

# Math-Net.Ru

Общероссийский математический портал

В. А. Деревщиков, Н. В. Русаков, Измерение лучистых потерь в импульсном плазменном ускорителе болометрическим методом, *ТВТ*, 1970, том 8, выпуск 1, 17–21

Использование Общероссийского математического портала Math-Net.Ru подразумевает, что вы прочитали и согласны с пользовательским соглашением

<http://www.mathnet.ru/rus/agreement>

Параметры загрузки:

IP: 18.97.9.174

19 марта 2025 г., 20:19:37



УДК 533.9.082.5:537.5

## ИЗМЕРЕНИЕ ЛУЧИСТЫХ ПОТЕРЬ В ИМПУЛЬСНОМ ПЛАЗМЕННОМ УСКОРИТЕЛЕ БОЛОМЕТРИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

*В. А. Деревщигов, Н. В. Русаков*

Предложена методика измерения лучистых потерь в эрозионном импульсном плазменном ускорителе с помощью малоинерционных приемников излучения, помещаемых на значительном расстоянии от излучающего объема плазмы, с целью разделения эффектов бомбардировки частицами плазмы и воздействия излучения.

Измерены потери энергии на излучение в торцевой и коаксиальной моделях ускорителя. В торцевой модели потери составляют 16—24% для алюминиевого центрального электрода и 7—10% для литиевого, в коаксиальной — 3—5%.

То, что основная доля лучистых потерь приходится на вакуумную ультрафиолетовую область спектра, указывает на нежелательность применения при подобных измерениях оптических фильтров.

Лучистые потери плазмы в импульсных плазменных ускорителях наименее исследованы как в теоретическом, так и экспериментальном отношении, в результате чего их роль в общем балансе энергетических потерь недостаточно ясна. Наиболее распространена точка зрения, что ими можно пренебречь по сравнению с кинетической энергией плазмы [1, 2]. Теоретические оценки [3—6] очень приближены, так как они получены в рамках достаточно широких предположений относительно характера возбуждения и ионизации и прохождения излучения через плазму [5, 6]. Для более точного расчета необходимо решение уравнения переноса излучения для конечного объема плазмы с изменяющимися во времени и пространстве параметрами, что представляет очень трудную задачу.

Попытки экспериментального определения лучистых потерь инерционными приемниками излучения с применением оптических фильтров [1] также не дают однозначных результатов, поскольку основная доля энергии излучения в разрядах подобного типа может приходиться на вакуумную ультрафиолетовую область спектра [5, 6]. При измерениях лучистых потерь без фильтров возникают трудности другого рода, связанные с бомбардировкой приемника излучения частицами плазмы. Этого можно избежать, если осуществить измерения с помощью малоинерционных приемников излучения, помещаемых на значительное расстояние от излучающего объема плазмы.

**Экспериментальная установка.** Исследования проводились на торцевой и коаксиальной моделях эрозионного ускорителя, показанные на рис. 1.

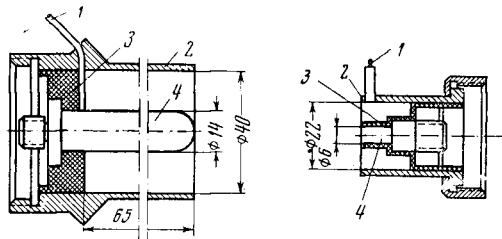
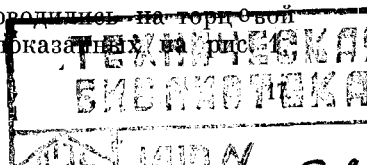


Рис. 1. Схемы торцевой и коаксиальной модели ускорителя:

1 — инициирующий электрод; 2 — наружный электрод; 3 — изолятор; 4 — центральный электрод



при давлении в вакуумной камере  $10^{-5}$  мм рт. ст. В торцевой модели в качестве анода служил алюминиевый центральный электрод. Использовался также литиевый центральный электрод (литий запрессовывался в тонкостенную оправку из нержавеющей стали). Электроды коаксиальной модели, а также внешний электрод торцевой модели изготавливались из меди. Катодом коаксиальной модели являлся центральный электрод. В качестве межэлектродной изоляции в обеих моделях использовались фторопласт и полипропилен. Батарея накопительных конденсаторов состояла из 96 конденсаторов типа МБГП-1-1500 с общей емкостью (номинальной) 192 мкф. Заряд-

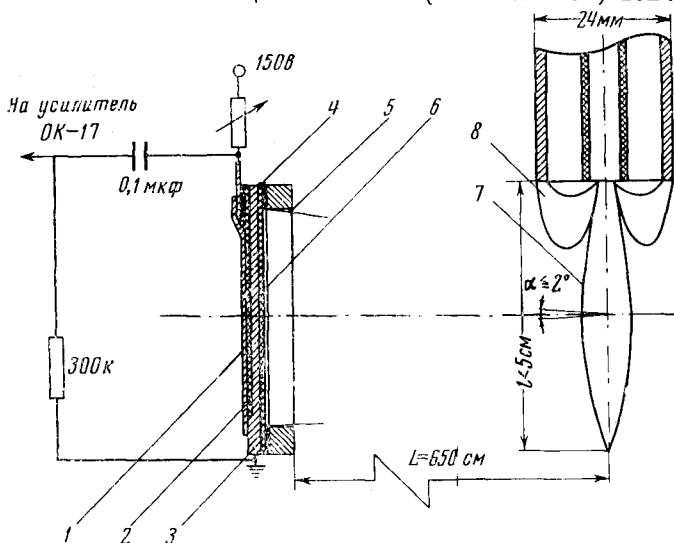


Рис. 2. Принципиальная схема болометра и оптическая схема измерения:

1 — висмутовое термосопротивление; 2, 4 — оксидный слой; 3 — алюминиевая фольга; 5 — молибденовое кольцо; 6 — эпоксидная смола; 7 — анодный факел; 8 — катодный факел

ное напряжение варьировалось в пределах 500—2000 в, ток разряда в максимуме составлял 12—60 (торцевая модель) и 10—15 ка (коаксиальная модель) при длительности первого полупериода 9—10 и 12—13 мксек соответственно.

В качестве приемника излучения применялся металлический болометр с висмутовым термосопротивлением, технология изготовления которого заимствовалась из работ [7—9]. Для изготовления болометра использовалась алюминиевая фольга толщиной 7,5 мк (рис. 2), которая после оксидирования приклеивалась к молибденовому кольцу эпоксидной смолой при температуре 180—190° С (с целью обеспечения ее натяжения после остывания). Величина напыленного термосопротивления порядка 5 ком. Предельная чувствительность болометра соответствовала плотности излучения  $2 \cdot 10^{-4}$  Дж/см<sup>2</sup>, постоянная времени нагревания ~5 мксек, постоянная времени остывания более чем на два порядка превышала длительность разряда. Болометр помещался в боковом патрубке напротив среза ускорителя (рис. 2) на расстоянии 65 см от оси ускорителя.

**Экспериментальные результаты.** Типичная осциллограмма приведена на рис. 3. Как видно из рис. 3б, наряду с инерционным термосигналом ( $I_1, I_2, I_3$ ) имеется также сигнал безынерционного характера  $I_0$ , который достигает максимума в момент пика разрядного тока. Этот сигнал обусловлен фотоэффектом с оксидного слоя и корпуса болометра, обращенных навстречу падающему излучению, и регистрируется осциллографом благодаря емкостным связям. Наличие сигнала, вызванного фотоэффектом в отсутствие специального «вытягивающего» напряжения, указывает на то, что излучение имеет весьма жесткий характер и большую интенсивность.

Действительно, при регистрации излучения через кварцевый фильтр этот сигнал с болометра практически исчезает (рис. 3, в).

Первого насыщения сигнал с болометра достигает под воздействием излучения, поглощенного подложкой в первом полупериоде разряда ( $I_1$ ). Незначительный подъем сигнала с последующим спадом до прежнего уровня  $I_1$  на этом участке обусловлен фотоэффектом во втором полупериоде. Поэтому при нахождении радиационного термосигнала этот подъем из рассмотрения исключался. Следующее приращение сигнала ( $I_2$ ) обусловлено излучением, поглощенным болометром во втором полупериоде разряда,

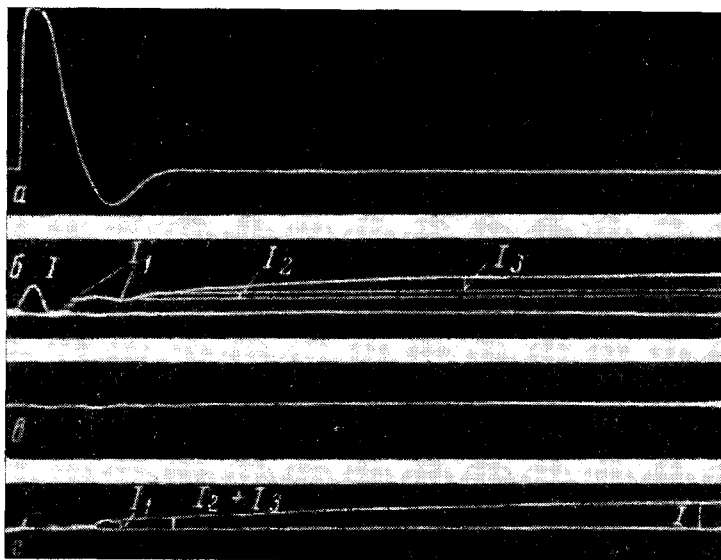


Рис. 3. Осциллограмма разрядного тока, длительность первого полупериода 10 мксек (а). Сигнал с болометра: центральный электрод — алюминий (б); то же, регистрация излучения через кварцевый фильтр (в); центральный электрод — литий (г). Торцевая модель

и бомбардировкой подложки быстрыми ( $v \geq 5 \cdot 10^6$  см/сек) частицами, успевающими к этому времени долететь до болометра. Наконец, заключительный подъем сигнала с болометра ( $I_3$ ) вызван бомбардировкой подложки сравнительно медленными ( $v \leq 2 \cdot 10^6$  см/сек) частицами, а также воздействием нагретого газа, остающегося в вакуумной камере после разряда из-за ограниченной скорости откачки вакуумной системы.

Истинное значение сигнала с болометра, обусловленного радиационным нагревом, лежит в пределах  $I_1 \leq I_{\text{рад}} \leq I_1 + I_2$  и зависит от соотношения вкладов излучения и бомбардировки в сигнале  $I_2$ . Оставаясь в рамках данного эксперимента, разделить эти вклады не представляется возможным. Однако благодаря незначительности сигнала  $I_2$  по сравнению с  $I_1$  (по крайней мере для торцевой модели) эта неопределенность оказывается сравнительно небольшой и не выходит за пределы ошибок измерения используемого болометрического метода.

По данным скоростных фотографических и спектроскопических [10] исследований, а также на основании данных о распределении лучистых потерь по длине факела (неопубликованные данные), в торцевой модели преобладающая доля радиации выходит из анодного факела. Длина факела в видимом свете не превышает 3—5 см, в ультрафиолетовом свете — 1—1,5 см. Поперечные размеры факела также очень малы и не превышают в прианодной области, из которой излучается основная часть энергии, 2—3 мм [10]. Очевидно, что при имевшем место удалении боло-

метра от плазмы (65 см) такой источник с достаточным основанием можно считать точечным. Для коаксиальной модели ускорителя, несмотря на несколько большие размеры, поперечные и продольные размеры факела вследствие самосжатия разряда к оси ускорителя остаются малыми, что также позволяет воспользоваться моделью точечного источника.

В этих предположениях абсолютная величина энергии излучения плазмы разряда будет определяться выражением

$$W = 4\pi R^2 \frac{mc\Delta V_6}{V_6\alpha^\circ}$$

где  $R$  — расстояние от излучающего объема плазмы до болометра,  $m$  и  $c$  — удельные (на 1 см<sup>2</sup>) масса и теплоемкость подложки,  $V_6$  и  $\Delta V_6$  — соответственно напряжение на болометре до разряда и его последующее приращение  $\alpha^\circ$  — температурный коэффициент изменения термосопротивления.

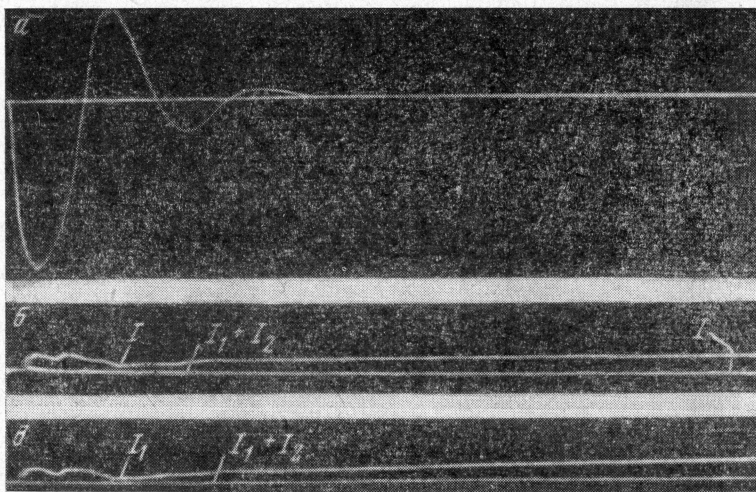


Рис. 4. Осциллограмма разрядного тока, длительность первого полупериода 12 мксек (а). Сигнал с болометра: изолятор — фторопласт (б); полипропилен (в). Коаксиальная модель

По оценке, при амплитуде сигнала на экране осциллографа 10 мм, суммарная относительная ошибка определения энергии излучения составляет 20—30%, что соответствует запасенной в конденсаторах энергии 400 дж. При меньшей запасенной энергии (~100 дж) ошибка может достигать 50—60%. Наибольший вклад дает ошибка измерения амплитуды сигнала с болометра.

Исходя из результатов осциллографирования, определены лучистые потери плазмы в области длин волн 50—2000 Å (область поглощения подложки). Для торцевой модели лучистые потери в пределах ошибки измерения не зависят от величины запасенной в конденсаторах энергии (в интервале 100 ÷ 400 дж) и составляют 16—24% для алюминиевого центрального электрода и 7—10% для литиевого по отношению к энергии, запасенной в конденсаторах. Минимальные значения здесь соответствуют амплитуде сигнала  $h = I_1$ , а максимальные —  $h = I_1 + I_2$ . При этом энергетический к.п.д. торцевой модели (отношение энергии, вкладываемой в плазму, к энергии, запасенной в конденсаторах) составлял ~65%.

Измерения для коаксиальной модели (рис. 4) показали, что лучистые потери плазмы после выхода ее из ускорителя значительно меньше, чем для торцевой модели. К сожалению, вследствие существования нескольких полупериодов тока, сравнимой амплитуды удовлетворительного разделения

эффектов воздействия излучения и бомбардировки в данном случае достичь не удастся. Поэтому возможны лишь очень приближенные оценки. Для рассматриваемых условий эксперимента лучистые потери для обоих материалов изолятора (фторопласт, полипропилен) не превышают 3—5% по отношению к энергии, запасенной в конденсаторах (для амплитуд сигнала  $I_1$  и  $I_1 + I_2$  соответственно). Отличие от торцевой модели связано с закрытой геометрией коаксиала и иными излучательными характеристиками фтор-углеродной и водород-углеродной плазм [5]. Интересно отметить, что эффект бомбардировки болометра частицами плазмы для коаксиальной модели также весьма существен, что на первый взгляд несколько неожиданно. Это связано, по-видимому, с выходом разряда на торец коаксиала, в результате чего и возникает угловой разброс истекающей плазмы.

В заключение авторы благодарят Ю. П. Рылова за интерес к работе и обсуждение результатов и И. Н. Попова за помощь в изготовлении болометра.

Всесоюзный научно-исследовательский  
институт электромеханики

Поступила в редакцию  
5 V 1968

#### ЛИТЕРАТУРА

1. А. М. Рушайло. ПМТФ, № 4, 1965.
2. Мичелз, Хэйуэй, Йохансен. Ракетная техника и космонавтика, № 5, 1966.
3. Ларсон, Гуддинг, Хэйуорт, Эшби. Ракетная техника и космонавтика, № 5, 1965.
4. Эшби. Ракетная техника и космонавтика, № 6, 1965.
5. В. А. Деревщиков. Теплофизика высоких температур, 6, № 3, 1968.
6. В. А. Деревщиков, М. А. Дерябина. Теплофизика высоких температур, 6, № 5, 1968.
7. Л. Л. Горелик, Е. А. Лобиков. Ж. техн. физ., 31, 125, 1961.
8. Л. Л. Горелик. Ж. техн. физ., 34, 496, 1964.
9. Л. Л. Горелик, В. В. Синицын. Ж. техн. физ., 34, 505, 1964.
10. В. А. Деревщиков. Ж. техн. физ., 37, 315, 1967.