

УДК 621.3.038+621.52

Комплексная имитация факторов космического пространства

В. В. Абраимов¹, А. А. Негода², А. П. Завалишин², Л. К. Колыбаев¹

¹ Фізико-технічний інститут низьких температур ім. Б. І. Веркіна НАН України, Харків

² Національне космічне агентство України, Київ

Надійшла до редакції 16.11.95

Разработан и создан не имеющий аналогов в СНГ и странах-представителях Европейского космического агентства комплексный имитатор для наземной ускоренной имитации шести факторов космического пространства: 1) излучения искусственного Солнца (в интервале $\lambda\lambda$ 200—2500 нм); 2) вакуумного ультрафиолетового (ВУФ) излучения (в интервале $\lambda\lambda$ 5—200 нм); 3) потоков протонов и 4) электронов радиационных поясов Земли с энергиями 50—200 кэВ; 5) вакуума (10^{-7} торр); 6) термоциклирования в интервале 4.2—400 К. Предполагается проведение исследований влияния шести факторов космического пространства на физико-механические свойства материалов, а также работоспособность узлов и масштабных моделей космических аппаратов. Проведение ускоренной имитации факторов космоса и исследование свойств материалов позволят дать обоснованные рекомендации по применению перспективных материалов для создания космических систем с временами жизни 5—10 лет.

ВВЕДЕНИЕ

Актуальными задачами космического материаловедения на современном этапе являются (Вернов, 1983):

- проведение корректной и надежной имитации факторов космического пространства (ФКП) в наземных (лабораторных) условиях;
- комплексное исследование физико-механических свойств перспективных материалов космических систем под их воздействием;
- изучение работоспособности («времени жизни») материалов, узлов и масштабных моделей КА под воздействием факторов космического пространства.

Ситуация осложняется тем обстоятельством, что материалы и приборы в открытом космосе работают в «жестких» и экстремальных условиях при воздействии таких основных факторов, как глубокий вакуум (10^{-6} – 10^{-7} торр*), электромагнитное излучение Солнца в интервале длин волн $\lambda\lambda$ 5—2500 нм, потоки протонов и электронов естественных и искусственных радиационных поясов Земли в широком интервале энергий (10 кэВ $< E < 10$ МэВ), многократное изменение температуры в широком интервале (4.2—450 К), сильные электрические поля напряженностью $E = 20$ —30 кВ, которые возникают благодаря электризации космического аппарата, сильные магнитные поля, невесомость, вибрации, перегрузки и пр. Следует особенно подчеркнуть, что полученные за последние годы экспериментальные данные по наземной имитации основных ФКП на материалы и приборы

* 1 торр = 1 мм рт. ст. = 133.322 Па (Ред.)

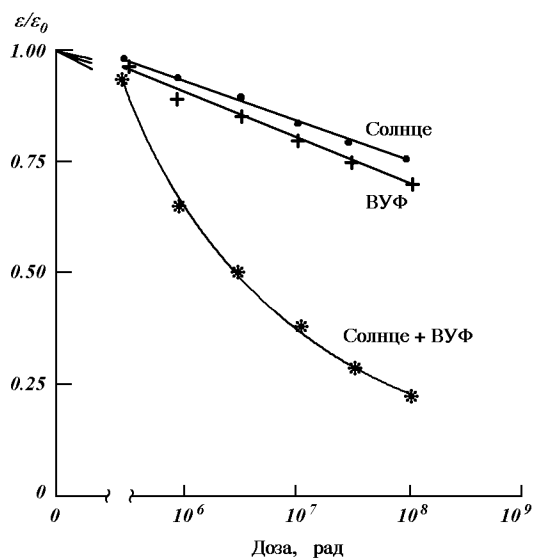


Рис. 1. Зависимость суммарной степени деформации ε фторопласта от дозы облучения искусственным Солнцем; ВУФ-излучением, а также для совместного облучения Солнце + ВУФ

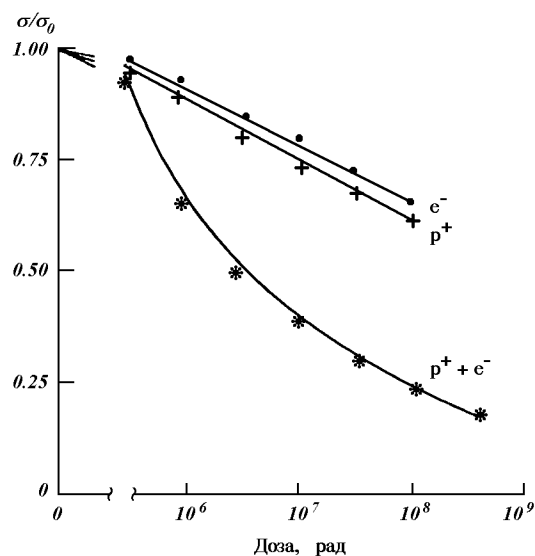


Рис. 2. Зависимость предела текучести полиэтилентерефталата (майлара) от дозы облучения потоками электронов (e^-), протонов (p^+), а также совместного облучения протонами и электронами ($e^- + p^+$)

являлись несопоставимыми. Сама имитация ФКП проводилась в целом ряде институтов и лабораторий СНГ, Европейского космического агентства (ESA) при недостаточно корректных условиях. Практически отсутствовало целенаправленное сравнение результатов натуральных экспериментов с данными наземной имитации. В большинстве случаев проводилась имитация, как правило, двух-трех (в некоторых случаях четырех) факторов (Вернов, 1983; Милинчук и Тупиков, 1986; Abraimov et al., 1993), например: облучение Солнцем + термоциклирование; или облучение протонами (электронами) + термоциклирование в интервале $-150...+150$ °С. Имитация ФКП проводилась последовательно в разных имитаторах, при этом материалы и изделия извлекались из вакуумных камер на воздух. Подчеркнем, что эксперименты, проведенные в последние годы в СКТБ ФТИНТ (отдел космического материаловедения) (Abraimov et al., 1993, 1995b, 1995c; Абраимов и др., 1992; 1993) и других институтах СНГ (Милинчук и Тупиков, 1986), а также предсказания некоторых теоретических моделей по воздействию радиации на вещество (Косевич, Ландау, 1989), показывают, что многие физико-механические свойства материалов изменяются под воздействием одного типа излучения, как правило линейно с увеличением интенсивности (дозы облучения). При наличии

двух типов излучений, например свет + протоны или свет + электроны, свойства материалов изменяются от дозы облучения нелинейно. Такие кинетические процессы названы фотостимулированными или радиационностимулированными нелинейными эффектами (синергизмом). Это хорошо иллюстрируют экспериментальные результаты, полученные в СКТБ ФТИНТ (рис. 1, 2). В работе (Abraimov et al., 1993) показано, что при воздействии одного фактора космического пространства (Солнце; ВУФ-излучение; потоки протонов или электронов) деградация механических свойств материалов, например суммарной деформации образца ε или предела текучести σ_0 , происходит линейно. При воздействии двух факторов космоса — Солнца + ВУФ-излучение, или при совместном облучении протонами и электронами (рис. 1, 2) — наблюдается, во-первых, неаддитивный вклад каждого вида облучения в процесс деградации, а также существенное нелинейное изменение свойств материалов от дозы облучения.

Таким образом, для проведения корректной и надежной имитации ФКП требовались разработка и создание комплексного имитатора для одновременного воздействия максимально возможного числа из достижимых в настоящее время шести основных факторов космического пространства: потоков протонов и электронов радиационных поясов Зем-

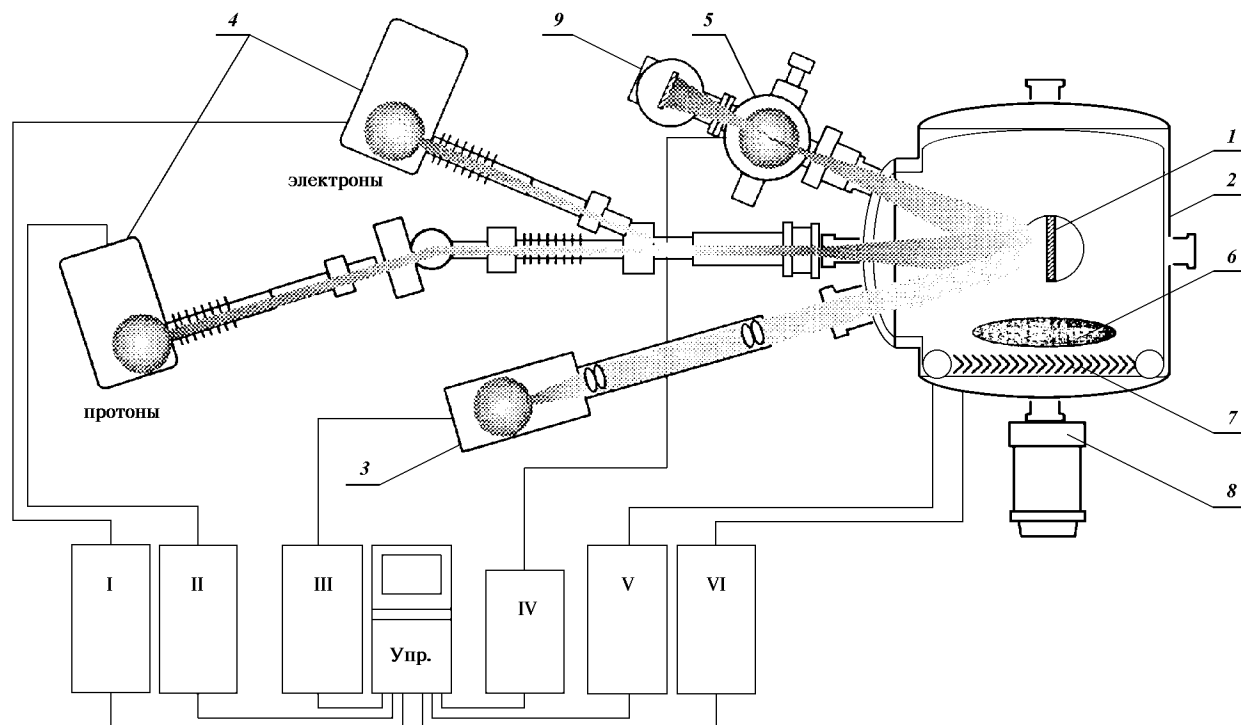


Рис. 3. Общий вид комплексного имитатора факторов космического пространства КИФК и основных его систем. I, II, III, IV, V, VI — стойки управления элементами комплекса; Упр. — панель управления комплексом; 1 — объект исследований, 2 — вакуумная камера, 3 — источник искусственного Солнца (ИС-160) ($\lambda\lambda = 200\text{—}2500$ нм), 4 — источник протонов и электронов (с энергиями $\varepsilon = 30\text{—}200$ кэВ), 5 — источник ВУФ-излучения ($\lambda\lambda 5\text{—}200$ нм), 6 — криогенный насос ($T = 4.2$ К), 7 — экран ($T = 77$ К), 8 — системы вакуумной откачки, 9 — камера по ускоренному воздействию ВУФ-излучения на свойства материалов

ли, излучения «заатмосферного» Солнца, ВУФ-излучения, термоциклирования в интервале температур $4.2\text{--}400$ К, вакуума порядка 10^{-7} торр.

В этой связи целью настоящей работы являлись:

1. Разработка и создание комплексного имитатора ФКП для одновременной ускоренной имитации шести ФКП (не имеющего аналогов в странах СНГ и ESA): излучения искусственного Солнца (в интервале $\lambda\lambda 200\text{—}2500$ нм), ВУФ-излучения (в интервале $\lambda\lambda 5\text{—}200$ нм); излучения протонов (p^+) и электронов (e^-) с энергиями $50\text{—}200$ кэВ; вакуума (10^{-7} торр); термоциклирования в интервале $4.2\text{—}400$ К.

2. Разработка и создание новых физических методов ускоренной лабораторной имитации основных факторов космического пространства, адекватных воздействию природных факторов на свойства материалов, узлов, механизмов и масштабных моделей КА.

ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ИМИТАТОРА ФАКТОРОВ КОСМИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВА

На рис. 3 приведен общий вид комплексного имитатора факторов космического пространства (КИФК), который состоит из следующих основных систем: вакуумной камеры 2 с системами криогенной 6 и вакуумной 8 откачки; источника искусственного Солнца типа ИС-160 3; ускорителя протонов и электронов 4 с совмещенными пучками частиц; источника ВУФ-излучения 5 со специальной вакуумной камерой 9, а также пультов управления комплексным имитатором.

Вакуумная камера КИФК. Вакуумная камера 2 имитатора КИФК имеет величину рабочего вакуума $P = 10^{-7}$ торр. Откачка камеры производится турбомолекулярным насосом типа Lybold со скоростью откачки $q = 1500$ л/с.

В вакуумной камере КИФК расположен гелиевый криогенный насос 6. Объем жидкого гелия —

около 10 л. Диаметр вакуумной камеры равен 0.7 м, ее длина $L = 1.5$ м. Вакуумная камера 2 имеет величину рабочего вакуума $P = 10^{-7}$ торр.

Радиационный экран камеры 7 с системой азотного охлаждения, имеющий объем жидкого азота около 20 л, позволяет автоматически поддерживать температуру экрана на уровне 77 К. Внутренняя поверхность радиационного экрана 7 имеет коэффициент черноты $\varepsilon = 0.95$, внешняя поверхность экрана характеризуется коэффициентом поглощения $A_s = 0.1$.

В вакуумной камере имитатора КИФК производится одновременная ускоренная имитация шести факторов космоса.

В настоящей работе разработаны и созданы следующие методики физических экспериментов непосредственно под пучком в камере КИФК (т. е. *in situ* в вакууме):

1) комплексных исследований и испытаний механических свойств материалов в условиях активной деформации с максимальной чувствительностью по напряжению 1 г (получение кривых упрочнения материалов $\sigma(\varepsilon)$), ползучести материалов $\varepsilon(t)$ с максимальной чувствительностью по деформации образцов $\delta l / l_0 = 10^{-6}$, релаксации напряжений с той же чувствительностью — 1 г;

2) измерений электрофизических свойств материалов — вольт-амперных характеристик солнечных батарей, диэлектрических характеристик веществ, поверхностного и объемного сопротивления материалов;

3) изучений работоспособности масштабных моделей космических аппаратов под воздействием имитируемых факторов (терморadiационные свойства масштабных моделей КА, деградация коэффициента черноты ε и коэффициента оптического поглощения A_s , измерение температурных полей, а также полей упругих напряжений моделей КА при имитации их полета в радиационных поясах Земли);

4) исследование процессов газовой выделенности материалов в поле излучения ФКП методом масс-спектрометрии с использованием масс-спектрометра типа РОМС—9, разработанного в ФТИНТ в диапазоне регистрируемых массовых чисел 1—500 а. е. м. при разрешающей способности 0.5 а. е. м.;

5) измерений потери массы материалов в вакууме (10^{-7} торр) в поле ФКП с максимальной чувствительностью 10^{-4} г.

Воздействие космической радиации на исследуемый объект 1, расположенный в вакуумной камере КИФК, осуществляется с помощью следующих имитаторов и источников излучения:

1. Источника искусственного (заатмосферного) Солнца 3 типа ИС-160, с интенсивностью излучения $I = 0.14 \pm 0.28$ Вт/см², имеющего площадь облучения $S = 150$ см².

2. Ускорителя 4 протонов и электронов на совмещенных пучках, имитирующего потоки протонов и электронов радиационных поясов Земли с энергией частиц $E = 30 \div 200$ кэВ и суммарным током $I = 10 \div 100$ мкА. Площадь облучения объекта исследования составляет $S = 150$ см².

3. Имитатора 5 ВУФ-излучения, осуществляющего имитацию заатмосферного Солнца в интервале $\lambda \lambda 5 \div 200$ нм с интенсивностью ВУФ-излучения $I = (0.01 \div 3) \cdot 10^{-4}$ Дж·см⁻²·с⁻¹. Спектр излучения ВУФ-имитатора максимально приближен к спектру Солнца в указанном диапазоне длин волн.

НАУЧНАЯ

И ПРАКТИЧЕСКАЯ ЗНАЧИМОСТЬ РАБОТЫ

Данная работа решает, по нашему мнению, ряд важных проблем в области наземной имитации факторов космического пространства, обеспечивая:

- одновременность воздействия шести ФКП на материалы и модели космических аппаратов;
- имитацию полного спектра электромагнитного излучения Солнца (включая ВУФ-излучение) в диапазоне длин волн 5—2500 нм;
- ускоренную имитацию потоков протонов и электронов радиационных поясов Земли с энергией 50—200 кэВ и интенсивностью 10^{12} см⁻²·с⁻¹ (т. е. с коэффициентом ускорения 500—1000);
- ускоренную имитацию ВУФ-компонента в спектре Солнца с максимальной интенсивностью $3 \cdot 10^{-4}$ Дж·см⁻²·с⁻¹ (т. е. с коэффициентом ускорения 300);
- одновременное термоциклирование объектов исследования в широком интервале температур 4.2—400 К в вакууме $P = 10^{-7}$ торр;
- измерение непосредственно под пучком (т. е. *in situ*, без переноса объекта из вакуумной камеры на воздух) механических, диэлектрических свойств материалов; потери массы материалов; изучение газовой выделенности масс-спектрометрическим методом.

В заключение следует особо подчеркнуть, что проведенные на комплексном имитаторе КИФК исследования позволят в будущем предоставлять научнообоснованные рекомендации по применению и созданию новых материалов КА с заданными

физико-механическими свойствами, обеспечивающими надежную работу космических систем нового поколения (с временами жизни 5—10 лет).

Абраимов В. В., Агашкова Н. Н., Будняк И. В. и др. Влияние низких температур, радиации и глубокого вакуума на физико-механические свойства полимерных светопоглощающих покрытий // ФизХОМ.—1992.—№ 2.—С. 26—30.

Абраимов В. В., Бочаров К. Ш., Будняк И. В., Дановский В. В. Стимулированная вакуумным ультрафиолетовым излучением ползучесть некоторых полимерных материалов // ФизХОМ.—1993.—№ 1.—С. 39—46.

Вернов С. Н. (ред.) Моделирование воздействия космической среды на материалы и оборудование космических летательных аппаратов // Модель космического пространства. — М.: НИИЯФ МГУ, 1983.—Т. 2.—771 с.

Косевич А. М., Ландау А. И. Теоретические механизмы влияния электромагнитного излучения в диапазонах длин волн 2000—25000 Э и электростатических полей на пластические свойства полимерных материалов в условиях глубокого вакуума // Отчет ФТИНТ АН УССР. — Харьков, 1989.—9 с.

Милинчук В. К., Тупиков В. И. (ред.) Радиационная стойкость

органических материалов // Справочник. — М.: Энергоатомиздат, 1986.—272 с.

Abraimov V. V., Lura F., Bohne L., et al. Untersuchung von Erscheinungen nichtlinearen Degradation der physikalisch-mechanischen Eigenschaften von Materialien unter dem Einfluss Kosmischer Umgebungsfaktor // Deutscher Luft und Raumfahrt Kongress DGLR. — Berlin, 1993.—P. 80—91.

Abraimov V. V., Bocharov K., Budniak I., et al. VUV-Stimulated Creep and Mechanical Properties of Polymers in Temperature Interval of 4.2—300 K // Cryogenic Engineering Conference and International Cryogenic Materials Conference SES/ICMC 1995, July 17—21. — Hyatt Regency Hotel/Columbus, Ohio USA, 1995a.—P. 66.

Abraimov V. V., Galeev A., Kostenko V., et al. Effect of Space Factors on Physico-Mechanical Properties of Materials Space Vehicle of Mars'96 // Cryogenic Engineering Conference and International Cryogenic Materials Conference SES/ICMC 1995, July 17—21. — Hyatt Regency Hotel/Columbus, Ohio USA, 1995b.—P. 89.

Abraimov V. V., Mirzoeva L., Agashkova N., et al. Investigation of Blistering Effect on Materials of Space Optics Affected by Space Factors // Cryogenic Engineering Conference and International Cryogenic Materials Conference SES/ICMC 1995, July 17—21. — Hyatt Regency Hotel/Columbus, Ohio USA, 1995c.—P. 90.