимые для отсечения тока, можно обеспечить за счет подбора материала и диаметра проволоки, а также регулируя динамику заполнения вакуумного промежутка ППТ.

3D МГД моделирование основано на РМГД коде MARPLE (ИПМ РАН). В коде реализована одножидкостная двухтемпературная МГД-модель, включающая перенос лучистой энергии на основе многогруппового по спектру диффузионного приближения. Основная система МГД уравнений дополнена обобщенным законом Ома. Численное моделирование включало два этапа: заполнение промежутка ППТ плазмой взорванной проволоочки и срабатывание ППТ. Результаты моделирования хорошо согласуются с теоретическими оценками и полученными экспериментальными данными.

Ключевые слова: плазменный прерыватель тока, взрыв проволоочки, 3D МГД моделирование

G. Bagdasarov, V. Gasilov, G. Dolgachev, Y. Kalinin, O. Olkhovskaya, S. Tkachenko, K. Chukbar., A. Shvedov

Experimental and Numerical Study of a Wire-Explosion-Pos Plasma Dynamics

We study the filling of the POS gap using wire explosion in an external axial magnetic field in order to optimize POS performance. We propose to replace the plasma injector by a thin wire (or a set of wires) connecting the POS electrodes and apply external magnetic field directed along the electrodes. The electric wire explosion would be carried out by POS current. Parameters necessary for the current cutoff may be achieved by selection of the wire material and diameter, and also by effect on the dynamics of its expansion in the POS gap.

3D MHD simulations are based on RMHD code MARPLE (KIAM RAS). The code implements one-fluid two-temperature MHD model including radiative energy transfer based on spectral multigroup model of radiation diffusion and the generalized Ohm's law. Numerical simulation includes two stages: filling the POS gap by wire's plasma and plasma switch operation. The numerical results are in close fit with theoretical estimations and experimental data obtained.

Key words: plasma opening switch, wire explosion, 3D MHD simulations

Введение

В программе создания сверхмощных генераторов для экспериментов в области инерциального УТС (установка МОЛ в программе Байкал [1], взрывомагнитные генераторы [2]) конечной ступенью обострения импульса является плазменный прерыватель тока (ППТ), рабочий объем которого находится во внешнем магнитном поле. Внешнее поле, взаимодействуя с токнесущей плазмой, вызывает ее движение, способствующее выравниванию параметров плазмы в занимаемой ею области. Одно из условий его работоспособности – получение оптимальных параметров плазмы, создаваемой плазменными пушками. Выход на оптимальный режим работы ППТ требует некоторого количества наладочных пусков, которые на крупных установках достаточно дороги. Поэтому проблема выхода на режим с первого раза без предварительных импульсов по подбору оптимальных параметров плазмы, т.е. проблема первого ”выстрела”, является актуальной. Она особенно важна при обострении мощности взрывомагнитных генераторов, где первый “выстрел” является и последним. Для решения этой проблемы предложено шунтировать межэлектродный зазор ППТ тонкой провололочкой, взрываеваемой током ППТ. При этом необходимые для включения механизма обрыва тока параметры плазмы в зазоре ППТ предполагается подбирать за счет выбора материала, диаметра проволоочки и ее разлета в зазоре ППТ. Предполагается, что замена плазменных пушек на электровзрываеваемый проводник (ЭВП) может позволить сразу выходить в рабочий режим ППТ – изначально высокая локально сконцентрированная плотность плазмы ЭВП будет «размазываться» в кольцевом зазоре по углу за счет силы Ампера $F=I \times B$, как это наблюдалось в [3]. Кроме того, как отмечалось в [3], падающая во времени за счет азимутального «размазывания» плотность частиц (от $\sim 10^{23}$ до $\sim 10^{14}$ см⁻³) в зазоре ППТ открывает возможность решить характерную для программы «Байкал» (установка МОЛ) проблему длинного (~ 40 мкс) предимпульса.

Данная работа посвящена изучению динамики плазмы при взрыве проволоочки в аксиальном магнитном поле, создаваемом внешним источником ($B_z \leq 30$ кГс). С помощью электронно-оптической фотографии изучалась динамика азимутального и продольного распространения свечения плазмы, с помощью электротехнических методов – динамика изменения сопротивления плазмы, создаваемой при взрыве проволоочки. Эксперименты проводились в НИЦ "Курчатовский институт" на стенде [3] и установке РС-20 [4]. Численное моделирование выполнялось в ИПМ им. М. В. Келдыша РАН.

Работа поддержана грантами РФФИ 11-08-00624, 11-02-01008, 11-07-93939-Джи8_а и грантом Президента РФ МК-2436.2011.2.

Вычисления выполнялись на суперкомпьютерах К-100 (ИПМ им. М. В. Келдыша РАН) и ЛОМОНОСОВ (НИВЦ МГУ).

Схема эксперимента

Эксперимент по изучению динамики образования плазмы при взрыве тонкой проволоочки во внешнем магнитном поле B_z , создаваемом сторонним источником, проводился на макете ППТ (рис.1 и 2) установки [3].

Медный анод ППТ 6 (рис. 1) через выводящий изоляционный фланец 9 подключался к анодной батарее. Емкость анодной батареи составляла 10 мкФ (4 конденсатора ИК-100-2,5), рабочее напряжение 25 кВ, полпериода контура «батарея-проволочка» $T/2=12$ мкс. Для обеспечения проникновения внешнего магнитного поля в зазор ППТ корпус катода 1 (рис.2) выполнен из нержавеющей трубы с толщиной стенки 1,5 мм. Внутренний диаметр катода 80 мм.

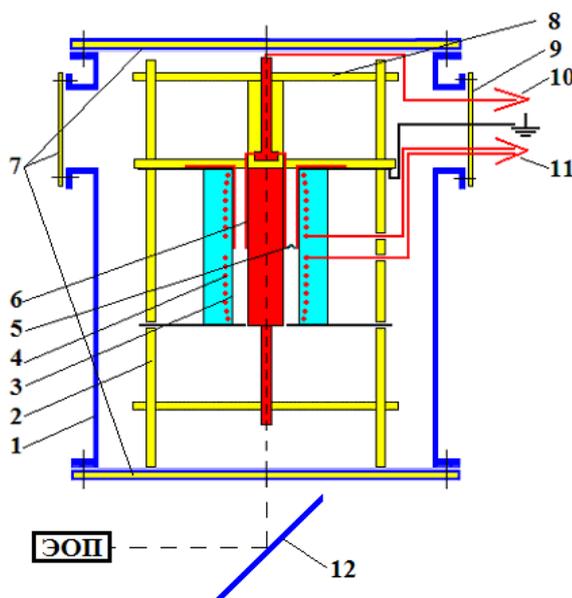


Рис.1. Схема эксперимента:

- 1 – вакуумная камера ($h=55$ см, $d=35$ см, $P=8 \times 10^{-6}$ мм рт. ст.),
- 2 – изоляционные стойки,
- 3 – катод ППТ,
- 4 – соленоид,
- 5 – взрываема проволока,
- 6 – анод ППТ (медь),
- 7 – смотровые фланцы,
- 8 – соединительный изолятор опоры,
- 9 – выводящий фланец,
- 10 – кабели питания анода,
- 11 – кабели питания соленоида,
- 12 – зеркало

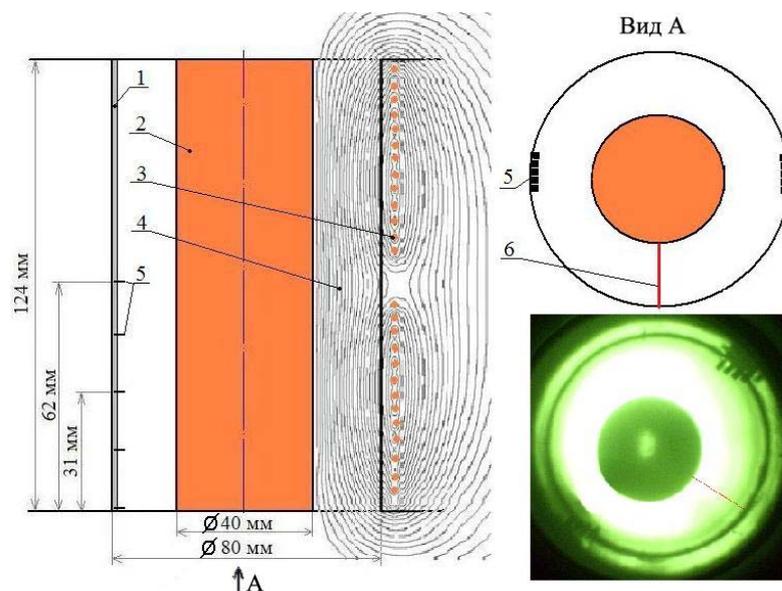


Рис. 2. Схема и фотография макета ППТ:

- 1- корпус катода,
- 2- анод,
- 3- витки соленоида внешнего магнитного поля,
- 4- распределение B_Z в зазоре ППТ,
- 5- затеняющие пластинки (15 мм друг от друга вдоль оси и 1 мм по азимуту),
- 6 – электровзрываемая проволочка

Квазистационарное магнитное поле ($T/2 \approx 140$ мс) создается соленоидом (поз. 4 на рис. 1) из двух катушек, крайние концы которых заземлены на корпус катода, противоположные – соединены между собой и с кабелем питания 11. Такая конструкция позволяет максимально приблизить соленоид к зазору ППТ на краях катода, обеспечить симметрию магнитного поля и надежную изоляцию высоковольтных концов соленоида. Обмотка соленоида изолирована от корпуса катода стеклотканью Т-10-14(92), пропитанной эпоксикремниевой смолой, допускающей нагрев до $\sim 250^\circ\text{C}$. Питание соленоида осуществляется от батареи $C=1400$ мкФ с напряжением от 0,2 до 4,5 кВ. После прохождения первого полупериода тока батарея с помощью дополнительного ключа (игнитрон ИРТ-6) шунтировалась низкоомным резистором ($R \leq \rho$), который и поглощал основную часть энергии батареи. Магнитное поле соленоида измерялось с помощью трех петель, расположенных в одной плоскости, перемещаемых вдоль оси, что позволило получить распределение величины аксиального поля B_Z в зазоре ППТ, которое хорошо совпадает с результатом компьютерного расчета (силовые линии 4 на рис. 2). В максимуме внешнего магнитного поля включалось питание анода ППТ и происходил взрыв проволочки. Регистрация свечения в различные моменты времени осуществлялась с помощью кадровой ЭОП-фотографии (экспозиция 50 нс). Следует отметить, что яркость свечения плазмы возрастает по мере

приближения тока анодной батареи к своему амплитудному значению. Поэтому, чтобы находиться в динамическом диапазоне, в ряде случаев применялись светофильтры с коэффициентом ослабления 6 и минимальное значение диафрагмы 22.

Для оценки продольной скорости плазмы применялись затеняющие пластины 5 (рис. 2). Две группы пластинок размером $3 \times 3 \text{ мм}^2$ размещены в области двух образующих катодного цилиндра, которые смещены по азимуту относительно проволочки на 90° и 270° . Расстояние между пластинками вдоль оси 15 мм, по азимуту 1 мм. Пластинки, «погруженные» в плазму, не затеняют свечение, что позволяет определить положение границы плазмы. Фотография зазора с пластинками приведена на рис. 2.

Система электронно-оптической фотографии на основе ЭП-15

Для исследования динамики плазмы проволочки применялись однокадровая и четырехкадровая системы ЭОП-фотографии [5] с экспозицией 50 нс и задержкой включения электронно-оптического преобразователя (ЭОП) относительно начала импульса тока в диапазоне (0-6 мкс). Как и в работах [3], [6], использовалась сборка из двух последовательных ЭОПов ЭП-15 с коэффициентом преобразования $\sim 10^4$ и регистрацией на цифровой фотоаппарат [7]. Однокадровая система обладает более высокими чувствительностью и пространственным разрешением, четырехкадровая же, уступая в чувствительности и пространственном разрешении, позволяла получать достаточно полную картину изменения свечения за один «выстрел».

Была предложена беспараллаксная система кадрового фотографирования, аналогичная [8], сочетающая в себе достоинство многомодульной системы с относительной компактностью и возможностью получения последовательных кадров. Регистрация изображения с экрана ЭОП осуществлялась двумя фотоаппаратами Canon EOS 350D, каждый на два ЭОП. Были подобраны четыре ЭОП с близкими коэффициентами усиления.

Световой поток от исследуемого объекта делится светоделительным кубом (коэффициенты отражения и пропускания 50%) и затем разводится с помощью призм полного внутреннего отражения на идентичные верхний и нижний светоделительные каскады (рис. 3). ЭОПы закреплены попарно на диэлектрических конструкциях так, чтобы на фотокатодах всех ЭОПов были резкие изображения одинакового масштаба. Такая конструкция позволяет системе оставаться беспараллаксной, что актуально в экспериментах, где ограничен угол зрения на объект, а ЭОПы расположены на относительно небольшом расстоянии от исследуемого объекта.

Система вместе с регистрирующей фотокамерой смонтирована в помехозащищенном светонепроницаемом корпусе [3]. Ввод излучения в корпус прибора оформлен в виде запердельного волновода. Для управления затвором

фотокамеры используется электромагнит с диэлектрическим толкателем, проходящим сквозь корпус. На рисунке 4 представлены четыре одновременных снимка для соответствующих каналов при фотографии искрового пробоя.

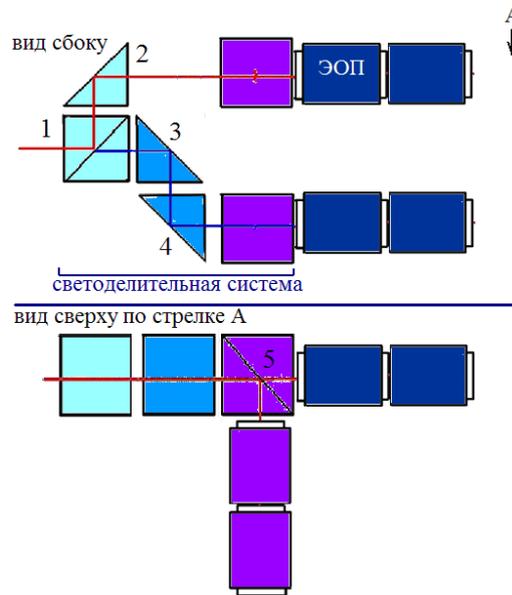


Рис. 3. Схема светоделительной части:

1, 5 – светоделительный куб;

2, 3, 4 – прямоугольная призма.

Одинаковым цветом обозначены элементы системы, находящиеся на одной вертикали.

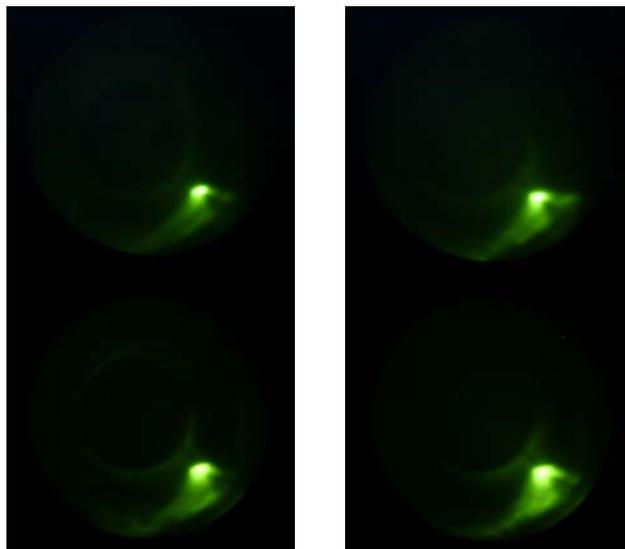


Рис.4. Калибровка каналов четырехкадровой системы (экспозиция 50 нс)

Результаты эксперимента

На рис. 5 представлены типичные осциллограммы при значении внешнего магнитного поля $B_Z = 30$ кГс.

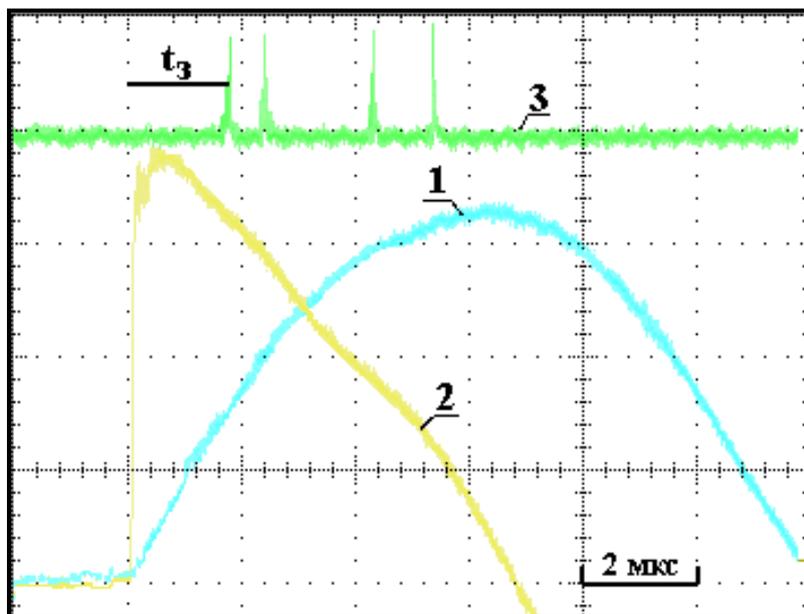


Рис. 5. Осциллограммы:

1 - ток через шунт, установленный на анодной батарее, 20 кА/дел.,

2 - напряжение на анодной батарее 6 кВ/дел.,

3 - импульсы запуска ЭОПов, t_3 – времена их задержки относительно начала тока.

Типичные серии эопограмм для углеродной и вольфрамовой проволочек приведены на рис. 6, где каждый кадр представлен в виде реальной фотографии (левая часть) и в виде изолиний интенсивности свечения (правая часть). Рис. 6 иллюстрирует динамику распространения свечения в кольцевом зазоре ППТ – «шайбе» для углеродной проволочки **А** и вольфрамовой проволочки **Б**, **В**, **Г** в зависимости от величины B_Z и времени задержки t_3 включения ЭОП относительно начала тока. Из рис. 6А следует, что для углеродной проволочки в отсутствие магнитного поля скорость разлета свечения (на уровне 0.2-0.3) симметрична относительно начального положения проволочки и составляет $\sim 0,6$ см/мкс. Включение магнитного поля (30 кГс) приводит к появлению быстрого вращения под действием силы Ампера, и в момент $t_3 = 1,9$ мкс свечение (на уровне 0.2-0.3) занимает кольцевую область, азимутальная скорость V_θ превышает величину 13 см/мкс.

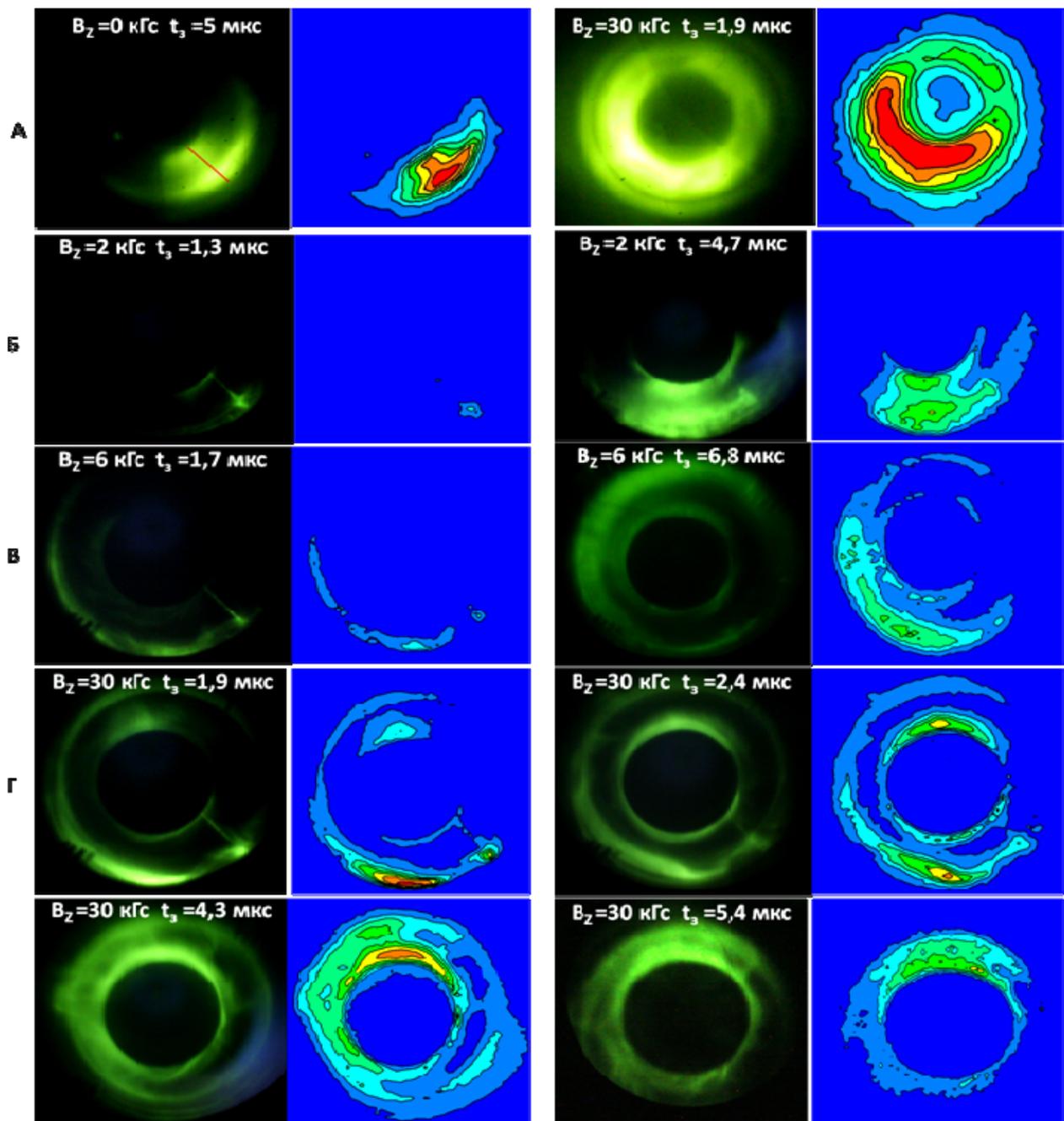


Рис. 6. Эопограммы:

А – углеродная проволочка, красная черта – ее начальное положение,

Б, В, Г – вольфрамовая проволочка,

t_3 – время задержки ЭОП относительно начала тока ППТ в мкс,

B_z – значение внешнего магнитного поля.

Более подробно изучалась динамика разлета вольфрамовой проволоочки. Сравнивая рисунок 6Б и нижеследующие рисунки, можно сказать, что при малых полях (2к Гс - рис. 6Б) азимутальная скорость распространения свечения мала, и вновь образующаяся в результате испарения проволоочки плазма накладывается на ранее образованную, создавая ярко выраженный фронт, что позволяет оценить его азимутальную скорость ($V_{\theta} \approx 5,5$ см/мкс). Видимое свечение вправо от проволоочки может быть объяснено разлетом нейтральных паров и последующей их ионизацией. Начиная с 6 кГс (рис. 6В), свечение имеет сильно размытый фронт, что может быть следствием двух причин: возрастания азимутальной скорости плазмы и снижения скорости испарения (плазма сносится силой Ампера и не «греет» оставшуюся часть проволоочки). В результате создается впечатление, что свечение «разгорается» одновременно по всему зазору, причем светится в основном приэлектродная часть зазора. Если определять азимутальную скорость свечения вблизи электродов, то при $B_Z = 30$ кГс в момент $t_3 = 1,9$ мкс $V_{\theta} \approx 1,2$ см/мкс, к моменту $t_3 = 2,4$ мкс она возрастает до $V_{\theta} \approx 1,4$ см/мкс, что может быть связано с ростом тока во времени. В моменты $t_3 = 4,3$ мкс и $t_3 = 5,4$ мкс картинка становится более яркой, особенно разгорается появившееся в момент $t_3 = 1,9$ мкс пятно (под углом $\sim 200^\circ$ относительно первоначального положения проволоочки), что может быть связано с неоднородностью поверхности электродов – электроды покрывались сажей, чтобы не было бликов. Благодаря затеняющим пластинкам удалось определить продольную скорость плазмы – она не превышает 1 см/мкс для 30 кГс (рис. 6Г).

Обсуждение результатов

Основной результат состоит в том, что во всем диапазоне величин применяемых магнитных полей (вплоть до 30 кГс) удается получить заполнение кольцевого зазора ППТ плазмой, образованной при электрическом взрыве углеродной или вольфрамовой проволоочки. Низкая величина полученной для вольфрамовой проволоочки продольной скорости плазмы (~ 1 см/мкс) позволяет надеяться на эффективное «размазывание» плазмы по кольцевой «шайбе» до необходимой концентрации за счет резкого роста азимутальной скорости с увеличением тока ППТ и внешнего магнитного поля B_Z .

Высокая скорость «размазывания» плазмы по азимуту может быть использована в проекте «Байкал» и на установке МОЛ [1] для решения проблемы предимпульса. Действительно, можно подобрать начальные параметры плазмы так, чтобы на стадии предимпульса ее концентрация уменьшалась в результате азимутального выравнивания и к началу основного импульса достигла величины $\sim 10^{14}$ см⁻³, необходимой для осуществления режима эрозии. Это обеспечит беспрепятственное прохождение предимпульса

за счет высокой концентрации и создаст условия для обрыва тока на стадии основного импульса.

Продемонстрированная в этих экспериментах возможность заполнения кольцевого зазора ППТ плазмой, образованной при электрическом взрыве углеродной или вольфрамовой проволоочки в сильном (до 30 кГс) внешнем магнитном поле, а также результаты изучения динамики заполнения зазора являются основанием для продолжения работ с проволочками или нитями из более легкого материала (углерод, полиэтилен и др.) и применения ППТ большего диаметра – для получения более низкой концентрации плазмы в его зазоре.

Вычислительные эксперименты

Трехмерное моделирование плазменного прерывателя тока выполнялось посредством РМГД кода MARPLE (ИПМ им. М. В. Келдыша РАН) [9]. Для численного анализа использована модель динамики плазмы на основе одножидкостного МГД-приближения. Аппроксимируемая система уравнений магнитной гидродинамики представлена в декартовой системе координат. Учитывается анизотропия диссипативных процессов в условиях замагничности. Энергетический баланс записан в двухтемпературной модели, описывающей электрон-ионный энергообмен. Соответственно, полное термическое давление P является суммой электронной (P_e) и ионной (P_i) компонент. Перенос энергии излучением описывается многогрупповой диффузионной моделью. Основная система МГД-уравнений дополнена обобщенным законом Ома, описывающим эффекты смещения электронов относительно ионов при сохранении квазинейтральности плазмы в целом [10].

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \rho + \operatorname{div}(\rho \vec{w}) &= 0 \\ \frac{\partial}{\partial t} \rho w_i + \sum_k \frac{\partial}{\partial x_k} \Pi_{ik} &= 0 \\ \Pi_{ik} &= \rho w_i w_k + P \delta_{ik} - \frac{1}{4\pi} \left(B_i B_k - \frac{1}{2} B^2 \delta_{ik} \right) \\ \frac{\partial}{\partial t} \vec{B} - \operatorname{rot}(\vec{w} \times \vec{B}) &= 0 \\ \frac{\partial}{\partial t} \left(\rho \varepsilon + \frac{1}{2} \rho w^2 + \frac{B^2}{8\pi} \right) + \operatorname{div} \vec{q} &= 0 \\ \vec{q} &= \left(\rho \varepsilon + \frac{1}{2} \rho w^2 + P \right) \vec{w} + \frac{1}{4\pi} \vec{B} \times (\vec{w} \times \vec{B}) \\ P &= P(\rho, \varepsilon) \end{aligned}$$

$$\vec{j} = \sigma \left(\vec{E}_m + \frac{\nabla P_e}{ne} \right) - \frac{\sigma}{nec} \vec{j} \times \vec{B}$$

$$\text{rot} \vec{B} = \frac{4\pi}{c} \vec{j}$$

$$\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = -c \text{rot} \vec{E}_m$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho \varepsilon_e = -\text{div}(\kappa_e \text{grad} T_e) + Q_{ei} + Q_J + Q_R$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho \varepsilon_i = -\text{div}(\kappa_i \text{grad} T_i) - Q_{ei}$$

$$\varepsilon = \varepsilon_e + \varepsilon_i, \quad P = P_e + P_i$$

Данные по уравнениям состояния, электрофизическим и оптическим свойствам вещества были предоставлены д.ф.-м.н., проф. В. Г. Новиковым, к.ф.-м.н. А. Д. Соломянной и И. Ю. Вичевым (расчет по программе ТЕРМОС, ИПМ им. М. В. Келдыша РАН) [11].

Для моделирования был выбран эксперимент с формированием плазменного прерывателя тока в коаксиальном канале электровзрывом одной вольфрамовой проволоки диаметром 4 мкм и длиной 2 см. Через проволоку пропускается синусоидальный импульс тока с амплитудой 64 кА и периодом 24 мкс. Внешнее аксиальное магнитное поле $B_z = 30$ кГс. Внутренний и внешний радиусы электродов равны соответственно 2 и 4 см. Схема расчетной области изображена на рис. 7. Целью моделирования является определение времени образования плазменной перемычки, определение параметров плазмы в ней, в том числе степени однородности сформированного плазменного кольца, а также режимов работы ППТ с такими параметрами.

Задача моделирования ППТ рассматривалась в двух постановках. На первом этапе моделировалось заполнение сечения канала веществом проволоки. На втором анализировалось движение плазменного кольца вдоль канала под действием внешнего и собственного магнитных полей. Предварительные оценки на основе исходных данных задачи показывают, что в изучаемых процессах существенную роль играет эффект Холла.

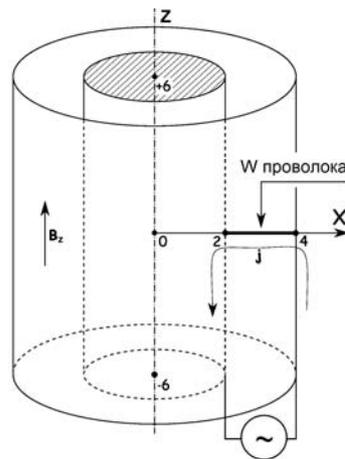


Рис. 7. Схема расчетной области для моделирования ППТ на основе взорванной проволоки

На первом этапе вычисления выполнялись в трехмерной расчетной области $2 \text{ см} < r < 4 \text{ см}$, $-1 \text{ см} < z < 2 \text{ см}$. В этой области была построена расчетная сетка из приблизительно 600 тысяч гексаэдральных ячеек, адаптированных к начальному положению проволоки ($h=0,05 \text{ см}$). Расчет начинается с момента времени $t = 160 \text{ нс}$ от начала токового импульса, предполагается, что в это время проволока уже находится в плазменном состоянии с плотностью $\rho = 9,7 \cdot 10^{-4} \text{ г/см}^3$ и температурой $T = 1 \text{ эВ}$. Начальное состояние фонового вещества $\rho = 10^{-9} \text{ г/см}^3$, $T = 0,1 \text{ эВ}$. Во всей расчетной области приложено постоянное продольное магнитное поле $B_z = 30 \text{ кГс}$. На границах расчетной области заданы следующие условия для магнитного поля: при $z = -1 \text{ см}$ $B_\varphi = 2I(t)/r$, $I(t)$ – модельный ток генератора; на электродах ($r = 2 \text{ см}$ и $r = 4 \text{ см}$) $B_n = 0$. Граница $z = 2 \text{ см}$ – свободная. На рис. 8 приведены распределения плотности плазмы в промежутке ППТ в последовательные моменты времени.

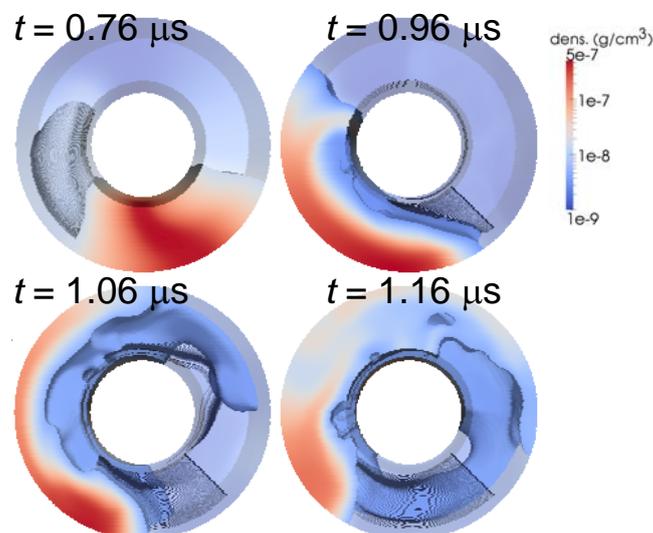


Рис. 8. Распределение плазмы в промежутке ППТ

Результаты моделирования находятся в хорошем соответствии с теоретическими оценками и экспериментальными данными. Равномерное заполнение промежутка плазмой занимает приблизительно 2 мкс, и результирующая плотность плазмы составляет порядка 10^{-7} г/см³.

Второй этап моделирования выполнялся в расчетной области, представляющей собой сектор 30° , вырезанный из цилиндрического кольца, заполненного плазмой на первом этапе, с периодическими граничными условиями при $\varphi = 0$ и $\varphi = \pi/6$. Использовалась расчетная сетка из приблизительно 1 миллиона гексаэдральных ячеек, адаптированных к поверхности электродов ($h = 0,01 - 0,025$ см). В качестве начальных условий задавалось состояние плазмы, определенное в результате первого этапа моделирования: плазменное кольцо, имеющее высоту 1 см, плотность $\rho = 1,29 \cdot 10^{-7}$ г/см³, температуру $T = 10$ эВ. Параметры фона: $\rho = 10^{-10}$ г/см³, $T = 0,1$ эВ. Ток генератора и внешнее магнитное поле такие же, как на первом этапе. Разрыв тока происходит в момент времени около 80 нс от начала 2-й стадии (2,08 мкс общего времени моделирования от начала токового импульса). На рис. 9 показаны распределение плотности плазмы в момент размыкания тока и линии электрического тока в тот же момент, искривление которых подтверждает существенное влияние эффекта Холла на работу ППТ.

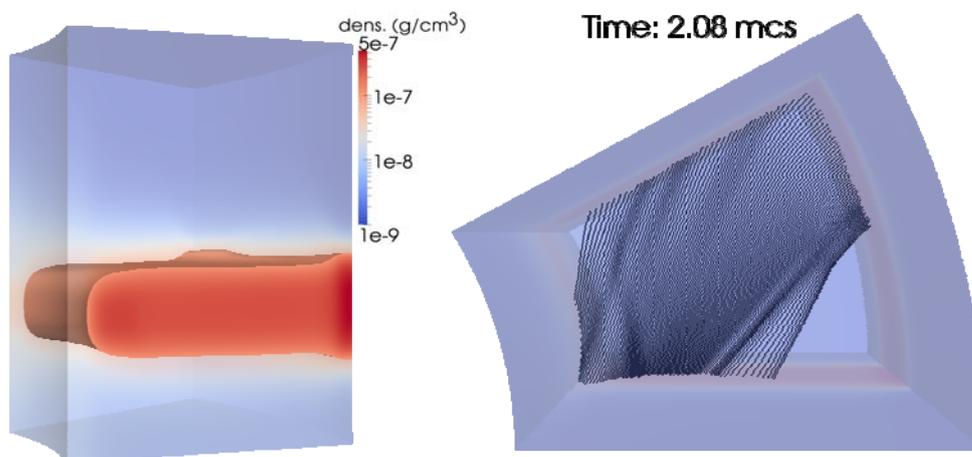


Рис. 9 Распределение плотности плазмы в ППТ в момент прерывания тока (слева). Линии электрического тока в момент срабатывания ППТ (справа).

Заключение

В результате моделирования были определены параметры плазмы ППТ, образованной при электровзрыве одиночной вольфрамовой проволоочки, и время срабатывания прерывателя с такими параметрами. Эти параметры находятся в согласии с экспериментальными данными. Количественные расхождения с экспериментом находятся в разумных пределах, если принять во внимание определенные трудности интерпретации экспериментальных условий в рамках принятой нами модели. Проведенные расчеты и сравнения с экспериментальными данными показывают, что принятая нами модель начального состояния вещества проволоочки в виде плазменного "шнура" является целесообразной моделью для первичной серии вычислительных экспериментов.

Основной вывод по результатам проведенных нами расчетов состоит в том, что вычислительный эксперимент с трехмерной компьютерной моделью плазмодинамики, учитывающей эффекты, определяемые обобщенной формой закона Ома, является информативным инструментом. Численное моделирование позволяет проанализировать экспериментальные данные, и уточнить условия последующих экспериментов, такие, как размер и толщина взрывающейся проволоочки, ток генератора, величина внешнего магнитного поля. Для выполнения дальнейших численных исследований функциональных свойств ППТ на основе взрывающейся проволоочки и оптимизации конструкции такого прерывателя требуется уточнение компьютерной модели, в частности, за счет включения в нее описания процесса плазмообразования при взрыве проволоочки. Целесообразно также изучить вопрос о возможности постановки модифицированных граничных условий по электромагнитному полю и о включении в полную систему решаемых уравнений дополнительного уравнения, описывающего внешнюю электрическую цепь.

Литература

1. Азизов Э.А., Алиханов С.Г., Велихов Е.П. и др. Проект "Байкал". Отработка схемы генерации электрического импульса // ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез. 2001. Вып. 3. С.3.
2. Бухаров В.Ф., Власов Ю.В., Демидов В.А. Плазменные прерыватели микросекундных мегаамперных токов // ЖТФ, 2001, т.71, в.3, С. 57-68.
3. Долгачев Г.И., Масленников Д.Д., Ушаков А.Г., Федоткин А.С., Ходеев И.А., Шведов А.А. Динамика заполнения плазмой зазора плазменного прерывателя тока поперек сильного магнитного поля // Физика плазмы, 2011, том 37, № 2, С. 193-198.

4. Баринов Н.У., Будков С.А., Данько С.А. и др. Модернизированная установка РС-20 для исследования характеристик плазменного прерывателя тока // ПТЭ, 2002, № 2, С.112-119

5. Бутслов М.М., Степанов Б.М., Франченко С.Д. Электронно-оптические преобразователи и их применение в научных исследованиях. М. «Наука», 1978, С. 368.

6. Долгачев Г.И., Масленников Д.Д., Ушаков А.Г. и др. Динамика заполнения плазмой зазора модуля ППТ установки МОЛ // ПТЭ, 2010, № 6, С.48-55

7. Ананьев С.С. Регистрация полутоновых изображений на импульсных сильноточных установках в условиях сильных электромагнитных полей» Препринт ИАЭ-6440/7. М., 2008, 15 с.

8. Ананьев С.С., Казаков Е.Д., Шведов А.А. Беспараллаксная шестикадровая электронно-оптическая камера для исследований в области импульсного УТС и других процессов // ВАНТ, сер. Термоядерный синтез, 2012, вып.2. С. 89.

9. V. Gasilov et al. Towards an Application of High-Performance Computer Systems to 3D Simulations of High Energy Density Plasmas in Z-Pinches // Advances in Parallel Computing, Volume 22, 2012. Applications, Tools and Techniques on the Road to Exascale Computing. Edited by K. De Bosschere et al., pp. 235 - 242.

10. Bobrova N.A., Lazzaro E., Sasorov P.V. Magnetohydrodynamic Two-Temperature Equations For Multicomponent Plasma // Physics of Plasmas. 2005. v. 12. pp. 022-105.

11. Никифоров А.Ф., Новиков В.Г., Уваров В.Б. Квантово-статистические модели высокотемпературной плазмы — М: Физматлит, 2000.

Оглавление

Введение	3
Схема эксперимента.....	4
Система электронно-оптической фотографии на основе ЭП-15.....	6
Результаты эксперимента	8
Обсуждение результатов	10
Вычислительные эксперименты	11
Заключение.....	15
Литература	15