

УДК 537.5

Экспериментальное исследование пространственной анизотропии излучения импульсного плазмотрона

Ю. А. Бауров

Центральный научно-исследовательский институт машиностроения, Москва, Россия

И. Б. Тимофеев, В. А. Черников, С. Ф. Чалкин

Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, Москва, Россия

Приведены результаты экспериментального исследования интегральной по времени и по спектру (в полосе прозрачности кварца) светимости плазмы, созданной импульсным плазмотроном, в зависимости от положения его оси относительно окружающего пространства. Показано, что пространственное распределение интенсивности излучения плазмы носит явно выраженный анизотропный характер, а именно, наблюдается некоторый пространственный конус направлений оси плазмотрона, по образующим которого излучение плазмы достигает максимальных значений.

В работе [1] рассмотрена анизотропия различных крупномасштабных явлений, наблюдаемых при исследованиях астрофизических объектов: анизотропия реликтового излучения, $l = (264,3 \pm 0,3)^\circ$; $b = (48 \pm 0,1)^\circ$, где l и b — координаты в Галактической системе координат: l — долгота, b — широта (метод исследования — эффект Доплера); первая анизотропия: движение со скоростью ~ 600 км/с большого количества вещества с характерным размером ~ 100 Мпк (местное суперскопление, рассмотрено движение ~ 400 эллиптических галактик), направленное в точку Вселенной с координатами $l = (312 \pm 11)^\circ$; $b = (6 \pm 10)^\circ$ (метод исследований — определение пекулярных скоростей); вторая анизотропия и т. д.

Поскольку основным состоянием вещества в звездах является плазма, закономерна постановка вопроса: нельзя ли наблюдать какие-нибудь проявления известных в астрофизике анизотропных явлений в земных условиях — в экспериментах с высокотемпературной плазмой, схожей по характеристикам с плазмой звездных образований [2]. Так, в работе [3] экспериментально исследуется теплосодержание в струе магнитоплазодинамического ускорителя (МПДУ) с помощью водяного калориметрического устройства в зависимости от ориентации МПДУ в физическом пространстве в процессе вращения с Землей. Показано, что в разное время суток теплосодержание в струе МПДУ, попадаемой в калориметр, меняется в среднем на 7 %. Однако сложность конструкции МПДУ не позволяла проводить экспериментальные измерения при его различных ориентациях относительно окружающего пространства, поэтому целью настоящей работы было дальнейшее проведение экспериментальных исследований возможной анизотропии пространства.

В качестве основного элемента измерений использовалось излучение импульсного плазмотрона, созданного на базе магнитоплазменного компрессора (МПК). Выбор такого импульсного плазмотрона для проведения измерений основывался на следующих факторах. Во-первых, на стабильности работы такого плазмотрона. Действительно, как показано в работах [4, 5], излучение

МПК остается практически постоянным (в пределах нескольких процентов) при неизменных внешних параметрах: рабочего напряжения и сопротивления цепи питания плазмотрона. Во-вторых, излучение МПК в максимуме разрядного тока близко к излучению абсолютно черного тела [5, 6]. В этом случае предполагаемая анизотропия пространства, проявляющаяся в виде дополнительного выделения энергии [7], приведет к возрастанию температуры плазмы T и резкому (пропорционально T^4) увеличению излучения, что позволяет надежно регистрировать относительно слабые эффекты. Немаловажным является и тот факт, что простота конструкции плазмотрона позволяет легко его ориентировать во всей полусфере окружающего пространства.

Экспериментальная установка и методика проведения измерений

Экспериментальная установка состояла из импульсного генератора плазмы — плазмотрона и системы регистрации плазменного излучения. Питание плазмотрона осуществлялось от емкостного накопителя энергии общей емкостью 100 мкФ с рабочим напряжением до 5 кВ. Полная энергия, запасенная в накопителе, составляла ~1,25 кДж. Заряд батареи осуществлялся от стандартного высоковольтного источника питания ГОР-100. Батарея конденсаторов коммутировалась на нагрузку — импульсный плазмотрон с помощью воздушного разрядника тригatronного типа. Запуск разрядника происходил при подаче на межэлектродный промежуток короткого (~1 мкс) высоковольтного (~30 кВ) импульса, поступающего со схемы запуска.

Конструкция импульсного плазмотрона 1 представлена на рис. 1. Корпус 2 (внешний электрод — анод) плазмотрона выполнен из тонкостенной медной трубки с внешним диаметром 11 мм и длиной 100 мм. Осевой электрод 3 плазмотрона (катод) диаметром 4 мм, изготовленный из медного прутка, помещался в трубку из оргстекла 4 с внутренним диаметром 4 мм и внешним диаметром, равным внутреннему диаметру внешнего электрода. Среднестатистическая картина токов в разряде плазмотрона [4] показана поз. 5. Угол $\varphi \sim 30^\circ$. Вся конструкция в сборе представляла собой эквивалент коаксиала.

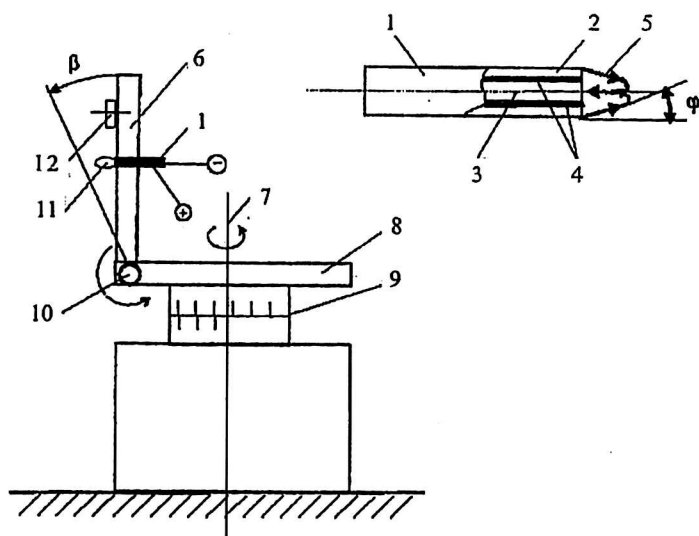


Рис. 1. Схема измерительного устройства

Плазмотрон крепится на крепежной плите 6 из текстолита, помещенной на специальном юстировочном столе 8, способным вращаться вокруг вертикальной оси 7. Стол снабжен лимбом 9, позволяющим контролировать угол поворота всей системы относительно некоторого начального положения. Крепежная плита может вращаться вокруг горизонтальной оси 10 на произвольный угол β . Вся система в сборе обеспечивает вращение плазмотрона в процессе проведения эксперимента вокруг вертикальной оси 7 на любой угол, а вокруг горизонтальной оси — в диапазоне углов $-90^\circ < \beta < 60^\circ$. Углом $\beta < 0$ соответствует поворот разряда плазмотрона в сторону поверхности Земли. Горизонтальному положению плазмотрона соответствует угол $\beta = 0$. При этом траектория торца плазмотрона в процессе вращения представляет собой окружность.

Все эксперименты проводились в воздухе при атмосферном давлении.

Вольт-амперные характеристики плазмотрона измерялись с помощью пояса Роговского и безындукционного делителя напряжений, собранного на сопротивлениях типа ТВО. По вольтамперным характеристикам контролировалась вложенная в разрядный канал энергия.

Типичные вольт-амперные характеристики разряда представлены на рис. 2. Видно, что разряд носит квазипериодический характер, однако с большим затуханием. Квазипериод разрядного тока в условиях эксперимента составлял ~ 70 мкс. Амплитуда силы разрядного тока в первом максимуме достигала 21 кА. Максимальное значение напряжения на межэлектродном промежутке составляло 3,5 кВ при величине зарядного напряжения на накопителе 5 кВ.

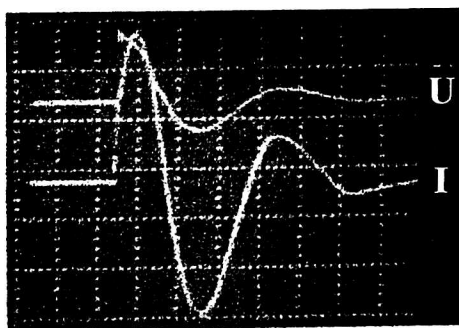


Рис. 2. Вольт-амперные характеристики разряда плазмотрона:
I — ток; U — напряжение

Динамика истечения плазмы (см. рис. 1, поз. 11) и характерные размеры плазменной струи исследовались с помощью сверхскоростного фоторегистратора типа СФР, работающего в режиме покадровой съемки. Фрагмент СФР-граммы представлен на рис. 3. Ранее проведенные исследования [4] данного импульсного плазмотрона показали, что около 30—40 % энергии плазмотрона реализуется в видимом диапазоне излучения.

Измерение абсолютного значения энергии излучения в полосе прозрачности кварца ($\lambda > 220$ нм) проводилось с помощью термостолбика типа ЛЭТИ (рис. 1, поз. 12), жестко закрепленного на плите (см. рис. 1, поз. 6) так, чтобы в процессе вращения плазмотрона не изменялось взаимное расположение плазмотрона и термостолбика. При этом ось термостолбика направлялась в заранее известную область максимального свечения разряда, расположенную на оси плазмотрона на расстоянии ~ 2 см от его торца.

Для калибровки термостолбика использовался эталонный источник излучения типа ИФП-1200 с энергией излучения в единичный телесный угол $E_{\text{эт}} = 35,64$ Дж/стер. Сигнал с термостолбика при калибровке и в процессе

эксперимента подавался на вход шлейфового осциллографа К117. Энергия излучения плазмы вычислялась по формуле

$$E = 4\pi A \rho n,$$

где A — градуированный коэффициент; l — расстояние от источника излучения, м; n — максимальное значение сигнала на ленте шлейфового осциллографа, мм.

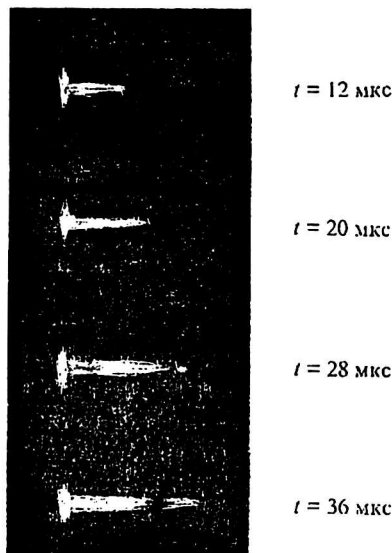


Рис. 3. Фрагмент СФР-граммы плазменной струи

При характерных размерах зоны кумуляции плазмы порядка 1 см и расстоянии от термостолбика до источника плазмы $l = 20$ см источник излучения можно было считать точечным.

Поскольку энергия излучения плазмы пропорциональна температуре T^4 , то незначительное изменение T может быть зарегистрировано термостолбиком. Несмотря на значительное увеличение тока и напряжения в разряде рассматриваемого плазмотрона по отношению к эксперименту [3], из-за кратковременности разряда тепловой эффект ожидался на уровне 10 %.

Главным регистрирующим параметром в эксперименте являлось отклонение луча шлейфового осциллографа К117, пропорциональное интенсивности свечения плазмы, которое фиксировалось на фотобумаге. По нему можно было судить об энергии, выделившейся в разряде плазмотрона при сканировании им небесной сферы.

При проведении экспериментальных измерений использовалась следующая методика. На первой стадии опытов, проводимых с 15.12.1999 г. по 3.05.2000 г., вращение плазмотрона осуществлялось только вокруг вертикальной оси 7 (см. рис. 1). Время проведения эксперимента определялось исходя из времени расположения предполагаемого направления пространственной анизотропии в окрестности горизонтальной плоскости. При этом на основе имеющихся данных [3, 7] считалось, что такое направление имеет во второй экваториальной системе координат следующие ориентировочные координаты: прямое восхождение $270^\circ < \alpha < 300^\circ$, склонение $20^\circ < \delta < 40^\circ$.

Кроме первых опытов (15.12.1999 г. и 20.01.2000 г.), в которых измерения светимости плазменной струи проводились через каждые 15° при полном повороте юстировочного стола на 360° , во всех других опытах энергия излучения плазменной струи плазмотрона измерялась при полном повороте юстировочного стола через каждые 10° .

Во второй стадии экспериментов при выявлении экстремальных направлений, полученных на первой стадии при вращении плазмотрона в горизонтальной плоскости, проводилось сканирование небесной сферы в окрестности выявленных экстремальных направлений для более точного определения пространственного расположения этих направлений. В этом случае положение оси плазмотрона изменялось в горизонтальной плоскости в пределах $\pm 50^\circ$ относительно выбранного направления, а в вертикальной плоскости — в пределах $\pm 40^\circ$ для каждого углового положения оси плазмотрона в горизонтальной плоскости. В обоих случаях шаг изменения углового положения составлял 10° .

Результаты экспериментов и их обсуждение

С 15.12.1999 г. по 3.05.2000 г. было проведено 32 эксперимента с вращением плазмотрона вокруг вертикальной оси на 360° . Продолжительность одного опыта (25 или 37 одиночных разрядов) не превышала 30—35 мин. На рис. 4 для иллюстрации опытов показаны величины отклонения луча шлейфового осциллографа L в зависимости от угла поворота θ .

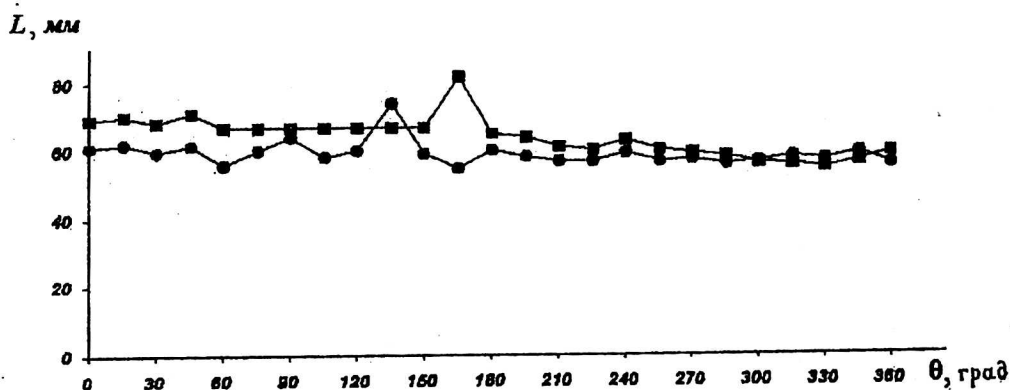


Рис. 4. Величина отклонения луча шлейфового осциллографа L в зависимости от угла поворота θ для экспериментов, проведенных:

■ — 15.12.1999 г. (16⁴⁰—17¹⁵); ● — 20.01.2000 г. (17²⁰—17⁵⁰)

В опыте, проведенном 15.12.1999 г. с 16⁴⁰ до 17¹⁵ ч, в 16⁵⁵ был зафиксирован всплеск светимости плазмы в разряде плазмотрона при угле $\theta = 165^\circ$, отсчитываемом от произвольного направления (Н), показанного на рис. 5. Величина этого всплеска на 25,7 % превышала среднюю величину светимости плазмы в процессе эксперимента при среднеквадратичной ошибке $\pm 3,7$ %. В опыте 20.01.2000 г., проходящем с 15³⁵ до 16¹⁰, был зафиксирован всплеск светимости плазмы в разряде плазмотрона при угле $\theta = 135^\circ$, отсчитываемом от того же направления (Н), на 24 % превышающий среднюю величину светимости плазмы в эксперименте при величине среднеквадратичной ошибки $\pm 3,3$ %.

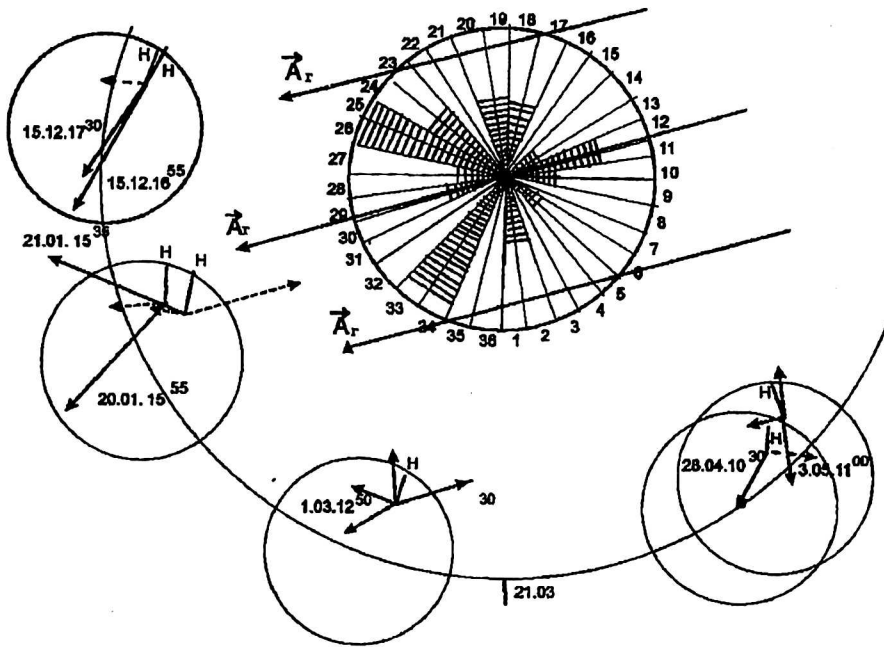


Рис. 5. Всплеск светимости плазмы в разряде плазмотрона:

→ — направления оси плазмотрона, при которых были зафиксированы максимумы отклонений луча осциллографа при вращении плазмотрона в горизонтальной плоскости;

H — направление, соответствующее началу поворота $\theta = 0$.
Дата и указанное время соответствуют дате и московскому времени наблюдения максимумов отклонений

Для более лучшего понимания полученных результатов и методики их обработки на рис. 5 для некоторых опытов в качестве иллюстрации стрелками показаны проекции направлений оси плазмотрона на плоскость эклиптики, при которых в опытах появилась максимальная светимость разряда в плазме, для конкретного расположения Земли на траектории в процессе ее вращения вокруг Солнца с указанием даты и времени наблюдения максимума светимости, превышающего ошибку. Пунктирной линией показаны неглавные экстремальные направления светимости. Во всех экспериментах вращение плазмотрона осуществлялось против часовой стрелки, если смотреть сверху на плоскость вращения. Буквой H отмечено направление оси плазмотрона при угле $\theta = 0$ для каждого эксперимента.

В месте расположения Солнца (см. центр, рис. 5) показана круговая диаграмма, суммирующая в себе результаты всех экспериментов. Подсчет результатов экспериментов производился следующим образом. Круг поделен на десятиградусные секторы таким образом, что направление радиуса вектора, проведенного из центра круга через начальную границу первого сектора, соответствует направлению на точку весеннего равноденствия (21.03.), от которой, согласно второй экваториальной системе координат против часовой стрелки, отсчитывается координата α .

Высота заштрихованных треугольников с углом в центре круга, равным 20° , соответствует относительной сумме процентов экстремальных отклонений луча осциллографа от среднего значения превышающих стандартную ошибку измерений и попавших в тот или иной треугольник, для всех вспле-

сков светимости, наблюдаемых во всех 32 экспериментах. Максимумы светимости чаще всего и с максимальной амплитудой наблюдаются в секторах 25, 26 и 33, 34.

Отметим, что секторы 25, 26 и 33, 34 расположены симметрично относительно некоторого направления, расположенного в секторах 29—30 с координатой $\alpha \approx (290 \pm 10)^\circ$. При этом эффективный угол между направлением осевого тока плазматрона и этой осью симметрии был равен 140° с ошибкой $\pm 10^\circ$.

Полученный результат полностью (с указанной ошибкой) совпадает с результатом, зафиксированным в работе [7], в которой использовался стационарный плазматрон, расположенный на специальном вращающемся постаменте, а в качестве чувствительного элемента — измерительная медная трубка, помещенная в факел плазматрона, по которой прокачивалась вода.

Необходимо отметить, что значительному количеству выбросов, попавших в секторы 11 и 12, соответствует направление, точно противоположное направлению уже указанной оси симметрии с угловым направлением $\alpha \approx 290^\circ$.

С 10.05 по 31.05.2000 г. и с 11.10 по 3.11.2000 г. был проведен цикл экспериментов по сканированию небесной сферы в горизонтальной и вертикальной плоскостях в окрестностях секторов от 25 до 34 в целях выяснения наиболее эффективных углов пространственного расположения оси плазматрона по отношению к обнаруженной пространственной оси анизотропии, при которых наблюдается максимальный эффект.

В табл. 1 в качестве иллюстрации показаны результаты последнего эксперимента, проведенного 3.11.2000 г. Всего за эксперимент производилось 77 одиночных разрядов плазматрона. Среднее время проведения эксперимента по горизонтальному и вертикальному сканированию небесной сферы осью торцевого плазматрона составляло около 90 мин.

Таблица 1

Отклонение луча осциллографа L в эксперименте, проводившимся 3.11.2000 г. с 17²² по 19⁰⁰ ч московского времени

γ , град β , град	270	260	250	240	230	220	210	200	190	180	170	$L_{\text{ср}}$, мм	σ , %
-20	70*	70,5*	69,5	67	67,5	65	66	66	67	65	70*	67,6	2,95
-10	69,5	66	62,5	66,5	63	63	67	66	63	66,5	62,5	65,1	3,5
0	65	64	61	67,5*	69*	66,5	65	60,5	63	65,5	66	64,8	3,8
+10	63,5	65	67*	63	65	62,5	66,5*	61	63	63	63	63,9	2,7
+20	65	65	65	65,5	64,5	67	66,5	63,5	63,5	69*	63,5	65,3	2,5
+30	64	64,5	66	63	63,5	72,5*	69,5	59,5	66,5	72*	68	66,3	5,7
+40	71*	65	63	67,5	67,5	65,5	62	65,5	65	69,5*	66	66,1	3,8

Примечание. Угол γ соответствует повороту плазматрона вокруг вертикальной оси, а угол β — вокруг горизонтальной оси; * — положения оси плазматрона для опыта 3.11.2000 г.

В каждой клетке таблицы показана величина отклонения луча шлейфового осциллографа, пропорциональная энергии излучения плазменного разряда плазматрона.

Поскольку эксперимент длился 1,5 ч (поворот Земли примерно на 23°), расчет величин среднего отклонения луча осциллографа ($L_{\text{ср}}$) проводился для одного прохода плазматрона по углу γ при фиксированном угле β . Величина $L_{\text{ср}}$ и среднеквадратичное отклонение σ (в %) для каждого прохода плазматрона показаны в табл. 1. Время проведения экспериментов выбиралось исходя из времени нахождения предполагаемой оси пространственной анизо-

клона оси плазмотрона по отношению к этой плоскости (угол β). Последнее понятно, так как сечения конуса плоскостью хорошо известны.

Диапазоны углов $\gamma = (170-190)^\circ$ и $(250-270)^\circ$ на рис. 6 соответствуют по пространственному расположению секторам 34, 33 и 26, 25 на рис. 5, соответственно.

Горизонтальные плоскости для рассматриваемых чисел и приведенного времени проведения экспериментов (31.05.2000 г. — 11²⁵ ч и 11.10.2000 г. — 20⁰⁰ ч) пересекаются под углом $\sim 35^\circ$.

Как видно из рис. 6, за исключением одной точки ($\gamma = 250^\circ$, $\beta = -40^\circ$), все остальные точки положений плазмотрона весенней серии экспериментов образуют сечение некоторого конуса направлений осей плазмотрона. Разброс точек в осенней серии экспериментов более велик, но с разбросом координат направлений $\pm 10^\circ$ все экспериментальные точки, кроме двух ($\gamma = 220^\circ$, $\beta = +10^\circ$; $\gamma = 225^\circ$, $\beta = +10^\circ$), укладываются в конус, показанный на рис. 6. Направление оси этого конуса также показано на рис. 6. Оно имеет координаты: $\alpha \approx (293 \pm 10)^\circ$ и $\delta \approx (36 \pm 10)^\circ$ во второй экваториальной системе координат. Указанное направление качественно совпадает с результатами ранее проведенных экспериментов [3, 7], а также с данными астрофизических наблюдений [1].

Действительно, пространственные координаты указанных выше явлений анизотропии различных крупномасштабных процессов, наблюдаемых при исследованиях астрофизических объектов, лежат в окрестности конической поверхности с раствором $\approx 100^\circ$, полученной при вращении его образующей вокруг оси с указанными координатами. Первая анизотропия имеет во второй экваториальной системе координат следующее направление: $\alpha \approx 169^\circ$ и $\delta \approx -14^\circ$, а вторая — $\alpha \approx 215^\circ$ и $\delta \approx -50^\circ$. При этом первая из них отклонена от конической поверхности на $\Delta\alpha \approx 10^\circ$ и $\Delta\delta \approx 15^\circ$, а вторая — на $\Delta\alpha \approx 30^\circ$ и $\Delta\delta \approx 20^\circ$.

Анализ ошибок эксперимента

Ошибки по определению направления оси пространственной анизотропии излучения плазмотрона подразделяются на систематические $\sigma_{\text{сист}}$ и случайные (статистические) $\sigma_{\text{ст}}$.

К систематическим ошибкам могут быть отнесены: выбросы в начале эксперимента с поворотом плазмотрона, связанные с недостаточностью предварительного “разогрева” системы (т. е. в эксперименте без предварительной “пристрелки” до выхода показаний осциллографа на стационарный режим); нарастание катода плазмотрона в процессе эксперимента, что приводит к изменению геометрии токов разряда (см. рис. 1); выгорание изолятора в процессе экспериментов, что также меняет картину токов в разряде; замутнение стекла термостолбика ЛЭТИ; отход оси термостолбика от направления на максимум светимости разряда; отражающие свет предметы, окружающие экспериментальную установку; ресурсные характеристики конденсатора.

Статистическая ошибка $\sigma_{\text{ст}}$ обусловлена случайным характером геометрической картины токов (см. рис. 1), точностью установки углов γ и β , точностью приборов и аппаратуры (блок питания ГОР-100, вольтметр и т. д.), точностью калибровки термостолбика, точностью построений на рис. 5 и 6, неконтролируемым перегревом контактов, случайными изменениями внешних условий (конвекционные процессы в помещении, случайные изменения освещения, электромагнитной обстановки).

Рассмотрим *систематические ошибки*. На первой стадии экспериментов систематическая ошибка, связанная с недоразогревом плазмотрона перед началом эксперимента, вошла в окончательный результат. Как показали исследования, до начала измерений (поворота плазмотрона в пространстве) необходимо произвести в среднем 7–10 выстрелов, прежде чем плазмотрон выйдет на стационарный режим с минимальной ошибкой. Учет этой ошибки позволяет снизить высоту заштрихованных треугольников в секторах 17–20 (см. рис. 5) на 25 %, тем самым сделать результат более рельефным (на рис. 5 эти ошибки не учтены).

Влияние нарастания катода плазмотрона в процессе эксперимента со скоростью примерно 1 мм за 30–40 разрядов на отклонение луча осциллографа окончательно не выяснено. Оно приводило как к уменьшению чувствительности исследований (уменьшению среднего значения отклонения луча осциллографа L_{cp}), так и его возрастанию. В процессе экспериментов данная ошибка в весенней и осенней сериях экспериментов была сведена к минимуму за счет приведения плазмотрона в исходное положение (зачистка катода и анода перед каждым экспериментом). В процессе эксперимента к плазмотрону не прикасались. Изменение L_{cp} за счет нарастания катода не превышало 2,5 % (σ_k).

Выгорание изолятора в процессе длительной серии с 15.12.1999 г. по 3.05.2000 г. сказывалось на уменьшении общей чувствительности метода исследований, т. е. некотором постоянном дрейфе на уровне 1–2 % за эксперимент (~37 разрядов). Данный дрейф был учтен. На отдельно взятом эксперименте он не сказывался, в окончательных результатах также, поскольку на рис. 5 приведена высота заштрихованных треугольников в процентах.

Перед новой серией экспериментов по сканированию небесной сферы плазмотрон был заменен на новый с аналогичными параметрами.

В процессе экспериментов было изучено влияние замутнения стекла термостолбика на отклонение луча осциллографа. Оно влияло также на общую чувствительность измерительной системы и приводило к дрейфу отклонения луча осциллографа. Протирка стекла за 1–2 ч до эксперимента практически снижала указанный эффект до 2 %. Данная ошибка не влияла на относительную величину амплитуды анализированных выбросов. Отход оси термостолбика от направления максимума свечения разряда в процессе эксперимента мог приводить только к дрейфу или скачкам величины L_{cp} не более 1 % (σ_m).

Эксперименты с плазмотроном проходили в экранированной от внешнего электромагнитного излучения лаборатории, находящейся в подвале физического факультета МГУ им. М. В. Ломоносова, без окон; конвективные течения практически отсутствовали; окружающие предметы всегда располагались на тех же местах, электромагнитные наводки от сторонних источников отсутствовали.

Всего в процессе опытов было произведено ~1800 одиночных разрядов при ресурсе используемого нового конденсатора, равном 10 000, поэтому нестабильность работы последнего не могла сказаться на результатах экспериментов. Суммарная систематическая ошибка ($\sigma_{сист}$) неконтролируемых процессов в эксперименте в связи с их независимостью представима в виде

$$\sigma_{сист} = \sqrt{\sigma_k^2 + \sigma_m^2} = \pm 2,7 \%$$

Статистическая ошибка, обусловленная случайным характером геометрической картины токов разряда (см. рис. 1), входит в суммарную ошибку экс-

перимента и не выделялась специально. Для опытов, проходивших с 15.12.1999 г. по 3.05.2000 г. при повороте плазмотрона в горизонтальной плоскости, суммарная ошибка эксперимента, включающая систематическую и случайную ошибки, показана в табл. 2.

Таблица 2

Величины амплитуд максимальных отклонений (в %) с указанием даты, времени проведения эксперимента и среднеквадратичной ошибки эксперимента (в %)

№ эксперимента	Дата и время эксперимента	Амплитуда максимального отклонения луча осциллографа, %	Средне-квадратичная ошибка эксперимента, %	№ эксперимента	Дата и время эксперимента	Амплитуда максимального отклонения луча осциллографа, %	Средне-квадратичная ошибка эксперимента, %
1	15.12.1999 г. 16 ⁴⁰ -17 ¹⁵	25,7	± 3,7	17	9.03.2000 г. 11 ²⁰ -12 ⁰⁷	7,8	± 2,6
2	15.12.1999 г. 17 ²⁰ -17 ⁵⁰	25,7	± 3,6	18	9.03.2000 г. 12 ²⁰ -12 ⁵⁸	13,9	± 4,6
3	20.01.2000 г. 15 ⁴⁵ -16 ¹⁰	24	± 3,3	19	15.03.2000 г. 10 ⁴⁵ -11 ³⁰	5	± 2,5
4	20.01.2000 г. 16 ²⁰ -16 ⁴⁰	3,5	± 3	20	15.03.2000 г. 11 ⁴⁰ -12 ³⁰	11,3	± 3
5	21.01.2000 г. 14 ⁴⁵ -15 ¹⁵	7	± 4	21	22.03.2000 г. 10 ¹⁵ -11 ⁰⁷	9,3	± 3
6	21.01.2000 г. 15 ³⁰ -16 ⁴⁰	22	± 5,2	22	22.03.2000 г. 11 ¹⁵ -12 ⁰⁰	10,2	± 3,6
7	2.02.2000 г. 14 ⁰⁰ -14 ⁴⁰	16,5	± 5,2	23	29.03.2000 г. 10 ⁴⁵ -11 ⁵⁵	8	± 4
8	2.02.2000 г. 14 ⁵⁵ -15 ³⁰	17,9	± 4,5	24	29.03.2000 г. 12 ⁰⁰ -12 ³⁵	7,6	± 3,5
9	9.02.2000 г. 13 ²⁵ -14 ⁰⁰	11,3	± 6	25	5.04.2000 г. 10 ²⁵ -11 ¹⁰	7	± 3
10	9.02.2000 г. 14 ¹⁰ -14 ⁴⁰	10	± 4,7	26	5.04.2000 г. 11 ¹⁵ -11 ⁵⁵	8,6	± 5
11	16.02.2000 г. 12 ⁵⁵ -13 ²⁰	11,8	± 4,8	27	12.04.2000 г. 11 ⁰⁰ -11 ⁴⁰	12,2	± 3
12	16.02.2000 г. 13 ⁴² -14 ¹⁰	8,7	± 4	28	12.04.2000 г. 11 ⁴⁵ -12 ²²	9,5	± 5
13	23.02.2000 г. 13 ⁰⁰ -13 ⁵⁵	19,8	± 5,1	29	26.04.2000 г. 10 ¹⁷ -11 ⁰⁰	4,5	± 2,6
14	23.02.2000 г. 14 ⁰⁰ -14 ⁴⁵	11,6	± 4,2	30	26.04.2000 г. 11 ⁰⁵ -12 ⁴⁵	4,6	± 3
15	1.03.2000 г. 11 ⁵⁰ -12 ⁴⁰	11 %	± 4,5	31	3.05.2000 г. 11 ⁰⁷ -11 ⁵²	6,2	± 2
16	1.03.2000 г. 12 ⁴⁵ -13 ²⁰	12	± 5	32	3.05.2000 г. 12 ²⁵ -13 ⁰⁷	4	± 2

Точность установки углов γ и β в процессе экспериментов была не хуже $0,5^\circ$ ($\sigma_\gamma < 0,5\%$). Точность определения начального напряжения конденсатора определялась вольтметром блока питания ГОР-100 и была равна $0,5\%$ ($\sigma_{\text{пит}}$). Точность шлейфового осциллографа $\sim 2\%$ ($\sigma_{\text{ш}}$). Ошибка в калибровке термостолбика по предварительным исследованиям не превышала 2% ($\sigma_{\text{к}}$). Точность построения различных кривых была порядка 1° .

Неконтролируемый перегрев контактов был исключен в процессе экспериментов. Случайные изменения светимости окружающих предметов, конвекция воздуха в помещении, электромагнитные помехи от сторонних установок отсутствовали. Согласно приведенным данным, расчетная общая статистическая ошибка ($\sigma_{\text{ст}}$) не превышает $\sim 2,8\%$. Общая расчетная ошибка в экспериментах $\sim 3,9\%$. Как видно, расчетная ошибка близка к среднеквадратичным ошибкам для экспериментов, приведенных в табл. 1, 2, что усиливает достоверность полученных результатов. Как видно из табл. 1, 2 во многих

экспериментах амплитуда отклонения луча осциллографа более чем в два раза превышает среднеквадратичную ошибку экспериментов, что также усиливает достоверность полученных результатов.

Заключение

В настоящей работе показано, что пространственное распределение интенсивности излучения плазмы разряда импульсного торцевого плазматрона носит явно выраженный анизотропный характер. Наблюдается некоторый конус направлений, в которых излучение плазмы достигает своего максимального значения. Ось данного конуса имеет определенное направление: $\alpha \approx (293 \pm 10)^\circ$ и $\delta \approx (36 \pm 10)^\circ$.

Известные в астрофизике координаты рассмотренных пространственных анизотропий крупномасштабных процессов лежат в окрестности конической поверхности с раствором $\approx 100^\circ$.

Авторы благодарны участникам семинаров в МГУ им. М. В. Ломоносова, ИОФ РАН и проф. А. А. Рухадзе за плодотворное обсуждение результатов исследований, а также А. В. Черникову — за помощь в проведении экспериментов и А. Ю. Баурову — за помощь в подготовке работы к печати

Литература

1. Кландор-Клайнротхаус Г. В., Цюбер К. Астрофизика элементарных частиц. — М.: Изд-во УФН, 2000. — 495 с.
2. Альвен Г., Фельтхаммар К.-Г. Космическая электродинамика. — М.: Мир, 1967. — 260 с.
3. Бауров Ю. А., Знак А. Г., Фарафонов В. Г. // ГВТ, 2002 (в печати).
4. Радиационная плазмодинамика/Под ред. Ю. Протасова. Т. 1. — М.: Энергоатомиздат, 1991.
5. Арделян Д. и др. // ДАН СССР. 1987. Т. 292. № 1. С. 78—81.
6. Арделян Д. и др. // Там же. № 3. С. 590—592.
7. Baurov Yu. A., Beda G. A., Danilenko I. P., Ignatko V. P. Experimental Investigation of New Method of Energy Generation in Plasma Devices Caused by Existence of Physical Space Global Anisotropy // Hadronic Journal Supplement. 2000. V. 15. P. 195.

Experimental research of dimensional anisotropy for the impuls plasmatron radiation

Yu. A. Baurov

The Central Research Institute for Machine Building, Korolev, Moscow region, Russia

I. B. Timofeev, V. A. Chernikov, S. F. Chalkin

The Lomonosov's Moscow State University, Moscow, Russia

The results of experimental examination of brightness of the plasma created by a pulsing plasma generator are given in the paper. The integrated on time and on spectrum (in a strip of quartz transparence) radiation was studied depending on a standing of its axis concerning environmental space. It is shown, that the spatial distribution of the plasma radiation has the explicitly expressed anisotropic character, namely, we apparent some spatial cone of the directions to an axis of the plasmatron, and the radiation of plasma reaches maximum ratings on generatrixs of the cone.