

УДК 622.3+621.435/457+536.79+355.014.1

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО СВЧ-ИЗЛУЧЕНИЯ НА ДЕТАЛИ ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

Л. Л. Хименко, А. П. Рыбаков\*, Н. А. Рыбаков\*, А. Н. Козлов\*\*

Научно-исследовательский институт полимерных материалов, 614113 Пермь, Россия

\* Пермский национальный исследовательский политехнический университет,  
614000 Пермь, Россия

\*\* Пермская государственная сельскохозяйственная академия, 614099 Пермь, Россия  
E-mails: lhimenko@mail.ru, anatryb@yandex.ru, smolinsky@yandex.ru, 112\_22@rambler.ru

Приводятся результаты экспериментального измерения модуля упругости, скорости горения и теплоемкости конденсированных высокоэнергетических полимерных составов (твердых ракетных топлив), подвергнутых СВЧ-облучению. Описаны экспериментальное оборудование, ход экспериментов, проведен анализ полученных результатов.

Ключевые слова: высокоэнергетический полимерный материал, твердое ракетное топливо, СВЧ-излучение, модуль упругости, скорость горения, теплоемкость.

**Введение.** По данным зарубежных и отечественных исследователей, электромагнитное излучение в диапазоне сверхвысоких частот  $3 \div 300$  ГГц является поражающим фактором. Поражающее действие электромагнитного сверхвысокочастотного излучения (СВЧ-излучения) на авиационную и ракетно-космическую технику в основном заключается в нарушении работы радиоэлектронной аппаратуры управления [1, 2]. Однако большинство деталей (узлов) ракетно-космических объектов изготовлены из полимерных высокоэнергетических материалов, например заряды твердого ракетного топлива, поведение которых при СВЧ-облучении исследовано недостаточно. Изменение свойств таких материалов может привести к нарушению функций изготовленных из них деталей. В последнее время большое внимание уделяется изучению различных аспектов воздействия СВЧ-излучения на полимерные высокоэнергетические материалы и детали, выполненные из этих материалов (см., например, [3]). Данная работа является продолжением теоретико-экспериментальных исследований воздействия СВЧ-излучения на конденсированные высокоэнергетические полимерные составы (твердые ракетные топлива). Приведены результаты экспериментального изучения зависимостей модуля Юнга, скорости горения и теплоемкости некоторых видов полимерных высокоэнергетических материалов от времени облучения двумя различными генераторами СВЧ-излучения. Во всех случаях измерения указанных параметров выполнялись через 24 ч после облучения.

**Материалы, образцы и экспериментальное оборудование.** Исследовались полимерные высокоэнергетические материалы четырех типов: 1) НДП-5А; 2) ПД-10/20Э; 3) МГТ-2П; 4) полимерный состав на основе полидивинилэпоксиуретанового каучука с плотностью  $1,8 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup> и начальным значением модуля Юнга, равным 2 МПа. Из мате-

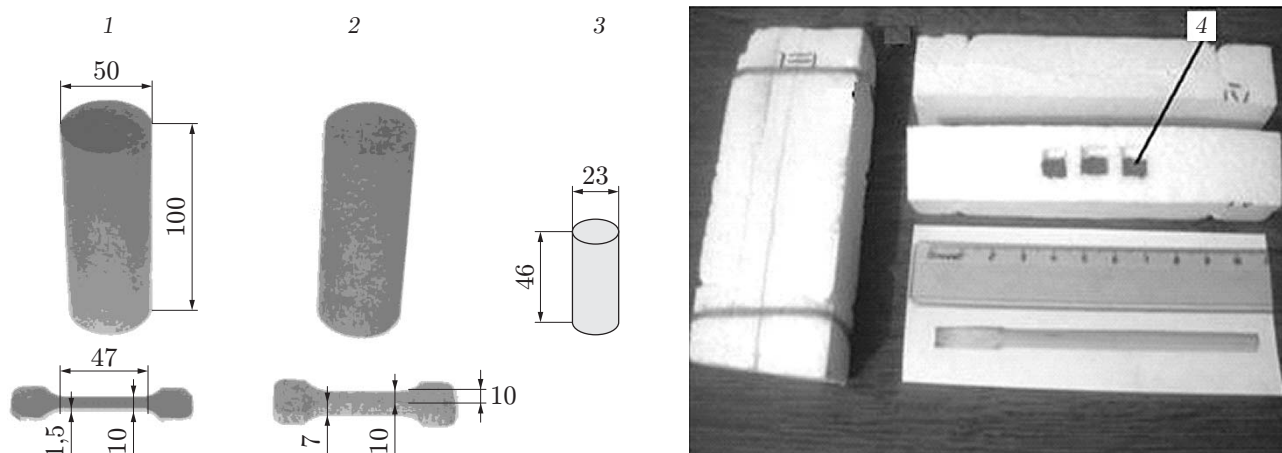


Рис. 1. Внешний вид и размеры образцов:

1 — образец из материала 1-го типа, 2 — образец из материала 2-го типа, 3 — образец из материала 3-го типа, 4 — образцы из материала 4-го типа

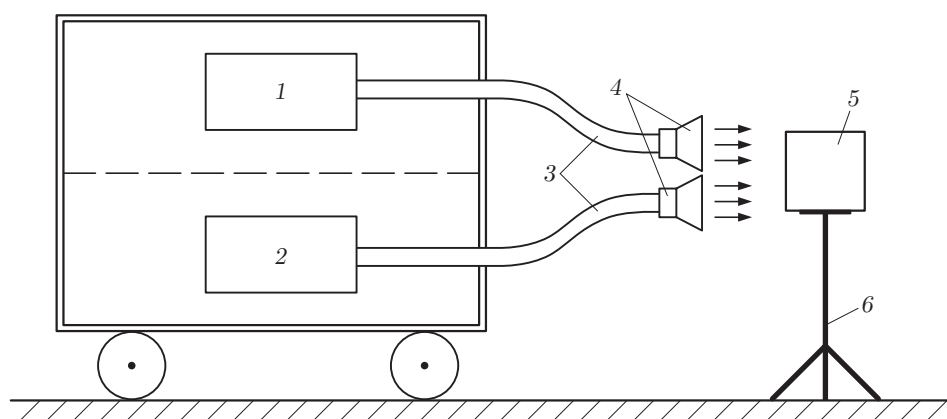


Рис. 2. Схема генератора Г1:

1 — СВЧ-генератор первого канала, 2 — СВЧ-генератор второго канала, 3 — волновод, 4 — рупорные антенны, 5 — контейнер с образцами, 6 — штатив

риалов первых трех типов изготовлены образцы в форме лопаток для определения модуля Юнга и в форме столбиков для определения скорости горения (рис. 1). Образцы материала 4-го типа в форме параллелепипеда имели массу  $0,12 \div 0,15$  г. Для образцов, изготовленных из материалов 1-го и 2-го типов, исследовались зависимости скорости горения и модуля Юнга от времени облучения, для образцов из материала 3-го типа — зависимость скорости горения от времени облучения, для материала 4-го типа — зависимость теплоемкости от времени облучения.

Использовались СВЧ-генераторы двух типов: импульсный Г1 и непрерывного действия Г2. На рис. 2 приведена схема генератора Г1, имевшего следующие параметры: частота излучения первого канала ( $2,71 \pm 0,000\,001$ ) ГГц, частота излучения второго канала ( $3,0 \pm 0,000\,001$ ) ГГц, мощность импульса в каждом канале ( $745 \pm 2$ ) МВт, суммарная мощность импульса ( $1,490 \pm 0,004$ ) МВт, длительность импульса ( $2,5 \pm 0,1$ ) мкс, частота следования импульсов ( $375 \pm 1$ ) Гц, размеры каждого волновода  $72 \times 34$  мм, площадь раскрыва каждого рупора  $80 \text{ см}^2$ .

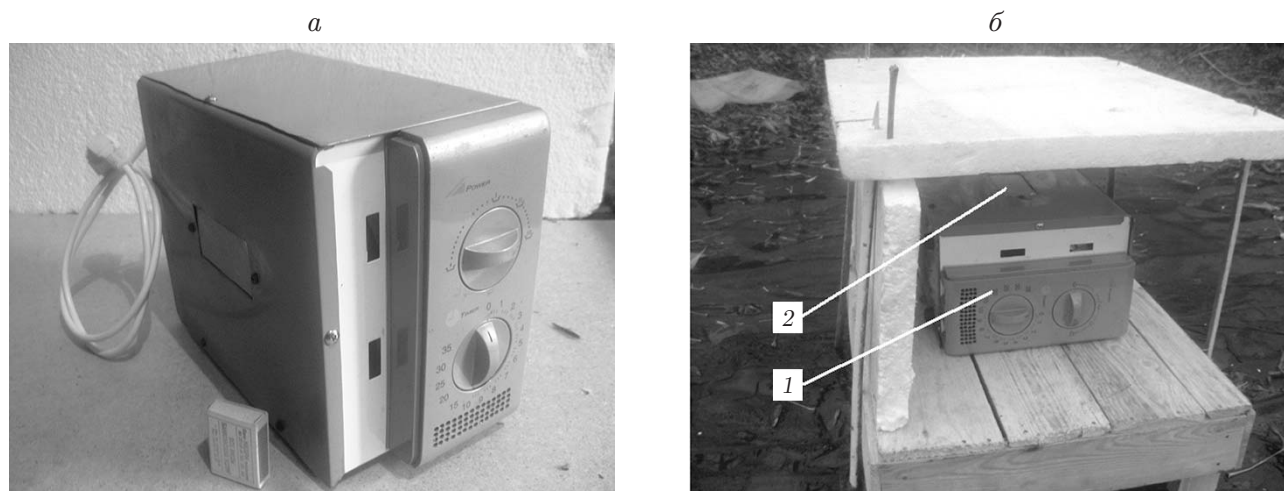


Рис. 3. Внешний вид (а) и размещение на открытой площадке (б) генератора Г2:  
1 — генератор, 2 — излучающий рупор

Генератор Г2 (рис. 3) имел следующие параметры: частота излучения 2,45 ГГц, мощность 600 Вт. С помощью регулятора таймера менялось время излучения.

**Схемы СВЧ-облучения.** Генераторы размещались на открытых площадках, размеры которых исключали влияние на образцы отраженного от окружающих предметов СВЧ-излучения. При облучении генератором Г1 образцы из материалов 1, 2 и 3-го типов размещались в контейнере, представлявшем собой пенопластовую коробку размером  $240 \times 160 \times 90$  мм с плотно закрывающейся крышкой. Внутри контейнер был разделен на секции, в которые помещались образцы, так чтобы они не затенялись от СВЧ-излучения. Пенопластовый контейнер является абсолютно “прозрачным” для СВЧ-излучения и не подвержен влиянию внешних факторов (в первую очередь, температуры и влажности). Контейнер располагался на расстоянии 50 мм от среза рупорной антенны генератора Г1.

Образцы из материала 4-го типа также размещались в пенопластовом контейнере (см. рис. 1). Расстояние между образцами и рупором генератора Г2 равно 40 мм.

До воздействия СВЧ-излучения образцы были разделены на две группы: 1) образцы-свидетели; 2) испытываемые образцы. Обе группы транспортировались (в том числе к месту проведения облучения) и хранились в одинаковых условиях, но образцы первой группы не подвергались воздействию СВЧ-излучения. Образцы второй группы были разделены на партии, время воздействия на которые различалось. Данные о количестве образцов материалов каждого типа в обеих группах приведены в табл. 1.

При воздействии СВЧ-излучения на образцы наблюдался их нагрев, степень которого зависела от продолжительности воздействия. По окончании СВЧ-воздействия с помощью термомпары измерялась температура образцов. Наибольшую степень нагрева имели образцы, изготовленные из материала 2-го типа. Данные о нагреве образцов при различной продолжительности воздействия на них СВЧ-излучения приведены в табл. 2. Прочерки означают, что нагрев образцов не зафиксирован термомпарой. В образцах первой, второй и третьей партий нагрев не зафиксирован. Все образцы седьмой партии сгорели вследствие воспламенения образца из материала 2-го типа через 315 с после начала облучения. Более интенсивный нагрев образцов из материала 2-го типа, по-видимому, обусловлен наличием каучука (11,5 %), который имеет большие значения диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь, а следовательно, большие диэлектрические потери по сравнению с другими компонентами образцов.

Таблица 1

Количество образцов при облучении генератором Г1

Номер группы	Номер партии	Материал 1-го типа		Материал 2-го типа		Материал 3-го типа	$t, c$
		Столбики	Лопатки	Столбики	Лопатки	Столбики	
1	0	3	9	3	12	6	0
2	1	1	4	1	3	1	10
	2	1	3	1	3	—	20
	3	1	3	1	3	1	30
	4	1	3	1	3	—	60
	5	1	3	1	3	1	120
	6	1	4	1	3	—	240
	7	1	4	1	3	1	360

Таблица 2

Температура образцов второй группы после облучения генератором Г1

Тип материала	Форма образца	$T, ^\circ C$			
		$t = 60 c$	$t = 120 c$	$t = 240 c$	$t = 360 c$
1	Столбики	—	20–25	30–35	Сгорели
	Лопатки	—	—	25–30	
2	Столбики	25–30	30–40	50–60	Сгорели
	Лопатки	—	20–25	25–35	
3	Столбики	—	20–25	25–30	Сгорели

Изменения температуры образцов из материала 4-го типа не зафиксировано.

По формулам (1)–(4) из работы [3] вычислены значения напряженности поля  $E_3$  и объемной плотности поглощенной тепловой энергии  $W$  для образцов из материала 2-го типа, поскольку именно они воспламенились. Результаты расчетов представлены в табл. 3. При этом использованы следующие параметры: амплитуда импульса  $f = 375$  Гц, длительность импульса  $\tau = 2,5$  мкс, мощность СВЧ-излучения  $P = 1,49$  МВт, длина волны СВЧ-излучения  $\lambda = 0,111$  м, размер широкой стенки волновода  $a = 0,072$  м, площадь раскрытия рупорной антенны  $S = 8 \cdot 10^{-3}$  м<sup>2</sup>. Значения относительной диэлектрической проницаемости диэлектрика  $\epsilon = 5$ , тангенса угла диэлектрических потерь диэлектрика  $\operatorname{tg} \Delta = 0,01$  и другие параметры образцов взяты из работы [4].

**Испытание облученных образцов на растяжение.** Через 24 ч после облучения образцы в форме лопаток из материалов 1-го и 2-го типов были испытаны на растяжение по стандартной методике на стендах Научно-исследовательского института полимерных материалов (НИИПМ). Растяжение проведено при постоянной скорости деформирования  $1,2 \cdot 10^{-3}$  с<sup>-1</sup>. Результаты испытаний приведены в табл. 4 ( $E$  — среднее значение модуля Юнга;  $\varkappa$  — коэффициент вариации). Результаты испытаний для различных образцов одной партии в пределах погрешности эксперимента практически одни и те же. Например, для материала 1-го типа при времени облучения  $t = 60$  с наибольшее значение  $E$  превышает начальное значение на 12 %, при этом сумма коэффициентов вариации сравниваемых величин равна 18 %.

Таблица 3

Значения  $W$  при  $E_э = 4,7 \cdot 10^5$  В/м

$t, c$	$W, Дж/м^3$	$t, c$	$W, Дж/м^3$
10	$1,6 \cdot 10^7$	120	$1,9 \cdot 10^8$
20	$3,1 \cdot 10^7$	240	$3,7 \cdot 10^8$
30	$4,6 \cdot 10^7$	315	$5,2 \cdot 10^8$
60	$0,9 \cdot 10^8$		

Таблица 4

Результаты испытания образцов на растяжение

$t, c$	Материал 1-го типа		Материал 2-го типа	
	$E, МПа$	$\varkappa, \%$	$E, МПа$	$\varkappa, \%$
0	410	13,7	10,0	6,8
10	360	13,5	10,3	3,4
20	360	11,0	10,4	3,1
30	400	3,0	10,5	4,1
60	460	4,4	10,5	2,0
120	430	24,0	10,4	6,2
240	420	20,5	10,2	3,9

Таблица 5

Экспериментальные значения скорости горения

$t, c$	Материал 1-го типа		Материал 2-го типа		Материал 3-го типа	
	$u, мм/с$	$\varkappa, \%$	$u, мм/с$	$\varkappa, \%$	$u, мм/с$	$\varkappa, \%$
0	3,77	0,9	9,40	7,4	1,92	2,2
10	3,79	—	9,60	—	1,91	—
20	3,90	—	—	—	—	—
30	4,10	—	8,89	—	1,93	—
60	3,94	—	8,82	—	—	—
120	3,96	—	—	—	1,91	—
240	3,89	—	8,89	—	—	—

Таблица 6

Экспериментальные значения теплоемкости при облучении образцов из материала 4-го типа

Номер партии	$t$ , мин	$W$ , Дж/м <sup>3</sup>	Номер образца	$C_p$ , кДж/(кг·К)				$a$ , кДж/(кг·К)	$b$ , К <sup>-1</sup>	$\sigma$ , кДж/(кг·К)	$\varepsilon$ , %
				$T = 50$ °С	$T = 75$ °С	$T = 100$ °С	$T = 125$ °С				
1	0	0	1	1,182	1,227	1,256	1,284	1,1392	0,0011	0,0130	1,0
			2	1,199	1,245	1,274	1,303				
			3	1,209 (1,202)	1,256 (1,235)	1,284 (1,269)	1,309 (1,304)				
2	35	$5,0 \cdot 10^8$	4	1,207	1,265	1,287	1,317	1,1473	0,0012	0,0104	0,8
			5	1,212	1,267	1,285	1,330				
			6	1,215 (1,218)	1,268 (1,255)	1,305 (1,294)	1,344 (1,333)				
3	60	$8,5 \cdot 10^8$	7	1,210	1,271	1,313	1,331	1,1412	0,0013	0,0128	1,0
			8	1,206	1,274	1,312	1,342				
			9	1,213 (1,221)	1,279 (1,263)	1,320 (1,306)	1,347 (1,351)				

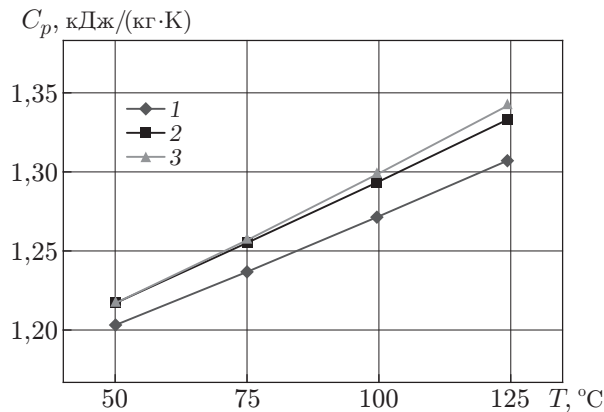


Рис. 4. Зависимость теплоемкости образцов из материала 4-го типа от температуры при различном времени СВЧ-облучения:  
 1 —  $t = 0$ , 2 —  $t = 35$  мин, 3 —  $t = 60$  мин

**Измерение скорости горения образцов после облучения.** Через 24 ч после облучения образцы в форме столбиков из материалов 1, 2 и 3-го типов испытывались по стандартной методике определения скорости горения на стендах НИИПМ. Результаты испытаний приведены в табл. 5 ( $u$  — скорость горения).

При времени облучения  $t = 30$  с скорость горения образцов из материала 1-го типа увеличивается на 9 % по сравнению со случаем отсутствия облучения, при этом сумма коэффициентов вариации равна 1,8 %. Скорость горения образцов из материалов 2-го и 3-го типов остается практически неизменной в пределах погрешности эксперимента.

**Измерение теплоемкости образцов из материала 4-го типа после облучения.** Через 24 ч после облучения с помощью дифференциального сканирующего калориметра ДСК-111 по стандартной методике НИИПМ проведено измерение теплоемкости образцов из материала 4-го типа. Образцы помещались в открытые керамические тигли и испытывались в динамическом режиме со скоростью нагрева  $\nu = 5$  К/мин в температурном диапазоне  $T = 30 \div 130$  °C. В табл. 6 приведены экспериментальные значения теплоемкости  $C_p$ . Методом наименьших квадратов экспериментальные значения аппроксимировались экспоненциальной зависимостью  $C_p = a e^{bT}$ , где  $a, b$  — параметры;  $T$  — температура испытания, °C. В табл. 6 эти значения указаны в скобках. Аппроксимационные зависимости  $C_p(t)$  представлены на рис. 4. В табл. 6 приведены также значения плотности поглощенной энергии  $W$ , вычисленные по формулам (1)–(4) из работы [3].

Анализ результатов измерения теплоемкости показывает, что с увеличением времени облучения теплоемкость незначительно увеличивается. Например, при  $T = 125$  °C аппроксимационное значение теплоемкости, полученное при времени облучения  $t = 60$  мин, больше теплоемкости необлученных образцов на 3,6 %, при этом сумма коэффициентов вариации  $\approx$  равна 1,8 %. При времени облучения  $t = 35$  мин эти значения равны 2,2 и 1,8 % соответственно.

**Заключение.** В результате проведения экспериментальных исследований и обработки экспериментальных данных получены следующие результаты. При воздействии на образцы из полимерных энергетических материалов СВЧ-излучения наблюдается их нагрев, причем наиболее интенсивно нагреваются те образцы, в состав которых входят компоненты с большими диэлектрическими потерями. Продолжительное СВЧ-воздействие приводит к воспламенению. После прекращения СВЧ-воздействия и остывания (в случае нагрева) образца значительного изменения модуля упругости его материала не наблюдалось.

Скорость горения образцов из материалов 2-го и 3-го типов после прекращения их СВЧ-облучения и остывания не изменилась, а для образцов из материала 1-го типа зафиксировано некоторое увеличение скорости горения (на 9 %). Увеличение длительности СВЧ-облучения приводит к незначительному увеличению разности теплоемкостей облученных и необлученных образцов.

Результаты данной работы могут быть использованы при построении качественных и количественных моделей воздействия СВЧ-излучения на полимерные высокоэнергетические материалы.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. **Козлов А. Н., Рыбаков А. П.** СВЧ-излучение как фактор деградационного воздействия на элементы и устройства систем управления объектов авиационно-космической техники // *Радіоелектронні і комп'ютерні системи*. 2007. № 7. С. 83–86.
2. **Козлов А. Н., Рыбаков А. П., Одинцов Ю. Т. и др.** Экспериментальное исследование воздействия СВЧ-излучения на образцы топлива твердотопливных ракетных двигателей // *Изв. Челяб. науч. центра*. 2007. Вып. 4. С. 14–18. [Электрон. ресурс]. Режим доступа: <http://csc.ac.ru/LANG=ru/news/index.html.ru>.
3. **Рыбаков А. П., Козлов А. Н., Кучевасов О. В. и др.** Модель реакции твердых ракетных топлив на воздействие сверхвысокочастотного излучения // *Вестн. Ижев. гос. техн. ун-та*. 2008. № 2. С. 96–98.
4. **Козлов А. Н., Рыбаков А. П., Хусаинов С. А.** Модель для оценки воздействия СВЧ-излучения на твердое топливо // *Тез. докл. 3-й Урал. конф. "Полимерные материалы и двойные технологии технической химии"*, Пермь, 18–20 дек. 1999 г. Пермь: Науч.-произв. об-ние им. Кирова, 1999. С. 128–129.

*Поступила в редакцию 22/II 2013 г.,  
в окончательном варианте — 19/VI 2013 г.*

---