

УДК 621.52/39–181.4

## Численный метод решения нестационарной задачи теплопроводности для определения температурного поля в криостатируемой фоточувствительной матрице

А. В. Самвелов, Н. Н. Оганесян, Д. А. Сысоев, Д. В. Минаев

*Проведены исследования температурного поля образца, имитирующего матричное фотоприёмное устройство (МФПУ). Исследования проводились в нормальных климатических условиях. Определялось распределение температур в охладителе микрокриогенной системы (МКС), охлаждающей МФПУ. Создана специальная программа решения четырехмерной задачи теплопроводности. С её помощью можно определить температурное поле криостатируемой фоточувствительной матрицы численным методом. Температурное поле в данной задаче меняется по оси вытеснителя МКС, радиусу и времени. Теплофизические параметры образца принимаются заданными и неизменными по координатам. Образец в начальный момент времени находится при температуре окружающей среды, которая характерна для всех его сечений. Исследования проводились с использованием дифференциального уравнения теплопроводности с помощью разработанной программы и экспериментальным способом. Представлены результаты исследований.*

PACS: 85.60.Gz

*Ключевые слова:* матричное фотоприёмное устройство, микрокриогенная система, температурное поле.

### Введение

Для некоторых материалов охлаждаемых матричных фоточувствительных элементов (МФЧЭ) является важным не только поддержание температуры криостатирования в определённых пределах (как правило, это доли градуса), но также не менее важно распределение температур внутри матрицы (радиальное изменение). В частности, для таких фоточувствительных материалов, как КРТ этот градиент не должен превышать сотых долей градуса в стационарном тепловом режиме работы [1—7].

Для определения распределения температур в охладителе МКС, охлаждающей матричное фотоприёмное устройство (МФПУ), творческим коллективом АО «НПО «Орион» создана специальная

программа решения четырехмерной задачи теплопроводности. С её помощью можно определить температурное поле криостатируемой фоточувствительной матрицы численным методом.

Целью данной работы являлось исследование температурного поля образца, имитирующего матричное фотоприёмное устройство (МФПУ), с использованием указанной программы решения четырехмерной задачи теплопроводности, а также сравнение результатов численного расчета с экспериментальными данными.

### Постановка задачи

Охлаждаемое тело (образец) представляет собой диск, выполненный из сплава 29НК-ВИ, применяемого для монтажа на нём МФЧЭ. Диск крепится методом сварки к гильзе охладителя МКС. Внутри охладителя расположен вытеснитель со встроенным регенератором, выполняющий холодопроизводящие процессы МКС (рис. 1) и отводящий тепло от объекта охлаждения [6—9].

Температурное поле ( $\partial T$ ) в нашей задаче меняется по оси  $X$ , радиусу  $r$  и во времени  $\tau$ . Теплофизические параметры образца принимаются заданными и неизменными по координатам. Образец в начальный момент времени  $\tau = 0$  находится при температуре  $T_{oc} = T_n$ , которая характерна для всех его сечений.

Самвелов Андрей Витальевич, начальник НТЦ<sup>1</sup>.

Оганесян Николайос Норикович, инженер<sup>1</sup>.

Сысоев Дмитрий Анатольевич, инженер<sup>1</sup>, аспирант<sup>2</sup>.

Минаев Денис Викторович, инженер<sup>1</sup>.

<sup>1</sup>АО «НПО «Орион».

Россия, 111538, Москва, ул. Косинская, 9.

Тел. 8 (926) 457-54-83.

E-mail: samv-andrej@yandex.ru

<sup>2</sup>НИУ «МЭИ».

Россия, 111250, Москва, ул. Красноказарменная, 14.

Статья поступила в редакцию 8 февраля 2016 г.

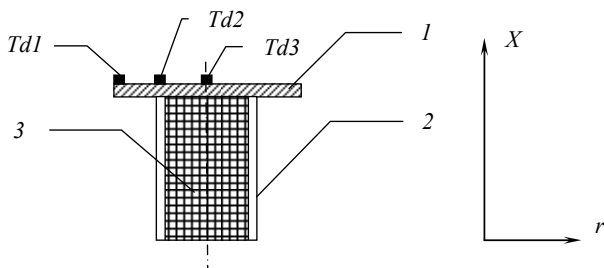


Рис. 1. Охладитель МКС: 1 — диск для монтажа МФЧЭ; 2 — гильза охладителя МКС; 3 — вытеснитель с встроенным регенератором; Td1, Td2, Td3 — термодатчики.

Математическое описание задачи строится на использовании четырехмерного уравнения нестационарной теплопроводности.

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \left( \frac{\partial^2 T}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} \right), \quad (1)$$

где  $\tau$  — текущее время,  $a$  — коэффициент температуропроводности материала образца, который определяется следующим соотношением:

$$a = \lambda / C \rho,$$

Здесь  $\lambda$  — теплопроводность;  $\rho$  — плотность;  $C$  — удельная теплоёмкость образца.

Граничные условия задачи:

$$\begin{cases} \tau = 0; X > 0; T = T_n \\ \tau = 0; X = 0; T = T_0; r = 0; r = R \end{cases}$$

### Расчёт и измерения температурного поля

Решение основывается на использовании метода прогонки. Метод прогонки является упрощенным методом Гаусса и применяется к трехдиагональным матрицам.

На основе дифференциального уравнения теплопроводности с использованием метода про-

гонки создана, как уже сказано, специальная программа расчёта температурного поля.

Задаётся основной массив температуры размерностью 15, 51, 15, т. е. размерность массива по длине составляет 15 ячеек, по времени 51 ячейку, по радиусу 15 ячеек. Задаётся также коэффициент экстраполяции  $W$ .

Пример расчёта по созданной программе включает следующие исходные данные:

- материал образца — 29НК-ВИ [2];
- $L = 40$  мм;
- $r = 8$  мм;
- $T_n = 300$  К;
- $T_0 = 80$  К;
- $h_T = 0,1$  с;
- $\lambda = 19$  Вт/(м·К);
- $C = 498$  Дж/кг·К;
- $\rho = 8350$  кг/м<sup>3</sup>;
- $W = 0,9$ .

Использованы следующие обозначения:  $L$  — длина образца,  $r$  — радиус,  $T_n$  — начальная температура образца,  $T_0$  — температура охлаждения,  $h_T$  — шаг по времени,  $\lambda$  — теплопроводность ковара при  $T_{oc}$ ,  $C$  — удельная теплоёмкость ковара при  $T_{oc}$ ,  $\rho$  — плотность ковара,  $W$  — коэффициент экстраполяции.

Программа способна рассчитать температуру по длине и радиусу на протяжении всего времени, захлаживания до  $T_0$ .

Для нашей задачи используем часть вычислений, относящихся к стационарному этапу. Для этого возьмем момент времени, в котором температура стабилизировалась, и рассмотрим распределение температуры вдоль радиуса.

Полученные результаты расчёта температурного поля представлены в табл. 1.

На рис. 2 показана зависимость радиального изменения температуры растра МФЧЭ.

Таблица 1

Результаты расчёта температурного поля растра

$r$ , мм	1	2	3	4	5	6	7	8
$T$ , К	80,20	80,205	80,209	80,211	80,214	80,216	80,219	80,22

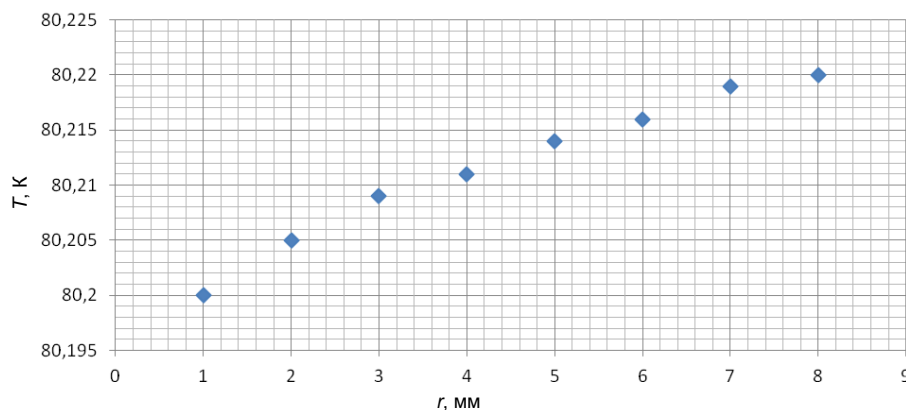


Рис. 2. Зависимость радиального изменения температуры растра МФЧЭ.

Для согласования разработанного численного метода определения температурного поля в посадочном узле МФЧЭ проводились измерения температур раstra имитатора МФЧЭ в стационарном режиме криостатирования. Измерения проводились с использованием термодатчиков  $Td$  диодного типа разработки НПО «Орион» БУТИ.405213.002ТУ, установленных в соответствующих зонах раstra, как показано на рис. 1. В качестве вторичного измерительного прибора использовался мультиметр типа FLUKE 289.

Получены следующие значения.

Таблица 2

№ термодатчика $Td$	1	2	3
Температура, К	80,3	80,31	80,315

Сравнительные кривые показаны на графике (рис. 3).

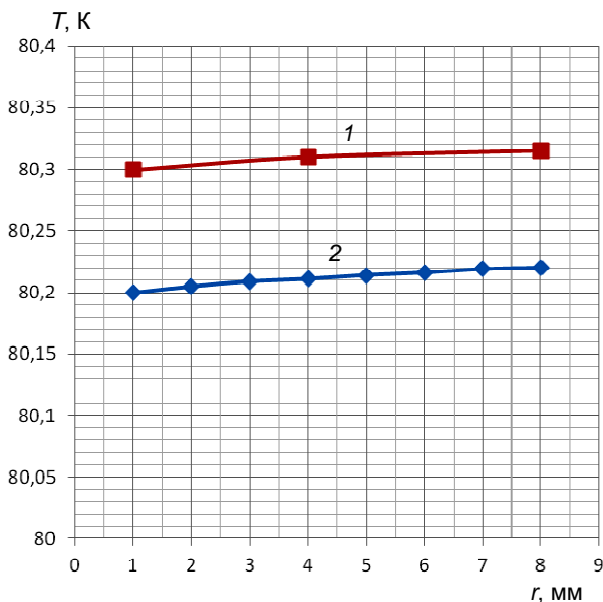


Рис. 3. Графики радиального распределения температуры на растре, полученные экспериментальным и численным методами. Кривая 1 — экспериментальный метод; кривая 2 — численный метод.

Температурное поле в нашей задаче меняется по оси  $X$ , радиусу  $r$  и во времени  $\tau$ . Теплофизические параметры образца принимаются задан-

ными и неизменными по координатам. Образец в начальный момент времени  $\tau = 0$  находится при температуре  $T_{oc} = T_n$ , которая характерна для всех его сечений.

## Заключение

По созданной программе численного расчёта температурного поля, реализованной на основе четырехмерного уравнения нестационарной теплопроводности с использованием метода прогонки, получено распределение температуры раstra имитатора МФЧЭ вдоль радиуса в стационарном режиме. Проведено сравнение экспериментальных данных с результатами, полученными с помощью программы. Отличие между расчетными и экспериментальными данными не превосходит 0,12 %. Полученная сходимость данных экспериментального и программного методов позволяет сделать вывод, что программа работает корректно и её можно использовать для определения распределения температуры на поверхности реального МФЧЭ. Это позволит, используя разработанную программу, в дальнейшем варьировать материалы раstra для получения минимального градиента температур вдоль матрицы.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Сивухин Д. В. // Общий курс физики. Т. II. Термодинамика и молекулярная физика. — М.: Физматлит, 2005.
2. Кожевников И. Г., Новицкий Л. А. Теплофизические свойства материалов при низких температурах. Справочник. — М.: Машиностроение, 1982.
3. Грезин А. К., Зиновьев В. С. Микрокриогенная техника. — М.: Машиностроение, 1977.
4. Криогенное и холодильное оборудование и технологии (Под ред. А. К. Грезина) — Омск: АО «Сибкриотехника», 1997.
5. Теплотехника. (Под. ред. В. Н. Луканина). — М.: Высшая школа, 2000.
6. Самвелов А. В., Сысоев Д. А., Оганесян Н. Н., Минаев Д. В. // Прикладная физика. 2015. № 1. С. 72.
7. Дирочка А. И., Филачев А. М. // Прикладная физика. 2012. № 2. С. 12.
8. Еремчук А. И., Полесский А. В., Самвелов А. В., Сысоев Д. А., Хамидуллин К. А. // Успехи прикладной физики. 2013. Т. 1. № 2. С. 220.
9. Дрожников Б. Н., Бычковский Я. С., Кондюшин И. С., Козлов К. В. // Успехи прикладной физики, 2013. Т. 1. № 3. С. 386.

## A numerical method of the solution for a heat conduction problem to determine a temperature field of a photosensitive matrix at cryostatting

A. V. Samvelov<sup>1</sup>, N. N. Oganessian<sup>1</sup>, D. A. Sysoev<sup>1,2</sup>, and D. V. Minaev<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Orion R&P Association, Inc.  
9 Kosinskaya str., Moscow, 111538, Russia  
E-mail: samv-andrej@yandex.ru

<sup>2</sup> National Research University "MPEI"  
14 Krasnokazarmennaya str., Moscow, 111250, Russia

Received February 8, 2016

*Consideration is given to a study of a temperature field for the sample simulating a matrix photodetector (FPA). The researches have been made by a numerical method using the standard differential equation. Experimental results also are presented.*

PACS: 85.60.Gz

*Keywords:* FPA, microcryogenic system, temperature field.

### REFERENCES

1. D. V. Sivulhin, *General Physics. Vol. II* (Fizmatgiz, Moscow, 2005) [in Russian].
2. I. G. Kozhevnikov and L. A. Novitskii, *Thermophysical Features of Materials at Low Temperatures*, Handbook. (Mashinostroenie, Moscow, 1982) [in Russian].
3. A. K. Grezin and V. S. Zinov'ev, *Microcryogenic Systems* (Mashinostroenie, Moscow, 1977) [in Russian].
4. *Microcryogenic and Refrigeration Equipment* Ed. by A. K. Grezin (Sibkriotehnika, Omsk, 1997) [in Russian].
5. *Heat Engineering*. Ed. by V. N. Lukanin (Vyssh. Shkola, Moscow, 2000) [in Russian].
6. A. V. Samvelov, D. A. Sysoev, N. N. Oganessian, and D. V. Minaev, *Prikladnaya Fizika*, No. 1, 72 (2015).
7. A. I. Dirochka and A. M. Filachev, *Prikladnaya Fizika*, No. 2, 12 (2012).
8. A. I. Eremchuk, A. V. Polesskii, A. V. Samvelov, D. A. Sysoev, and K. A. Khamidullin, *Uspekhi prikladnoi Fiziki* **1**, 220 (2013).
9. B. N. Drazhnikov, Ya. S. Bychkovskii, I. S. Kondyushin, and K. V. Kozlov, *Uspekhi prikladnoi Fiziki* **1**, 386 (2013).