

УДК 537.872+621.45

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ ФАКЕЛА ГОРЕНИЯ РЕАКТИВНОГО ДВИГАТЕЛЯ

В. А. Белавин, А. А. Наумов, О. Г. Русева

Казанский филиал Московского энергетического института, Казань, Татарстан, Россия

В. А. Ильин, М. Л. Калантаров

Московский педагогический государственный университет, Москва, Россия

Приведены результаты экспериментального исследования собственного радиотеплового излучения факела горения модели твердотопливного двигателя. Обнаружена и качественно объяснена неизотропность диаграммы направленности излучения.

Решение задач электромагнитной совместимости, экологических проблем, а также ряда прикладных народнохозяйственных задач требует детального изучения характеристик источников радиоизлучения естественного и антропогенного происхождения, в том числе собственного радиоизлучения факелов горения двигателей ракет и реактивных самолетов, что может служить источником радиопомех. В последнем случае задача сводится к диагностике низкотемпературной плазмы. При этом весьма актуальным является определение направленных свойств излучения указанных выше объектов и его частотного спектра.

Значительная часть опубликованных работ выполнена в инфракрасном и оптическом диапазонах спектра электромагнитных волн. В микроволновом диапазоне подобные исследования практически отсутствуют, хотя именно здесь реализуется ряд существенных преимуществ, например, "всепогодность" проведения исследований ввиду того, что микроволновое излучение слабо поглощается атмосферной влагой [1].

Основные задачи данного исследования — излучение направленных характеристик собственного теплового излучения факела твердотопливного реактивного двигателя в широком частотном диапазоне и создание первичной модели этого излучения. Для решения указанных задач были проведены экспериментальные исследования излучательной способности факела горения модели твердотопливного реактивного двигателя, в которых изучались диаграммы направленности и спектральная характеристика излучения в диапазоне частот 3,5—37,5 ГГц.

Схема измерительной установки приведена на рис 1. В качестве объекта исследования использовался факел модельной камеры сгорания, которая представляет собой металлический цилиндр диаметром 74 мм и длиной 38 мм с диаметром сопла 3 мм. Топливом являлась смесь на основе перхлората аммония. Время функционирования двигателя составляло ~ 1,7 с. Истечение струи происходило в режиме недорасширения, т. е. давление в выходном сечении сопла превышало давление окружающей среды. Форма струи в начальном ее участке бочкообразная, скорость была выше звуковой. Для оценки размеров факела использовались результаты видео- и фотосъемки; его длина составляла 500—600 мм, а максимальный диаметр 50—60 мм.

Струю, истекающую из сопла двигателя, по интенсивности излучения можно условно разбить на три характерные области: ближнюю, среднюю и дальнюю. Наиболее интенсивное излучение наблюдается от средней и дальней зон. Размер ближней зоны составляет ~10 r (r — радиус выходного сечения сопла), т. е. в данном эксперименте он был равен 30 мм. Макет двигателя располагался таким образом, чтобы середина факела находилась на центральной оси диаграмм направленностей антенн, независимо от направления факела по азимуту. Угол места в экспериментах не изме-

нялся, факел располагался параллельно поверхности земли. Измерения проводились в направлениях $0-150^\circ$ в направлении 180° излучение не измерялось, так как камера сгорания закрывала большую часть факела. В эксперименте предусмотрены меры для устранения переотражения радиоволн, с этой целью модель двигателя и все металлические конструкции располагались на фоне абсолютно черного тела.

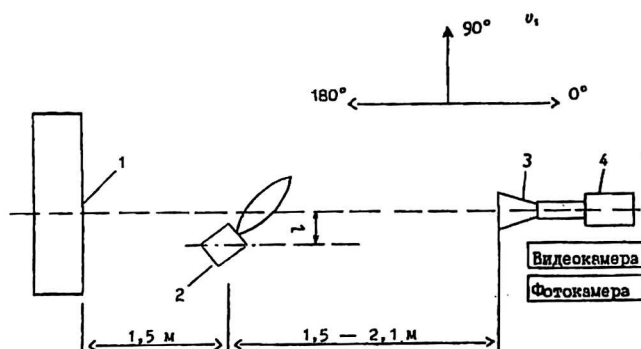


Рис. 1. Схема экспериментальной установки:
1 — абсолютно черное тело; 2 — модельная камера сгорания; 3 — антенна радиометра; 4 — радиометр

Измерительный комплекс включал четыре высокочувствительных радиометра, основные характеристики которых приведены в таблице. На частоте 37,5 ГГц использовался супергетеродинный радиометр, на частоте 22,5 ГГц — радиометр с приемником прямого усиления, на частоте 20 ГГц — детекторный радиометр на контакте Джозефсона [2], на частоте 3,5 ГГц — также радиометр с приемником прямого усиления. Использование радиометра на эффекте Джозефсона с высокой чувствительностью позволяет уменьшить постоянную времени интегрирования до 0,1 с и проводить исследования временных характеристик плазменных образований. Радиометры были оснащены рупорными антеннами, характеристики которых также приведены в таблице.

F , Гц	37,5	22,5	20	3,5
λ , см	0,8	1,35	1,5	8,5
ΔT , К	0,1	0,03	0,01	0,05
Δf , ГГц	1,5	1,5	6	0,25
$\Delta\varphi$, град	20	10	9"	30

Примечание. ΔT — чувствительность радиометра при постоянной интегрирования $\tau = 1$ с; Δf — полоса пропускания приемника по высокой частоте; $\Delta\varphi$ — диаграмма направленности антенны радиометра при вертикальной поляризации принимаемого излучения.

Описанная установка послужила основой для проведения комплекса экспериментов. На рис. 2 приведены результаты экспериментального исследования угловой зависимости излучения факела на частоте 20 ГГц и ее изменения со временем. Из рисунка видно, что интенсивность излучения немонотонным образом зависит от угла наблюдения. В диаграмме направленности излучения обнаруживаются максимумы и минимумы, величина которых меняется со временем. На рис. 3 показана зависимость приращения радиояркостной температуры для угла 110° в функции времени. Видно, что с момента начала горения до $t \approx 0,4$ с интенсивность излучения

возрастает, в интервале 0,5—0,6 с она практически не меняется, а с $t \approx 0,7—1,0$ с — падает. Горение завершается распадом плазмы. В каждый момент времени изрезанность диаграмм направленности сохраняется, сохраняется также максимум излучения по оси факела горения. В эксперименте были измерены диаграммы направленности на различных частотах, примеры которых приведены на рис. 4.

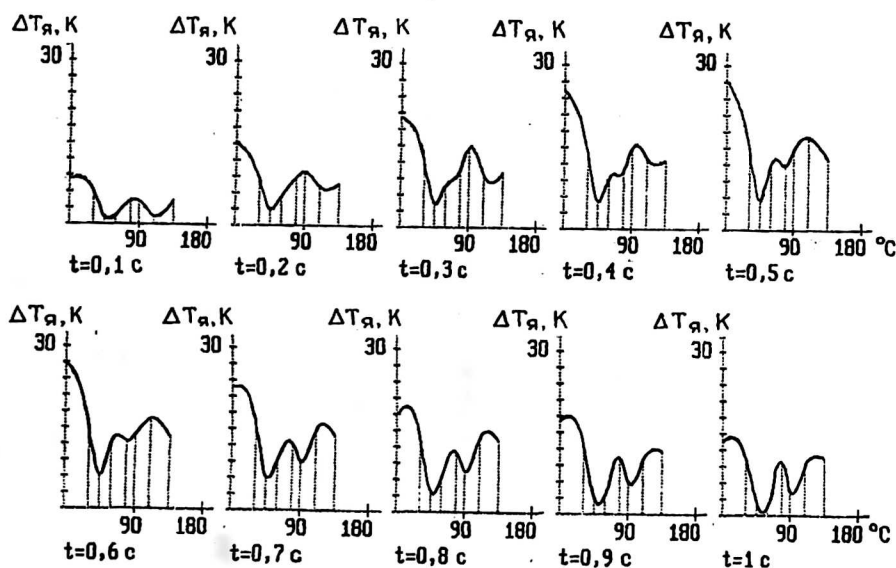


Рис. 2. Диаграммы направленности радиотеплового излучения факела горения твердотопливного реактивного двигателя, измеренные на частоте 20 ГГц в интервале времени 0,1—1,0 с

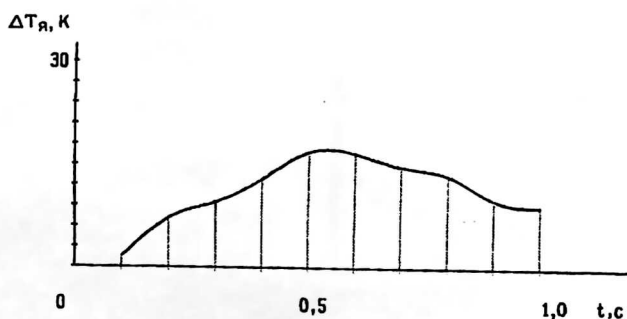


Рис. 3. Временная зависимость излучательной способности факела горения при азимутальном угле приема излучения 110°

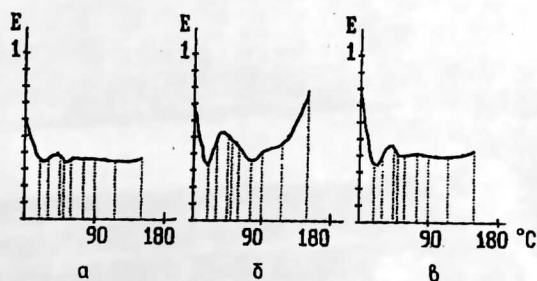


Рис. 4. Экспериментальные диаграммы направленности излучения на частотах: а — 3,5; б — 22,5 и в — 37,5 ГГц

Обработка результатов измерений проводилась по следующей схеме. В первую очередь определялись значения радиояркой температуры $T_{я}$ используя соотношение [3]

$$T_{я} = \frac{\Omega_a}{\Omega_{и} (1 - \beta) \eta} \Delta T_a + T_{яф},$$

где ΔT_a — превышение антенной температуры источника над антенной температурой фона $T_{яф}$;

$\Omega_{и}$ — телесный угол источника в пределах главного лепестка ДН антенны;

Ω_a — телесный угол главного лепестка ДН;

η — КПД антенны;

β — коэффициент рассеяния антенны относительно главного лепестка ДН.

По величине радиояркой температуры, измеренной под углом 90° к оси факела, был проверен расчет электрофизических параметров последнего. При этом для теоретической оценки использовалась модель спектрального излучения плоского плазменного слоя [4]. В итоге были определены концентрация электронов $N_e \approx 1,6 \cdot 10^{12}$ эл/см³, частота столкновений электронов с нейтральными частицами $\nu \approx 2 \cdot 10^{10}$ 1/с и интегральная температура $T \approx 900$ К. Эти параметры согласуются с данными, приведенными в литературе.

Таким образом, проведенные эксперименты позволили показать, что диаграммы направленности радиоизлучения факела твердотопливного двигателя неизотропны, отличаются значительной изрезанностью на частотах 3,5—37,5 ГГц. В целом излучение факела может быть с достаточной точностью описано в рамках модели плоского слоя однородной плазмы.

Л и т е р а т у р а

1. Башаринов А. Е., Гурвич А. С., Егоров С. Т. Радиоизлучение Земли как планеты. — М.: Наука, 1974.

2. Гершензон В. Е., Веревкин А. А., Ильин В. А. и др. Исследование собственного радиоизлучения морской поверхности с борта корабля с помощью джозефсоновского радиометра: Препринт ИКИ АН СССР. Пр-1368, 1988.

3. Павлова Л. С., Поляков В. М., Рудашевский В. Д. Определение параметров низкотемпературной плазмы по СВЧ-излучению // Вопросы физики низкотемпературной плазмы. — Минск: Наука и техника, 1970. С. 62—65.

4. Гиппиус А. А., Павлов Л. С., Поляков В. М. Диагностика низкотемпературной плазмы в СВЧ- и субмиллиметровом диапазонах. — М.: Энергоиздат, 1980. — 134 с.

THE EXPERIMENTAL STUDIES OF THE MICROWAVE RADIATION OF JET ENGINE'S FLAME TORCH

V. A. Belavin, A. A. Naumov, O. G. Ruseva

Moscow Energetic Institute Kazan' branch, Kazan, Tatarstan, Russia

V. A. Ilyin, M. L. Kalantarov

Moscow State Pedagogical University, Moscow, Russia

We present the results of experimental studies of own thermal radio radiation of flame torch of the solidfuel jet engine sampler. The anisotropy of radiation diagram is observed and qualitatively interpreted.