

УДК 533.9+518.5+537.511

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ФИЗИКА

С. И. АНДРЕЕВ, В. Я. ГОЛЬДИН, Д. А. ГОЛЬДИНА, Е. А. ЗОБОВ,  
Н. Н. КАЛИТКИН, член-корреспондент АН СССР А. А. САМАРСКИЙ, В. Г. СОКОЛОВ,  
Б. Н. ЧЕТВЕРУШКИН

## ИМПУЛЬСНЫЕ ИЗЛУЧАЮЩИЕ РАЗРЯДЫ В ИНЕРТНЫХ ГАЗАХ

Электрические разряды в плотных газах имеют многочисленные технические приложения и позволяют изучать физические свойства плазмы. Эффективное использование разнообразных физических явлений, возникающих в ходе разряда (образование плазмы, ударные волны, интенсивное излучение, протекание сильных токов, возникновение высоких напряжений и т. д.) требует всестороннего изучения таких разрядов.

Большие возможности для комплексного изучения подобных явлений дает одновременное исследование с помощью натурного и вычислительного эксперимента. Базой вычислительного эксперимента является математическая модель, реализованная на ЭВМ. Такое совместное исследование позволяет: а) выяснить полноту принятой математической модели, область ее применимости, а также уточнить модель; б) найти детальную картину процессов в разряде и правильно интерпретировать экспериментальные измерения; в) изучить зависимость основных характеристик процесса от большого числа параметров и провести оптимизацию экспериментальной установки.

Себестоимость создания подобных математических моделей, реализованных на ЭВМ, может быть очень большой. Однако эти затраты быстро окупаются, поскольку такая модель позволяет изучать весьма широкий класс физических объектов. При этом центр тяжести переносится на определение физических свойств конкретных веществ и учет новых явлений.

2. В качестве исходного пункта данной работы мы использовали математическую модель задач магнитной радиационной газодинамики (МРГД) <sup>(1)</sup>, и экспериментальные данные по импульсным излучающим разрядам и физическим свойствам плазмы <sup>(2-6)</sup>. Математическая модель была разработана в Институте прикладной математики АН СССР в связи с различными физическими задачами.

Развитие в <sup>(7, 8)</sup> математической модели <sup>(1)</sup> и более аккуратное определение свойств веществ позволили получить детальное количественное совпадение по экспериментально наблюдавшимся величинам для разрядов типа «обратный Z-пинч» в ксене. Принятая модель определяется одномерными уравнениями МРГД. Перенос излучения описывается многогрупповым кинетическим уравнением <sup>(7)</sup>. Поведение электромагнитного поля описывается в электротехническом приближении <sup>(8)</sup>. Коэффициенты электропроводности, электронной теплопроводности, уравнения состояния взяты из <sup>(9)</sup>. Коэффициент поглощения ксенона построен с учетом <sup>(4)</sup>.

Экспериментальное изучение разрядов проводилось в инертных газах: ксене, аргоне и гелии при высоком начальном давлении — от 10 до 600 мм рт. ст. При этом с помощью скользящего разряда удалось создать разряд со сплошной коаксиальной цилиндрической плазменной оболочкой в конфигурации типа «обратный Z-пинч». Как отмечено в <sup>(10)</sup>, такие разряды в плотных газах ранее не изучались.

Схема экспериментальной установки приведена на рис. 1. Ток разряда течет по центральному металлическому стержню и возвращается по плаз-

менному цилиндру. Начальный токоведущий слой инициируется скользящим искровым разрядом по внешней поверхности центрального стержня. На рис. 2 приведены фоторазвертки разряда, из которых видна хорошая цилиндрическая симметрия процесса.

На рис. 3а, б в качестве примера приведено сравнение результатов расчета и эксперимента для расходящегося разряда с параметрами: начальное давление ксенона  $p=180$  тор, емкость  $c=30$  мкф, паразитная индуктивность  $L=0,250$  мкГн, напряжение конденсаторной батареи  $U=20$  кв,

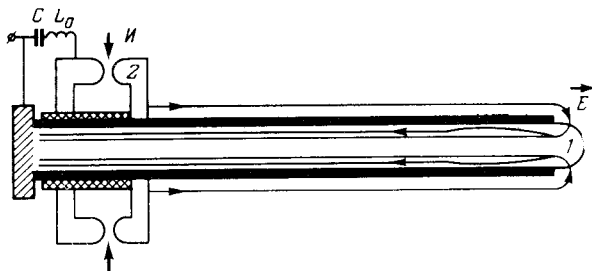


Рис. 1. Схема экспериментальной установки.  $C$  — емкость,  $L_0$  — паразитная индуктивность,  $И$  — искровой разрядник; стрелки показывают направление тока, текущего от электрода 2 по плазменному цилиндру к электроду 1 — металлическому стержню, покрытому диэлектрической пленкой

сопротивление цепи  $R=1,5 \cdot 10^{-2}$  ом, начальная энергия контура  $\varepsilon=6$  кдж, длина разрядного промежутка  $l=10$  см, радиус центрального электрода 1 см. Разряд проводился в камере с кварцевыми окнами, удаленными от оси на расстояние 15 см.

Видно хорошее согласие расчета с экспериментом. Отметим, что энергия, выделяемая на внешнем сопротивлении, и энергия, вкладываемая в разряд сравнимы по величине. При этом основная часть энергии вкладывается в разряд меньше чем за половину периода (это важно для применимости одномерной модели). Половина энергии разряда выделяется в виде излучения. Взаимодействие интенсивного излучения со стенками приводит к испарению со стенок. Это вызывает вторичные явления при прохождении тока через нуль.

### 3. Перечислим основные результаты работы:

а) Экспериментально исследованы коаксиальные расходящиеся разряды в инертных газах для широкого диапазона давлений. Экспериментально получена сплошная плазменная оболочка с хорошей цилиндрической симметрией.

б) Построена одномерная математическая модель излучающих разрядов типа прямого и обратного Z-пинчей и показана ее адекватность эксперименту. Получено (по-видимому, впервые) хорошее согласие с экспериментом даже таких тонких характеристик, как яркость разряда на разных длинах волн, сильно зависящая от небольших вариаций температуры и плотности.

в) Показано, что излучение подобных разрядов существенно неравномерно. Фронт распространения тепла является размазанным «языком прогрева», а не четким фронтом температурной волны. Обнаружено, что основной поток излучения формируется в периферийной области, в которой температура ниже, а плотность выше, чем в центральных областях плазменного кольца. Анализ расчетов показал, что наблюдаемая граница интенсивного свечения является не тепловой волной, а фронтом ионизации (см. также <sup>(11)</sup>). Обычно этот фронт отстает от ударной волны, но при большой скорости ударной волны может с ней совпадать.

Численным моделированием изучено пинцирование разряда скользящим разрядом и взрывом фольги <sup>(8)</sup>. В первом случае показано существование пороговой температуры  $T_n$  (0,3 эв для ксенона). При  $T_0 \geq T_n$  развитие разряда слабо зависит от  $T_0$  (здесь  $T_0$  — температура, достигаемая в скользящем разряде). При  $T_0 < T_n$  разряд затухает. Во втором случае разряд развивается за ударной волной, образующейся в газе при взрыве фольги.

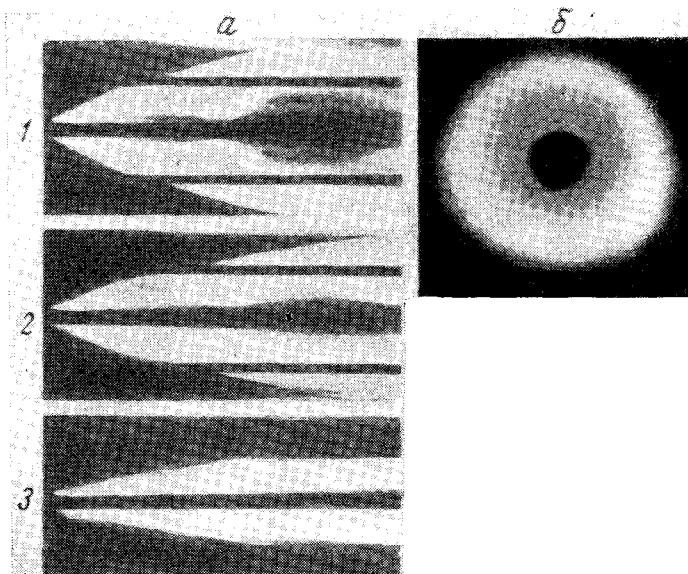


Рис. 2. Фотографии разрядов в ксеноне. *a* — фоторазвертки (СФР-граммы) для разрядов с начальным давлением 37 тор (1), 112 (2) и 600 тор (3); *б* — снимок разряда с торца,  $p=112$  тор

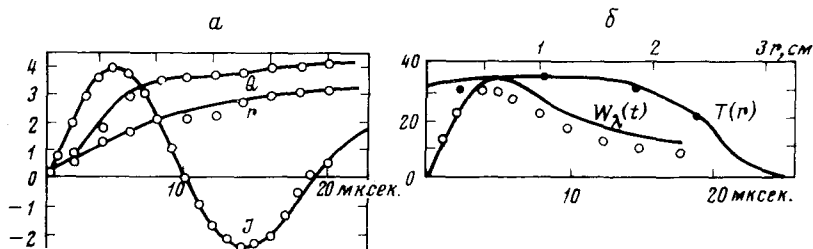


Рис. 3. Сравнение данных расчета и эксперимента (линия — расчет, точки — эксперимент). *a*:  $I$  — ток в 40 кА,  $r$  — граница интенсивного свечения в см,  $Q$  — выделение джоулева тепла по отношению к энергии батареи конденсаторов в 10%; *б*: Температура в  $5 \cdot 10^{-2}$  эв на момент  $t=10$  мксек.  $W_\lambda(t)$  — яркость по отношению к эталонному источнику в % на длине волны  $\lambda=5510$  Å

д) Расчет сходящегося разряда показал, что при схлопывании ударной волны в центре образуется неидеальная плазма с параметром идеальности  $\epsilon_{пот}/\epsilon_{кин}=0,4$ .

е) Найдено, что степень сжатия газа в ударной волне уменьшается из-за ее прогрева излучением разряда.

Институт прикладной математики  
Академии наук СССР  
Москва

Поступило  
20 X 1975

## ЛИТЕРАТУРА

- <sup>1</sup> В. Я. Гольдин, Д. А. Гольдина и др., Исследование задач магнитной радиационной газодинамики численными методами на ЭВМ. Препринт ИПМ АН СССР. № 36, 1971, Деп. № 1050-74.
- <sup>2</sup> С. И. Андреев, О. Г. Байков и др., Тр. III Всесоюзн. конфер. по физике низкотемпературной плазмы, М., МГУ, 1971, стр. 192.
- <sup>3</sup> С. И. Андреев, О. Г. Байков и др., ЖТФ, т. 45, 1735 (1975).
- <sup>4</sup> С. И. Андреев, В. Е. Гаврилов, Оптика и спектроскопия, т. 26, 665 (1969); Журн. прикл. спектроскоп., т. 13, 988 (1970).
- <sup>5</sup> С. И. Андреев, В. Е. Гаврилов, ЖТФ, т. 40, 1300 (1970).
- <sup>6</sup> С. И. Андреев, В. Е. Гаврилов, Теплофиз. высоких температур, т. 8, 1256 (1970).
- <sup>7</sup> В. Я. Гольдин, Б. Н. Четверушкин, О численном моделировании задач радиационной газовой динамики. М., Препринт ИПМ АН СССР, № 17 (1973).
- <sup>8</sup> В. Я. Гольдин, Н. Н. Калиткин, Б. Н. Четверушкин, Журн. прикл. мех. и техн. физ., № 1, 41 (1975).
- <sup>9</sup> Н. Н. Калиткин, Л. В. Кузьмина, В. С. Рогов, Таблицы термодинамических функций и транспортных коэффициентов плазмы, М., ИМП АН СССР, 1972.
- <sup>10</sup> А. Ф. Александров, А. А. Рухадзе, УФН, т. 112, № 2, 193 (1974).
- <sup>11</sup> В. Я. Гольдин, Б. Н. Четверушкин, ЖЭТФ, т. 68, № 5, 1768 (1975).