

ИССЛЕДОВАНИЕ ИМПУЛЬСНЫХ РАЗРЯДОВ С БОЛЬШОЙ СИЛОЙ ТОКА

*Л. А. Арцимович, А. М. Андрианов, О. А. Базилевская,
Ю. Г. Прохоров, Н. В. Филиппов*

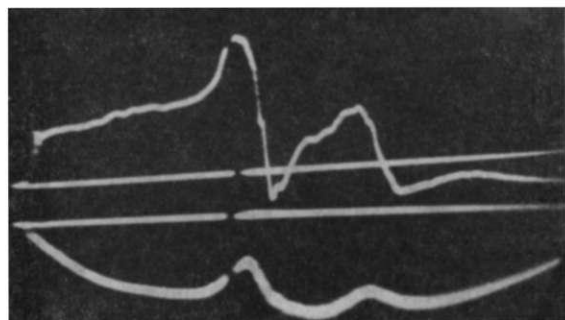
Излагаются результаты экспериментального исследования мощных импульсных разрядов с большой скоростью нарастания тока. Дается краткая характеристика использованной экспериментальной методики. Описываются процессы пульсации плазменного шнура.

Цель наших опытов заключалась в том, чтобы изучить свойства импульсных разрядов с большой силой тока. В таких разрядах должно происходить сжатие плазмы под действием электродинамических сил (притяжение параллельных токов). Работа электродинамических сил, сжимающих плазму, расходуется на увеличение кинетической энергии заряженных частиц. Благодаря этому в разряде с большой силой тока давление и температура плазмы могут достигать очень больших значений. Исследованию некоторых свойств импульсных разрядов в разреженных газах при силе тока от 10^2 до 10^4 а были посвящены работы [1], [2]. Мы изучали импульсные разряды в водороде, дейтерии, гелии, аргоне и ксеноне при начальных давлениях газа от 0,005 мм до нескольких миллиметров. Максимальная сила тока в разряде составляла в различных опытах от 100 ка до 1 млн. а. Разряд питался напряжением от 20 до 50 кв. Источником электрического питания служили конденсаторные батареи емкостью от нескольких десятков микрофард до 400 мкф. Скорость нарастания тока в начальной фазе разряда, т. е. величина $\left(\frac{dI}{dt}\right)_0$ составляла от $3 \cdot 10^{10}$ а/сек до $1,5 \cdot 10^{11}$ а/сек, а длительность нарастания тока от нуля до максимального значения

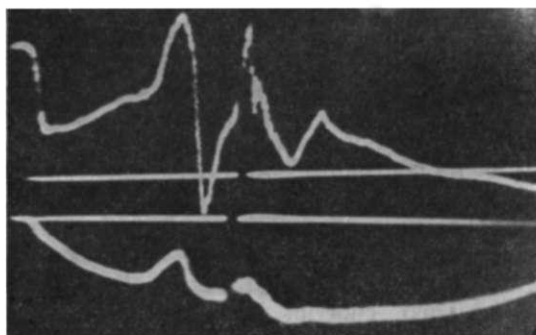
составляла от 8 до 17 мксек. Разрядные трубки представляли собой фарфоровые цилиндры длиной от 60 до 100 см и диаметром от 20 до 40 см. Electroдами служили плоские фланцы из меди или дюралю. Перед каждым разрядным импульсом трубка сначала откачивалась до высокого вакуума, а затем заполнялась свежей порцией газа. Измерения величин, характеризующих состояние плазмы при импульсном разряде, производились осциллографическим путем. Разрядный ток измерялся при помощи пояса Роговского с интегрирующей цепочкой RL. Для измерения напряжения использовались низкоомные делители, включаемые параллельно разрядному промежутку. Осциллографические измерения напряженности магнитного поля в различных точках плазмы были использованы для выяснения распределения тока по сечению трубки. Импульсы давления плазмы регистрировались с помощью пьезоэлектрических элементов. Подробные сведения о методике и результатах исследования мощных импульсных разрядов будут в ближайшее время опубликованы в ЖЭТФ. Здесь будет дана только общая характеристика свойств таких разрядов.

В условиях описываемых экспериментов импульсный разряд представляет собой периодический процесс с сильным затуханием.

Наибольший интерес представляет изучение первого полупериода разряда. На рис. 1 приведены две осциллограммы тока и напряжения в первом полупериоде разряда, полученные с помощью двухлучевого импульсного осциллографа. Одна из них снята при разряде в дейтерии с начальным давлением 0,03 мм рт. ст. Вторая осциллограмма относится



а)



б)

Рис. 1. Осциллограммы тока и напряжения для разряда в дейтерии при $U_0 = 40$ кВ.
а) $P_0 = 0,03$ мм рт. ст.; б) $P_0 = 0,2$ мм рт. ст.

ся к разряду в дейтерии при давлении 0,2 мм рт. ст. Начальное напряжение в обоих случаях равно 40 кВ. Максимальная сила тока практически одинакова и составляет 500 кА. Мы видим, что в самой начальной стадии разряда, после пробоя, ток и напряжение в разрядном промежутке возрастают. Затем в некоторый момент времени происходит резкий срыв напряжения. На осциллограмме тока в тот же момент времени появляется излом. После первого падения напряжение сначала быстро возрастает, а затем опять резко уменьшается. В момент, соответствующий второму скачкообразному падению напряжения, на осциллограмме тока по-

является второй излом. Эти отступления от плавного хода в развитии разряда являются отличительной чертой импульсных разрядов с большой силой тока и носят закономерный характер. Они особенно отчетливо выражены в тех случаях, когда разряд происходит в газах с малым атомным весом (водород, дейтерий, гелий) при низком начальном давлении.

При начальной скорости нарастания тока порядка 10^{11} а/сек интервал времени τ от пробоя газа до первого срыва напряжения составляет несколько микросекунд. Величина τ является функцией параметров, характеризующих начальные условия разряда.

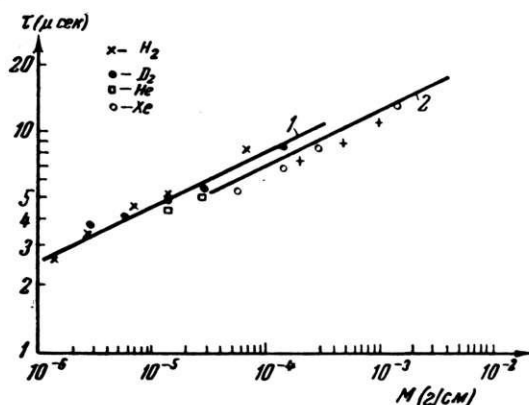


Рис. 2. Зависимость τ от M при $U_0 = 30$ кВ, $a_0 = 2 \cdot 10^{10}$ с.м.

- 1) $\frac{dI}{dt} = 6 \cdot 10^{10}$ а/сек (для легких газов);
- 2) $\frac{dI}{dt} = 7,5 \cdot 10^{10}$ а/сек (для тяжелых газов).

На рис. 2 изображена зависимость τ от M , где M — масса газа, приходящаяся на единицу длины разрядной трубки. Значения τ получены с помощью осциллограмм, снятых при импульсных разрядах в водороде, дейтерии, гелии, аргоне и ксеноне (при постоянной величине начального напряжения на трубке и одинаковых геометрических параметрах). Приблизительно $\tau \sim \sqrt{M}$. При заданном значении M величина τ возрастает с увеличением радиуса разрядной трубки и уменьшается при увеличении $\left(\frac{dI}{dt}\right)_0$.

В импульсном разряде с большой скоростью нарастания тока индуктивное падение напряжения значительно превосходит омическое. Поэтому, пользуясь осциллограммами тока и напряжения, можно найти

зависимость индуктивности плазменного шнура от времени и из этих данных определить, как изменяется радиус плазменного шнура (предполагая, что шнур имеет форму цилиндра с резкой границей).

Такой анализ показывает, что начальная стадия процесса характеризуется увеличением индуктивности, обусловленным сжатием плазмы по направлению к оси разрядной трубки. Плазма сжимается тем быстрее, чем больше $\left(\frac{dI}{dt}\right)_0$ и чем меньше плотность газа. В момент появления излома на осциллограмме тока индуктивность начинает уменьшаться. Это означает, что этот момент времени соответствует максимальной степени сжатия плазменного шнура. После этого происходит быстрое расширение плазмы, за которым следует вторая фаза сжатия. Если на осциллограмме тока наблюдается несколько изломов, то это означает, что происходят последовательные сжатия и расширения шнура. Зная радиус шнура в различные моменты времени, можно определить скорость движения плазмы к оси. Она зависит от M и $\left(\frac{dI}{dt}\right)_0$.

В наших опытах скорость движения плазмы изменялась в пределах от $1 \cdot 10^8$ см/сек при разрядах в газах с высокой начальной плотностью до $1,2 \cdot 10^7$ см/сек при разрядах в водороде и дейтерии с начальным давлением порядка 0,01 мм.

В начальной стадии разряда степень ионизации газа невелика. Спектрометрические измерения, выполненные С. Ю. Лукьяновым и В. И. Синицыным [3], показывают, что к моменту окончания первой фазы сжатия из общего числа атомов газа ионизировано не более 5—10% (для разрядов в водороде и дейтерии с максимальной силой тока около 200 кА, при начальном давлении 0,1—1,0 мм рт. ст.). После первого сжатия степень ионизации газа в центральной зоне разряда, повидимому, может быть очень высокой. Спектрометрические исследования показывают также, что при большой силе тока после вторичного сжатия шнура в разрядном пространстве появляется заметное количество посторонних примесей, обусловленных взаимодействием плазмы со стенками. Поэтому изучение более поздних стадий разряда не представляет большого интереса.

Измеряя напряженность магнитного поля на разных расстояниях от оси разрядной трубки, можно для каждого момента времени найти распределение плотности тока по сечению разряда. Экспериментальные данные приводят к следующей картине распределения тока в плазме. После пробоя область, занятая током, благодаря скин-эффекту представляет собой тонкий цилиндрический слой, прилегающий к стенкам разрядной трубки. Внутренняя граница этого слоя сначала медленно, а затем более быстро стягивается к оси. Движение границы слоя приводит к тому, что через некоторое время ток заполняет всю трубку. Момент времени, когда ток доходит до оси, практически совпадает с первым изломом на его осциллограмме. Плотность тока вблизи оси разряда в этот момент времени в 25 раз превосходит среднюю плотность тока по сечению трубки. Однако кривая распределения тока не имеет резкой границы, и на центральную зону радиусом в несколько сантиметров приходится меньше половины общего тока. При последующих расширениях и сжатиях плотность тока в центральной зоне остается очень высокой, хотя и испытывает значительные колебания.

Для иллюстрации этих результатов на рис. 3 изображено распределение тока по сечению трубки при разряде в дейтерии с начальным давлением 0,05 мм рт. ст. и начальным напряжением 40 кВ. Оно соответствует фазе второго сжатия плазмы. Характерной особенностью этого распределения является то, что в некоторой зоне разряда ток изменяет направление (из-за скин-эффекта).

Измерения импульсов давления в плазме с помощью пьезоэлементов из титаната бария показывают, что в фазе первого сжатия вместе с внутренней границей тока по направлению к оси распространяется волна давления. До момента максимального сжатия давление вблизи оси ничтожно мало. В тот момент, когда ток достигает оси, давление в центральной зоне быстро возрастает до 25—50 ат (при начальном давлении газа в трубке порядка 0,1 мм рт. ст.).

Изложенные экспериментальные факты приводят к следующим представлениям о механизме основных процессов в импульсном разряде. При быстром росте тока в начальной фазе разряда электродинамические силы, увеличивающиеся пропорционально I^2 ,

не могут быть скомпенсированы внутренним давлением ионизированного газа. Поэтому под действием электродинамических сил цилиндрический слой плазмы, первоначально прилегающий к стенкам разрядной трубки, получает ускорение, направленное к оси трубки.

Значительная часть работы, совершаемой электродинамическими силами на этой стадии процесса, переходит в кинетическую энергию направленного движения частиц,

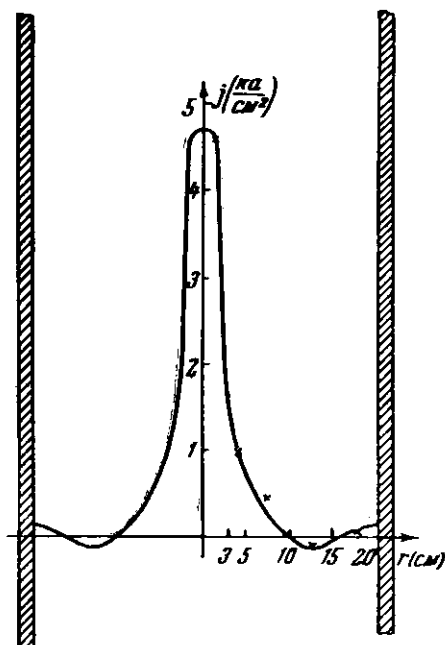


Рис. 3. Распределение плотности тока по сечению разряда в дейтерии при $U_0=40$ кВ и $P_0=0,05$ мм рт. ст. для фазы второго сжатия.

принадлежащих к сходящемуся слою плазмы. Так как заряженные частицы разных знаков двигаются с одинаковой скоростью, то ионы приобретают большую кинетическую энергию, в то время как энергия электронов из-за их малой массы почти не изменяется. Процесс сжатия можно рассматривать также как образование ударной волны, сходящейся к оси. Перед внутренним фронтом этой волны вначале находится нейтральный газ. При движении слоя плазмы газ частично увлекается вместе с заряженными частицами плазмы (благодаря большому эффективному сечению перезарядки ионов) и ионизируется. Поэтому масса вещества, при-

ходящего в движение, постепенно возрастает и быстро увеличивается общее число электронов и ионов в плазме. Количественная теория процесса сжатия плазменного шнура была разработана М. А. Леонтовичем и С. М. Осовцом [4]. Эта теория приводит к следующей формуле для величины τ , характеризующей длительность процесса (от момента отрыва плазменного слоя от стенок до момента максимального сжатия шнура)

$$\tau = 1,8 \left(\frac{M}{3} \right)^{1/4} a_0^{1/2} \left(\frac{dI}{dt} \right)_0^{-1/2}$$

(a_0 — радиус трубки; ток I выражен в единицах CGSM).

На рис. 2 значения τ , вычисленные по этой формуле, представлены сплошной линией. Можно констатировать хорошее согласие теории с экспериментом (в широком интервале изменения величины M). Последняя стадия сжатия наступает, когда ускоренная магнитным полем плазма достигает оси. В этот момент значительная часть энергии направленного движения превращается в тепло, что приводит к резкому повышению давления и температуры плазмы.

По грубым оценкам температура плазмы в фазе максимального сжатия в наших опытах достигала величины порядка 10^6 градусов (для водорода и дейтерия при начальном давлении порядка 10^{-2} — $5 \cdot 10^{-2}$ мм рт. ст.). Оценка температуры основана на измерении величин, определяющих энергетический баланс разряда. Данные, полученные таким путем, находятся в согласии с результатами измерений давления в центральной зоне разряда.

Вопрос об определении температуры плазмы будет подробно рассмотрен в последующих статьях. Здесь мы ограничимся только несколькими замечаниями, необходимыми для разъяснения этого вопроса. Во избежание недоразумений необходимо отметить, что, говоря о температуре плазмы, мы в этой статье имеем в виду температуру тяжелых частиц — ионов и нейтральных атомов. Можно считать, что благодаря большой величине эффективного сечения перезарядки температура ионов и атомов в сжимающемся плазменном шнуре одинакова. Как уже указывалось выше, в процессе сжатия значительная часть работы, совершаемой электродинамическими силами, расходуется

на кинетическую энергию направленного движения тяжелых частиц. Вместе с тем следует отметить, что при сжатии цилиндрического слоя плазмы к оси масса, приходящая в движение, постепенно возрастает, поэтому часть работы должна расходоваться на неупругие процессы, т. е. на возрастание температуры плазмы. Данные об энергетическом балансе импульсного разряда делают весьма вероятным предположение о том, что еще до момента максимального сжатия температура ионов и атомов достигает нескольких сотен тысяч градусов (что соответствует средней энергии хаотического движения порядка нескольких десятков электрон-вольт). В противоположность этому температура электронного компонента плазмы в стадии первого сжатия остается очень низкой и соответствует средней энергии электронов в несколько электрон-вольт. Это вытекает из данных спектрометрических измерений, которые указывают на невысокую степень ионизации плазмы. Если бы средняя энергия электронов составляла несколько десятков электрон-вольт, то газ был бы

полностью ионизирован еще до момента максимального сжатия тока.

Характер процессов, происходящих после момента максимального сжатия, еще не очень ясен. Однако очевидно, что вслед за максимальным сжатием должна возникнуть расходящаяся ударная волна, увлекающая плазму по направлению к стенкам. Расходящаяся волна должна быстро затормозиться под действием сжимающих ток электродинамических сил, благодаря чему вновь наступает фаза сжатия, за которой следует вторичное расширение шнура. На этой стадии процесса, повидимому, уже должны начать проявляться различные виды неустойчивости, свойственные плазменному шнуру с большой силой тока, вследствие чего форма шнура может сильно измениться. Потеря устойчивости плазменного шнура и сильное взаимодействие плазмы со стенками приводят к существенному изменению характера процессов. На более поздних стадиях разряда в объеме появляется большое количество посторонних газов и температура плазмы значительно понижается.

ЛИТЕРАТУРА

1. Cousins and Ware, Proc. Phys. Soc. B 64, 159 (1951).
2. Ware, Phil. Trans. Roy. Soc. 243, 197 (1951).
3. С. Ю. Лукьянов, В. И. Синицын, Атомная энергия, № 3, 88 (1956).
4. М. А. Леонтович, С. М. Осовец, Атомная энергия, № 3, 81 (1956).