

УДК 536.52

## **Компьютерное моделирование температурного поля бленды и аппаратурного фона в оптической системе с приемником ИК-излучения**

*В. А. Гончаров, Е. К. Кузнецов, В. И. Суслин, О. В. Пахомов, А. С. Попов,  
Н. Н. Тарновский, А. О. Федоров, В. Г. Черненко*  
Филиал ФГУП ЦНИИ "КОМЕТА" Научно-проектный центр опто-электронных комплексов  
наблюдения, Санкт-Петербург, Россия

*Рассмотрены программный комплекс и пример применения комплекса для компьютерного моделирования аппаратурного фона опто-электронных информационных систем ИК-диапазона с учетом теплового режима бленды.*

Для наблюдения из космоса лесных пожаров, извержений вулканов и других чрезвычайных ситуаций применяются спутниковые информационные опто-электронные системы (ОЭС) с ИК-приемниками излучения.

В поле зрения ОЭС на приемник излучения вместе с полезным сигналом приходит тепловое излучение облаков, поверхности, на которой расположен наблюдаемый объект, а также тепловое излучение деталей оптической системы.

Излучение, поступающее от предметов, расположенных вне оптической системы, исключая излучение наблюдаемого объекта, составляет внешний фон, тепловое излучение деталей оптической системы—приборный или аппаратурный фон.

Для защиты приемников излучения спутниковых ОЭС от засветки лучами Солнца используются солнцезащитные устройства, в простейшем случае бленды (рис. 1). При определенных ситуациях лучи Солнца могут проникать внутрь бленды, поглощаться поверхностью и, как показали предварительные оценки, вызывать ее значительное и неравномерное нагревание. При этом бленда сама становится источником теплового излучения, способного достичь приемника излучения, которое наряду с тепловым излучением других деталей оптической системы (зеркал, линз, их оправ, диафрагм, модулятора и т. п.) [1—3] воспринимается приемником как составляющая аппаратурного фона, на котором ОЭС должна различить полезный сигнал.

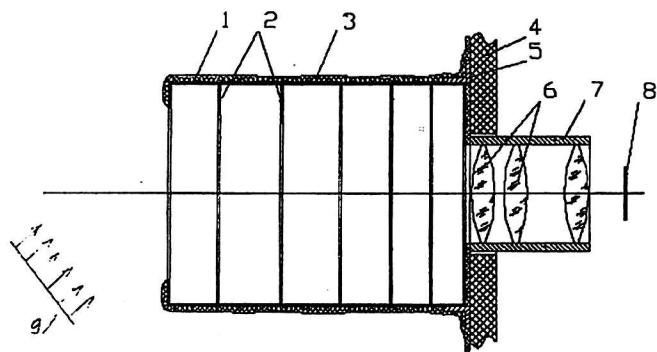


Рис. 1. Схематическое изображение рассматриваемой оптической системы:

- 1 — оболочка бленды; 2 — диафрагма; 3 — теплоизоляция; 4, 7 — агрегатная панель; 5 — фланец; 6 — линзы; 8 — приемник излучения; 9 — поток излучения Солнца

Авторам не известны работы, в которых предлагаются методы расчета температурных полей бленд и учета их влияния на аппаратурный фон ОЭС. Это обстоятельство и практическая необходимость побудили разработать рассматриваемый ниже программный продукт, решающий поставленную задачу.

### Постановка задачи

Требуется определить среднее значение и распределение потока теплового излучения деталей оптической системы, состоящей из объектива, фильтров, тонкостенной бленды и деталей несущей конструкции, поглощаемого чувствительным элементом приемника (ЧЭП).

Необходимо учесть вклад бленды в искомый поток, определив предварительно ее нестационарное температурное поле, возникающее в результате поглощения излучения Солнца, освещ

щающего поверхности бленды, радиационного теплообмена ее поверхностей с окружающими телами и пространством, а также переноса тепла теплопроводностью в материале бленды. Значения температуры оптических деталей системы, корпуса объектива и деталей несущей конструкции заданы и постоянны во времени. Зависимость угла между направлением лучей Солнца и осью бленды от времени известна и представляет собой ступенчатую функцию.

Теплофизические и оптические свойства материала бленды от температуры не зависят. Все поверхности оптической системы рассматриваются как серые. Спектральные оптические характеристики материалов и поверхностей задаются в виде кусочно-линейных функций от длины волны излучения.

### Методология

Нестационарное поле температуры бленды формируется в результате поглощения поверхностью бленды излучения внешнего источника и собственного излучения, переноса тепла в толще бленды теплопроводностью и изменения ее теплосодержания.

Нагревание бленды тепловым излучением будем рассматривать как результат действия внутренних распределенных источников тепла с объемной плотностью, соответствующей распределению плотности поглощенного излучения.

Для расчета нестационарного поля температуры бленды применен метод конечных элементов [4]. После объединения в выражении для функционала членов, учитывающих внутренние источники и изменение теплосодержания, производится его минимизация. Операция минимизации приводит к системе дифференциальных уравнений относительно неопределенных коэффициентов, которая преобразуется к конечно-разностному виду и решается методом Гаусса.

Для расчета объемной плотности источников тепла, действующих в конечных элементах, применен метод Монте-Карло. При этом каждая точка поверхности внешнего источника излучения и конечный элемент (КЭ) бленды рассматриваются как источники последовательно испускаемых лучей, направление которых в пределах полупространства и длина волны в определенном диапазоне являются случайными, соответствующими распределению плотности излучения источника. Диапазон длин волн, испускаемых каждым источником, ограничивается пользователем значениями  $\lambda_{\min}$  и  $\lambda_{\max}$ .

Суммарное количество лучей, испускаемых источниками, определяется исходя из требуемой точности. Распределение суммарного количества между внешним источником и конечными элементами производится на каждом временном шаге с учетом мощности внешнего источника или температуры КЭ.

Каждый луч трассируется в пределах виртуальной границы рассматриваемой системы, испытывает многократные отражения и частично поглощается встреченными препятствиями. Лучи, достигающие границы системы и пересекающие ее, в дальнейшем не рассматриваются. Регистрируя лучи, падающие на произвольный КЭ, складывая поглощенные им потоки излучения от соседних КЭ, определяется суммарный поток излучения, поглощенный КЭ. Этот поток принимается равным мощности тепловыделения в КЭ.

Таким же способом определяется распределение потока излучения, поглощаемого ЧЭП и любой другой поверхностью оптической системы.

В процессе подготовки исходных данных создаются трехмерные (3D) модели тонкостенной бленды, селективно-прозрачных и непрозрачных деталей системы. В библиотеку программного комплекса заносится информация о геометрических и физических свойствах всех составных частей системы.

### Программная реализация метода

Блок-схема программного комплекса, при разработке которого использовали программы VOB Lutex ([www.tecplusplus.de](http://www.tecplusplus.de)), приведена на рис. 2. Эта программа имеет средства для создания пространственной модели внешнего источника излучения, криволинейных и плоских поверхностей оптических деталей системы, ввода в компьютер информации о геометрических и физических свойствах деталей, обеспечивает генерацию случайных лучей и их трассировку, расчет всех видов потоков излучения, а также трехмерную визуализацию модели всей системы и хода лучей от внешнего источника.

Для создания 3D модели бленды и несущих элементов конструкции могут быть использованы любые САПР, например Mechanical Desktop (версия 6). При создании моделей тонких цилиндрической оболочки бленды и плоских диафрагм использовались элементы САПР в виде тонкой оболочки и поверхности.

Созданная средствами САПР 3D модель бленды триангулировалась для создания ее конечно-элементной модели и импортировалась в среду программы VOB Lutex. Количество конечных элементов для рассмотренных моделей бленды составляло 10 000–30 000. Для расчета нестационарного температурного поля бленды разработан программный блок, реализующий метод, описанный выше. Точность расчета температуры увеличивается с уменьшением шага по времени. Программный комплекс работает в среде операционной системы WINDOWS 98 и старше.

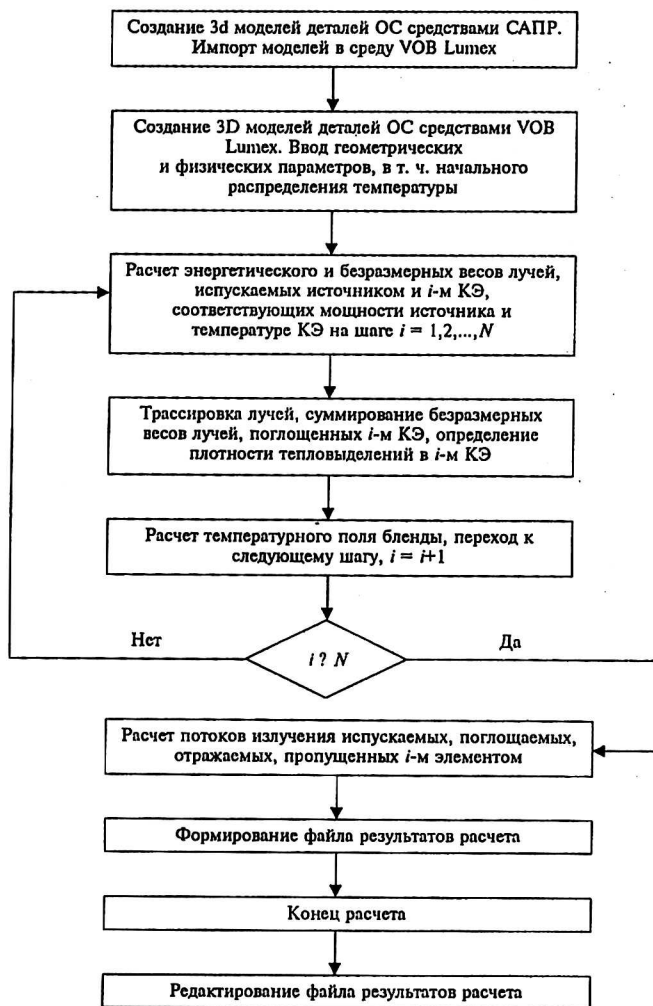


Рис. 2. Блок-схема программного комплекса

При тестировании программного комплекса использовались задачи, решенные ранее аналитическими или численными методами. В частности, результат определения предложенным методом эффективной излучательной способности нагретого полого цилиндра совпал с результатами, полученными при аналитическом решении данной нелинейной задачи радиационного теплообмена [5] с погрешностью 0,02 %. При тестировании и решении примера, рассматриваемого ниже, использовался компьютер Pentium 3 с тактовой частотой 1 ГГц, ОЗУ — 512 Мб.

Идеализация геометрических и физических свойств системы делает метод расчета приближенным и дает основание предполагать присутствие в результате систематической погрешности. Такая погрешность может быть выявлена и оценена при расчете конкретных систем, но на текущем этапе работы не производилась.

Применение метода Монте-Карло обуславливает наличие в результате случайной составляющей погрешности. При вычислении максимальной температуры бленды (см. ниже пример расчета) такая погрешность невелика и составила 0,5 %. При расчете потока излучения, поглощаемого ЧЭП, случайная погрешность результа-

та зависит от задаваемого количества лучей, генерируемых на каждом временном шаге и при малом количестве лучей может достигать 30—50 %.

### Пример применения программного комплекса

В качестве примера, иллюстрирующего возможность предлагаемого программного продукта, рассмотрим ОЭС, состоящую из охлаждаемых линзового объектива, двух фильтров, иллюминатора, приемника излучения и бленды (см. рис. 1). Пять линз объектива и их оправы объединены общим металлическим корпусом. Бленда закреплена на несущей агрегатной панели. Наружная поверхность бленды, а также поверхность панели теплоизолированы.

Бленда ОС имеет цилиндрическую оболочку, внутри которой расположены 6 диафрагм с центральными круглыми отверстиями. Седьмая диафрагма является внешним торцом бленды, обращенным в окружающее пространство. Бленда и диафрагмы тонкостенные, выполнены из теплопроводного алюминиевого сплава. Диаметр и длина оболочки равны 500 и 800 мм, соответственно.

Температура приемника 80 К. Значения температуры полосового фильтра, ближайшего к приемнику, и входного окна приемника равны 190 К. Температура объектива, второго фильтра и иллюминатора поддерживается на уровне 258 К. Температура агрегатной панели составляет 288 К. Степень черноты покрытия внутренних поверхностей оболочки и диафрагм 0,95.

Параллельные лучи от внешнего источника излучения с плотностью  $1400 \text{ Вт/м}^2$  в течение 30 мин под углом  $36^\circ$ , а затем 30 мин под углом  $26^\circ$  к оси системы поступают внутрь бленды, практически полностью поглощаются ее поверхностями и нагревают бленду. Поверхность бленды становится источником диффузного теплового излучения с длинами волн, как предполагалось в расчете, от 0,1 до 30 мкм. Определенная доля излучения бленды падает на поверхность первой линзы и корпус объектива, проникает внутрь объектива и вместе с тепловым излучением других частей ОС достигает ЧЭП излучения. Фильтры пропускают излучение в диапазоне чувствительности приемника с длинами волн от 3,5 до 4,1 мкм — в одном из диапазонов, предпочтительных для наблюдения лесных пожаров [6].

В расчетной модели бленда представлена в виде единого элемента, корпус объектива и оптические детали системы — как отдельные изотермические элементы. С учетом внешнего источника, а также вспомогательных элементов, учитывающих окружающее пространство, теплоизоляцию на внешних поверхностях бленды, устройства крепления бленды на агрегатной панели, общее количество элементов расчета составило 19, среди которых способных облучать ЧЭП — 12.

В процессе расчета температурное поле бленды вычислялось на всем заданном отрезке вре-

мени (1 ч), после чего определялись потоки излучения, поступающие от всех частей системы на ЧЭП (аппаратурный фон) и от бленды — на первую линзу объектива и панель (последние два потока определяют тепловую нагрузку устройств, охлаждающих объектив и панель).

Режим расчета: продолжительность анализируемого процесса 1 ч (0,5 ч — при угле  $36^\circ$ , 0,5 — при угле  $28^\circ$ ), шаг по времени 20 с, количество лучей, испускаемых источником и всеми конечными элементами на одном шаге, — 500 000. Расчет температурного поля бленды занял 30 ч машинного времени.

После окончания этапа термоанализа для достигнутого распределения температуры в бленде выполнен расчет потока излучения, проходящего на ЧЭП от всех выделенных элементов оптической системы и поглощаемого им, а также взаимной облученности всех выделенных элементов. Число лучей, испущенных элементами оптической системы на этом этапе расчета и обеспечивших достигнутое качество карты распределения потока освещенности ЧЭП (см. ниже), составило  $5 \cdot 10^8$ . Суммарная продолжительность расчета (машинное время) составила 50 ч.

В результате расчета получены:

значения максимальной, средней и минимальной температуры выделенного элемента бленды, а также потоков собственного, падающего, отраженного и пропускаемого (для селективно прозрачных элементов) теплового излучения в конце каждого шага термоанализа;

графики зависимости от времени температуры и потоков, указанных в предыдущем абзаце;

графики распределения по длинам волн потоков собственного, падающего, отраженного и пропускаемого (для селективно прозрачных элементов) теплового излучения для каждого выделенного элемента оптической системы.

вклад в падающий на каждый элемент и поглощенный им суммарные потоки теплового излучения от всех выделенных элементов системы (в %);

цветные карты распределения потока, падающего на бленду от внешнего источника, ее собственного теплового излучения, а также потока излучения от всех выделенных элементов оптической системы, поглощаемого ЧЭП.

В статье приведены карта распределения температуры в бленде (рис. 3); графики зависимости от времени максимальной, средней и минимальной температуры бленды (рис. 4); значения и спектральные распределения падающего на ЧЭП и поглощенного им потоков излучения, а также спектральные распределения этих потоков (рис. 5); цветная карта распределения освещенности ЧЭП выделенными элементами оптической системы (рис. 6); таблица вкладов в падающий на ЧЭП и поглощенный им потоки теплового излучения других элементов системы.

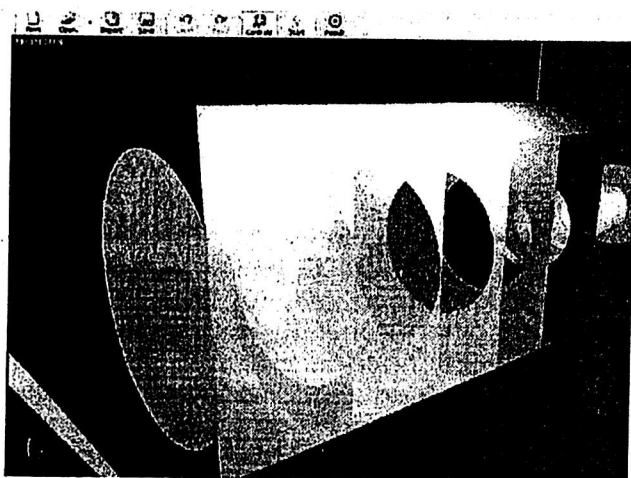


Рис. 3. Карта распределения температуры в бленде

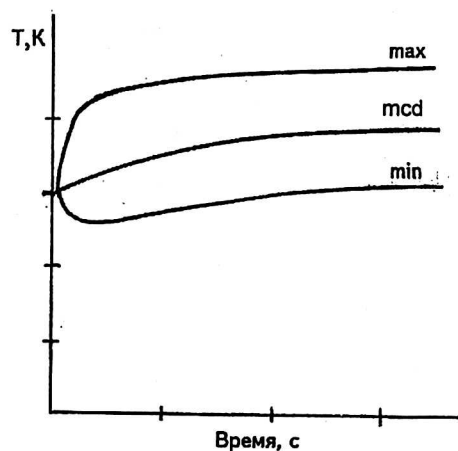


Рис. 4. Временные зависимости для температур бленды: max — максимальной; mcd — средней; min — минимальной

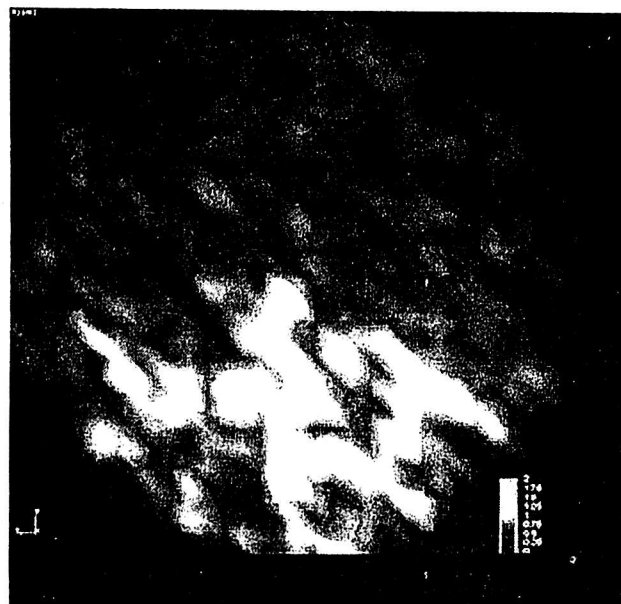


Рис. 6. Карта распределения освещенности поверхности ЧЭП

Поэлементный анализ вклада частей конструкции оптической системы для потоков излучения, падающего на ЧЭП и им поглощенного

Источник излучения	Поток, %	
	падающий	поглощенный
Корпус объектива	0,04	5,00
1-я линза	0,00	0,68
2-я линза	0,01	2,33
3-я линза	0,02	3,09
4-я линза	0,01	2,18
5-я линза	0,01	1,74
Бленда	0,28	65,00
Фильтр турели	0,06	6,76
Иллюминатор	0,08	2,79
Входной фильтр	0,00	0,06
Входное окно	99,48	0,38

Расчет показал, что поток излучения Солнца, поступающего в рассматриваемую бленду, при угле падения  $36^\circ$  составляет 143 Вт, при угле падения  $28^\circ$  — 156 Вт. В первом случае поток 119 Вт рассеивается блендой в окружающее пространство, 12 Вт от бленды поступает к охлаждаемому объективу, еще 12 Вт — к агрегатной панели. Знания тепловых потоков к объективу и панели необходимы при проектировании систем поддержания на заданном уровне температуры указанных частей оптической системы.

Рассматривая карту распределения температуры в бленде (см. рис. 3) можно видеть, что наиболее нагретой оказывается средняя часть освещаемой Солнцем стороны бленды. В конце процесса нагревания бленды экстремальные, и средние значения температуры составили  $T_{\max} = 396 \text{ K} = 123^\circ \text{C}$ ,  $T_{\min} = 276 \text{ K} = 3^\circ \text{C}$ ,  $T_{\text{mcd}} = 330 \text{ K} = 57^\circ \text{C}$ .

Из таблицы следует, что при достигнутом распределении температуры в системе от вход-

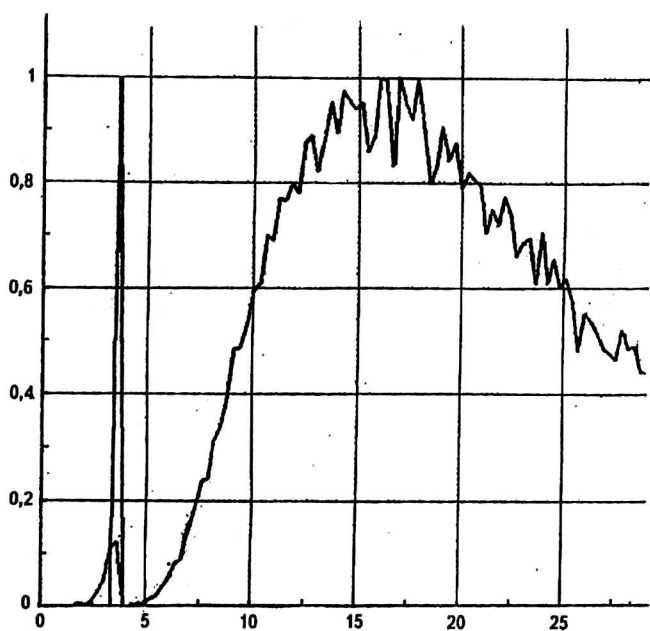


Рис. 5. Спектральное распределение потока теплового излучения, падающего на ЧЭП и им поглощенного

ного окна приемника (температура 190 К) и бленды поток падает на ЧЭП 0,19 Вт, причем 99,5 % этого потока поступает от входного окна и только 0,3 % — от бленды. Однако доля излучения бленды в потоке, поглощенном ЧЭП, составляет 65 %, а доля излучения входного окна приемника — всего 0,4 %. Содержание рис. 4 объясняет эти сведения. Так как излучение входного окна является длинноволновым, фильтр перед приемником не пропускает его. Напротив, так как излучение бленды является сравнительно коротковолновым, оно частично проходит фильтр и поглощается приемником. Значительный вклад в освещенность ЧЭП вносят объектив (15,1 %), иллюминатор (12,7 %) и фильтр турели (6,8 %).

Как показал расчет, стационарное тепловое состояние бленды достигается примерно через 1 ч. Расчет переходного процесса выполнен за 180 шагов с длительностью по 20 с. Количество весов лучей, задаваемых на каждом шаге, равнялось  $5 \cdot 10^5$ , расчет занял 12 ч машинного времени. На последнем шаге для повышения точности расчета распределения потока излучения, поглощаемого приемником, использовалось  $1,0 \cdot 10^9$  весов лучей. При этом расчет указанного распределения занял 120 ч.

### Заключение

Разработанный программный комплекс позволяет рассчитать температурное поле бленды

оптической системы, вызванное нагревом лучами Солнца и теплообменом с окружающим пространством, а также распределение по площади освещенности приемника излучения спектральным и белым в пределах рабочего диапазона длин волн тепловым излучением всех деталей системы.

Предлагаемая методика базируется на конечном-элементном представлении и расчете температурного поля тонкостенной бленды, а также расчете методом Монте-Карло взаимной облученности всех деталей системы.

Программный комплекс позволяет выполнять расчеты, позволяющие оценивать технические решения, принимаемые при проектировании оптико-электронной аппаратуры.

### Литература

1. Мирошников М. М. Теоретические основы оптико-электронных приборов. — Л.: Машиностроение, 1983.
2. Линник В. Н., Новиков Д. Д. Прогнозирование наблюдения заданного района спутниковыми системами дистанционного зондирования // Вопросы радиоэлектроники. Серия "Общетехническая". 2001. Вып. 1. С. 45.
3. Голубь Б. И., Пахомов И. И., Дорохоров А. М. Собственное излучение элементов оптических систем оптико-электронных приборов. — М.: Машиностроение, 1978.
4. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике. — М.: Мир, 1975.
5. Оциссик М. Н. Сложный теплообмен. — М.: Мир, 1976.
6. Аксенов О. Ю., Зубков И. А., Скребушевский Б. С., Чернявский Г. М. О возможности построения космической системы раннего обнаружения лесных пожаров // Вопросы радиоэлектроники. Серия ОТ. 2002. Вып. 2. С. 11.

## Computer simulation of temperature distribution on interior surfaces of blends and computation of intrinsic noise for infrared optoelectronic data system

V. A. Goncharov, E. K. Kuznetsov, V. I. Suslin, O. V. Pakhomov, A. S. Popov,  
N. N. Tarnovsky, A. O. Fedorov, V. G. Chernenko

PETROKOMETA Research Institute of Regional Informing-Controlling Systems, Saint-Petersburg, Russia

*A construction of a special-purpose software for simulation of intrinsic noise in infrared optoelectronic data systems with taking into account temperature distribution on interior surfaces of blends is described. An example of practical use of the software is demonstrated.*