

04

© 1992 г.

СИЛЬНОТОЧНЫЙ РАЗРЯД ТИПА Z-ПИНЧ
В ПЛОТНЫХ СРЕДАХД. А. Андреев, А. А. Богомаз, Ф. Г. Рутберг,
А. М. Шакиров

Приводятся описание установки и результаты исследования разряда в воздухе при атмосферном давлении и в гелии при начальном давлении до 15 МПа. Скорость нарастания тока $6 \cdot 10^{11}$ А/с, максимальная амплитуда 570 кА, величина активной мощности в районе максимума тока около 10^{10} Вт. Величина активного сопротивления дуги в максимуме разрядного тока около $5 \cdot 10^{-2}$ Ом близка к волновому сопротивлению контура. Оценки температуры канала разряда в воздухе и гелии дают величину порядка 10^5 К. Для разряда в гелии в максимуме тока 570 кА измеренное по оси давление 436 МПа близко к расчетному для пинча с равномерной плотностью тока. Датчиками давления, расположенными на оси разряда и на стенке разрядной камеры, исследована динамика нагрева газа.

Введение

Как известно, наиболее эффективно сжатие энергии во времени и пространстве осуществляется в установках типа Z-пинчи. При близких к предельным в настоящее время скоростях нарастания тока в диодах сильноточных ускорителей $5 \cdot 10^{12}$ А/с температура „стенки“ канала разряда при взрыве тонких проволочек из измерений мягкого рентгеновского излучения оценивается в 400—800 эВ [1].

С целью повышения температуры и давления в сильноточном разряде в плотной среде была разработана конструкция генератора плазмы с малоиндуктивным источником питания. Исследовался разряд в гелии при начальном давлении до 15 МПа и воздухе при атмосферном давлении.

При начальной концентрации гелия $2.7 \cdot 10^{21}$ см⁻³, скорости нарастания тока $6 \cdot 10^{11}$ А/с и амплитуде разрядного тока 570 кА зарегистрировано импульсное давление по оси разряда 436 МПа. Разработанная система может быть использована для получения потоков плотной плазмы с истечением по оси разряда [2] и для ускорения тел малой массы до скоростей $5 \cdot 10^5$ см/с. Ниже приводится описание источника питания и разрядной камеры, а также некоторые характеристики канала разряда. Результаты измерений сравниваются с результатами расчетов работы [3], опубликованной в настоящем выпуске.

Система питания представляет собой емкостный накопитель с плоской ошиновкой. Зарядное напряжение накопителя 50 кВ, запасенная энергия при трех модулях 28 кДж. Конденсаторы КМК-50-4 объединены в модули по два конденсатора. Емкость одного модуля 7.4 мкФ. Края шин крепятся в квадратной плите токосборника, на которой установлена разрядная камера. Шины выполнены из медного листа толщиной 3 мм. Между шинами в качестве изоляции используются 16 слоев полиэтиленовой пленки толщиной 0.120 мм. Края полиэтиленовых листов выступают на 300 мм за края шин. Трехслойная ошиновка на участке между „гребешками“ конденсаторов незначительно увеличивает общую индуктивность. Общая индуктивность системы питания с нагрузкой определялась в основном индуктивностью разрядной камеры и составляла 80 нГн. Начальная скорость нарастания тока $6 \cdot 10^{11}$ А/с. Изменение амплитуды разрядного тока 50—600 кА достигалась изменением числа подключенных к нагрузке модулей (1—3) и изменением величины зарядного напряжения 10—50 кВ.

Разрядная камера (рис. 1) крепится к верхней плите токосборника и является обратным токопроводом. К нижней плите токосборника крепится анод, который вводится в камеру через изолятор, состоящий из двух полиэтиленовых стаканов, места стыка которых для предотвращения электрического пробоя уплотняются прокладками из вакуумной резины. Продолжением верхнего электрода является канал, отделенный от него диафрагмой. Внутренний диаметр разрядной камеры без изоляции 4 см, расстояние между электродами 1—5 см. В ряде случаев стенки разрядной камеры закрывались оргстеклом или полиэтиленом. При этом диаметр разрядной камеры составлял 2 или 3 см. Система газоподвода отделена от камеры обратным клапаном, запирающим ее в момент разряда.

Для иницирования разряда в гелии при начальных концентрациях $1.4-4 \cdot 10^{21}$ см⁻³ была разработана конструкция плазменного инжектора (рис. 2), который размещался в аноде. Объем камеры инжектора соответствует плотности энергии порядка 200 Дж·см⁻³. Диаметр камеры инжектора 3 мм, длина 8 мм, диаметр выходного отверстия в аноде 1 мм, напряжение на вспомогательном конденсаторе инжектора 20 кВ. В диапазоне начальных давлений гелия 5—10 МПа использовался скользящий разряд по поверхности полиэтиленового изолятора камеры инжектора. В диапазоне начальных давлений гелия 10—15 МПа для надежного пробоя в камеру инжектора 2 вставлялась тонкая проволочка, которая замыкала электроды 1 и 3.

При исследовании атмосферного разряда в воздухе иницирование осуществлялось тригatronным поджигом с помощью дополнительного электрода, введенного по оси анода. В этом случае стенки камеры для предотвращения пробоя закрывались изолятором из оргстекла.

Измерялись ток разряда, падение напряжения между пластинами токосборника разрядной камеры, производилась его скоростная фоторегистрация. Для измерения давления по оси разряда пьезоэлектрический датчик с передающим кварцевым или керамическим стержнями вводился в катод. Нагрузка на турмалиновый пьезоэлемент уменьшалась за счет акустического рассогласования стержней и обжатия переднего стержня резиной. Датчик калибровался ударно-волновым методом. При сопоставлении показаний датчика давления с остальными измерениями учитывалась задержка, связанная с временем распространения импульса давле-

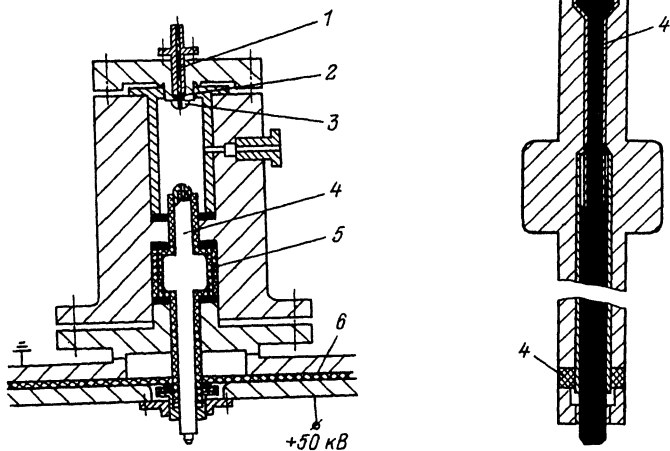


Рис. 1. Схема конструкции разрядной камеры.

1 — канал, 2 — диафрагма, 3 — катод, 4 — анод, 5 — изоляция.

Рис. 2. Схема конструкции инжектора плазмы.

1 — основной электрод (анод), 2 — камера инжектора, 3 — электрод поджига, 4 — изоляция.

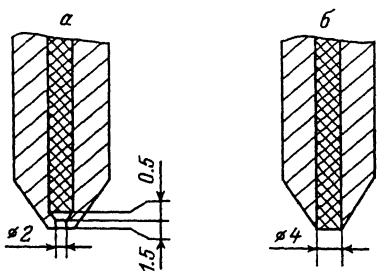


Рис. 3. Схема расположения в катоде кварцевого стержня датчика при измерениях среднего по диаметру давления.

Измерение среднего давления на диаметре канала разряда 2 (а) и 4 мм (б).

ния по переднему стержню датчика, которая составляла до 20 мкс. При этом постоянная времени датчика, которая в основном связана с дисперсией звука в стержне и конечной толщиной пьезоэлемента, 0,6 мкс.

Для оценки распределения давления по диаметру канала разряда были выполнены измерения давления при разных диаметрах отверстия в электроде. Диаметр переднего кварцевого стержня датчика давления при этом оставался одинаковым (рис. 3). Отверстие диаметром 2 мм может несколько занижить показания датчика, но это не сказывается на дальнейших качественных оценках.

Для исследования динамики нагрева газа во всем объеме воспринимающий давление торец кварцевого стержня второго датчика аналогичной конструкции располагался перпендикулярно оси разряда на стенке разрядной камеры. Специальным опытом установлено, что собственная несинхронность показаний датчиков не более чем 0,25 мкс, несмотря

на значительно большую задержку показаний обоих датчиков, связанную с прохождением упругого импульса давления по переднему стержню.

В конструкции емкостного делителя напряжения диэлектриком высоковольтного плеча являлась многослойная полиэтиленовая изоляция между пластинами токосборника. Величина активной составляющей напряжения определялась из осциллограмм общего напряжения, зарегистрированного делителем в моменты времени, соответствующие максимуму разрядного тока.

Результаты и их обсуждение

Разряд в воздухе при атмосферном давлении инициировался триггерным поджигом в аноде и самопробоем. На фоторазвертках свечения на начальном участке наблюдается слабое свечение фронта ударной волны, возникающей в результате пробоя разрядного промежутка. Скорость его распространения около 10^6 см/с. Одновременно происходит расширение зоны с большей интенсивностью свечения со скоростью порядка 10^5 см/с.

В начальной стадии расширения канала разряда измеренные значения радиуса и давления согласуются с вычисленными по теории тепловой волны, предложенной в [4]. При этом указаны границы применимости модели тепловой волны. После момента времени t_1 (рис. 4) наблюдается изменение скорости расширения зоны интенсивного свечения, связанное, по-видимому, с влиянием собственного магнитного поля разряда. Из-за большей скорости нарастания тока, чем в [4], эта стадия наступает раньше. Как известно, для пинча с равномерной плотностью тока среднее по сечению давление выражается как

$$\bar{P} = 1.6 \cdot 10^{-10} \frac{J^2}{r^2}. \quad (1)$$

Здесь $[\bar{P}]$ в МПа; $[J]$ в А; $[r]$ в см. Для момента времени t_1 из рис. 4 $r = 0.12$ см, $J = 60$ кА, что по формуле (1) соответствует давлению 40 МПа. Ввиду того что для этого момента времени радиус дуги r меньше радиуса измеряющего давления зонда r_1 , который введен в электрод ($r = 0.12$ см, а $r_1 = 0.165$ см), показания зонда давления (рис. 4) занижены в $(r_1/r)^2$ раз. При учете этой поправки значения рассчитанного магнитного давления и измеренного близки между собой. Однако точность измерений невелика. Для момента времени, соответствующего максимуму тока (144 кА), радиус светящейся зоны $r = 0.25$ см полностью перекрывает торец зонда давления.

Как нетрудно показать, для пинча радиусом r с равномерной плотностью тока среднее давление, измеренное на радиусе r_1 , выражается как

$$\bar{P} = P_{\max} \left(1 - \frac{r_1^2}{2r^2} \right) = 3.2 \cdot 10^{-10} \frac{J^2}{r^2} \left(1 - \frac{r_1^2}{2r^2} \right). \quad (2)$$

Подставляя значения r и J , соответствующие максимуму тока, имеем $\bar{P} = 83$ МПа. Измеренное значение \bar{P} около 60 МПа.

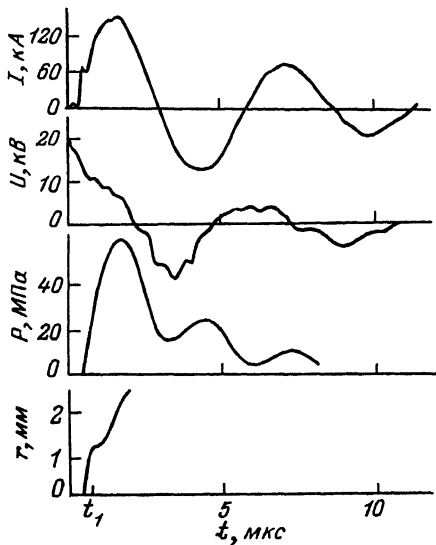


Рис. 4. Осциллограммы и фоторазвертка свечения разряда в воздухе при атмосферном давлении.

Радиус камеры 1.5 см, зарядное напряжение 20 кВ, емкость батареи 7.4 мкФ, расстояние между электродами 1 см.

Измерения давления по оси разряда на разных диаметрах (рис. 3) позволяют оценить распределение плотности тока по радиусу канала. Из формулы (2) отношение двух средних давлений, измеренных на радиусах r_1 и r_2 соответственно, в случае постоянной по радиусу плотности тока будет

$$\frac{\bar{P}_1}{P_2} = \frac{2r^2 - r_1^2}{2r^2 - r_2^2}. \quad (3)$$

Из измерений при амплитуде тока 144 кА $r_1 = 0.10$ см, $r_2 = 0.20$ см, $\bar{P}_1/\bar{P}_2 = 1.6$. Тогда по формуле (3) можно определить радиус зоны проводимости r . При постановке исходных данных получаем $r = 0.21$ см, что близко к радиусу, определенному на фоторазвертке свечения и равному 0.25 см.

При увеличении амплитуды разрядного тока до 290 кА из проделанных измерений $\bar{P}_1/\bar{P}_2 > 2$, чего не может быть при постоянной по радиусу плотности тока. Наблюдаемое увеличение отношения (3) более чем в два раза при переходе от разряда с амплитудным значением тока 144 кА к разряду с амплитудным значением тока 290 кА означает, что во втором случае на меньшем диаметре r_1 плотность разрядного тока больше, чем на r_2 . При этом на диаметре $r_1 = 0.10$ см среднее давление составило 17.2 МПа. Исходя из этой величины давления, считая плотность в центральной части не превышающей атмосферной [5], температура в центре не ниже чем 10^5 К.

При росте амплитуды разрядного тока наблюдается рост „постоянной составляющей“ давления, соответствующей переходу тока через нуль. При увеличении амплитуды разрядного тока до 500 кА в случае полусферического катода без отверстия на нем видна четко обозначенная равномерно оплавленная вспученная зона с радиусом 0.2 см. Наблюдается также зона с меньшим оплавлением без вспучивания радиусом около 0.5 см которая присутствует во всем диапазоне изменения амплитуд тока.

Появление вспученной зоны при больших токах согласуется с предположением об увеличении плотности тока в центральных частях разряда. Величина активного сопротивления дуги, определенная из измерений падения напряжения и тока при амплитуде разрядного тока 144 кА, оказалась равной $6 \cdot 10^{-2}$ Ом, что близко к волновому сопротивлению контура $9 \cdot 10^{-2}$ Ом и говорит о хорошем согласовании источника с нагрузкой. Средняя напряженность поля при этом 8 кВ/см. Максимальная активная мощность достигает при токе 500 кА величины 10^{10} Вт. Поскольку для амплитудного значения тока 144 кА, как это следует из приведенных выше измерений давления, плотность тока по сечению постоянна, а токовый радиус близок к световому, то из измерений сопротивления можно найти проводимость. При этом величина проводимости оказывается $200 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$. Спектр разряда сплошной с линиями поглощения железа, марганца и хрома. Для амплитудного значения тока 144 кА активная мощность разряда около 10^9 Вт. Баланс мощности выполняется в том случае, если считать, что дуга излучает как абсолютно черное тело с радиусом 2 мм и поверхностной температурой порядка 10^5 К. При этом измеренная проводимость ниже, чем рассчитанная по формуле Спитцера.

Разряд в гелии при начальных давлениях до 10 МПа инициировался струей гелиевой плазмы из анода (рис. 2). При начальных давлениях в диапазоне 10—15 МПа промежуток между электродами 1 и 3 инжектора плазмы закорачивался тонкой стальной проволочкой. Благодаря этому между основными электродами формировалась струя плазмы радиусом около 0.1 см с концентрацией паров металла порядка 10^{20} см^{-3} . Наряду с более стабильным пробоем присутствие металла, как показывают расчеты [3], увеличивает температуру и давление в канале разряда.

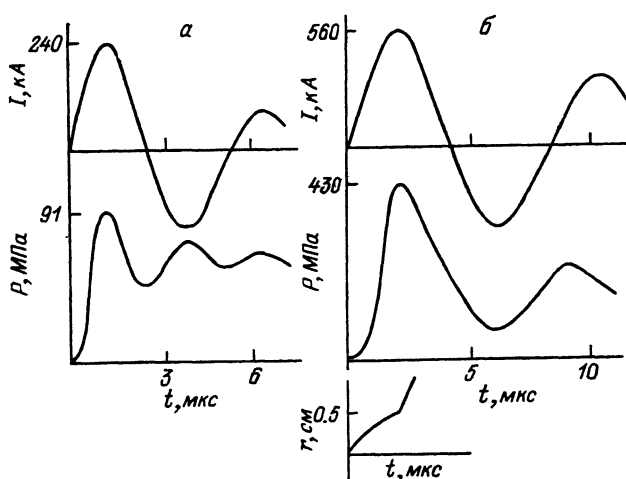


Рис. 5. Осциллограммы и фоторазвертка свечения разряда в гелии. Радиус камеры 1.5 см.

Начальное давление гелия 1 (а), 10 МПа (б); зарядное напряжение 35 (а), 50 кв (б); емкость батарей 7.4 (а), 22.2 мкФ (б); расстояние между электродами 4.2 (а) и 3 см (б); а — инициирование самопробоем по оси, б — инициирование плазменным инжектором.

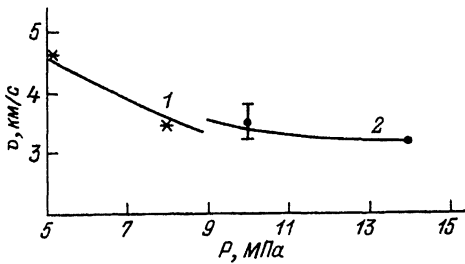


Рис. 6. Зависимость скорости расширения зоны высокого давления, определенной по показаниям датчиков, от величины начального давления гелия. Емкость батареи 7.4 мкФ.

Зарядное напряжение 30 (1), 50 кВ (2); амплитуда разрядного тока 240 (1), 390 кА (2).

На фоторазвертке свечения канала разряда, полученной при начальном давлении в камере 10 МПа и амплитуде тока 570 кА, видно изменение скорости расширения канала разряда с $2 \cdot 10^5$ до $5.7 \cdot 10^5$ см/с, которое по времени соответствует началу уменьшения разрядного тока после его максимума (рис. 5, б). Приведены также осциллограммы тока и соответствующего ему давления по оси разряда в гелии для различных условий. При начальном давлении 1 МПа (рис. 5, а) второй максимум на осциллограмме давления обусловлен нагревом газа разрядным током во втором полупериоде. В случае начального давления 10 МПа (рис. 5, б) второй максимум на осциллограмме давления наступает позже и связан, по-видимому, с приходом волны давления, отраженной от стенок разрядной камеры. Для этого случая амплитуда максимального импульса давления соответствует расчетной [3].

Динамика нагрева газа исследовалась датчиками давления, расположенными по оси и на стенке камеры при ее разных радиусах и меньших, чем в случае, соответствующем рис. 5, б, энерговкладах. Рост давления на стенке запаздывает по отношению к давлению по оси на 5—7 мкс, что соответствует скорости расширения v области высокого давления $3-5 \cdot 10^5$ см/с (рис. 6) и согласуется со скоростью расширения, определенной по фоторазвертке. За время, сопоставимое с длительностью разряда при радиусе разрядной камеры 1.5—2 см, заметного выравнивания давления не происходит. На стенке камеры наблюдаются волны давления, амплитуда которых сравнима с давлением по оси. Лишь при радиусе разрядной камеры 0.9 см снижение давления по оси после импульса тока незначительно. В целом картина изменения давления в камере по оси разряда и на стенке в процессе нагрева газа качественно соответствует расчетам, проделанным в [3]. Зарегистрированное датчиком среднее давление по оси на радиусе $r_1 = 0.2$ см при амплитуде тока 570 кА—436 МПа близко к расчетному для пинча с равномерной плотностью тока и радиусом $r = 0.5$ см, определенным по фоторазвертке. По формуле (2) оно составляет 380 МПа. Активное сопротивление дуги в диапазоне амплитуд разрядных токов 600—200 кА составляет $3-5 \cdot 10^{-2}$ Ом. При этом средняя напряженность поля в разрядном канале слабо растет при увеличении начального давления гелия в камере с 2 до 15 МПа и составляет 4—7 кВ/см. С уменьшением расстояния между электродами она увеличивается.

Если считать, что в максимуме разрядного тока подведенная мощность JU уносится рекомбинационно-тормозным излучением, то по измеренным величинам J , U и P , зная из фоторазвертки r , из системы уравнений

$$JU = an_e^2 T^{1/2} + bn_e^2 T^{-1/2},$$

$$P = 2n_e kT$$

можно оценить n_e и T . Принимая из эксперимента $U = 14$ кВ, длину дуги 3.5 см, $r = 0.5$ см, $J = 567$ кА, $P = 400$ МПа, получим $T \sim 10^5$ К, $n_e \sim 10^{20}$. Эксперимент соответствует рис. 5, б.

Выводы

1. При скорости нарастания тока $6 \cdot 10^{11}$ А/с для атмосферного разряда в воздухе и разряда в гелии при начальном давлении 1–15 МПа наблюдается хорошее согласование дуги с разрядным контуром.

2. Наблюдается фаза пинчевания, связанная с изменением расширения скорости канала разряда, причем в воздухе эта фаза наступает до того, как ток достигает максимального значения.

3. Для разряда в воздухе проделаны измерения давления на оси на разных диаметрах, позволяющие судить об распределении плотности тока по сечению канала. В воздухе при переходе от разряда с амплитудой тока 150 кА к разряду с амплитудой тока 290 кА полученные результаты измерений объясняются увеличением плотности тока в центральных частях разряда. Для разряда в гелии в максимуме тока 570 кА измеренное давление 436 МПа близко к расчетному для пинча с равномерной плотностью тока.

4. Оценка температуры канала разряда в воздухе и гелии из баланса мощности в максимуме разрядного тока дает величину 10^5 К. Для разряда в воздухе при амплитуде тока по величине измеренного импульсного давления по оси 171 МПа нижняя граница температуры на оси также 10^5 К.

5. Для разряда в гелии величина максимального давления 436 МПа, зарегистрированного датчиком по оси, оценка температуры канала разряда по балансу мощности и давлению, а также динамика нагрева газа во всем разрядном объеме качественно соответствуют результатам расчетов [3].

С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] Аранчук Л.Е., Боголюбовский С.П., Тельковская О.В. // ЖТФ. 1985. Т. 55. Вып. 11. С. 2222–2224.
- [2] Комельков В.С., Перебейнос В.В., Соломонов М.Т. // Докл II Все-союз. конф. по инженерным проблемам термоядерных реакторов. 1982. Т. 1. С. 247–251.
- [3] Дубовенко К.В. // ЖТФ. 1992. Т. 62. Вып. 5. С. 00.

[4] Александров А.Ф., Зосимов В.В., Рухадзе А.А. и др. // Краткие сообщения по физике. 1970. № 8. С. 72—78.

[5] Бобров Ю.К., Вихрев В.В. // Физика плазмы. 1988. Т. 14. С. 1222—1227.

Филиал научно-исследовательского
института электромашиностроения
Санкт-Петербург

Поступило в Редакцию
4 июля 1991 г.

