

# МОДЕЛИРОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕПЛОВЫХ ПРИЕМНИКОВ ИК-ИЗЛУЧЕНИЯ

*Е.Ф. Певцов, Р.И. Аль-Натах, М.И. Малето*

Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Московский государственный институт радиотехники, электроники и автоматики (технический университет)», e-mail:pevtsov@mirea.ru

Целью работы является разработка методик моделирования характеристик многоэлементных тепловых приемников инструментами современных средств автоматизированного проектирования. Для типовых конструкций тепловых приемников, выполненных по технологии МЭМС, рассчитаны переходные функции распределения температуры при нагревании излучением. Предложены оптимальные варианты конструкции интегральных многоэлементных тепловых приемников с детекторными элементами на основе пироэлектрических пленок из сополимеров винилиденфторида и цирконата титаната свинца. Показано, что материалы приемников, размеры детекторных элементов и элементов конструкции могут быть выбраны таким образом, что максимальная чувствительность достигается за время соответствующее стандартному времени кадра.

## **Введение и постановка задачи**

Анализ публикаций по системам визуализации теплового излучения показывает, что неохлаждаемые матрицы тепловых приемников успешно конкурируют с охлаждаемыми приборами аналогичного назначения. Особенно это относится к областям, где важно учитывать такие факторы как цена, возможность работы при температурах окружающей среды и высокие критерии технологичности, позволяющие создавать компактные инфракрасные камеры с малыми габаритами и энергопотреблением.

Состояние разработок по созданию многоэлементных тепловых приемников, располагающихся в фокальной плоскости оптической системы (приемников UFPA), и изготовленных по технологиям МЭМС, иллюстрирует табл. 1. Работы ведутся в научно-исследовательских центрах США, Франции, Японии, Австралии, Великобритании и Германии. Основные направления этих исследований связаны со снижением стоимости интегральных приемников за счет улучшения технологии их изготовления и внедрения в типовые технологические процессы микроэлектроники.

Эффективность нагревания излучением является главным фактором, определяющим чувствительность тепловых приемников излучения. Для всех тепловых приемников, независимо от физического эффекта, используемого для преобразования теплового излучения в электрические сигналы (изменения сопротивления или емкости с температурой, изменение поляризации, т.э.д.с, прогиб консоли с микрозеркалом и др.), основой для улучшения их характеристик является разработка интегральной конструкции матрицы приемников с высокой тепловой изоляцией элементов, выполненной по технологии МЭМС.

Целью работы является разработка методик моделирования соответствующей тепловой задачи, точность и производительность которых повышена за счет использования современных систем автоматизированного проектирования.

Таблица 1

Основные характеристики современных разработок  
многоэлементных тепловых приемников

№	Тип приемника	Размер матрицы	Размер пикселя	NETD*	Разработчик
1	микроболометрический ( $\alpha$ -Si)	640×480	25 мкм	< 100 мК (f/1)	Fraunhofer-IMS, Германия [1]
2	микроболометрический ( $\alpha$ -Si)	640×480	17 мкм	46 мК (303 К)	ULIS, CEA/LETI, Франция [2]
3	микроболометрический (VOx)	320×240, 640×480. 320×240, 640×480, 1024×768	25 мкм  17 мкм	< 50 мК(f/1)	DRS Reconnaissance, Surveillance & Target Acquisition, США [3]
4	микроболометрический (VOx)	640×480	25 мкм		Raytheon Vision Systems, США [4]
5	микроболометрический (VOx)	640×480, 1024×768	17 мкм	< 35 мК	BAE Systems Великобритания, [5]
6	микроболометрический ( $\alpha$ -Si)	1024×768	17 мкм	47 мК	ULIS and CEA/LETI Франция [6]
7	микроболометрический ( $\alpha$ -Si / $\alpha$ -SiGe)	320×240, 640×480, 1024×768	17 мкм	< 50 мК	L-3 Communications Infrared Products США [7]
8	на основе КНИ SOI	320×240	22 мкм	0,12 мК	Япония [8]
9	пироэлектрический (SrBi <sub>2</sub> Ta <sub>2</sub> O <sub>9</sub> )	14×14			Symetrix Corporation, Delphi Corporation США [9]
10	оптико-механический (МОEMS)		10 мкм, 25 мкм		Electro-optic Sensor Design Австралия [10]
11	на основе ТЭДС	80×60			Ann Arbor Sensor Systems США [11]
12	биметаллический Al/SiO <sub>2</sub>	296×194	50 мкм	< 500 мК	Oak Ridge National Lab. and Univ. of Tennessee США, [12]

\* NETD (Noise Equivalent Different Temperature) – эквивалентная шуму разность температур, параметр, характеризующий чувствительность приемника.

В данной работе для определения эффективности нагревания чувствительного слоя приемника падающим излучением рассчитываются переходные функции распределения температуры при условии, что изменение падающего потока излучения соответствует изменению температуры среды на один градус. Инструментами анализа служат пакеты программ специализированного комплекта САПР CoventorWare [13], предназначенного для разработки и моделирования микроэлектромеханических устройств и приборов.

Как следует из табл. 1., в настоящее время наилучшие успехи достигнуты при разработке неохлаждаемых микроболометрических матричных приемников. Однако разработка приемников на основе пироэлектрических материалов остается актуальной, поскольку они нечувствительны к фоновому излучению и обладают повышенной радиационной стойкостью. По этой причине и, без ущерба для общности расчетов, при апробации методик моделирования в качестве чувствительных материалов детекторных элементов выбран тип приемников, работа которых основана на эффекте изменения поляризованности полярных диэлектрических материалов с температурой (пироэлектрический эффект). В работе рассматриваются типовые варианты конструкций приемника инфракрасного излучения с материалами из сополимеров винилиденфторида (ПВДФ) и сегнетоэлектрической керамики (цирконата титаната свинца ЦТС).

### **Методики моделирования**

С помощью пакета программ CoventorWare, предназначенного для проектирования устройств МЭМС, можно моделировать и рассчитывать тепловые свойства различных конструктивных вариантов приемников инфракрасного излучения. Моделирование характеристик тепловых приемников в этой среде и, применительно к данной конкретной задаче, требует последовательного выполнения следующих основных процедур проектирования:

1) задание в интерфейсе инструмента Designer исходных данных для синтеза трехмерных моделей пикселей матрицы приемников: определение типа конструкции, задание размеров (топологии масок, необходимых для симуляции операций изготовления);

2) описание последовательности технологических операций получения заданной конструкции на основе встроенных в Designer поверхностных и объемных типовых технологий формирования устройств МЭМС;

3) синтез трехмерной модели устройства;

4) задание значений свойств материалов конструкции используемых при моделировании, выбор типа и размеров сетки разбиения трехмерной модели для последующих расчетов методами конечных элементов;

5) задание с помощью инструментов модуля Analyzer математической модели для расчетов, граничных и начальных условий;

б) вычисление в модуле Analyzer трехмерных распределений температуры в чувствительном слое приемника в определенные моменты времени после включения источника излучения и вывод данных о профилях распределения температуры в текстовые файлы для последующей обработки и анализа результатов;

7) определение зависимости средних значений температуры по объему приемника от времени.

#### *Задание исходных данных для синтеза трехмерных моделей*

Анализ задачи показывает, что конструктивные варианты исполнения отдельных пикселей интегральных тепловых МЭМС-приемников могут быть сведены к трем основным типам:

*Тип I. Конструкция с теплостоком в центре:* чувствительный элемент имеет форму тонкого цилиндра, поддерживаемого в центре.

*Тип II. Конструкция с теплостоком по периметру:* чувствительный элемент имеет форму тонкой мембраны, закрепленной по периметру.

*Тип III. Конструкция с консольными балками:* чувствительный элемент имеет форму квадрата, поддерживаемого в углах анкерными балками.

Определение оптимальных размеров и материалов этих типов приемников является конечной целью моделирования. Для задания размеров и конструкции трехмерной модели в среде CoventorWare служит специальный редактор топологии эскизов масок для последовательных операций изготовления устройства по технологиям МЭМС. Для начала итеративного процесса оптимизации размеров задано, что толщина приемников составляет 1 мкм, а линейные размеры – 50x50 мкм.

Для задания свойств материалов, необходимых для расчетов, в САПР CoventorWare используется встроенная в модуль Designer база данных, одна из форм которой позволяет пользователям обновлять и редактировать записи таблицы данных (см. пример на рис. 1). Типовые характеристики материалов для реализации МЭМС-конструкций пикселей пироэлектрических приемников, которые были занесены в базы данных проектов приведены в табл. 2.

Таблица 2.

Теплофизические свойства материалов конструкций пикселей интегральных пироэлектрических приемников, заданные для моделирования.

Материал	Объемная теплоемкость $c_v$ , Дж/(м <sup>3</sup> ·К)	Коэффициент теплопроводности $K_p$ , Вт/(м·К)	Коэффициент температуропроводности $\chi_p$ , (м <sup>2</sup> /с)
ПВДФ	$2,52 \cdot 10^6$	0,13	$0,051 \cdot 10^{-6}$
ЦТС	$2,6 \cdot 10^6$	3	$1,15 \cdot 10^{-6}$
Алюминий	$2,3 \cdot 10^6$	238	$103,4 \cdot 10^{-6}$
Кремний	$1,62 \cdot 10^6$	145	$89,5 \cdot 10^{-6}$

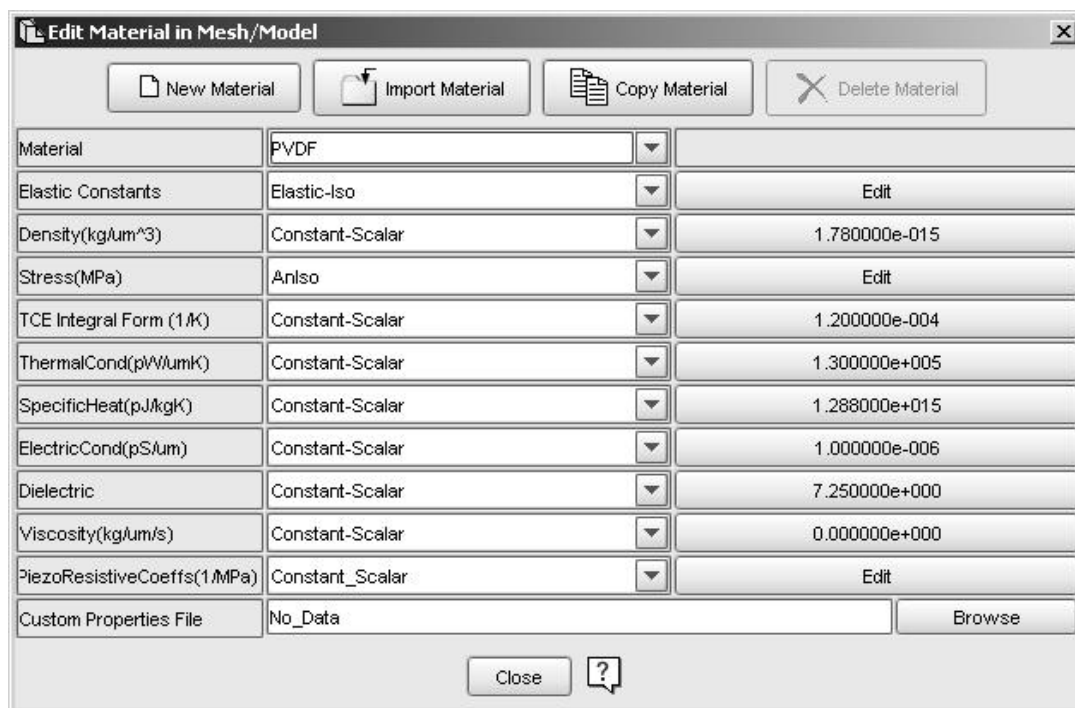


Рис. 1. Пример форма для описания свойств модуля Designer

### Описание технологических операций изготовления

Пример задания последовательности операций изготовления приемника с консольными балками приведен на рис. 2.

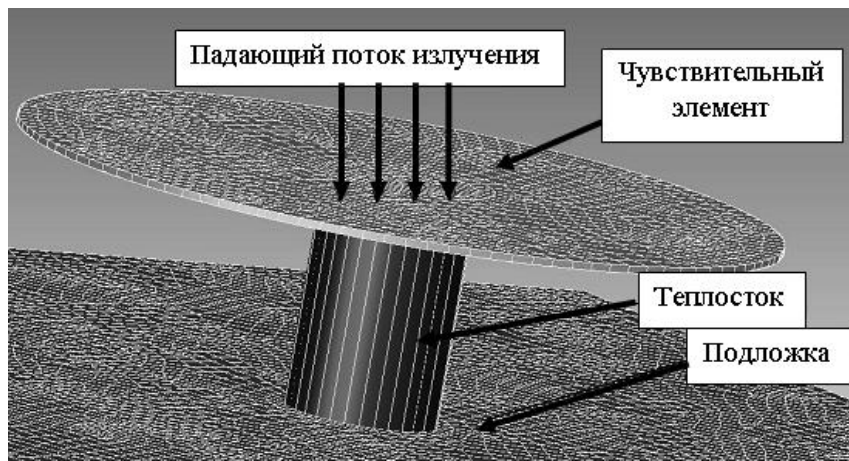
Number	Step Name	Layer Name	Material Name	Thickness	Mask Name	Photoresist	Depth	Mask Offset	Sidewall Angle
0	Substrate	Substrate	POLYSILICON	100	layer1				
1	Stack Material	Layer2	BPSG	5					
2	Straight Cut				layer2	+	0	0	
3	Conformal Shell	Layer3	ALUMINUM	1					
4	Straight Cut				layer3	+	0	0	
5	Planar Fill	Layer4	PZT	0					
6	Straight Cut				layer4	+	0	0	
7	Delete		BPSG						

Рис. 2. Описание последовательности технологических операций формирования пикселя приемника с консольными балками (тип III).

На начальном этапе задается материал подложки, далее наносится жертвенный слой из борофосфоросиликатного (BPSG) стекла, затем наносится положительный фоторезист, по которому вытравливается некоторая часть стекла, а оставшая часть остается в качестве опоры для нанесения следующих слоев. Следующим этапом является напыление алюминия и вытравливание для формирования консольных балок, затем наносится слой чувствительного элемента, крепящегося к балкам, и, наконец, удаляется жертвенный слой и получается готовая конструкция приемника.

### Синтез трехмерных моделей и задание сетки для моделирования

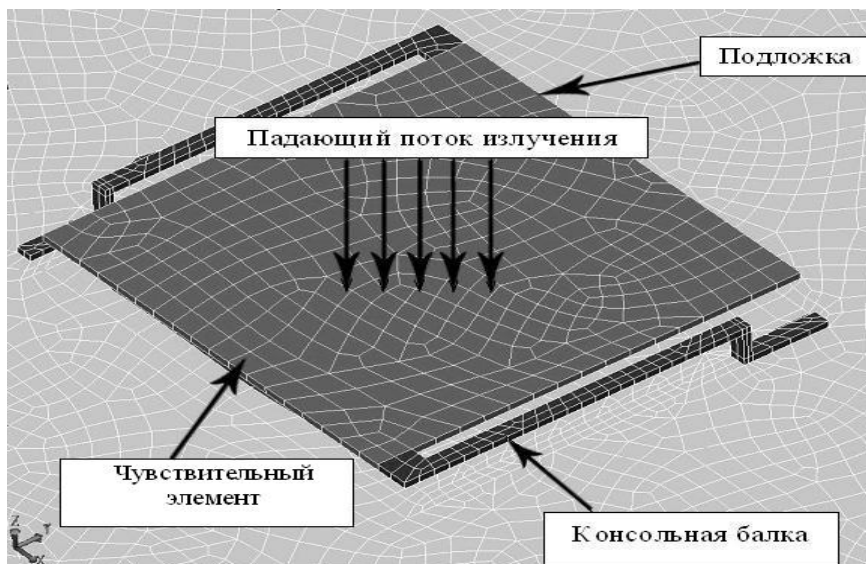
Синтез трехмерной модели устройства осуществляется автоматически в модуле Designer на основании заданных исходных данных. Результаты синтеза для всех трех типов конструкции приведены на рис. 3.



а)



б)



в)

Рис. 3. Результаты синтеза трехмерных моделей пикселей интегральных тепловых приемников излучения: а) приемник с теплосток в центре (тип I), б) приемник в виде тонкой мембраны с теплосток по периметру (тип II) и в) приемник на консольных балках (тип III). Толщина теплочувствительного слоя – 1 мкм. Линейные размеры пикселей – 50...100 мкм.

На трехмерных изображениях моделей также нанесены линии сеток разбиения для определения методом конечных элементов профилей распределения температуры. Конечные элементы представляют собой ребра сеток разбиения модели, для узлов которых численными методами решаются соответствующие уравнения системы уравнений баланса тепла. Из множества типов сеток, предлагаемого пользователю модулем MemMech, путем итеративного поиска был выбран тип сетки, элемент которой сетки имеет форму параллелепипеда (сетка «Extruded bricks»). Грани параллелепипеда могут меняться в соответствии с формой поверхности, что лучше всего подходит для цилиндрических, кубических и сферических тел. Построение сетки идет от поверхности вглубь объема. Шаг сетки также выбирался итеративно. Критерием служили время моделирования и сходимость результатов моделирования. В частности, уменьшение шага разбиения останавливалось, если два последующих результата не различались более, чем на 0,01%.

*Задание математической модели для расчетов и вычисление профилей распределений температуры*

Наиболее подробно вопросы математического описания тепловых процессов в телах различной природы и формы рассмотрены в монографии [14]. В общем случае требуется решение уравнения баланса тепла при заданных начальных и граничных условиях. Расчеты выполнялись встроенным в модуль Analyzer математическим пакетом, который позволяет, в частности, наблюдать изменение расположений линий изотерм в модельном времени по заданной пользователем шкале температур. Результаты работы программы расчета иллюстрируют рис. 4 и рис. 5.

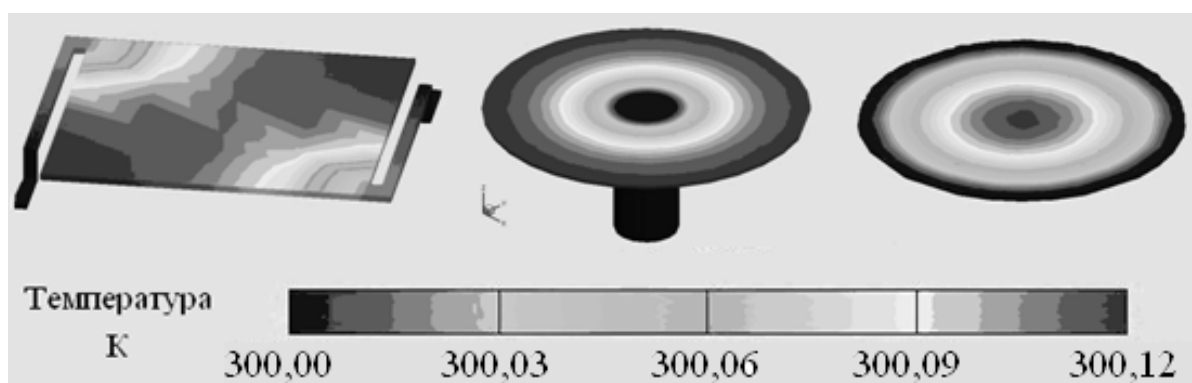


Рис. 4. Результаты моделирования процесса изменения температуры во времени для трех приведенных вариантов конструкций

### **Результаты моделирования и их обсуждение**

Для типовых вариантов конструкции пикселей приемников ИК-излучения, находящихся при комнатной температуре, получены профили распределения температуры в разные моменты времени после изменения температуры сцены на один градус. Примеры профилей температуры для конструкции типа I с материалом пикселя из пленки ПВДФ толщиной 1 мкм приведены на рис. 4.

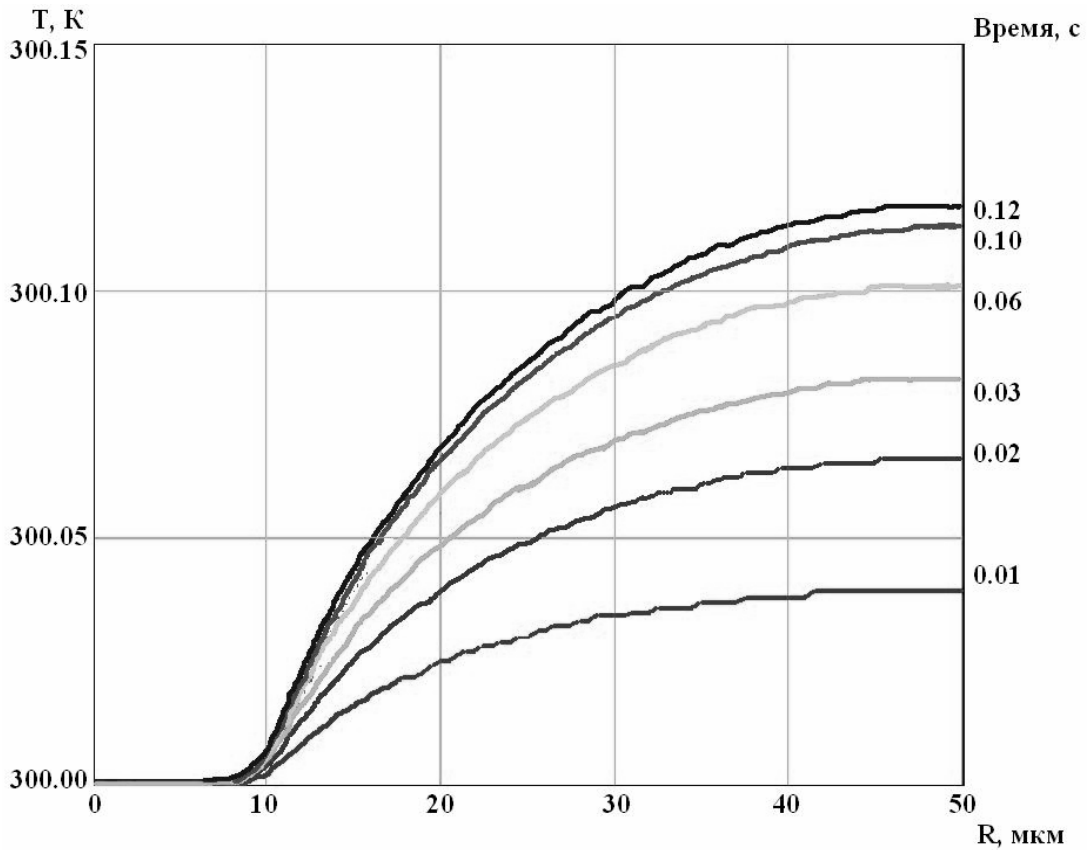


Рис. 5. Изменение распределения температуры для приемника типа I с чувствительным слоем из пленки ПВДФ толщиной 1 мкм диаметром 100 мкм и радиусом теплостока 10 мкм.

Для оценки достоверности проведено сравнение результатов моделирования конструкции типа I с известным решением задачи о нагревании тонкого ребра с внешним радиусом  $R$  и с теплостоком радиуса  $r$  в центре. Удовлетворяющее этой модели уравнение теплопроводности имеет вид:

$$K_p \left( \frac{\partial^2 \theta}{\partial \rho^2} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \theta}{\partial \rho} - \frac{1}{\chi_p} \frac{\partial \theta}{\partial t} \right) = - \frac{g(\delta\theta_0 - 2\theta)}{b} \quad (1)$$

где  $\rho$  - радиус в системе цилиндрических координат;  $\delta\theta_0$  - изменение температуры сцены, принято равным 1К,  $\theta(\rho)$  - температура ребра в точке с координатой  $\rho$ ,  $g$  - коэффициент, характеризующий падающий поток излучения от плоского источника, в частности, для всего спектра  $g = 4\sigma T^3 \delta\theta_0$ , ( $\sigma$  - постоянная Больцмана,  $T$  - температура сцены, равна 300К).

Переходя к безразмерным координатам и параметрам:

$$\xi = \frac{\rho}{r} - \text{безразмерный радиус; } 1 \leq \xi \leq \frac{R}{r};$$

$$\tau = \frac{\chi_p}{r^2} t - \text{безразмерное время;}$$

$$\beta^2 = \frac{2gr^2}{K_p b} - \text{параметр, характеризующий конструкцию.}$$



В [14] показано, что при достижении стационарного режима распределение температуры в такой конструкции имеет вид:

$$\theta_{\infty} = \frac{1}{2} \left[ 1 - \frac{K_1\left(\beta \cdot \frac{R}{r}\right) I_0(\beta \xi) + K_0(\beta \xi) I_1\left(\beta \cdot \frac{R}{r}\right)}{K_1\left(\beta \cdot \frac{R}{r}\right) I_0(\beta) + K_0(\beta) I_1\left(\beta \cdot \frac{R}{r}\right)} \right], \quad (2)$$

где  $I_0$ ,  $I_1$ ,  $K_0$  и  $K_1$  - модифицированные функции Бесселя нулевого и первого порядка. Расхождения стационарных профилей распределения температуры, полученных в результате моделирования (верхняя кривая на рис. 4) и вычисленного по формуле (2) не превышают до 5%, что служит подтверждением корректности предложенных методик моделирования.

Оптимизация конструктивных параметров приемников проводилась из соображений достижения максимального значения средней температуры за время примерно соответствующее стандартному времени кадра тепловизионных систем (0,01...0,04 с). Окончательные результаты моделирования для всех типов приемников обобщены на рис. 6, где изображены зависимости изменения средних температур приемников от времени после включения источника излучения.

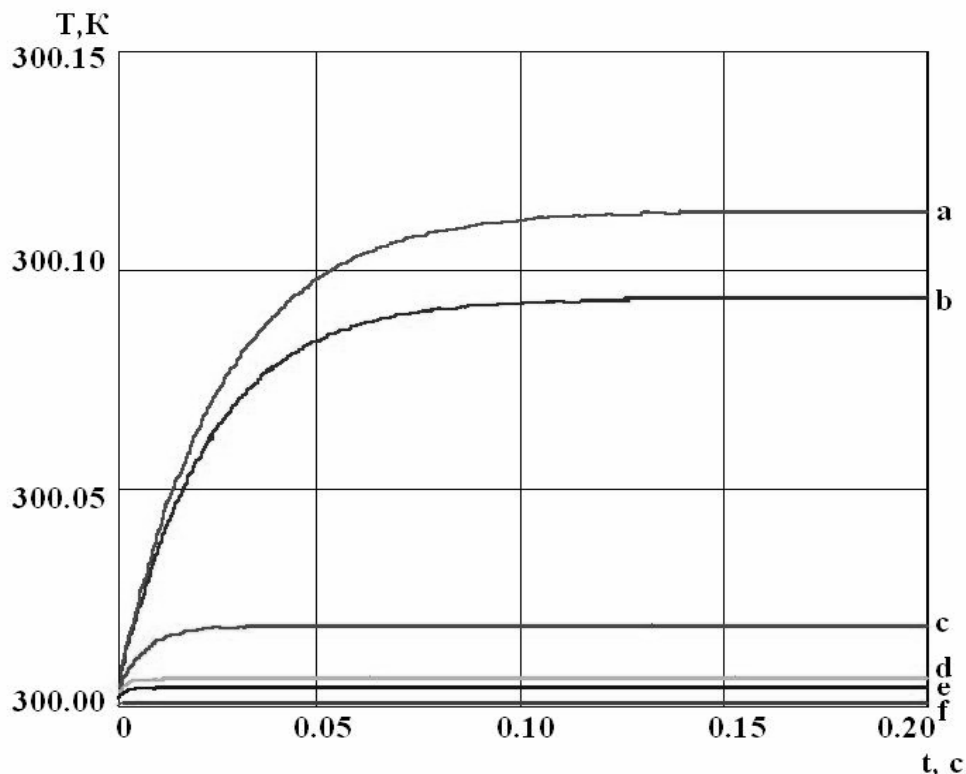


Рис. 6. Зависимость средней температуры от времени: а – конструкция приемника на консольных балках (тип III) с пленкой ПВДФ; б – приемник с чувствительным элементом с теплостоком в центре (тип I) с пленкой ПВДФ; в – приемник с чувствительным элементом в виде круглой мембраны (тип II) на подложке с пленкой ПВДФ; д, е, ф – соответственно те же самые конструкции только из материала ЦТС

Разработанные методики моделирования тепловых ИК-приемников излучения в базе современных САПР носят общий характер. Их апробирование было проведено также для анализа приемников, работа которых основывается на изменении емкости биметаллической МЭМС-конструкции при нагревании излучением [14]. В частности, в работе [15] показано, что использование пакета CoventorWare позволяет провести оптимизацию конструкции интегрального приемника с биметаллическими детекторами на основе пары материалов Al/SiO<sub>2</sub>с размерами пикселей 50x50 мкм.

### **Выводы**

На основе современных средств САПР разработаны эффективные методики моделирования процессов нагревания излучением, основанные на определении переходных функций средней температуры теплочувствительных элементов. Предложенные методики позволяют проводить сравнительные оценки характеристик приемников излучения на теплочувствительных (например, пироэлектрических) тонких пленках. Получено распределение температуры по времени и по координатам для различных вариантов конструкции приемника с детекторными элементами на основе пироэлектрических структур. На основе разработанных методик выполнен анализ типовых вариантов МЭМС-конструкций. Показано, что наиболее эффективной оказывается конструкция с приподнятой над пластиной пленкой с низкой теплопроводностью. Общая теплопроводность в этом случае не превышает 0.1...0.05 Вт/см<sup>2</sup>·К при размерах элементов приемника 1×100×100 мкм<sup>3</sup>.

### **Библиографический список**

1. Weiler D., Russ M., Würfel D., Lerch R., Yang P., Bauer J., Vogt H. A digital 25 m pixel-pitch uncooled amorphous silicon TEC-less VGA IRFPA with massive parallel Sigma-Delta-ADC readout // Proc. of SPIE. 2010. Vol.7660. 7660 0S.
2. Tissot J. L., Durand A., Garret Th., Minassian C., Robert P., Tinnes S., Vilain M. High performance uncooled amorphous silicon VGA IRFPA with 17-m pixel-pitch // Proc. of SPIE. 2010. Vol.7660. 7660 0T.
3. Li C., Han C. J., Skidmore G. D., Hess C. DRS uncooled VOx infrared detector development and production status // Proc. of SPIE. 2010. Vol.7660. 7660 0V.
4. Black S. H., Kraft R., Medrano A., Kocian T., Bradstreet D., Williams R., Yang T. Advances in high-rate uncooled detector fabrication at Raytheon // Proc. of SPIE. 2010. Vol.7660. 7660 0X.
5. Blackwell R., Franks G., Lacroix D., Hyland S., Murphy R. Small pixel uncooled imaging FPAs and applications // Proc. of SPIE. 2010. Vol.7660. 7660 0Y.
6. Trouilleau C., Fièque B., Noblet S., Giner F., Pochic D., Durand A., Robert P., Cortial S., Vilain M., Tissot J. L., Yon J. J. High-performance uncooled amorphous silicon TEC less XGA IRFPA with 17µm pixel-pitch // Proc. of SPIE. 2009. Vol.7298. 7298 0Q.
7. Schimert T., Hanson C., Brady J., Fagan T., Taylor M., McCardel W., Gooch R., Gohlke M., Syllaios A. J. Advances in small-pixel, large-format α-Si bolometer arrays // Proc. of SPIE. 2009. Vol. 7298. 7298 0T.

8. Honda H., Funaki H., I. Fujiwara I., H. Yagi H., K. Ishii K., Suzuki K., Sasaki K., Ogata M., Ueno R., Kwon H. A 320 x 240pixel uncooled TEC-less infrared radiation focal plane array with the reset noise canceling algorithm // Proc. of SPIE. 2010. Vol.7660. 7660 OZ.
9. Unglaub R.A.G., Celinska J.B., McWilliams C.R., Paz de Araujo C.A., Forbes T., Pankin J.D. Advanced dynamic pyroelectric focal plane array // Proc. of SPIE. 2010. Vol. 7660. 7660 1A.
10. Liddiard K.C. Design and performance of PIR security sensors using 10 to 25- $\mu\text{m}$  microbolometer technology // Proc. of SPIE. 2010. Vol. 7660. 7660 10.
11. Kryskowski D., Renken J. 80 x 60 element thermoelectric infrared focal plane array for high-volume commercial use // Proc. of SPIE. 2009. Vol. 7298. 7298 0N.
12. Lavrik N.V., Grbovic D., Rajic S. et al. Uncooled infrared imaging using bimaterial microcantilever arrays // Proc. SPIE – Infrared Technology and Applications. – 2006. – т.6206, №32. – 62061K
13. <http://www.coventor.com>
14. Г. Карслоу, Д. Егер Теплопроводность твердых тел. / Пер. с англ. под ред. А.А. Померанцева. М.: «Наука». - 1964. 488с.
15. Бреев С.В., Певцов Е.Ф. Физическое моделирование биметаллического MEMS- приемника инфракрасного излучения // Материалы IV Международной научно-технической конференции «Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения» ("Intermatic-2006") 24-28 октября 2006 г. Москва / Московский государственный институт радиотехники, электроники и автоматики (технический университет) – М.: МИРЭА. 2006.- Часть 2. - С.116-119.