

## Экспериментальное исследование электрического разряда в продольном потоке водорода

Г.А. Вареников, Е.П. Горелик, А.Б. Каторгин, Б.И. Каторгин, М.Ю. Марин, В.А. Пинчук.

Сообщаются результаты экспериментального исследования электрического разряда в газовых потоках при одинаковых направлениях векторов электрического поля и скорости потока газа. Зарегистрирован ряд эффектов при изменяющемся удельном энергокладе. Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 08-08-00942).

### Введение

В настоящей работе приводятся результаты экспериментального исследования разряда, в основном, в водороде и для сравнения в других газах при одинаковых направлениях векторов электрического поля и скорости газового потока. Цель работы – поиск режимов формирования разряда без предварительной ионизации среды и проверка теоретических предположений о формировании в разряде областей с избыточным зарядом [1,2].

### Экспериментальная установка

Схема и общий вид экспериментальной установки показаны на рис. 1 (а и б соответственно).

Установка состоит из камеры смешения 1, обеспечивающей прием в определенных количествах одного либо нескольких различных газов, их смешение до однородной по составу смеси и ввод в рабочий канал установки через электроизоляционную проставку 2. В экспериментах использовался или чистый водород  $H_2$  или смесь водорода и дейтерия  $H_2 + D_2$ . Для проверки эффектов, которые будут описаны ниже, были проведены сравнительные эксперименты на газах  $N_2$ ,  $Ar$ ,  $He$  и их смесях. Разряд создавался в промежутке между анодом ( $A$ ) и катодом ( $K$ ) внутри кварцевой трубы диаметром 38 или 25 мм. Газовый поток после разрядной зоны через измерительную проставку 3 и сопло 4 направлялся в приемную систему 5 стенда и сбрасывался в вакуумную камеру, либо в атмосферу. Материал электродов – бронза. Длины преданодного и закатоного участков канала сохранялись практически постоянными ( $\sim 500$  мм). Длина рабочего участка ( $A - K$ ) варьировалась от 70 до 200 мм. Варьировался проходной диаметр сопла 4 (10, 13, 16 и 20 мм).

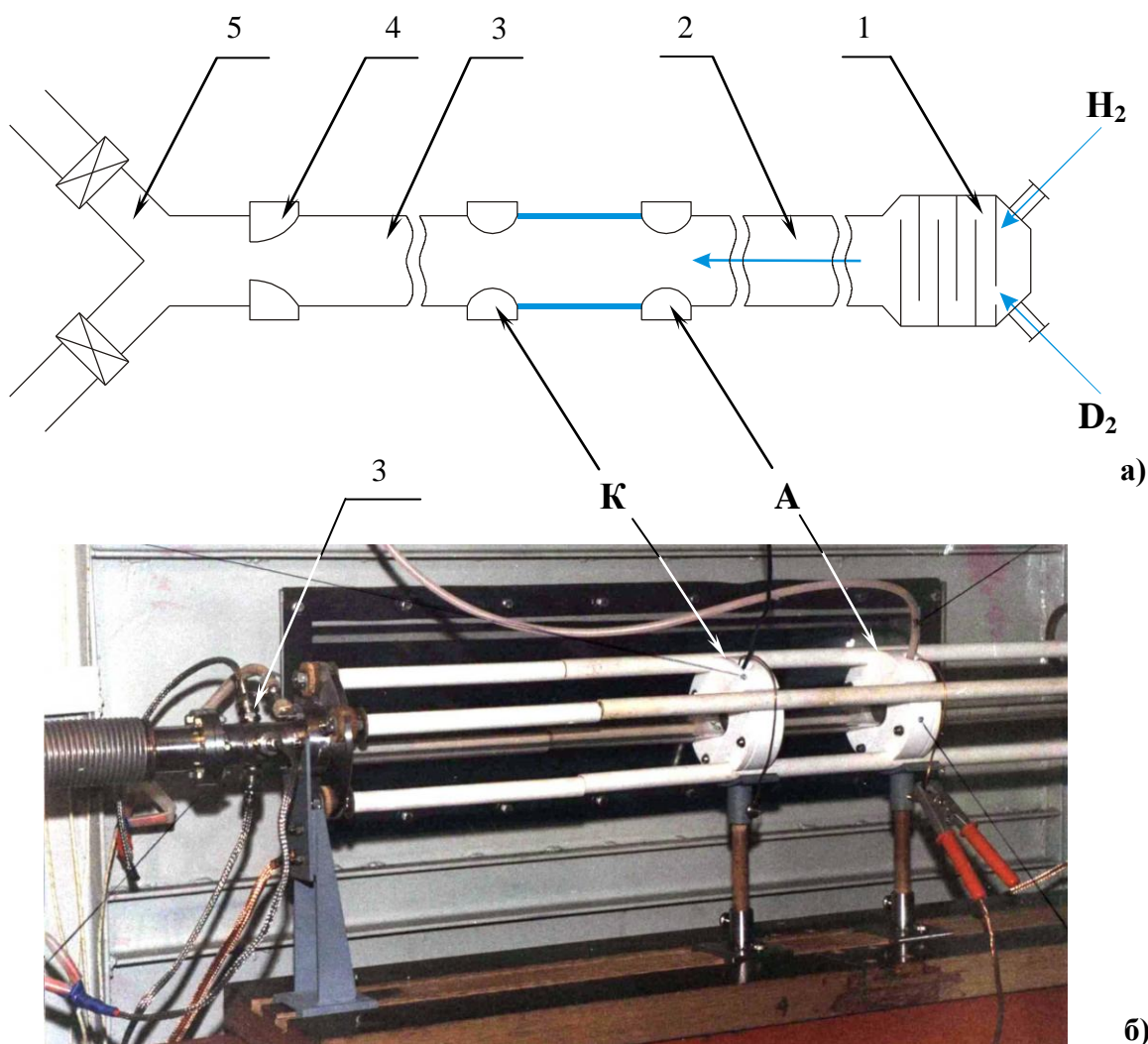
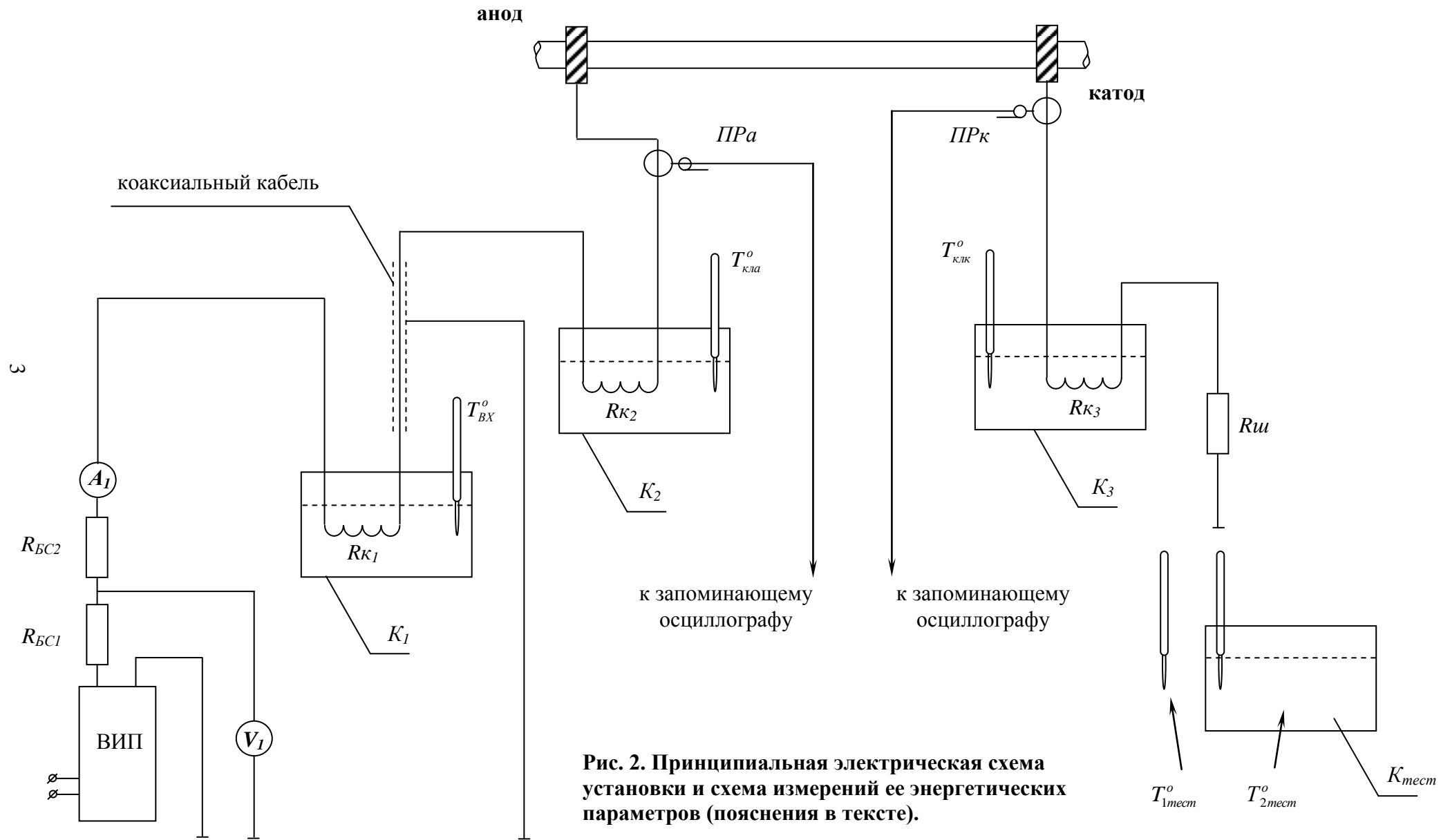


Рис. 1. Экспериментальная установка (а – схема установки, б – общий вид).

Использованием взаимозаменяемых элементов канала с различиями в характеристических размерах и конструктивном оформлении, варьированием состава и расходов рабочих сред, наконец, выводом потока либо в атмосферу, либо в вакуум-камеру обеспечивались возможности изменения в широких диапазонах общих условий организации эксперимента и характеристик газоразрядной плазмы. Уровни абсолютных давлений в рабочем участке канала варьировались при этом в диапазоне от десятых долей атмосферы до полутора атмосфер.

Принципиальная электрическая схема установки и схема измерений ее энергетических параметров приведена на рис. 2. От высоковольтного источника питания (ВИП) постоянного тока высокое напряжение подается к разрядному промежутку (анод – катод). Подключение плюса источника к аноду осуществлялось через балластные сопротивления  $R_{BC1}$  и  $R_{BC2}$  коаксиальным кабелем длиной 7,3 м с собственной емкостью  $\sim 730$  пФ и индуктивностью  $\sim 1,8$  мкГн. Минус источника заземлен. Напряжение холостого хода ВИП – 35 кВ, ток короткого замыкания установки – 1 А.

Напряжение и ток разрядной цепи после источника питания регистрировались статическим киловольтметром С96  $V_I$  и амперметром постоянного тока  $A_I$ . Импульсно-периодический ток перед анодом и после катода регистрировался поясами Роговского ПРа и ПРк, которые представляют собой замкнутый соленоид с равномерной намоткой. Катод заземлялся через шунтирующее сопротивление  $R_{ш} = 0 \div 16$  Ом.



**Рис. 2. Принципиальная электрическая схема установки и схема измерений ее энергетических параметров (пояснения в тексте).**

Исходя из того, что измерения при проведении экспериментов на установке проводились в условиях значительных электромагнитных помех и невозможности в данной конструкции и на данном этапе обеспечить защиту от помех на необходимом уровне, было отдано предпочтение измерению токов в разрядной цепи калориметрическим методом. Нагреватели калориметров  $K_1$  (входной калориметр),  $K_2$  (анодный калориметр) и  $K_3$  (катодный, выходной калориметр) были изготовлены из никелевой фольги. Сопротивление нагревателей  $R_{K1}, R_{K2}$  и  $R_{K3}$  – 2,2 Ом. Нагреватели помещены в сосуды Дьюара с объемом воды 250 см<sup>3</sup>. Температура воды в калориметрах измерялась керосиновыми термометрами. Для оценки влияния электромагнитного излучения разряда на показания керосиновых термометров калориметров абсолютно идентичные термометр ( $T_{1\text{месм}}^0$ ) и термометр в тестовом калориметре  $K_{\text{месм}}$  ( $T_{2\text{месм}}^0$ ) были расположены вне потока газа на расстоянии 0,5 м от разрядной зоны и отключены от электрической цепи установки. За время пуска изменение температуры на них не зарегистрировано. Таким образом, электромагнитное излучение разряда на расходах, обеспеченных при испытаниях (до 5,5 г/сек), не влияет на показания керосиновых термометров калориметров.

Для определения временных спектральных и энергетических характеристик электромагнитного излучения проводились измерения магнитной индукции и напряженности электрического поля при помощи антенн различного типа с записью измеряемого сигнала на пишущий цифровой осциллограф “Tektronix TDS–3054”. Для измерения величины напряженности электрического поля использовался широкополосный датчик ИППЛ–5М, конструктивно являющийся полосковой линией, имеющей чувствительность 0,536 мВ/В/м и согласованный с 50–омным входом осциллографа. Измеренные сигналы в дальнейшем обрабатывались на ПЭВМ. Гармонический анализ сигналов производился с помощью быстрого преобразования Фурье в программе “Mathcad 7”. По измеренным напряжениям с выхода датчика для каждого опыта были рассчитаны значения напряженности электрического поля в точке измерения, плотность потока энергии, а также импульсная и средняя мощность электромагнитного излучения.

## Результаты экспериментов

Характерный вид разряда представлен на рис 3. На фотографии видно, что разряд состоит из множества жгутов. Как показала фотосъемка разряда на снимках с разрешением  $\sim 5$  мс одновременно зарегистрировано до 100 плазменных жгутов. Такая структура канала называется контрагированный столб разряда [3–5]. Известны [6–8] методы возбуждения таких разрядов, исследованы их энергетические и временные характеристики.

В наших условиях наблюдались некоторые особенности разряда. При изменении удельного энерговклада (при постоянном напряжении подводимого питания к разрядному промежутку варьировались расходы водорода) в разряде наблюдался переход разряда в режим, при котором средняя энергия, выделяемая в калориметрах  $K_2$  и  $K_3$ , больше энергии, выделяемой в калориметре  $K_1$ . Этот эффект сопровождается скачкообразным изменением цвета разряда (до порога эффекта – синий, после прохождения порога – красный) и скачкообразным увеличением уровня электромагнитного излучения разряда. На других газах или их смесях ( $N_2$ ,  $Ar$ ,  $He$  без добавления  $H_2$  или  $D_2$ ) при любых расходах таких эффектов не наблюдалось. В других работах [6–8] такие эффекты не наблюдались при противоположном направлении вектора направления электрического поля и вектора скорости газового потока.

После возникновения разряда при расходах до  $\sim 3$  г/сек (удельный энерговыход –  $6,04 \cdot 10^{-12}$  Дж/молекулу) цвет разряда – синий (авторы назвали такой режим – “синий режим”), значения токов до анода и после катода в каждый момент времени равны (согласно показаниям калориметров  $K_1$ ,  $K_2$  и  $K_3$ , поясов Роговского анодного  $ПП_a$  и катодного  $ПП_k$ )  $\sim 0,9$  А, что соответствует показаниям амперметра  $A_1$ . При увеличении расхода водорода (от 0,5 до 3 г/сек) токи до анода и после катода незначительно уменьшались. Напряжение на разрядном промежутке составляло  $9 \div 15$  кВ.

При увеличении расхода водорода более 3 г/сек наблюдался резкий переход цвета разряда на красный (авторы назвали такой режим – “красный режим”). Значения тока до анода продолжают незначительно уменьшаться согласно показаниям амперметра  $A_1$  и калориметра  $K_1$  до значения  $\sim 0,5$  А. При этом в калориметрах  $K_2$  и  $K_3$  выделяется энергии больше, чем в калориметре  $K_1$ . При увеличении расхода эта разница увеличивается. На рисунках 4 и 5 представлены характерные осциллограммы анодного и катодного токов, полученные с помощью поясов Роговского, на “красном” режиме. Как видно из осциллограмм в разрядной цепи возникают импульсы разрядного тока, имеющие колебательный характер. Причем, амплитуда импульсов отличается в  $5 \div 7$  раз. Частота следования импульсов разрядного тока, как видно из осциллограммы, составляет примерно 5 кГц, частота колебаний разрядного тока в импульсе составляет примерно  $2 \cdot 10^6$  Гц.

Если за среднеинтегральное действующее значение тока, протекающего через калориметры, условно принять ток, рассчитанный по формуле

$$I_{\text{клк}} = \sqrt{\frac{C_p \cdot M \cdot \Delta T_{\text{кл}}}{t_{\text{исп}} \cdot R_{\text{кл}}}},$$

где  $C_p$  – теплоемкость воды;  
 $M$  – масса воды в калориметре;  
 $\Delta T_{\text{кл}}$  – изменение температуры воды в калориметре;  
 $t_{\text{исп}}$  – время проведения эксперимента;  
 $R_{\text{кл}}$  – сопротивление нагревателя калориметра;

то в зависимости от расхода водорода зарегистрирован ток после катода от 3,5 до 7 А и ток до анода от 3,5 до 14 А. Соответственно зависимости токов на разных участках цепи от расхода водорода представлены на рис. 6.

Описанный эффект проявляется до расхода  $\sim 6,5$  г/сек (что соответствует энерговыходу  $\sim 1,9 \cdot 10^{-12}$  Дж/молекулу), далее разряд переходит в дуговой.

Электромагнитное излучение разряда при “синем” режиме наблюдается в широкой полосе частот от  $10^6$  до  $10^9$  Гц; средняя мощность излучения составляет  $0,5 \div 1$  Вт, импульсная до 50 Вт.

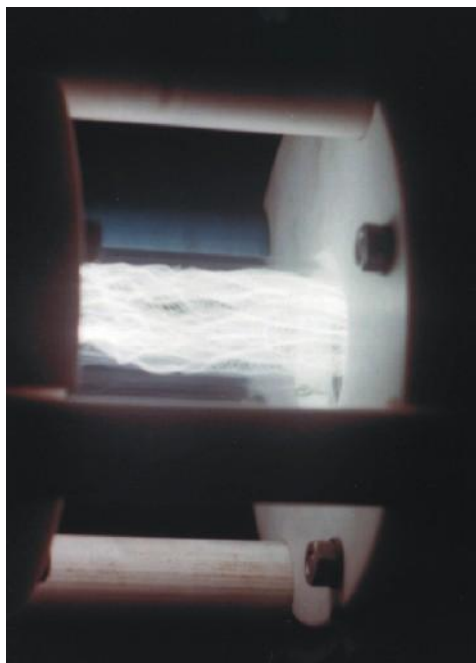
При “красном” режиме электромагнитное излучение генерируется в виде радиоимпульсов экспоненциальной формы с частотой следования  $5 \cdot 10^4 \div 2 \cdot 10^5$  Гц с разбросом максимальной напряженности электрического поля в точке измерения в различных опытах от 50 до 200 В/м; максимум спектральной плотности частоты заполнения лежит в диапазоне от  $2 \cdot 10^6$  до  $50 \cdot 10^6$  Гц, можно выделить участки около 6, 8,  $10 \cdot 10^6$  Гц, а также около  $(2 \div 3) \cdot 10^7$  Гц; средняя мощность излучения составляет  $20 \div 300$  Вт, импульсная  $250$  Вт  $\div 12$  кВт.

Для оценки влияния электромагнитного излучения на величину сопротивления нагревателей в калориметрах была проведена калибровка калориметров, в результате которой была построена зависимость сопротивления нагревателя калориметра от частоты. Калибровка показала, что на частоте 1 МГц – сопротивление калориметра

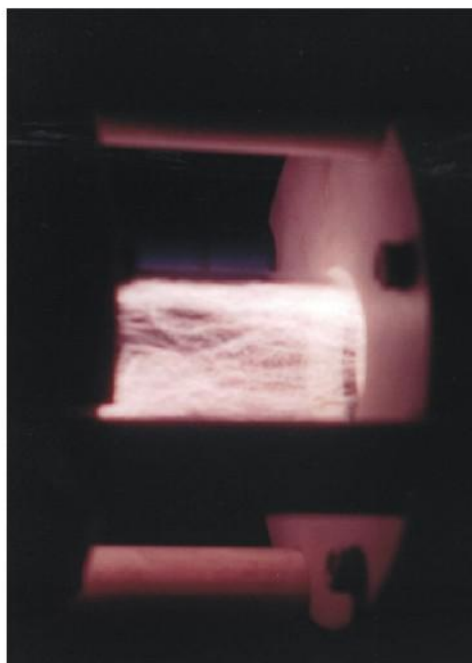
увеличивается на 1% и это изменение можно не учитывать. На частоте 5 МГц сопротивление калориметра может возрасти до 3-х раз и соответственно ток уменьшится в  $\sqrt{3} = 1,7$  раза.

Цель оптимизации геометрических размеров установки (варьировались длина рабочего участка, диаметр газоразрядной трубки и проходной диаметр сопла) – достижение максимального катодного тока. Максимальные значения достигнуты при длине рабочего участка 85 мм, диаметре газоразрядной трубки 24 мм и диаметре сопла 13 мм.

Добавление к водороду до 50% дейтерия приводит к возрастанию среднеинтегрального действующего значения тока после катода с 7 до 20 А.

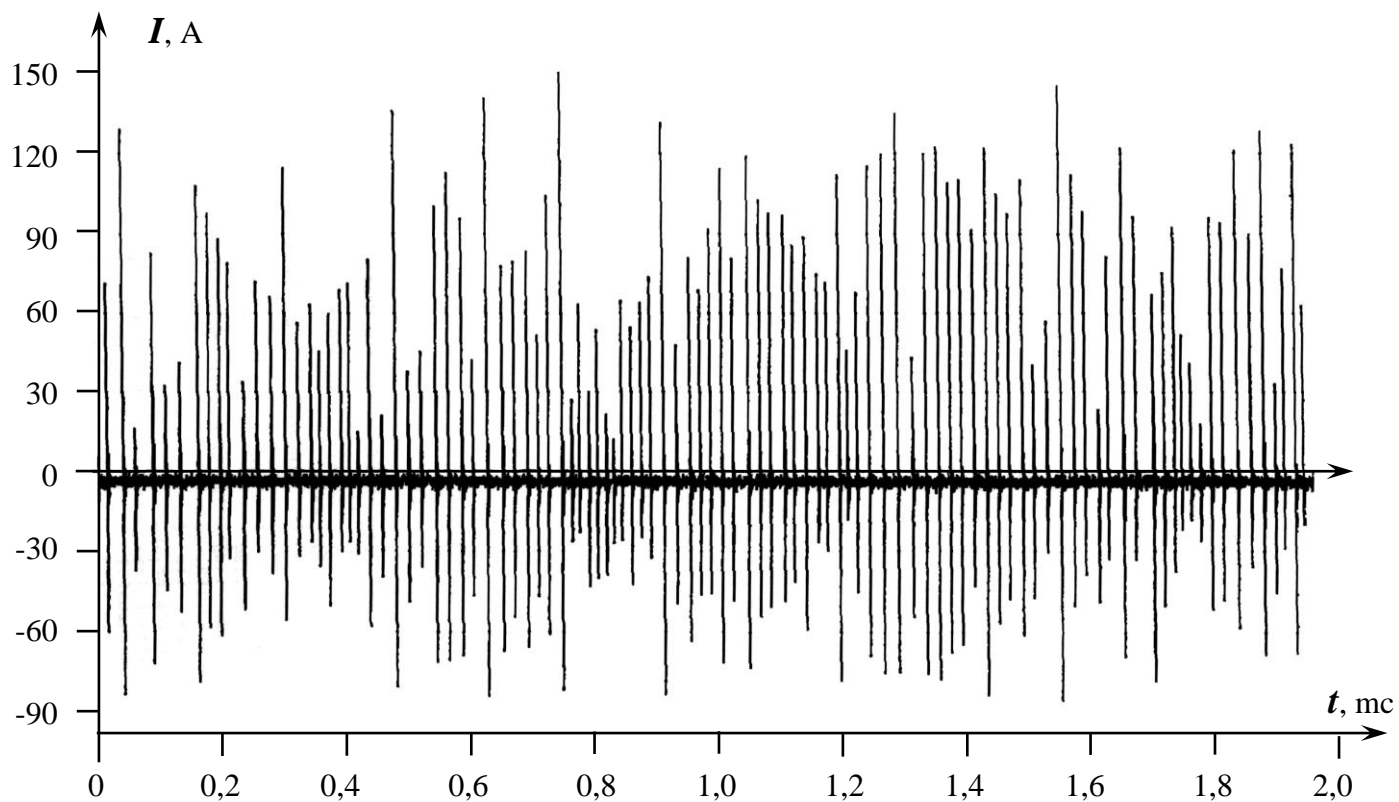


а)

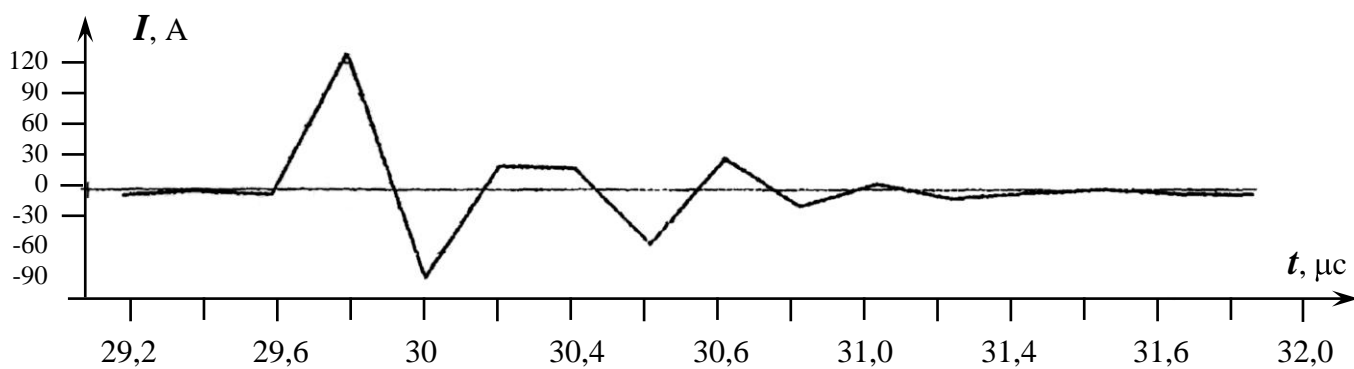
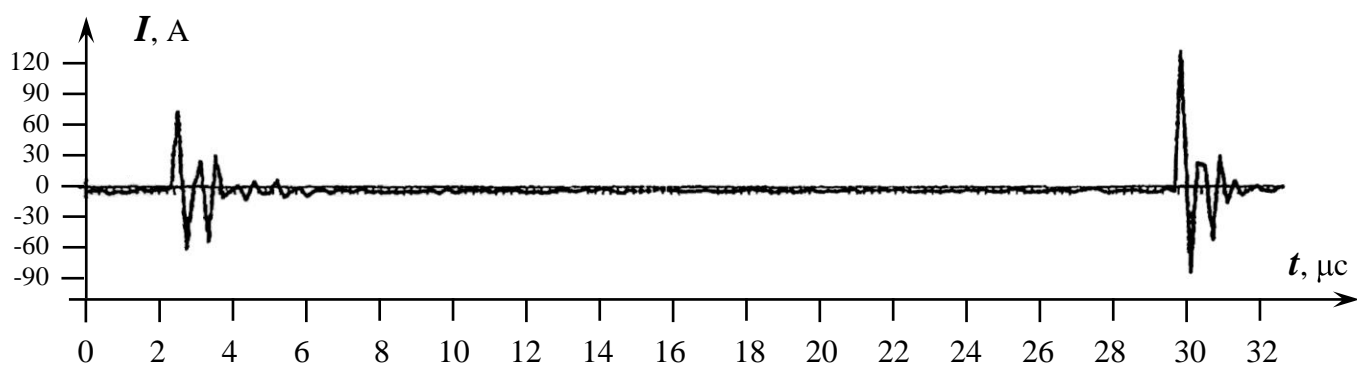
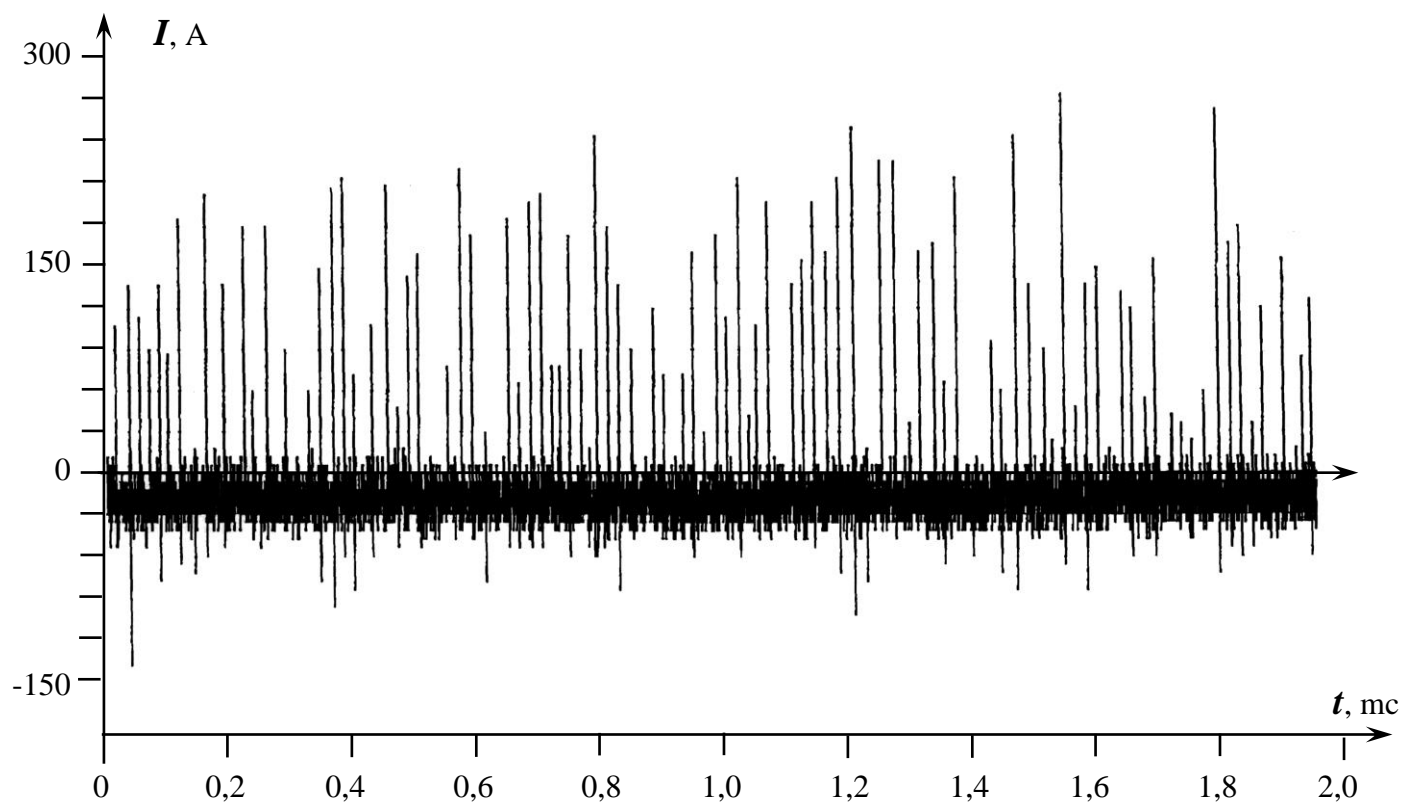


б)

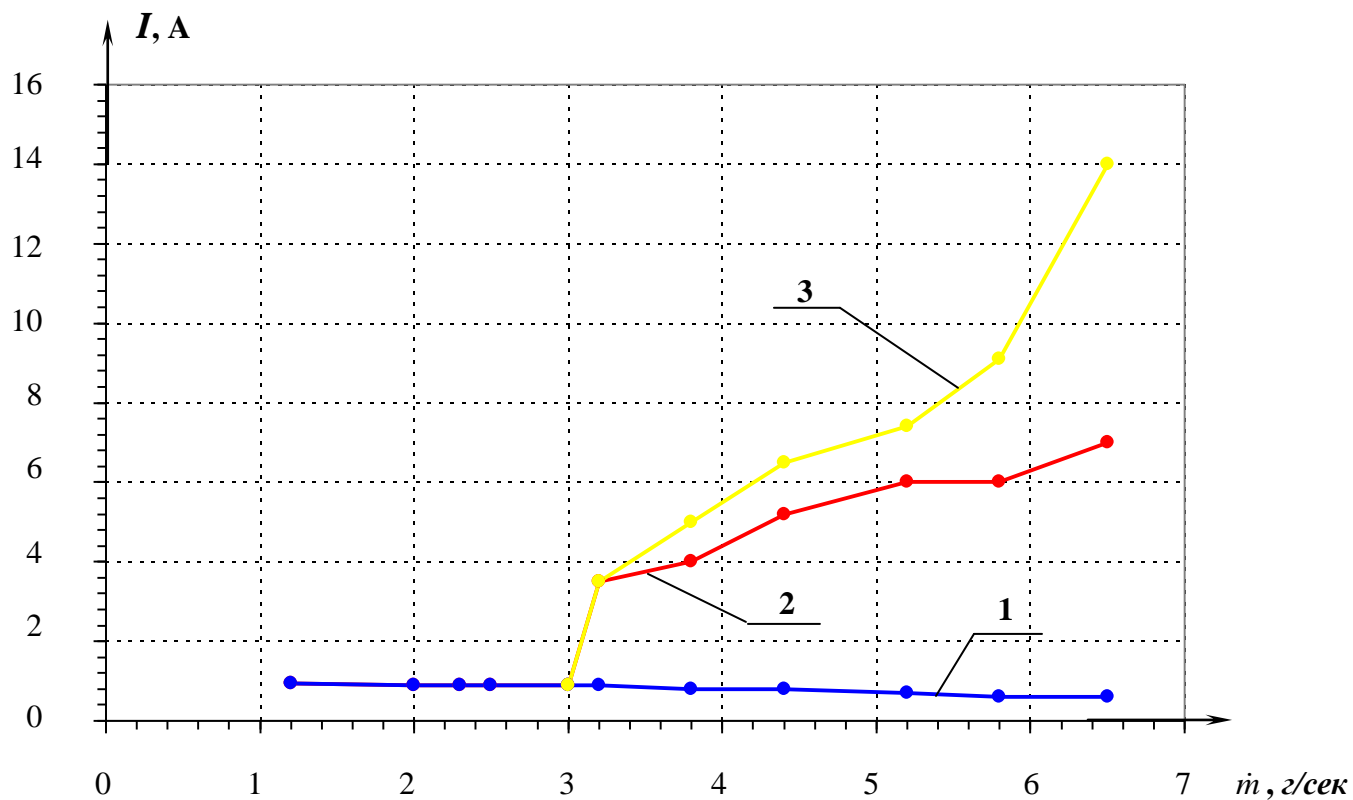
**Рис. 3. Внешний вид разряда, газовая среда – водород (а – “синий” режим, б – “красный” режим).**



**Рис. 4. Осциллограмма тока в анодной цепи в “красном” режиме.**



**Рис. 5. Осциллограммы тока в катодной цепи в “красном” режиме на различных развертках.**



**Рис. 6. Зависимости от расхода водорода токов:**

- 1 – до коаксиального кабеля;**
- 2 – после катода;**
- 3 – до анода.**

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Полученные результаты носят предварительный характер, исследования будут продолжены для дальнейшей детализации и уточнения.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Pinchuk V.A. The nature and energy sources of ball lightning. // Proceedings of 24-th International Electric Propulsion Conference/ Paper IEPC-95-233. Moscow, september 19-23, 1995, p. 1-11.
2. Пинчук В.А. Общие особенности состояний и механизмов теплопереноса в системах с нескомпенсированным электрическим зарядом // Труды 2-го международного семинара “Внутрикамерные процессы, горение и газовая динамика дисперсных систем”. – Санкт-Петербург, Россия, 1997, т. 1, с. 19-47.
3. Райзер Ю.П., 1980, УФН, т. 132, 549-581.
4. Королев Ю.Д., Месяц Г.А. Автоэмиссионные и взрывные процессы в газовом разряде. Новосибирск: Наука, 1982. 253 с.
5. Велихов Е.П., Ковалев А.С., Рахимов А.Т. Физические явления в газоразрядной плазме. М.: Наука, 1987. 160 с.
6. Королев Ю.Д., Месяц Г.А. Физика импульсного пробоя газов. М.: Наука, 1991. 223 с.
7. Напартович А.П., Старостин А.Н.// Химия плазмы. №6. М.: Атомиздат, 1979, с. 220-221.
8. Месяц Г.А., Бычков Ю.И., Кремнев В.В.// УФН. 1972. т.107. №С. 201-228.