

УДК 533.27

## Система активной плазменной защиты космических аппаратов от электрорадиационного воздействия ионосферы и магнитосферы

В. А. Шувалов, А. И. Приймак, В. В. Губин, Н. М. Лазученков

Институт технічної механіки НАНУ—НКАУ, Дніпропетровськ

Надійшла до редакції 06.02.98

Подается описание разработанной системы активного плазменного зашита космических аппаратов от радиационного влияния окружающей среды на геостационарных, высокоэллиптических та высокоширотных орбитах.

Проблема обеспечения электрорадиационной безопасности космических аппаратов и их систем при длительной эксплуатации на высокоэллиптических, геостационарных, высокоширотных орбитах (в авроральной и геополярной областях) может быть решена с применением пассивных и активных методов защиты:

- металлизации всей наружной поверхности для предупреждения возникновения дифференциальной электризации;
- облучения элементов конструкции потоками низкотемпературной плазмы с концентрацией  $N_i \geq 10^{10} \text{ м}^{-3}$ .

Для реализации активной защиты необходимо создание специальной системы, состоящей из источника разреженной плазмы, средств определения и контроля зарядового состояния материалов наружной поверхности КА и функциональных элементов. В данной работе представлена система активной плазменной защиты космических аппаратов, предназначенных для эксплуатации на высокоэллиптических, геостационарных и высокоширотных орбитах.

Элементами системы являются:

- инжектор положительных ионов потока низкотемпературной плазмы, работающий в режиме

тлеющего разряда;

- система измерения и контроля напряженности электрического поля у поверхности элементов конструкции КА (бортовая система «Зонд-Заряд» с датчиком, работающим по методу динамического конденсатора);
- система обратной связи и управления в цепи «датчик—инжектор»;
- система хранения и подачи газа, электропитания, пневмоавтоматики.

При разрядном токе  $I_p \leq 0.1 \text{ А}$  и потребляемой электрической мощности не более 50 Вт инжектор обеспечивает на выходе поток мягкой аргоновой плазмы с концентрацией  $N_i \sim 10^{11} - 10^{13} \text{ м}^{-3}$  и энергией положительных ионов  $W_i \leq 400 \text{ эВ}$ . Инжектор высотой 0.3 м, размещенный на облучаемой поверхности, обеспечивает эффективную нейтрализацию электрического заряда на площади 3 м<sup>2</sup>. С увеличением высоты размещения инжектора площадь облучаемой и «нейтрализуемой» поверхности увеличивается.

Внешний вид источника плазмы — газоразрядного инжектора (нейтрализатора) и генерируемые им в разных режимах плазменные образования приведены на рис. 1.

Катодом нейтрализатора служит цилиндрическая

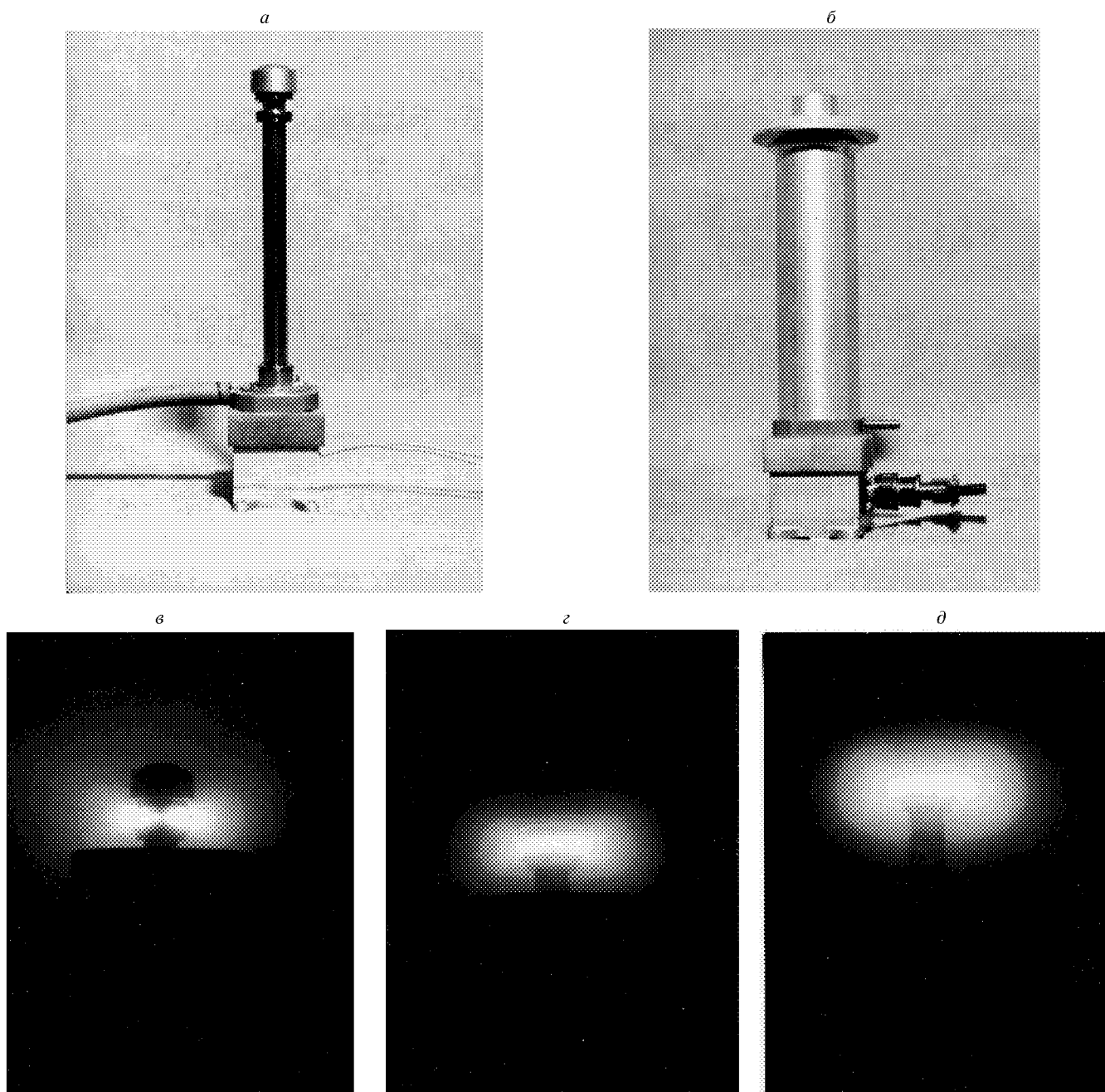


Рис. 1. Инжектор-нейтрализатор: *a* — без кожуха; *б* — с защитным кожухом; *в*, *г*, *д* — генерируемые плазменные образования

трубка с симметрично расположенными по окружности выходными отверстиями. Анод, выполненный в виде тонкого металлического стержня, расположен коаксиально с катодом. В качестве рабочего тела используется практически любой газ.

При исследовании работоспособности газоразрядного нейтрализатора для диагностики плазменного потока использовалась система электрических зон-

дов. В качестве коллекторов тока применялись плоский зонд — диск диаметром 45 мм, а также кольцо радиусом 80 и высотой 10 мм.

Вольтамперные характеристики разряда в нейтрализаторе при стационарном и квазистационарном (с длительностью импульса включения  $t_0 \leq 400$  с) истечении ионов аргона, неона, азота, ксенона свидетельствуют об устойчивости разряда и посто-

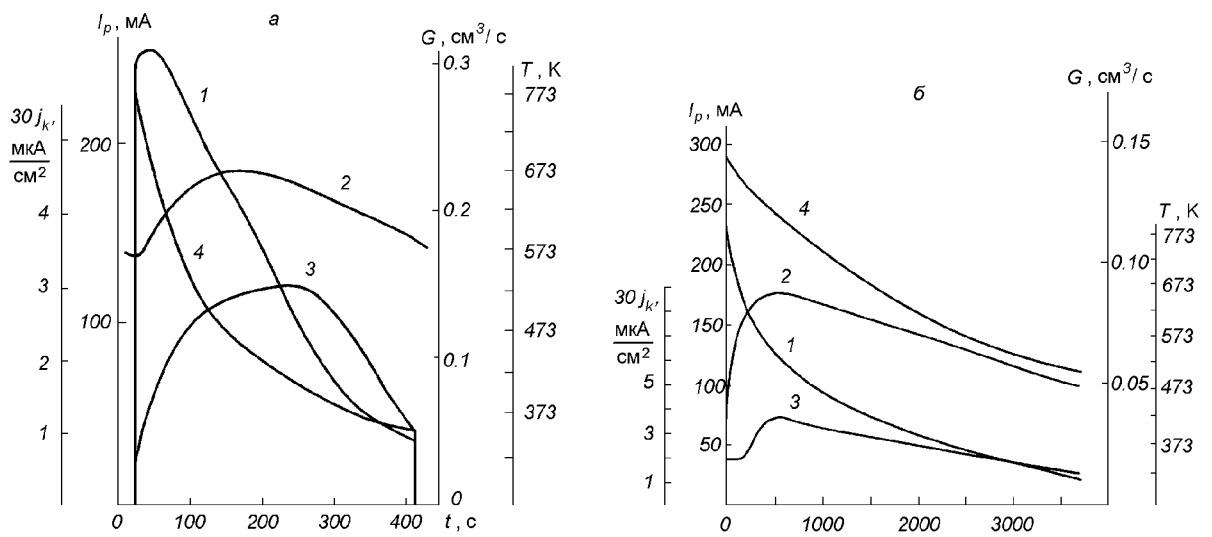


Рис. 2. Параметры разряда в инжекторе при истечении Ag из фиксированного объема: а — 80 см<sup>3</sup>; б — 2000 см<sup>3</sup> (1 — ток разряда; 2 — температура катода; 3 — плотность тока ионов; 4 — расход газа)

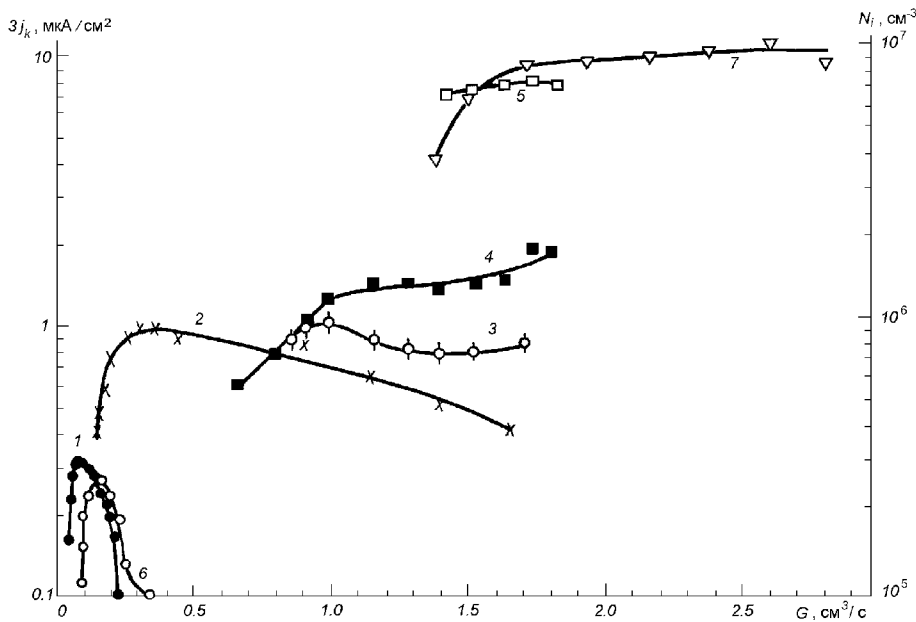


Рис. 3. Поток ионов на выходе инжектора

яестве параметров в течении длительного времени.

Исследовались режимы работы инжектора при истечении газа из емкости с фиксированным объемом: 80 и 2000 см<sup>3</sup>. Характеристики разряда в инжекторе при квазистационарном истечении аргона (рис. 2) указывают на то, что максимум плотности ионного тока на выходе инжектора практически не зависит от длительности импульса при  $t_0 \geq 100$  с. Зависимости плотности тока и концентрации инжектируемых ионов от расхода газа при различных диаметрах выходных отверстий показаны

на рис. 3. Кривая 1 соответствует суммарной площади 20 отверстий 1.4 мм<sup>2</sup>; 2 — 4 мм<sup>2</sup>; 3 — 7.7 мм<sup>2</sup>; 4 — 12.7 мм<sup>2</sup>; 5 — 22.6 мм<sup>2</sup> (Ag); 6 — 1.4 мм<sup>2</sup>; 7 — 22.6 мм<sup>2</sup> (N<sub>2</sub>). Данные рис. 3 указывают на практически постоянный выход ионов из инжектора при изменении диаметра выходных отверстий от 0.5 до 0.9 мм. Наиболее экономичным является режим инъекции через отверстия диаметром 0.5 мм. При этом запас Ag для непрерывной работы нейтрализатора в течение одного года не превосходит 50 кг. При сохранении расхода рабоче-

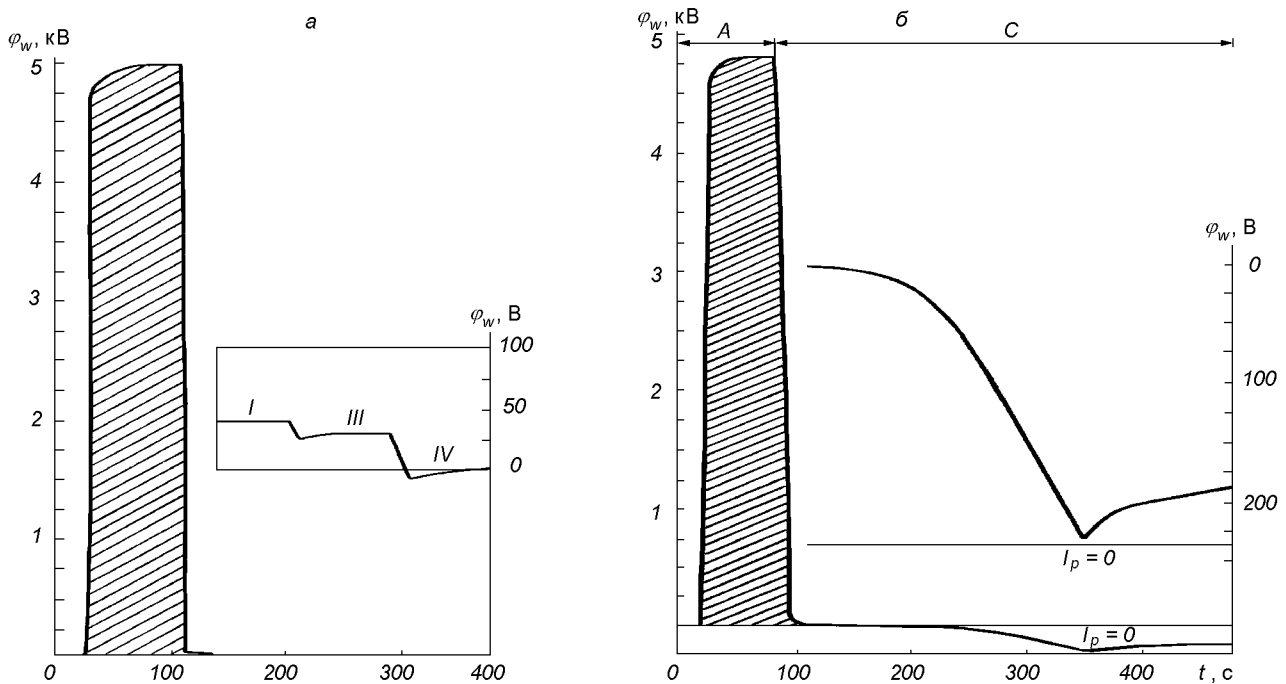


Рис. 4. Изменения потенциала  $\varphi_w$  поверхности образца при нейтрализации заряда: а — плазоидами импульсного плазменного компенсатора; б — плазмой газоразрядного инжектора

го тела выход ионов практически не зависит от сорта газа.

Загрязняющим веществом для оптических систем и терморегулирующих покрытий КА является титан — материал катода, распыляемого в разряде ионами  $\text{Ag}^+$ . Для формирования монокристаллического слоя титана на элементе поверхности КА, расположенном на расстоянии 1 м от инжектора, в пренебрежении процессами десорбции требуется более трех лет непрерывной работы. Инжекция титана не является определяющей при формировании собственной внешней атмосферы КА.

Исследования электрорадиационной стойкости конструкционных материалов КА свидетельствуют о том, что наиболее эффективным средством нейтрализации поверхностных и объемных зарядов являются плазменные образования с концентрацией частиц  $N \geq 10^{10} \text{ м}^{-3}$ . Эффективность плазменной нейтрализации характеризуется величиной остаточного нескомпенсированного электрического заряда и зависит от факторов, определяющих динамику процесса [4]. Проводимость нейтрализующей плазмы должна обеспечивать минимум нескомпенсированного электрического заряда на поверхности. Высокая проводимость плазмы может привести к сильноточному режиму нейтрализации и вызвать радиационно-стимулированный пробой диэлектри-

ка [1]. Накопление диэлектриками электрического заряда в объеме материала накладывает ограничения на длительность процесса нейтрализации. Диэлектрики конструкционных материалов обладают свойством маскировки накопленного в объеме заряда [1, 4, 5]. После непродолжительного воздействия на поверхность заряженного материала потока холодной плазмы накопленный в объеме нескомпенсированный заряд «мигрирует» на свободную поверхность и проявляет себя внешним электрическим полем. Временной масштаб процессов релаксации для многих диэлектрических конструкционных материалов составляет десятки или сотни секунд. Это обусловлено тем, что у диэлектриков значения подвижности свободных носителей лежат в пределах от  $10^{-7}$  до  $10^{-4} \text{ м}^2 \text{ В}^{-1} \text{ с}^{-1}$ , а подвижность с учетом захвата свободных носителей в объеме — на несколько порядков ниже [3].

Для нейтрализации электрического заряда, накопленного конструкционными материалами наружной поверхности КА, может быть использована стационарная и квазистационарная холодная плазма. Это иллюстрируют приведенные на рис. 4 данные сравнительных испытаний разработанного инжектора-нейтрализатора и импульсного плазменного компенсатора (ИПК) эрозионного типа с твердым диэлектриком в качестве рабочего тела (фото-

ропласт-4). Изолированный образец из осветленного АМг6, покрытого грунтом ВЛ-2 и белой эмалью КО-5191 (3 слоя) заряжался пучком электронов с плотностью тока  $j_e = 2 \cdot 10^{-6} \text{ А} \cdot \text{м}^{-2}$  и энергией  $W_e = 15 \text{ кэВ}$ . Изменение потенциала поверхности  $\varphi_w$  во времени при нейтрализации плазмоидами ИПК иллюстрирует рис. 4, а. Заряженную поверхность образца облучал плазмод с концентрацией положительных ионов  $N_i = 8 \cdot 10^{17} \text{ м}^{-3}$ , массовой скоростью  $V_i = 1.6 \cdot 10^4 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$  и длительностью импульса облучения  $t \approx 5 \cdot 10^{-5} \text{ с}$ . После первого облучения в образце есть остаточный нескомпенсированный заряд. Этот заряд нейтрализуют дополнительные импульсы II, III, IV. Первый импульс ИПК обеспечивает высокоточный режим нейтрализации с развитием радиационностимулированного пробоя с характерным СВЧ-излучением в диапазоне 8—12 ГГц. Газоразрядный инжектор-нейтрализатор обеспечивает «мягкую» нейтрализацию аккумулярованного образцом электрического заряда (рис. 4, б). В этом случае радиационно-стимулированные пробои не зарегистрированы. На рис. 4, б в увеличенном масштабе показано изменение во времени потенциала поверхности  $\varphi_w$  при работающем газоразрядном инжекторе. Данные рис. 4, б подтверждают эффективность нейтрализации поверхностных и объемных зарядов квазистационарными плазменными потоками.

Аккумуляция заряда эквивалентна процессу заряжения некоторого электрического конденсатора. В таблице приведены значения удельной емкости  $C_{уд}$  и предпробойного удельного заряда  $Q_{уд}$  некоторых диэлектрических конструкционных материалов наружных поверхностей КА.

Эксплуатационный режим системы активной плазменной защиты предполагает настройку канала обратной связи «датчик—инжектор» по уровню беспробоного потенциала — напряженности электрического поля у поверхности элемента конструкции КА, при превышении которого по сигналу датчика включается инжектор. Длительность импульса инъекции определяется зарядно-разрядными процессами на поверхности материала элементов конструкции КА, скоростью нейтрализации поверхностных и объемных зарядов и для материалов таблицы составляет 10—100 с.

Для бортовой системы «Зонд-Заряд» апертура измерительного канала датчика  $d = 5 \text{ мм}$  при наличии плазменного образования при потенциалах поверхности  $\Phi_w = |e\varphi_w/kT_e| \leq 20$  вносит существенные искажения в выходной сигнал и увеличивает погрешность метода измерения и контроля напряженности электрического поля ( $e$  — элементарный заряд,  $k$  — постоянная Больцмана,  $T_e$  —

Электрофизические свойства некоторых конструкционных материалов

Материал	$C_{уд}, \text{ Ф} \cdot \text{м}^{-2}$	$Q_{уд}, \text{ Кл} \cdot \text{м}^{-2}$
Стеклопластики	$(1-3) \cdot 10^{-7}$	$\sim 10^{-3}$
Защитное покрытие СБ (К-208)	$(4-5) \cdot 10^{-7}$	$(4-6) \cdot 10^{-4}$
ЭВТИ (ТСОН-СОТ+ПЭТФ)	$\sim 10^{-6}$	$\sim 10^{-3}$
Аримидные ткани	$(1-2) \cdot 10^{-6}$	$(2-3) \cdot 10^{-3}$
Углепластики	$(1-3) \cdot 10^{-6}$	$(1-2) \cdot 10^{-3}$

температура электронов плазменного образования). Это обусловлено конструкцией датчика и, как следствие, неоднородным распределением электрического поля у элементов его поверхности. Значение  $\Phi_w \approx -20$  является граничным. Доверительный диапазон аппаратуры «Зонд-Заряд» в высокоскоростном ( $V_\infty = 8 \text{ км} \cdot \text{с}^{-1}$ ) потоке разреженной плазмы охватывает область высоких отрицательных потенциалов поверхности тела  $\Phi_w < -20$ . В области «плавающих» потенциалов поверхности ( $\Phi_w > -20$ ) возможность применения аппаратуры определяет соотношение  $\lambda_d > 10d$ , где  $\lambda_d$  — дебаевский радиус невозмущенной плазмы.

1. Антонов В. М., Пономаренко А. Г. Лабораторные исследования эффектов электризации космических аппаратов. — Новосибирск: Наука, 1992.—115 с.
2. Бургасов М. П., Безнос И. А., Графодатский О. С. и др. Нейтрализация потенциала космического аппарата потоками холодной плазмы // Исследования по геомагнетизму, аэронауке и физике Солнца. — М.: Наука, 1992.— Вып. 87.—С. 67—82.
3. Гросс Б. Формирование заряда и поляризационные эффекты, вызванные действием излучения // Электреты. — М.: Мир, 1983.—С. 271—356.
4. Шувалов В. А., Приймак А. И., Губин В. В., Токмак Н. А. Нейтрализация высоковольтных зарядов на поверхности диэлектрика потоками плазмы и электромагнитного излучения // Физика плазмы и плазменные технологии (ФППТ-2): Матер. II междунар. конф., Минск, 15—19 сентября 1997 г. — Минск: ИМАФ НАН Беларуси, 1997.— Т. 3.—С. 432—435.
5. Ягушкин Н. И., Графодатский О. С., Исляев Ш. Н. и др. Радиационноэлектрические явления в диэлектрических материалах КА при электризации // Исслед. по геомагнетизму, аэронауке и физ. Солнца.—1989.—Вып. 86.— С. 131—180.

#### ACTIVE PLASMA PROTECTION OF SPACECRAFT FROM ELECTROIRRADIATION INFLUENCE OF THE IONOSPHERE AND MAGNETOSPHERE

V. A. Shuvalov, A. I. Priymak, V. V. Gubin, and N. M. Lazuchenkov

We describe a system developed for the active plasma protection of spacecraft from radiation influence of the outer space at geostationary, high-elliptic, and high-latitude orbits.