

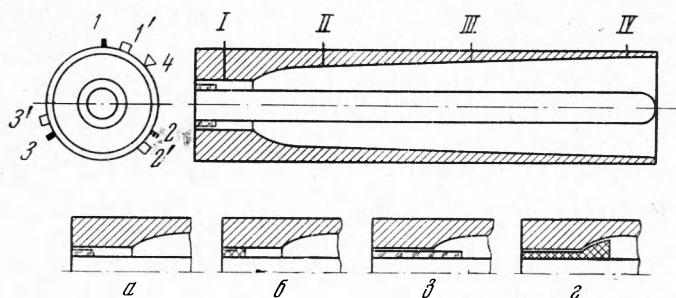
О ТЕПЛОВЫХ ПОТЕРЯХ В ИМПУЛЬСНОМ УСКОРИТЕЛЕ ПЛАЗМЫ

А. М. Рушайло (Москва)

В работе [1] было отмечено неравномерное распределение тепловых потерь и плотности электрического тока в профилированном канале коаксиального импульсного электромагнитного ускорителя плазмы.

Ниже будет показано, что эта неравномерность — основная причина больших тепловых потерь в канале. При уменьшении неравномерности в распределении разряда экспериментально удалось снизить потери в ускоряющие электроды и увеличить энергетический к. п. д. ускорителя с 45 до 60%.

1. Эксперименты проводились на установке со следующими параметрами: емкость батарей электрических конденсаторов $C_0 = 1480$ мкф, рабочее напряжение $V_0 = 2-5$ кВ (начальная энергия $W_0 = 3 \cdot 10^9 - 1.85 \cdot 10^4$ Дж), начальная индуктивность контура $L_0 = 60$ нГн, максимальные токи разряда $I_m = 80-450$ кА, полупериод тока $1/2 T = 3.4 \cdot 10^{-5}$ сек, средняя скорость плазмы $v = 4-8 \cdot 10^6$ см/сек.



Фиг. 1. Схема ускоряющих электродов и четырех вариантов начального участка: а, б — кварцевый и фторопластовый изоляторы в горле; в, г — кварцевый и фторопластовый изоляторы в квазицилиндрическом канале; 1, 2, 3 — световоды, 1', 2', 3' — тепловые датчики, 4 — поджигающие электроды

Исследования велись в режиме одиночного разряда в вакуумной камере с рабочим давлением $P_0 = 5 \cdot 10^{-5} - 10^{-4}$ мм рт. ст.

В качестве рабочего тела использовался материал эрозии электродов (медь или дюралюминий) и изоляторов (кварц или фторопласт). Разряд в канале инициировался специальным поджигающим электродом, к которому подводился высоковольтный импульс от скоростной кинокамеры СФР.

В ходе экспериментов измерялись следующие величины: начальная энергия конденсаторов и начальное давление в рабочей камере; энергия, подводимая к ускоряющим электродам (из осциллограмм полного тока и падения напряжения на электродах); распределение по поверхности наружного электрода суммарных за время разряда тепловых потоков (калориметрическими тепловыми датчиками [1]); световая картина развития разряда в ускорителе (скоростной кинокамерой СФР с использованием гибких световодов) и энергия плазменной струи, т. е. энергетический к. п. д.¹ (калориметром).

Энергия плазменной струи определялась трехсекционным цилиндрическим калориметром диаметром 9 см и длиной 80 см (20 + 40 + 20). Калориметр устанавливался на расстоянии 1 см от выходного сечения ускоряющих электродов.

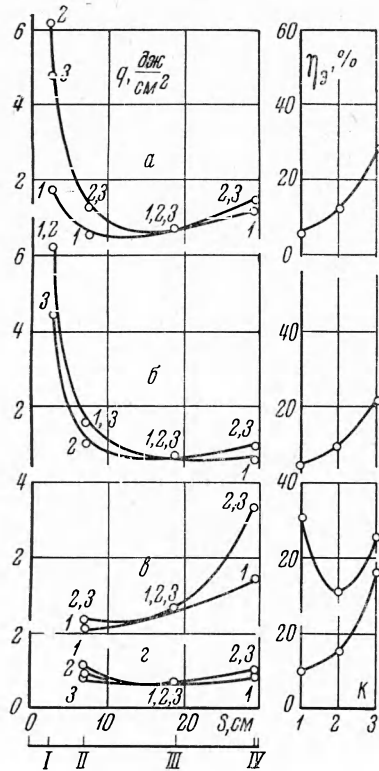
Форма канала ускоряющих электродов показана на фиг. 1. Особенностью этого канала является узкое горло в начальном участке, переходящее в квазицилиндрический кольцевой канал. Выбранная профилировка была призвана стабилизировать разряд в начальном участке и обеспечить квазистационарное ускорение плазмы на всей длине ускорителя.

Ускоряющие электроды имели следующие размеры: длина 30 см, диаметр наружного электрода 7.5 см, диаметр внутреннего электрода 2 см и диаметр горла 3 см. В четырех сечениях по длине, по три в каждом сечении, в стенке наружного электрода устанавливались 12 световодов и 12 тепловых датчиков. Их расположение показано на фиг. 1. Поджиг разряда осуществлялся одним из двух поджигающих электродов, расположенных в первом и вблизи второго сечений.

Для управления распределением разряда в канале изменялась форма начального участка и подбирались материал межэлектродного изолятора. Исследовались четыре

¹ Под энергетическим к. п. д. здесь принято отношение полной энергии струи плазмы к начальной энергии конденсаторов.

варианта начального участка, показанные на фиг. 1: (а) канал с узким горлом и кварцевым изолятором; (б) канал с узким горлом и фторопластовым изолятором; (в) квазипцилиндрический канал с кварцевым изолятором; г) квазипцилиндрический канал с фторопластовым изолятором.



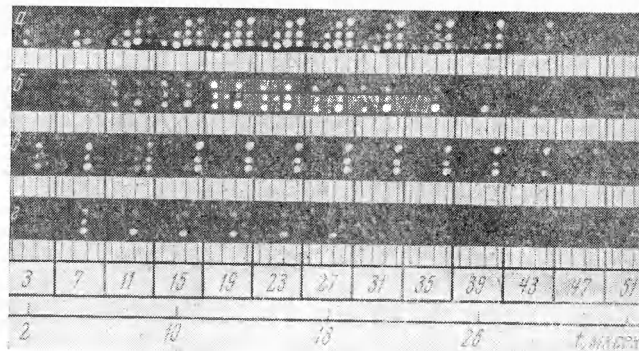
Изменения, произведенные в начальном участке ускорителя, не привели к заметному изменению его начальной индуктивности.

2. Рассмотрим подробно результаты экспериментов, проведенных для каждого варианта при $V_0 = 3$ кВ ($W_0 = 6600$ Дж).

Азимутальное и продольное распределения теплового потока, измеренного тепловыми датчиками, вместе с диаграммами распределения энергии плазменной струи по сечениям калориметра (I — сечение, ближайшая к калориметру), приведены на фиг. 2. На фиг. 3 приведены СФР-граммы картины разряда в канале, полученные при помощи световодов. Здесь четыре фотографии соответствуют четырем вариантам начального участка и содержат по 13 кадров, снятых со скоростью 1 500 000 кадр/сек, и охватывающих весь первый полупериод тока. В каждом кадре двенадцать световых точек соответствуют двенадцати световодам. Четыре столбца слева направо соответствуют сечениям, а каждая строка сверху вниз соответствует номеру теплового датчика, расположенного по окружности электрода, как показано на фиг. 1.

Фиг. 2. Распределение удельного теплового потока q по поверхности наружного электрода и энергии плазменной струи η_3 по сечениям калориметра (K); $V_0 = 3$ кВ, $W_0 = 6600$ Дж

Вариант (а). В этом варианте условия и полученные результаты оказались такими же, как в работе [1]. Дополнительная информация получена на СФР-граммах. Световая картина (фиг. 3, а) показывает, что разряд возникает вблизи третьего световода в первом сечении (I—3) и второго и третьего световодов во втором сечении (II—2, II—3). Затем плазма заполняет весь канал, и свечение появляется во всех световодах третьего и четвертого сечений. Световоды I—1, I—2 и II—1 из-за азимутальной неоднородности разряда в горле остаются темными на протяжении всего полупериода тока.



Фиг. 3. СФР-граммы развития разряда в коаксиальном канале ускорителя. $V_0 = 3$ кВ, $W_0 = 6600$ Дж

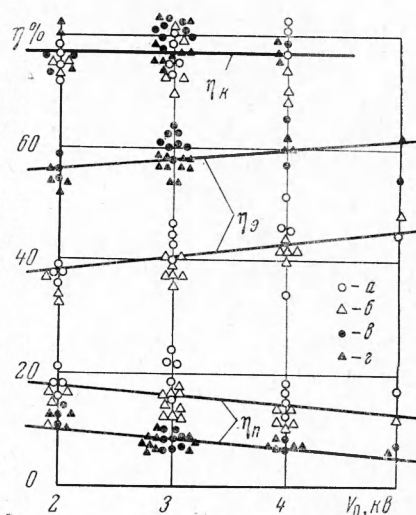
Аналогичные выводы можно сделать по данным тепловых датчиков. Из графика распределения тепловых потоков (фиг. 2, а) видно, что наибольший тепловой поток за-

регистрован в первом сечении датчиками $I-2$ и $I-3$, между которыми расположен световод $I-3$. Корреляция между показаниями тепловых датчиков и световодов наблюдается и во втором сечении.

Из осциллограмм тока и напряжения следует, что разряд в ускорителе быстро затухает. Существенными оказываются лишь два полупериода тока, причем основные процессы происходят в первом полупериоде. Максимум тока наступает через 13 мксек после начала разряда и составляет 250 ка , а весь полупериод тока равен 34 мксек .

Расчеты подводимой к ускоряющим электродам энергии, проведенные по осциллограммам, показали, что к концу первого полупериода к электродам подводится 64% начальной энергии, накопленной в конденсаторах. Во втором полупериоде к электродам подводится еще около 9% начальной энергии. Всего в эксперименте варианта (а) к электродам подводится примерно 73% начальной энергии. Остальные 27% составляют потери в конденсаторах и подводящих электродах. Во всех дальнейших экспериментах, с точностью до нескольких процентов, потери в конденсаторах и подводящей цепи оставались постоянными и равными примерно 25% .

Фиг. 4. Баланс энергии в импульсном ускорителе; η_k — энергия, подводимая к ускоряющим электродам; η_0 — энергетический к. п. д. ускорителя; η_n — потери в электродах, определенные тепловыми датчиками



Энергетический к. п. д. ускорителя, измеренный калориметром, составил для варианта (а) 46% . Рядом с графиком теплоотода на фиг. 2, а, приведен график распределения энергии струи плазмы по секциям калориметра, из которого видно, что большая часть энергии усваивается последней секцией калориметра с плоским дном, т. е. струя плазмы имеет узкую направленность и малый угол расширения.

Вариант (б). В этом случае кварцевый изолятор в горле заменялся фторопластовым (фиг. 1, б). При этом, как видно из графиков распределения тепловых потоков (фиг. 2, б) и картины распределения разряда (фиг. 3, б), отмечается некоторое выравнивание азимутальной неравномерности разряда в горле по сравнению с вариантом (а). Однако продольная неравномерность в распределении теплового потока осталась прежней и интегральные характеристики ускорителя (общие потери в канале, энергетический к. п. д. и др.) изменились слабо.

Вариант (в). Для уменьшения большой продольной неравномерности в распределении тока, основной причиной которой является, по-видимому, узкое горло, кварцевый изолятор выдвигался из горла на 5 см в квазицилиндрическую часть канала (фиг. 1, в). Датчики и световоды первого сечения в этих экспериментах давали нулевые показания. Поджиг разряда осуществлялся во втором сечении.

СФР-грамма картины разряда (фиг. 3, в) показывает, что в этом случае разряд возникает между вторым и третьим сечениями и, не задерживаясь в начальном участке канала, перемещается на концы электродов. То же следует и из графика для распределения теплоотода (фиг. 2, в). Полные тепловые потери в канале уменьшились примерно на 10% ; соответственно увеличился энергетический к. п. д. Однако увеличение к. п. д. произошло, как видно из фиг. 2, в, за счет увеличения энергии, попадающей на первую секцию калориметра. В этом случае плазма большую часть полупериода тока ускоряется не внутри, а на концах электродов и вытекает широко расходящейся струей с потерями реактивной тяги.

Вариант (г). В этом варианте кварцевый изолятор в квазицилиндрическом канале был заменен фторопластовым (фиг. 1, г). Фторопласт легко испаряется, и при помощи его оказалось возможным «привязать» разряд к начальному участку в квазицилиндрическом канале. СФР-грамма (фиг. 3, г) и распределение теплоотода (фиг. 2, г) показывают, что в этом случае как азимутальное, так и продольное распределения тока в канале становятся достаточно равномерными. Энергетический к. п. д. увеличился до 60% , а потери в канале снизились примерно на 10% . Условие равномерного распределения разряда на всей длине ускорителя позволило увеличить энергетический к. п. д. до 60% при сохранении узкой направленности истекающей струи. Из фиг. 2, г видно, что основная доля энергии плазменной струи зафиксирована в калориметре последней секцией.

3. Результаты многочисленных экспериментов, проведенных при рассмотренных выше условиях, но для различных начальных напряжений, показаны на фиг. 4. Здесь по оси абсцисс отложено напряжение, а по оси ординат приведены в процентах от начальной энергии: η_k — энергия, подводимая к ускоряющим электродам; η_e — энергетический к. п. д. ускорителя; и η_n — суммарные потери в электроды. Полный теплоотвод в электроды находился в предположении, что тепловые потоки в наружный анод и внутренний (катод) электроды одинаковы [1].

Из приведенных для баланса энергии графиков видно, что: 1) к электродам во всех случаях подводится 70—80% начальной энергии конденсаторов. Остальная часть энергии (30—20%) теряется в конденсаторах и подводящей цепи; 2) в диапазоне начальных напряжений $V_0 = 2-5$ кэ (начальных энергий $W_0 = 3-18.5$ кдж) все энергетические характеристики, энергетический к. п. д., потери в канале и подводимая к электродам энергия слабо зависят от напряжения; 3) с переходом от профилированного канала с узким горлом к квазицилиндрическому энергетический к. п. д. увеличивается с 40—45% до 55—60% при одновременном уменьшении тепловых потерь в ускоряющие электроды.

Автор благодарен Г. М. Бам-Зеликовичу за внимание, С. В. Гусеву и Э. И. Парфеновой за помощь при проведении и обработке экспериментов.

Поступила 27 II 1967

ЛИТЕРАТУРА

1. Р у ш а й л о А. М. Измерение тепловых потоков и оценка температуры электродов в импульсном электромагнитном ускорителе плазмы. ПМТФ, 1965, № 4.

НИЗКОЧАСТОТНЫЕ КОЛЕБАНИЯ ПЛАЗМЫ В ПЛОСКОСТНЫХ ДИОДАХ

Г. В. Гордеев

(Ленинград)

Рассматриваются низкочастотные колебания плазмы в плоскостных диодах методом кинетического уравнения с учетом асимметрии граничных условий на границах плазмы с приэлектродными барьерами. Показывается, что волны, движущиеся от катода к аноду, могут возбуждаться при меньшей скорости дрейфа электронов, чем в случае неограниченной плазмы, за счет того, что на эти волны накатываются волны, отраженные от электродов. Выведено условие возникновения незатухающих колебаний плазмы при длине волны, равной расстоянию между электродами.

В работе [1] было выведено дисперсионное уравнение колебаний плазмы в плоскостных диодах методом кинетического уравнения с учетом асимметрии граничных условий на границах плазмы с приэлектродными областями. Асимметрия граничных условий связана с наличием внешнего напряжения, наложенного между электродами, при котором одни и те же заряженные частицы могут ускоряться при движении на один электрод и замедляться при движении на другой электрод. В той же работе [1] полученное таким образом дисперсионное уравнение исследовалось в случае, когда колебания плазмы будут высокочастотными (электронными). В предлагаемой работе исследование дисперсионного уравнения, полученного в [1], будет продолжено на случай, когда колебания плазмы являются низкочастотными (ионными).

В работе [2] рассматривались низкочастотные колебания в неограниченной плазме; там было выведено условие возбуждения волн за счет энергии электронов, дрейфующих во внешнем поле, без наличия добавочного пучка частиц. Экспериментальная проверка этой теории, изложенная в работе [3], качественно подтвердила вывод теории о возбуждении колебаний плазмы без наличия добавочного пучка частиц. Количественные же результаты теории несколько расходятся с результатами эксперимента. В данной работе будет показано, что учет влияния границ плазмы на колебания в ней значительно приближает количественные выводы теории к результатам эксперимента.

1. Дисперсионное уравнение колебаний плазмы в плоскостных диодах имеет следующий вид [1]:

$$\text{Det} \{ [1 + A_1(k) + A_2(k)] \delta_{kk_1} + B_1(-k, -k_1) + B_2(k, k_1) \} = 0 \quad (1.1)$$

Здесь $k = \pi n / l$, $k_1 = \pi m / l$ — волновые числа, причем $k > 0$, если волна распространяется от анода к катоду, и $k < 0$ при обратном направлении распространения.