

УДК 621.369.9

О.В. Бойправ¹, В.В. Лобунов¹, Л.М. Лыньков¹, Е.А.А. Аль-Машиатт¹**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ИНФРАКРАСНОГО ДИАПАЗОНА ДЛИН ВОЛН С РАДИОПОГЛОТИТЕЛЯМИ НА ОСНОВЕ МЕТАЛЛСОДЕРЖАЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ**

DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-2-89-94

Исследованы процессы взаимодействия электромагнитного излучения инфракрасного диапазона длин волн с эластичными радиопоглотителями, характеризующимися ячеистой структурой и изготовленными на основе металлизированной полиэтиленовой пленки и материала в виде вспененного пенополиуретана. По результатам проведенного исследования установлено, что средняя температура поверхности указанных радиопоглотителей увеличивается не более чем на 8 °С в течение их 60-минутного взаимодействия с электромагнитным излучением инфракрасного диапазона длин волн, температура которого составляет 60±2 °С. Полученные результаты являются экспериментальным обоснованием возможности использования исследованных эластичных радиопоглотителей для маскирования наземных объектов не только в радиолокационном, но и в инфракрасном диапазонах длин электромагнитных волн.

Ключевые слова: инфракрасный диапазон, длина волны, металлизация, радиопоглотитель.

O.V. Boiprav¹, V.V. Lobunov¹, L.M. Lynkov¹, E.A.A. Almashat¹**RESEARCH OF INTERACTION OF INFRARED WAVELENGTH RANGE ELECTROMAGNETIC RADIATION WITH RADIO-ABSORBENT MATERIALS BASED ON METAL-CONTAINING ELEMENTS**

The article studies the processes of infrared wavelength range electromagnetic radiation interaction with elastic radio-absorbent materials (RAM) characterized by a cellular structure and made on the basis of a metallized polyethylene film and material in the form of foamed polyurethane. Based on the results of the study, it was found that the average surface temperature of the radio-absorbent materials increased by no more than 8°C during their 60-minute interaction with electromagnetic radiation of infrared wavelength range, the temperature of which is 60±2 °C. The obtained results show the experimental justification for the possibility of using the studied elastic radio-absorbent materials to mask ground objects not only in the radar but also in the infrared electromagnetic wavelength ranges.

Keywords: infrared range, wavelength, metallization, radio-absorbent material.

¹Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники [Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics]; e-mail: boiprav@tut.by

Введение

В работе [1] представлена методика изготовления эластичных электромагнитных экранов на основе металлсодержащих элементов. Обоснована перспективность использования этих экранов в качестве радиопоглотителей, предназначенных для снижения заметности наземных объектов в радиолокационном диапазоне длин волн, что обусловлено их низкой массой (1 м² – не более 0,6 кг), а также низкими значениями коэффициента отражения электромагнитного излучения (ЭМИ) в диапазоне частот 2–17 ГГц, измеренными при условии их размещения на металлических подложках – от -5 до -20 дБ.

В данной статье приведены результаты исследования по установлению возможности

использования представленных в работе [1] радиопоглотителей в качестве электромагнитных экранов инфракрасного диапазона длин волн. Актуальность исследования обусловлена в настоящее время следующими причинами:

– для получения информации о наземных объектах используют подход, основанный на комплексировании технических каналов ее утечки (как правило, комплексировуют электромагнитный и визуально-оптический каналы утечки) [2];

– существующие решения, связанные с затруднением получения информации о наземных объектах с помощью подхода, основанного на комплексировании технических каналов ее утечки, характеризуются высокой стоимостью,

низкой технологичностью, сложностью эксплуатации в условиях открытой местности; основные из указанных решений описаны в работах [3–11].

При проведении исследований выполнено следующее:

- в соответствии с представленной в работе [1] методикой изготовлены образцы радиопоглотителей на основе металлсодержащих элементов, полученных из материалов различных типов;
- разработана методика проведения измерительного эксперимента;
- в соответствии с разработанной методикой изучен процесс взаимодействия ЭМИ инфракрасного диапазона длин волн с изготовленными радиопоглотителями.

Материалы и методы

Для проведения исследований изготовили образцы радиопоглотителей трех типов:

- образцы типов 1 и 2 – с использованием металлсодержащих элементов, полученных путем раскроя на фрагменты изолированной металлизированной полиэтиленовой пленки толщиной не более 20 мкм;
- образцы типа 3 – с использованием металлсодержащих элементов, полученных путем раскроя на фрагменты двухслойной структуры в виде вспененного пенополиуретана толщиной 5 мм, с нанесенной на его поверхность изолированной металлизированной полиэтиленовой пленкой толщиной не более 20 мкм.

Геометрические размеры металлсодержащих элементов для изготовления образцов типа 1 не превышали 10 мм, для образцов типов 2 и 3: 5 мм. Длина и ширина изготовленных образцов составляли 500 мм, толщина $5 \pm 0,05$ мм. Толщину образцов измеряли с помощью штангенциркуля ШЦ-1-125. По данным размерам изготовлено и исследовано по три образца каждого типа.

В ходе разработки методики проведения измерительного эксперимента выполнена модификация конструкции стенда, представленного в работе [12]. В состав модифицированной конструкции стенда входят следующие элементы:

- предметный столик;
- источник ЭМИ инфракрасного диапазона длин волн (далее – источник ИК-излучения);
- дуга с закрепленными на ней устройством регистрации ИК-излучения и планками для размещения образца;
- дуга с закрепленными на ней планками для размещения образца;
- блок управления устройством регистрации ИК-излучения.

Дуги, входящие в состав конструкции стенда, размещены в параллельных плоскостях в 20 см друг от друга. Расстояние между свободными концами планок для размещения образца, закрепленных на каждой из дуг, также составляет 20 см. Планки изготовлены из органического стекла.

Схематическое изображение модифицированной конструкции стенда приведено на рис. 1.

При проведении эксперимента с использованием модифицированного стенда применяли источник ИК-излучения на основе галогеновой лампы, температура поверхности которого составляла 60 ± 2 °С. Для регистрации ИК-излучения использовали тепловизионную камеру MobIR M4, которая функционирует в среднем ИК-диапазоне длин волн (8–14 мкм). Ее оптическое поле зрения по вертикали и горизонтали составляет 25×19 градусов, диапазон измеряемых температур – от -25 до +250 °С, точность измерения температуры ± 2 °С. Расстояние между источником ИК-излучения и поверхностью исследуемого образца, а также объективом тепловизионной камеры и поверхностью образца составляло 50 мм. Корпус тепловизионной камеры размещали под углом 90 градусов относительно

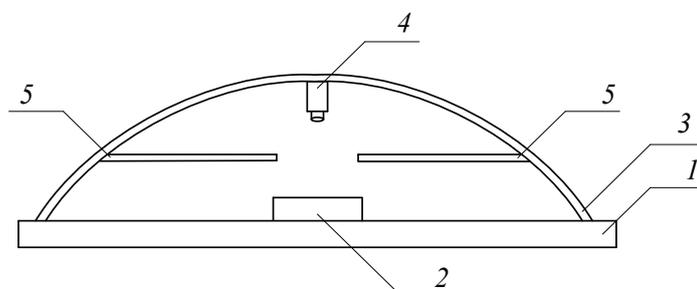


Рис. 1. Схематическое изображение модифицированной конструкции стенда (вид спереди):

1 – предметный столик; 2 – источник ИК-излучения; 3 – дуга с закрепленными на ней устройством регистрации ИК-излучения и планками для размещения образца; 4 – устройство регистрации ИК-излучения; 5 – планки для размещения образца

Таблица 1

**Порядок регистрации тепловизионных изображений поверхностей
исследованных образцов при проведении измерительного эксперимента**

Номер телевизионного изображения	Момент времени от начала эксперимента, мин
1	0,00
2	0,21
3	0,47
4	0,78
5	1,15
6	1,61
7	2,16
8	2,83
9	3,64
10	4,62
11	5,81
12	7,25
13	9,0
14	11,12
15	13,68
16	16,78
17	20,54
18	25,10
19	30,62
20	37,31
21	45,41
22	55,23
23	60,00

поверхности исследуемого образца. Установлено, что его минимальная наблюдаемая площадь составляла $0,5 \text{ мм}^2$ [13].

Измерительный эксперимент заключался в регистрации в течение 60 мин в определенные моменты времени телевизионных изображений поверхности каждого из изготовленных образцов. Продолжительность эксперимента эквивалентна минимальному промежутку времени, по истечении которого температура поверхности образцов переставала расти.

В результате данного эксперимента с каждым из изготовленных образцов каждого типа получено, соответственно, по 23 тепловизионных изображения их поверхностей. В табл. 1 представлены значения моментов времени, в которые выполняли регистрацию таких изображений.

Анализ тепловизионных изображений, полученных при проведении измерительного эксперимента, выполняли с помощью программного обеспечения Guide IrAnalyser. После определения минимальной, максимальной и средней температуры поверхности каждого из образцов получали термопрофиль их поверхности, демонстрирующий изменение ее температуры вдоль условной линии. Указанную линию проводили с помощью инструмента Line программного обеспечения Guide IrAnalyser параллельно горизонталь-

ным краям анализируемого образца через участок его поверхности, характеризующийся максимальной температурой.

Результаты и обсуждение

При анализе тепловизионных изображений установлено, что значения температур соответствующих участков поверхностей каждого из образцов одного и того же типа отличаются не более чем на $2 \text{ }^\circ\text{C}$. На рис. 2 представлено по одному термопрофилю поверхностей образцов всех трех типов, полученных на основе их тепловизионных изображений 1, т. е. изображений, зарегистрированных в начальные моменты измерительных экспериментов с этими образцами.

Полученные температурные параметры поверхностей образцов в начальные моменты измерительных экспериментов систематизированы в табл. 2.

Термопрофили поверхностей исследованных образцов характеризуются неравномерностью ввиду наличия на этих поверхностях шероховатостей, размеры которых превышают длины волн среднего ИК-диапазона [14]. Представленные на рис. 2 термопрофили образцов каждого типа характеризуются наибольшей неравномерностью, по сравнению с термопрофилями, полученными для других образцов аналогичных типов.

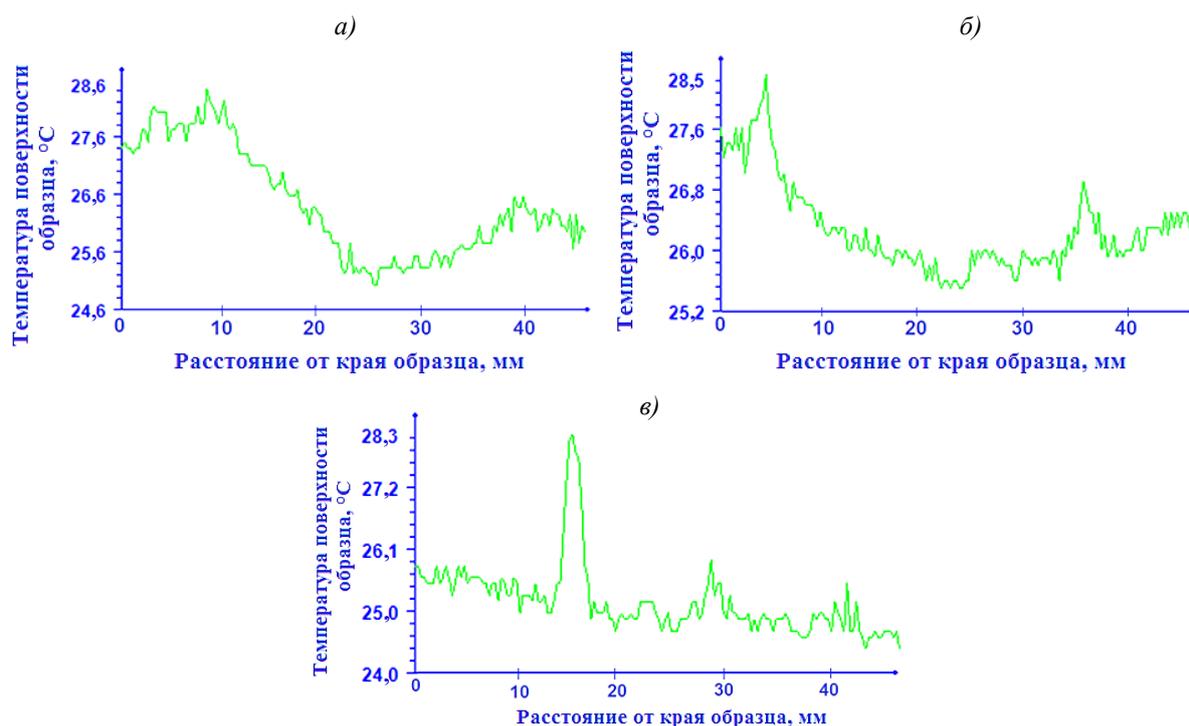


Рис. 2. Термопрофили поверхностей исследованных образцов в начальные моменты проведения измерительных экспериментов образца типа 1 (а), 2 (б) и 3 (в)

Таким образом, наиболее равномерная температура поверхности в начальный момент времени измерительного эксперимента характерна для образцов типа 3. Это связано с отсутствием в указанном образце сквозных воздушных зазоров между металлосодержащими элементами, на основе которых он изготовлен, ввиду объемной структуры последних. Наличие пика на термопрофиле рассматриваемого образца может быть связано с тем, что в той области, где зарегистрирована максимальная температура, элементы, на основе которых изготовлен этот образец, ориентированы относительно друг друга таким образом, что образованная ими металлизированная поверхность характеризуется малой кривизной и большой площадью по сравнению с поверхностями, образованными аналогичным образом в других областях образца.

Из данных, представленных в табл. 2, следует, что наименьшая средняя температура характерна для поверхности образца типа 3, что связано с более низкой теплоемкостью материала, на основе которого он изготовлен, по сравнению с теплоемкостью материала, на основе которого изготовлены образцы типов 1 и 2 [15, 16].

На рис. 3 представлены графики, отображающие динамику изменения минимального, максимального и среднего значений температур поверхностей исследованных образцов в течение их 60-минутного взаимодействия с ИК-излучением источника, использованного при проведении измерительных экспериментов. На основе результатов анализа графиков установлено следующее. Минимальная, максимальная и средняя температуры поверхностей образцов типов 1 и 2 увеличивались

Таблица 2

Температурные параметры поверхностей исследованных образцов в начальные моменты измерительных экспериментов

Значение параметра	Температура поверхности, °С, образца типа		
	1	2	3
Минимальное	25	25,5	24,4
Максимальное	28,6	28,5	28,0
Среднее	26,5	26,3	25,3

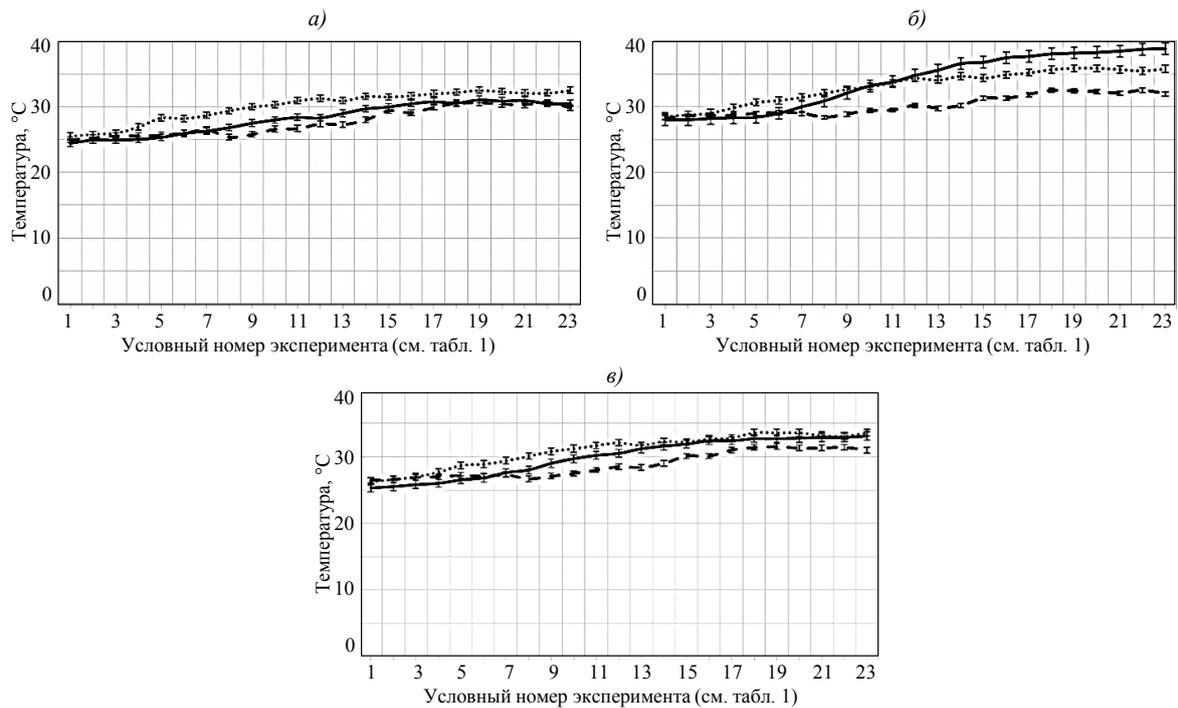


Рис. 3. Динамика изменения минимальных (а), максимальных (б) и средних (в) значений температур поверхностей исследованных образцов типа 1 (---), 2 (···) и 3 (—)

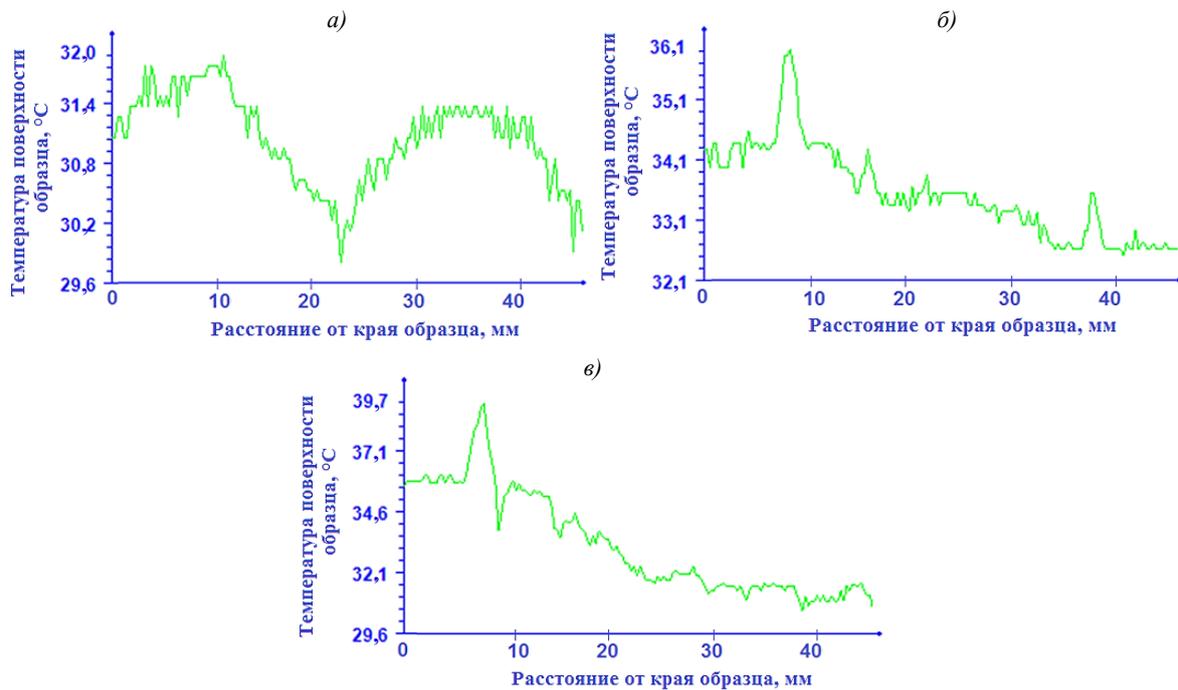


Рис. 4. Термопрофили поверхностей исследованных образцов по завершении проведения измерительных экспериментов образцов типа 1 (а), 2 (б) и 3 (в)

с одинаковой интенсивностью в течение их 60-минутного взаимодействия с ИК-излучением. У образца типа 3 максимальная температура поверхности увеличивалась с большей интенсивностью по сравнению с мини-

мальной и средней, что может быть связано с низким значением теплоемкости входящего в его состав вспененного пенополиуретана.

На рис. 4 представлены термопрофили поверхностей образцов, полученные на основе

**Температурные параметры поверхностей исследованных образцов
по завершении измерительных экспериментов**

Значение параметра	Температура поверхности, °С, образца типа		
	1	2	3
Минимальное	29,8	32,5	30,5
Максимальное	32	35,8	38,9
Среднее	31	33,6	33,1

их тепловизионных изображений 23, т. е. изображений, зарегистрированных по завершении измерительных экспериментов с этими образцами (после 60-минутного взаимодействия образцов с ИК-излучением). Полученные на основе указанных термопрофилей температурные параметры поверхностей образцов по завершении измерительных экспериментов систематизированы в табл. 3.

На основе результатов сравнения данных, представленных в табл. 2 и 3, установлено, что среднее значение температуры поверхности образца типа 1 увеличилось на 4,5 °С в результате его 60-минутного взаимодействия с ИК-излучением. Средние значения температуры поверхностей образцов типов 2 и 3 в результате их аналогичного взаимодействия с ИК-излучением увеличились соответственно на 7,3 и 7,8 °С. На основе результатов сравне-

ния данных рис. 2 и 4 установлено, что наибольшей неравномерностью нагрева характеризуется поверхность образца типа 1, что может быть связано с наличием в объеме этого образца сквозных воздушных зазоров.

Заключение

Таким образом, по результатам проведенного исследования можно сделать вывод о перспективности применения рассмотренных радиопоглотителей, изготовленных с использованием металлсодержащих элементов, полученных путем раскрытия на фрагменты изолированной металлизированной полиэтиленовой пленки толщиной не более 20 мкм для формирования изделий, предназначенных для защиты информации о наземных объектах от утечки как по электромагнитным, так и по тепловым каналам.

Библиографический список

1. Бойправ О.В., Лыньков Л.М., Аль-Машатт Е.А.А., Абдулхади Х.Д.А. Эластичные электромагнитные экраны на основе комбинированных металлсодержащих элементов // Материалы XXIII науч.-практ. конф. «Комплексная защита информации» (Суздаль, 22–24 мая 2018 г.). М.: Авангард, 2018. С. 312–315.
2. Аверченков В.И., Рытов М.Ю., Кувыклин А.В., Гайнулин Т.Р. Методы и средства инженерно-технической защиты информации. М.: Флинта, 2011. 187 с.
3. Material for multispectral camouflage of objects and permanent constructions: pat. US4287243; filed 25.07.79; publ. 01.09.81.
4. Formulation for producing low infrared coating in the 2...15 micron range: pat. US4289677; filed 10.09.79; publ. 15.09.81.
5. Broad spectrum camouflage mat: pat. US4659602; filed 12.11.85; publ. 21.04.87.
6. Electromagnetic wave absorbing, heat conductive silicone rubber compositions: pat. US6514428; filed 11.04.01; publ. 04.02.03.
7. Heat-absorbing layer system: pat. US6780515; filed 08.04.02; publ. 24.08.04.
8. Camouflage material for the temperate environment: pat. US6933023; filed 20.02.03; publ. 23.08.05.
9. IR reflective pigment compositions: pat. US6989056; filed 20.09.04; publ. 24.01.06.
10. Camouflage net: pat. US7119037; filed 14.08.02; publ. 10.10.06.
11. Thermal control interface coatings and pigments: pat. US6997981; filed 20.05.02; publ. 14.02.06.
12. Лобунов В.В., Кухаренко А.И., Борботько Т.В., Лыньков Л.М. Стенд для оценки температуры поверхности фрагментов природных сред и их имитаторов // Приборы и методы измерений. 2016. Т. 7. №2. С. 145–151. DOI: 10.21122/2220-9506-2016-7-2-145-151.
13. Энерготест: офиц. сайт [Электронный ресурс]. URL: <http://www.thermoview.ru> (дата обращения: 25.10.2019).
14. Прошкин С.С. К вопросу о точности измерения температуры с помощью тепловизора // Вестник Международной академии холода. 2014. №1. С. 51–54.
15. Кулешов И.В., Торнер Р.В. Теплоизоляция из вспененных полимеров. М.: Стройиздат, 1987. 144 с.
16. Говарикер В.Р., Висванатхан Н.В., Шридхар Дж. Полимеры: пер. с англ. М.: Наука, 1990. 396 с.