

УДК 531.523

Б.И. Колотилин, С.А. Колесников

РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ УСТАНОВКИ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ПЛАЗМОИДОВ ПРИ ЭЛЕКТРОВЗРЫВАХ СВЁРНУТЫХ В ТОР ПРОВОЛОЧНЫХ СПИРАЛЕЙ

Проведен расчёт параметров установки при варьируемых условиях экспериментов по электровзрывам свёрнутых в тор проволочных спиралей в атмосфере. Представлены экспериментальные результаты в виде осциллограмм процессов передачи энергии в медные спирали различных конструкций.

Введение. Электрический взрыв проволочек давно привлекает внимание исследователей [1]. Проведение экспериментов по получению плазмOIDов (плазменных конфигураций с захваченным магнитным полем) в лабораторных условиях является, безусловно, одним из эффективных способов генерации электромагнитных волн высокой интенсивности, а также изучения высокоэнергетических воздействий на вещество. Эффективность эксперимента может быть более высокой при использовании физических идей, вытекающих из теоретических моделей изучаемых процессов, число которых в настоящее время достаточно велико [2]. Одной из таких моделей является магнитогидродинамическая конфигурация в виде плазмOIDа с тороидальным токовым слоем [3]. Для экспериментальной проверки возможности получения таких плазмOIDов был проведен ряд экспериментов, связанных как с моделированием процессов взаимодействия модели плазмOIDа с моделью искрового разряда, так и с непосредственным получением плазмOIDов на основе электрического взрыва свёрнутых в тор проволочных спиралей [4].

Настоящая работа посвящена проверке результатов работ [3, 4], в ней представлены методики расчёта параметров экспериментальной установки по электрическому взрыву свёрнутых в тор проволочных спиралей и приводятся обновленные экспериментальные результаты.

Моделирование передачи энергии от искрового разряда к плазмOIDу. Теоретическим основанием этих экспериментов является вихревая магнитогидродинамическая модель плазмOIDа [3], которая служит удобной основой исследования взаимодействия потоков электромагнитной энергии с веществом. Согласно этой модели магнитогидродинамическая конфигурация содержит тороидальный токовый слой в виде токового кольца с суммарным током I_{BL} , ко-

торая поддерживается в равновесии внешним давлением вращательно циркулирующего плазмООобразующего газа p_g . При этом ток I_{BL} создаёт тороидальное магнитное поле с напряжённостью H , при которой магнитное давление сравнимо с давлением окружающей среды: $\mu_0 H^2 / 2 \cong p_g$, где μ_0 - магнитная постоянная. Такой плазмOID может сформироваться при искровом разряде с амплитудой импульса тока I_{LL} порядка десятков или сотен килоампер.

Основная энергия в искровом разряде выделяется во время действия возвратных ударов снятия потенциала разрядного канала [5]. Если канал искрового разряда проходит через проводящее кольцо, как показано на рисунке 1, то может реализоваться индукционный разряд – разряд H -типа [6].

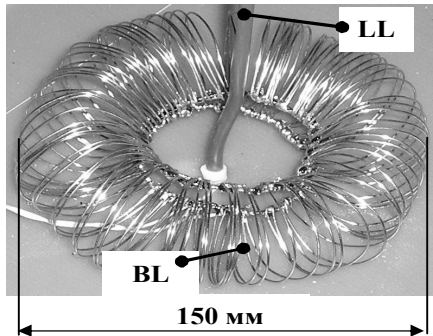
Это предположение было проверено в ходе предварительных экспериментов [4], а в данной работе была проведена перепроверка результатов. Для этого была выполнена модель токового кольца плазмOIDа в виде тороидальной оболочки, набранной из медных проволочных колец **BL**, распаянных в виде тора, рисунок 1,а.

В кольцах был сделан небольшой разрыв, к которому через витую пару проводов **P** подключалась нагрузка в виде резистора **Z**. Магнитное поле создавалось с помощью индуктора **LL** – витка провода большого сечения, пропущенного через центр тора. На индуктор подавались импульсы тока I_{LL} с помощью переключателя **S**, управляющего силовым быстродействующим IGBT-транзистором **VT**, рисунок 1,а.

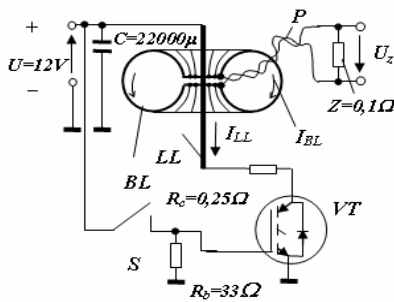
В процессе экспериментов последовательно производилось замыкание и размыкание ключа **S** (рисунок 1,б), и были получены осциллограммы напряжений на нагрузке **Z**, которые приведены на рисунке 2,а и 2,б. Из осциллограмм следует, что в данной схеме процессы передачи энергии

на переднем и заднем фронтах импульса тока индуктора существенно различаются: величина амплитудного значения передаваемого напряжения на заднем фронте импульса существенно выше, чем на переднем фронте, но на переднем

фронте существенно больше период процесса передачи энергии. Нас, в контексте рассматриваемой задачи, интересует процесс передачи энергии на заднем фронте импульса тока индуктора.

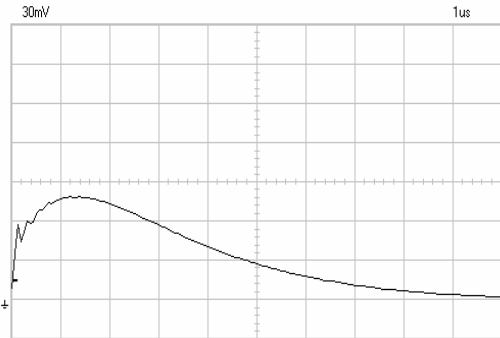


а

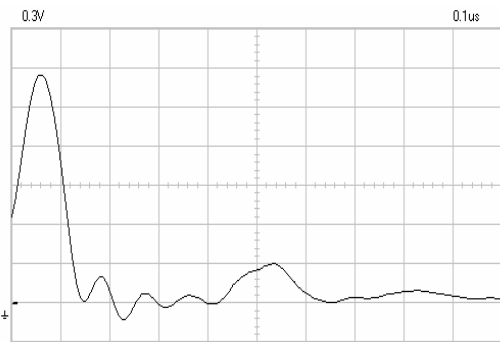


б

Рисунок 1 – Модель разрядного канала искрового разряда (LL) и токового кольца плазмоида (BL) (а); электрическая схема для моделирования процесса передачи энергии (б)



а



б

Рисунок 2 – Осциллограмма U_Z при замыкании (а) и размыкании (б) ключа S. Здесь μs - микросекунды

Физическая идея эксперимента.

При постановке лабораторных экспериментов по получению плазмоедов с диаметром D_N порядка 15 мм потребуется ток индуцирующего импульса [7]

$$I_{LL15\text{мм}} = B_L D_{15\text{мм}}, \quad (1)$$

где B_L - коэффициент, определяющий необходимую амплитуду тока индуктора для генерации плазмоида.

Принимая во внимание, что согласно [7]

$$B_L = \frac{\pi}{k_{\text{звг}}} \sqrt{\frac{2p_g}{\mu_0}} = \frac{\pi}{0,5} \sqrt{\frac{2 \cdot 10^5}{4\pi \cdot 10^{-7}}} \approx 3 \cdot 10^6 \left(\frac{A}{M} \right) \quad (2)$$

из соотношения (1) получаем:

$$I_{LL15\text{мм}} = 3 \cdot 10^6 \cdot 15 \cdot 10^{-3} = 45 \cdot 10^3 (A). \quad (3)$$

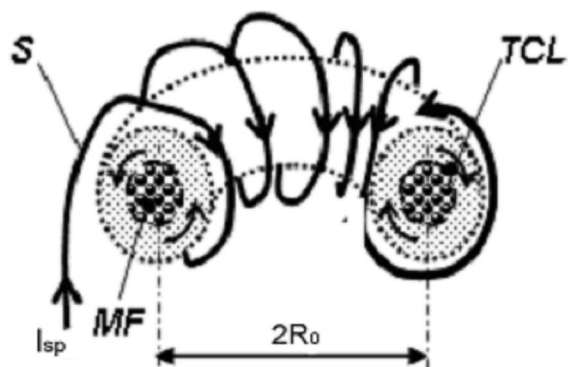
Здесь мы сталкиваемся с двумя серьёзными техническими трудностями, заключающимися в том, что необходимо получить довольно большой ток и цепь с этим током нужно разорвать за очень короткое (микросекунды) время.

Физическая идея, которая позволяет существенно упростить решение задачи, состоит в том, чтобы одновременно в качестве индуктора и разрывного силового ключа можно было использовать один элемент – *свёрнутую в тор проводочную спираль*. При этом необходимо обеспечить соблюдение следующих условий:

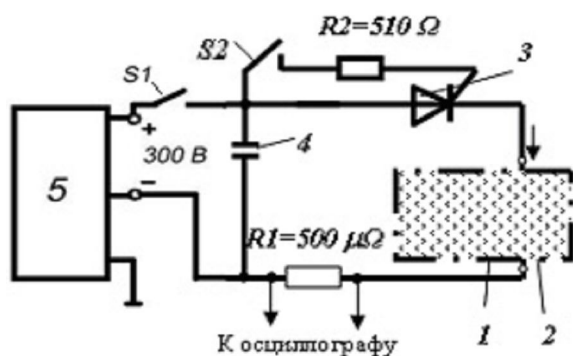
- электрический ток в момент плавления проводочной спирали должен достигать величины, обеспечивающей захват *тороидального магнитного поля* с магнитным давлением, близким к атмосферному давлению;

- должно быть обеспечено *формирование кольцевого газового вихря* перед плавлением проводочной спирали.

Идея эксперимента графически проиллюстрирована на рисунке 3,а. В центре спирали размещен конусообразный или полусферический формирователь газового вихря.



а



б

Рисунок 3 – Физическая идея формирования плазмоида (а) и упрощенная схема экспериментальной установки (б): TLC – формируемый ток-вольный слой, MF – тороидальное магнитное поле, S – проволоочная спираль, 1 – картридж, 2 – проволоочная спираль, 3 – тиристор, 4 – конденсаторная батарея, 5 – регулируемый источник питания, S1, S2 – ключи

Благодаря наличию витков импульс тока спирали I_{SPmax} может быть существенно меньше тока линейного индуктора:

$$I_{SPmax} = B_L D_N / N, \quad (4)$$

где N - число витков спирали, D_N - диаметр плазмоида.

Упрощённая схема экспериментальной установки показана на рисунке 3,б. В ней использована конденсаторная батарея с общей ёмкостью $C = 48000 \text{ мкФ}$, которая через диодный мост заряжалась от стандартной сети через ключ S1 и ограничивающий резистор, в качестве которого использовалась стандартная лампа накаливания.

Число витков спиралей в обоих картриджах 60, диаметр медной проволоки - 0.5 мм, диаметр спирали - 5 мм, а диаметр тора – 15 мм. В этом случае расчетное значение необходимой амплитуды импульса тока согласно формуле (4) составляет 750 А, что является вполне приемлемой

величиной и облегчает проведение эксперимента.

Расчёт параметров эксперимента. Значение энергии, которая должна быть накоплена в конденсаторной батарее для электровзрыва, содержит три составляющих:

$$Q = Q_{плав} + Q_{ост} + Q_{маг}, \quad (5)$$

где $Q_{плав}$ – энергия плавления проволоочной спирали; $Q_{ост}$ – остаточная энергия на конденсаторе, которая необходима для того, чтобы в момент электрического взрыва обеспечивалась необходимая величина магнитного давления тороидального магнитного поля внутри свёрнутой в тор проволоочной спирали, $Q_{маг}$ – энергия тороидального магнитного поля. Заметим, что по нашим оценкам составляющей $Q_{маг}$ в соотношении (5) можно пренебречь.

Энергия, необходимая для нагрева проволоочной спирали до температуры плавления, рассчитывалась по формуле:

$$Q_{плав} = c_m m (T_{пл} - T_{ком}), \quad (6)$$

где c_m – удельная теплоёмкость меди ($380 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$), m - масса медной проволоочки, $T_{пл}$ – температура плавления, $T_{ком}$ – комнатная температура.

Остаточную энергию найдем из соотношения:

$$Q_{ост} = \frac{C \cdot U_{ост}^2}{2}, \quad (7)$$

где C - ёмкость батареи конденсаторов (48000 мкФ), $U_{ост}$ - остаточное напряжение на конденсаторах.

Остаточное напряжение на конденсаторах найдём через закон Ома:

$$U_{ост} = i_m \cdot R_{плав}, \quad (8)$$

где i_m - амплитуда импульса тока в проволоочной спирали, $R_{плав}$ - сопротивление спирали, свёрнутой в тор, при плавлении.

Величина i_m рассчитывалась по формуле [8]:

$$i_m = I_m \cdot \frac{B}{N} \cdot \frac{1}{k_{захв}}, \quad (9)$$

где $I_m = 2\pi \cdot R_{тор} \cdot H$ - амплитуда тока в плазмоеде, $k_{захв} \approx 0.5$ - коэффициент захвата магнитного поля индуктора тороидальной оболочкой согласно расчетам, $R_{тор}$ - радиус тора, H - напряжённость поля.

$R_{\text{плав}}$ рассчитывалась с учетом температурного коэффициента для температуры плавления меди ($1083\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Расчет по представленным выше соотношениям показал, что для электровзрыва проволоки необходим запас энергии в конденсаторе 2594 Дж (1149 Дж при двух ветвях спирали).

Связь между электрическими параметрами установки и размерами спирали. Значения емкости конденсатора C и напряжения U , необходимые для взрыва спирали, можно рассчитать по известной величине требуемой энергии. Из соотношений (5) и (7), пренебрегая величиной $Q_{\text{маг}}$, получаем:

$$C = \frac{2 \cdot (Q - Q_{\text{плав}})}{U_{\text{ост}}^2}. \quad (10)$$

Значения $Q_{\text{маг}}$ и $U_{\text{ост}}$ определяются соотношениями (6) и (8)-(9), в которые входят характеристики спирали.

Величина напряжения вычисляется по простой формуле

$$U = \sqrt{\frac{2 \cdot Q}{C}}. \quad (11)$$

Разработана компьютерная программа, обеспечивающая расчет необходимых значений емкости и напряжения по заданным величинам диаметра и длины провода спирали, удельного сопротивления и температуры его плавления.

Результаты экспериментов. В процессе экспериментов были произведены электровзрывы проволоочных спиралей различной конфигурации:

- линейная проволоочная спираль;
- проволоочная спираль, свёрнутая в тор;
- две проволоочные спирали, образующие тор.

Каждый опыт фиксировался на видеокамеру Sony Digital Handycam со скоростью съёмки 15 кадр/сек.

При электровзрыве линейной проволоочной спирали с помощью нашего оборудования не было зафиксировано образование долгоживущей конфигурации.

В ходе проведения экспериментов со спиралями были получены долгоживущие светящиеся образования (плазмоиды с диаметром 15-30 мм). Для одной спирали время жизни плазмоидов составило около 0,5 секунды, а для двух – около 0,2 секунды.

Энергия конденсатора для первого случая составляла приблизительно 2457 Дж, а для второго - 1215 Дж.

Заключение. Таким образом, разработанная методика расчета параметров установки для получения плазмоидов при электровзрывах свёрнутых в тор проволоочных спиралей дает удовлетворительные результаты и может быть рекомендована для практического применения вместе с соответствующей компьютерной программой.

Достоверность результатов расчета подтверждена экспериментально для нескольких спиралей с различными параметрами. Характеристики наблюдавшихся в экспериментах долгоживущих плазмоидов соответствуют литературным данным.

Библиографический список

1. Взрывающиеся проволоочки // Под ред. А.А. Рухадзе. М.: ИИЛ, 1963. – 341 с.
2. Физика экстремальных состояний вещества - 2007 // Под ред. В.Е. Фортова и др. Черноголовка. Ин-т проблем химической физики РАН, 2007. – 340 с.
3. Власов А.Н. О возможности формирования тороидального токового слоя при искровом разряде // ЖЭТФ. 1990. Т. 97. С. 468-475.
4. Власов А.Н., Колесников С.А., Маношкин А.Б. Об особенностях электрического взрыва проволоочной спирали, свёрнутой в тор // Тезисы XXII международной конференции «Воздействие интенсивных потоков энергии на вещество» Эльбрус – 2007. РАН, 2007. С.192-193.
5. Райзер Ю.П. Физика газового разряда. М.: Наука, 1977. – 592 с.
6. Власов А.Н., Власов Д.А., Киселёв Ю.В. Особенности индукционного разряда при однополярном импульсном питании // Известия Академии Наук. Серия физическая. 2003. Том 67. № 9. С. 1241-1243.
7. Власов А.Н., Власов Д.А. Исследование процессов передачи энергии от линейной к шаровой молнии по модели индукционного разряда // Холодная трансмутация ядер химических элементов и шаровая молния // Материалы 12-й Российской конференции по холодной трансмутации ядер химических элементов и шаровой молнии. М. ©НИЦ ФТП «Эрзион», 2005. С. 239.
8. Власов А.Н. Экспериментальное моделирование шаровой молнии на основе электровзрыва свёрнутой в тор проволоочной спирали // Проблемы холодной трансмутации ядер химических элементов и шаровой молнии. (Российская академия наук, Российское физическое общество, Ядерное общество России и др. Материалы 13-й Российской конференции по холодной трансмутации ядер химических элементов и шаровой молнии, Дагомыс, Сочи 11-18 сентября 2005 г.). М.: НИЦ ФТП "Эрзион", 2006. С. 290-297