

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ИЗЛУЧЕНИЯ ДВИГАТЕЛЬНОЙ УСТАНОВКИ АЛ-31Ф В ИНФРАКРАСНОМ ДИАПАЗОНЕ

© 2014 Г. С. Филиппов

Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)

Статья посвящена моделированию излучения силовой установки (СУ) летательного аппарата (ЛА) на примере исследования силовой установки АЛ-31Ф из серии высокотемпературных турбореактивных двухконтурных двигателей с форсажными камерами. Изложены результаты исследования, посвящённого определению пространственного распределения лучистой энергии от сложных излучателей. Предлагается комплексный метод расчёта инфракрасного (ИК) излучения, основанный на математическом моделировании пространственного распределения лучистой энергии от сложного излучателя. Разработан алгоритм с использованием вероятностного метода Монте-Карло, что приближает смоделированный процесс испускания и отражения луча к реальному физическому, и применением нового метода расчёта индикатрисы в поглощающей среде от сложных излучателей. Выполнен расчёт распределения температур внутри сопла и моделирование геометрии СУ. На основе проведённых вычислений получено пространственное распределение инфракрасного излучения. Предложено устройство по снижению интенсивности излучения в широком диапазоне углов, проведён анализ его эффективности. Предложенное устройство позволило снизить расчётный уровень ИК-излучения более чем на 90% в диапазоне телесного угла задней полусферы. Приведён результат расчётов прямого (без учёта переотражения излучения внутри сопла) и также полного (с учётом переотражения) потока лучистой энергии для отдельных излучающих элементов на примере центрального эллипсоидного тела. Приведены результаты сравнения этих расчётов.

Метод Монте-Карло, распределение ИК-излучения, тепловое излучение, излучение летательного аппарата.

Главными источниками ИК-излучения в составе СУ являются детали двигателя, нагретые до высоких температур, и струя выхлопных газов. Излучающие элементы двигателя являются сложными составными геометрическими фигурами, где каждый элемент проявляет себя в качестве излучателя и отражателя, что вносит дополнительные трудности. В связи с этим возникает необходимость компактных программ расчёта излучения сложных устройств. Широкое распространение для решения этой задачи получил метод «обратного хода луча» [1]. Но для расчёта излучения СУ ЛА он не подходит, так как не позволяет рассчитывать системы с отражением, отличным от зеркального. Исследования излучения, проводимые для спускаемых космических аппаратов и межпланетных зондов различных классов [2], имеют ряд преимуществ, но не учитывают отражающие свойства поверхностей,

которые в условиях задачи расчёта излучения СУ ЛА играют важную роль.

Цель исследования – разработка метода расчёта излучения нагретых поверхностей сложных излучателей и распределения лучистых потоков в пространстве. Его основу составляет методика, подробно изложенная в [3,4] и базирующаяся на усложнённом итерационно-зональном методе расчёта переноса излучения Ю.А. Суринова [5].

Исходя из этого, предлагается комплексный метод расчёта ИК-излучения, основанный на математическом моделировании пространственного распределения потока лучистой энергии от сложного излучателя. На базе разработанного алгоритма формируется программное обеспечение с удобным интерфейсом. Результатом работы программы является построение пространственного распределения излучения СУ ЛА. Расчёт проводится с помощью метода Монте-

Карло, который предполагает физико-математические и численные модели для прямого и полного (с учётом переотражения, поглощения, рассеяния) инфракрасного излучения элементов турбины и реактивного сопла в заднюю собирающую полусферу.

Суть модели заключается в том, что внутренняя поверхность сопла представляется совокупностью элементарных поверхностей. Проводя газодинамические расчёты турбулентного течения газовой струи, определяют распределение температур внутри сопла и для каждой элементарной поверхности. Для излучающих микроэлементов случайным образом задаются направления лучей, выходящих из их центров. Считается, что вся энергия излучения микроэлемента или (ячейки) распространяется в указанном случайном направлении. После чего рассматривается распространение луча до выхода его из сопла или до пересечения его с другими элементарными поверхностями. При пересечении луча с другим микроэлементом СУ рассчитываются координаты точки пересечения и определяется новое случайное направление отражённого луча (ввиду отсутствия зеркального отражения). Энергия отражённого луча уменьшается в зависимости от коэффициента отражения поверхности, поглощения и рассеяния газовой струей. При выходе луча из сопла определяются координаты пересечения его с условной, разбитой на площадки полусферой. Каждая площадка на собирающей полусфере соответствует некоторому телесному углу

суммирования. Поток лучистой энергии, приходящейся на указанные площадки полусферы, запоминается и в случае попадания лучей в область одной площадки – суммируется. Таким образом, определяется пространственное распределение излучения СУ или индикатриса излучения. Принимая во внимание сложность модели, обусловленную большим количеством микроэлементов, характер отражения и тот факт, что излучение внутри СУ может испытывать отражение (и неоднократное), использование метода Монте-Карло является целесообразным по сравнению с другими существующими методами расчёта.

Разработанная модель легла в основу программного комплекса и прошла экспериментальную проверку [6]. Дальнейшее развитие описанной методики позволит в перспективе иметь совершенный инструмент расчёта оптических характеристик различных систем на начальных этапах проектирования излучающих устройств.

В качестве примера проведения расчётов и оценки ИК-излучения реальных излучателей проведено исследование СУ АЛ-31Ф (рис.1). Данная силовая установка, разработанная под руководством А.М. Люльки в НПО «Сатурн», относится к серии авиационных высокотемпературных турбореактивных двухконтурных двигателей с форсажными камерами. Данная силовая установка применяется на истребителях четвёртого поколения СУ-27 и его модификациях. Исходные геометрические данные получены из [7].

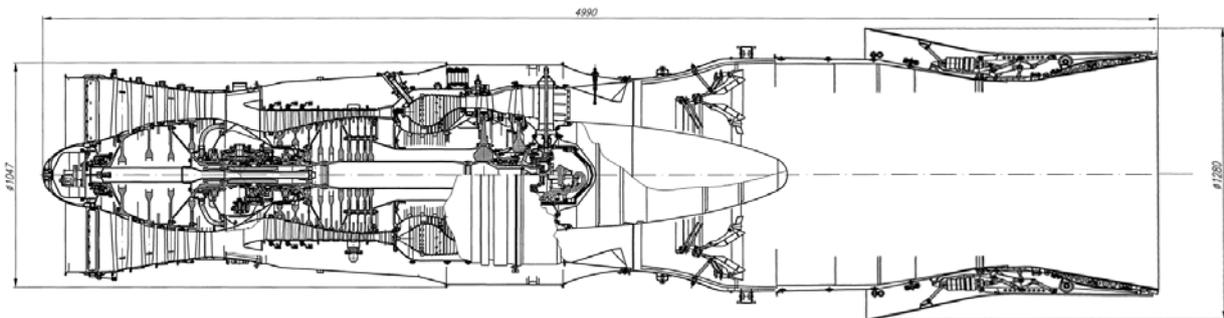


Рис. 1. Продольный разрез двигателя

Таблица 1. Исходные данные расчётов

Фигура	Температура, К	Количество ячеек	Степень черноты
Конус 1	1173	25500	0,85
Конус 2	1473	25500	0,85
Цилиндр	1373	25500	0,85
Гипербола 1	1573	25500	0,85
Гипербола 2	1573	25500	0,85
Турбина	1623	7500	0,85
Кок	1543	12000	0,85

Для вычислений сопло моделируется конусами, цилиндрами, гиперболами, турбина – кольцом, центральное тело – эллипсоидом. Распределение температур получено путём проведения газодинамического расчёта, описанного в [8]. Исходные данные, используемые в разработанной программе расчёта, приведены в табл. 1.

Внутренняя поверхность сопла, представляющая собой перечисленные геометрические поверхности вращения, разбивается на ряд элементарных излучающих площадок: по длине окружности на $m = 1 \dots m_{max}$, в виде изменения полярного угла $\theta_{c_m} = 360^\circ m / m_{max}$, по длине на $n = 1 \dots n_{max}$, задающихся в начальных условиях. Пересечение этих элементов образует ряд ячеек dS_n . Далее в основной системе координат (СК) центры ячеек рассчитываются для цилиндрических поверхностей по формулам:

$$X_{c_{m,n}} = R_n \cos \frac{(\theta_{c_m} + \theta_{c_{m-1}})}{2},$$

$$Y_{c_{m,n}} = R_n \sin \frac{\theta_{c_m} + \theta_{c_{m-1}}}{2},$$

$$Z_{c_{m,n}} = Z_{min} + \frac{(Z_{max} - Z_{min}) \cdot (n + 0.5)}{n_{max}},$$

где R_n – радиус соответствующей цилиндрической поверхности; θ_{c_m} – угол с центром на оси Z геометрической поверхности (лежащий в плоскости, параллельной плоскости X, Y).

Площадь ячеек dS рассчитывается как

$$dS = (2\pi R_n / m_{max}) (Z_{c_{min}} - Z_{c_{max}} / n_{max}).$$

Далее аналогичным образом определяется площадь и центры ячеек для других фигур разбиения сопла СУ ЛА. Для всех излучающих поверхностей СУ поочередно выбираются все ячейки и рассчитывается их площадь и прямоугольные координаты центров ячеек в основной СК. Интенсивность излучения ячейки (энергия луча) равна:

$$dQ_{\dots n} = \alpha \sigma T_{c_{\dots}}^4 dS_{\dots n},$$

где $dS_{\dots n}$ – площадь ячейки соответствующей поверхности сопла; $T_{c_{\dots}}$ – температура элементов сопла; α – степень черноты элементов сопла; $\sigma = 5,668 \times 10^{-8}$ – постоянная Стефана-Больцмана.

Учитывается рассеяние, поглощение и уменьшение мощности потока.

Для центров $(X_{c_m}, Y_{c_m}, Z_{c_m})$ элементарных поверхностей dS_m задаются локальные системы координат. Рассчитывается вероятность распределения луча по азимутальному углу $\theta_{r_{m,n}}$ и по зенитному углу $\beta_{m,n}$. Распределение вероятности направления луча определяется путём задания локальных координат $X01_{m,n}, Y01_{m,n}, Z01_{m,n}$ вершины единичного вектора (длиной ρ), направленного из центра ячейки, в полусферу радиуса ρ . Затем полученные результаты переводятся в основную СК.

Определяется пространственное распределение прямого излучения в сферической СК. Рассчитываются координаты $Xr \dots_{m,n}$, $Yr \dots_{m,n}$, $Zr \dots_{m,n}$ пересечения луча с полусферой суммирования путём совместного решения уравнений луча и радиуса L сферы согласно выражениям с учётом затенения поверхностью сопла. Для элементов сопла согласно выражениям (для других фигур аналогично):

$$\frac{(Xrc_{m,n} - Xc_{m,n})}{(Xc_{m,n} - Xc_{m,n})} = \frac{(Yrc_{m,n} - Yc_{m,n})}{(Yc_{m,n} - Yc_{m,n})} = \frac{(Zrc_{m,n} - Zc_n)}{(Zc_{m,n} - Zc_n)},$$

$$Xrc_{m,n}^2 + Yrc_{m,n}^2 + Zrc_{m,n}^2 = L^2.$$

Определяется поток энергии Q_i в пределах шага зенитного угла φ_i путём сравнения углов $\varphi_{r_{m,n}}$ координат $Xr_{m,n}, Yr_{m,n}, Zr_{m,n}$ лучей на заданной полусфере и суммирования энергий этих лучей:

$$Q_i = \sum_{n=1}^{n \max} \sum_{m=1}^{m \max} \text{if} \left[\varphi_{i-1} \leq \left(\arccos \frac{Zrc_{m,n}}{L} \right) \leq \varphi_i, dQ_n, 0 \right].$$

Рассчитывается мощность потока E_{si} ИК-излучения сопла СУ в единице телесного угла (Вт/Ср) с площадью ячейки собирающей полусферы dF_i :

$$E_{si} = (Q0_i + Q1_i + \dots + Q \dots_i) L^2 / dF_i.$$

Результаты расчётов мощности потока ИК-излучения для СУ АЛ-31Ф приведены на рис. 2.

Проведя анализ полученной зависимости, можно сделать вывод, что излучение имеет высокий уровень в широком диапазоне углов.

Для снижения этого уровня предложен специальный экран. Он представляет собой цилиндрическую поверхность, расположенную за срезом сопла. Диаметр экрана превышает диаметр сопла (рис. 3).

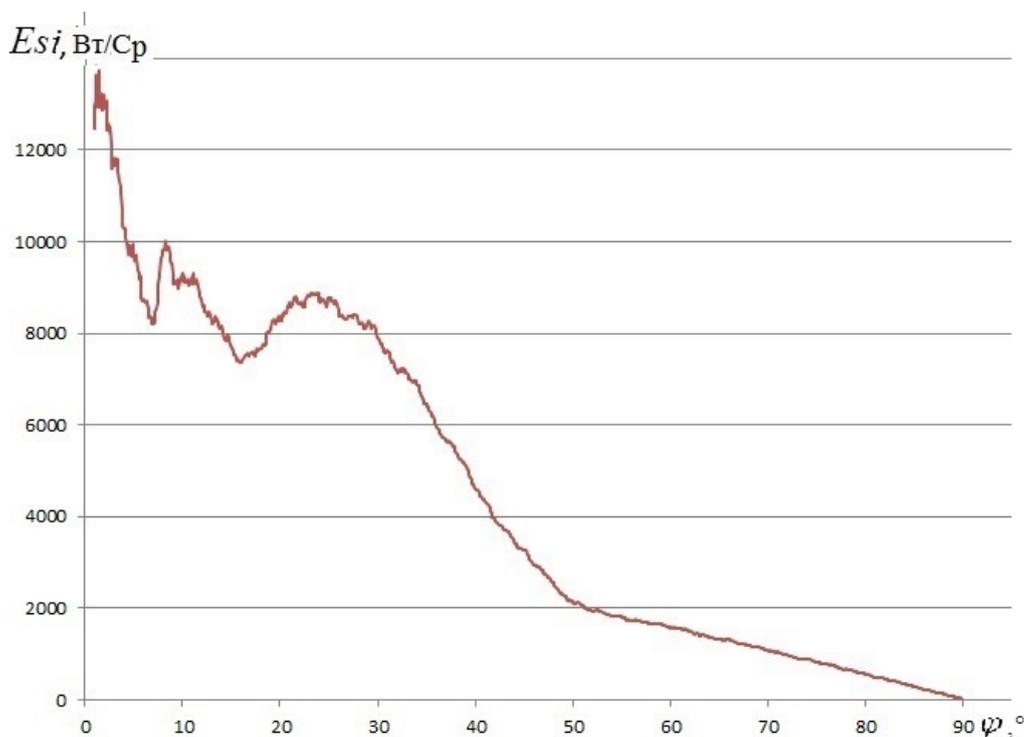


Рис. 2. Индикатриса излучения СУ АЛ-31Ф

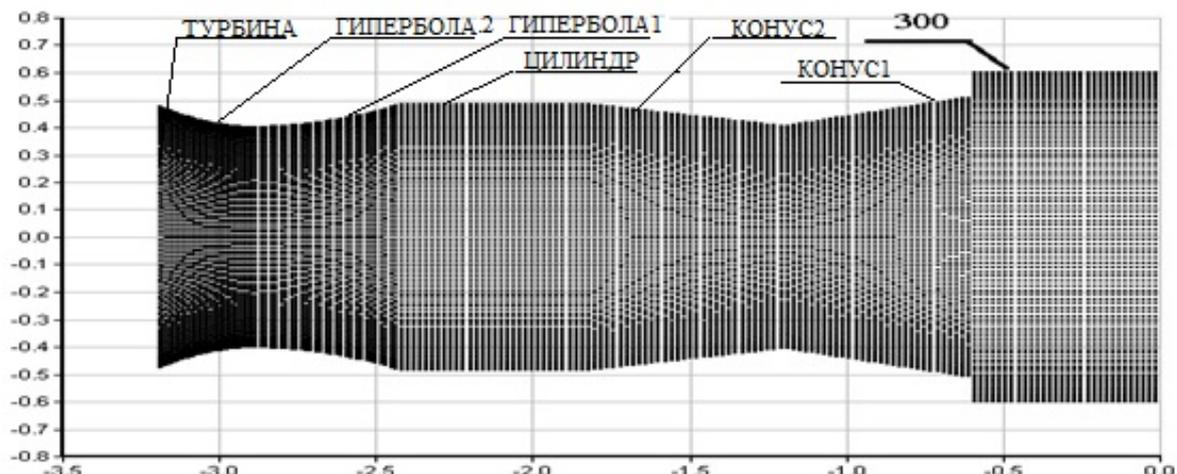


Рис. 3. Схематическое изображение сопла и экрана

Проведены расчёты для экранирующего элемента с различным радиусом r , длиной h и расстоянием до плоскости среза сопла H . Результаты приведены на рис. 4.

Общая эффективность возрастает незначительно при увеличении размера экрана, начиная от длины 0,85 м. При использовании специального экранного устройства наблюдается значительное (до 98%) снижение ИК-излучения в радиальном направлении. При этом уровень излучения вдоль оси возрастает. Таким образом, видимость ЛА для

фотоприёмников, чувствительных к излучению в области ИК спектра, сводится к небольшому углу вдоль оси симметрии СУ. Учитывая, что для наземной ИК-аппаратуры наибольшее значение имеет излучение в радиальном направлении, использование устройства может быть плодотворным. Оценка эффективности применения экранов приведена в табл. 2. При этом геометрия экрана (длина и диаметр) являются важными параметрами, определяющими его эффективность.

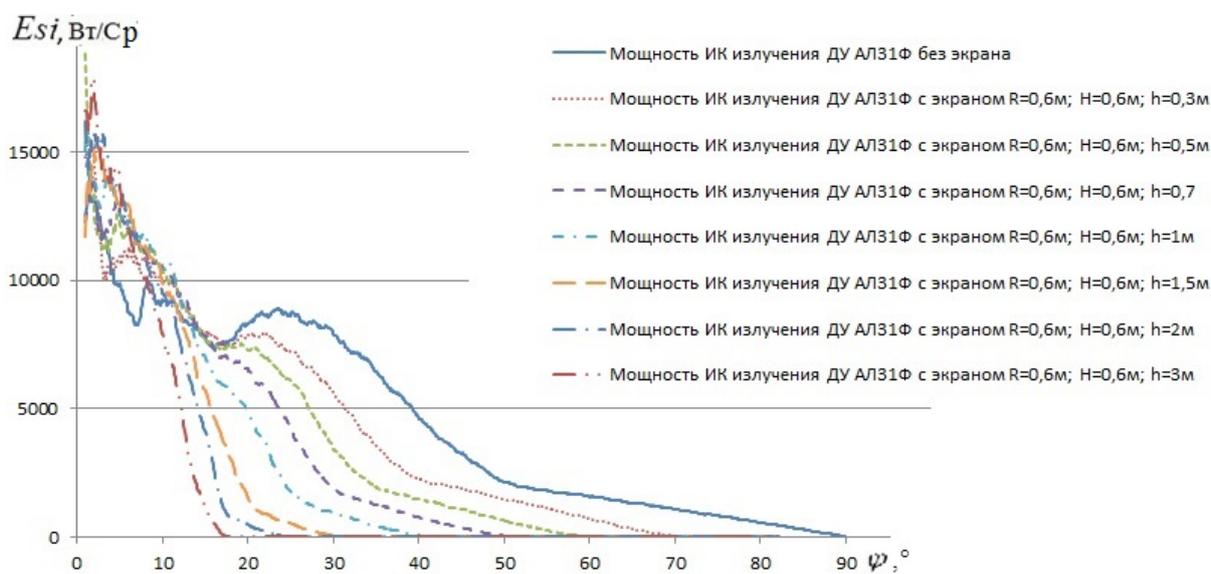


Рис. 4. Индикатриса излучения ДУ АЛ-31Ф с установленным экранирующим элементом

Таблица 2. Сравнительная эффективность экранов, %

Диапазон углов, градусы	Длина экрана, м						
	0,3	0,5	0,7	1	1,5	2	3
1-10	-11,14	-19,45	-16,64	-23,54	-22,18	-25,30	-20,88
10-20	-1,96	0,21	2,50	12,90	35,43	54,39	77,38
20-30	18,00	33,97	53,65	75,94	94,23	98,92	99,59
30-40	44,36	67,15	80,53	93,60	99,49	99,49	99,48
40-50	40,45	67,54	89,95	99,10	99,11	99,10	99,10
50-60	40,56	86,58	98,76	98,77	98,77	98,76	98,78
60-70	77,36	98,77	98,77	98,77	98,77	98,79	98,78
70-80	98,74	98,76	98,75	98,78	98,76	98,77	98,73
80-90	98,76	98,80	98,77	98,78	98,80	98,73	98,79
Среднее значение эффективности, %	45,01	59,15	67,23	72,57	77,91	80,18	83,30



Рис. 5. Индикатриса излучения центрального эллипсоидного тела СУ АЛ-31Ф

Сравнение результатов прямого (без учёта переотражения) и полного (с учётом переотражения) расчёта излучения потока лучистой энергии элементов центрального эллипсоидного тела СУ ЛА в заднюю собирающую полусферу позволяет сделать вывод о том, что доля отражённого излучения составляет 11-17% от общего (рис.5).

На основе описанной математической модели разработан пакет прикладных программ, написанный на языке С++, позволяющий проводить численные эксперименты. Проведено моделирование СУ АЛ-31Ф и произведён расчёт ИК-излучения. Предложено экранирующее устройство, снижающее ИК-излучение, и проведён анализ её эффективности. Предложенное устройство позволило снизить уровень ИК-излучения более чем на 90% в некоторых значениях телесного угла задней полусферы. Рассчитана индикатриса прямого инфракрасного излучения элементов турбины, кока и реактивного сопла СУ АЛ-31Ф в собирающую полусферу. Рассчитана индикатриса ИК-излучения элементов турбины и внутренней поверхности сопла с учётом переотражения в заднюю полусферу сопла СУ ЛА. Разработанный алгоритм использует вероятностный подход, что приближает смоделированный процесс испускания и отражения луча к реальному физическому процессу. Его достоинством является и то, что он применим как к высокодетализированному, так и грубому моделированию двигателя.

Библиографический список

1. Гавриленков В.А., Скорик В.И., Трембач В.В. К расчету кривой силы света параболоидного отражателя // Светотехника. 1965. № 3. С. 23-25.
2. Суржиков С.Т. Рациональный нагрев спускаемого космического аппарата в лётном эксперименте FIRE-II // Сб. науч. тр. IX междунар. симпозиума по радиационной плазмодинамике. М.: Инженер, 2012. С. 48-52.
3. Филиппов Г.С., Николаенко В.С., Яценко Б.Ю. Математическое моделирование пространственного распределения энергии сложного излучателя // Вестник Московского авиационного института. 2013. Т. 20, № 3. С. 76-85.
4. Филиппов Г.С., Николаенко В.С., Яценко Б.Ю., Евдокимов И.Е. Расчёт пространственного распределения энергии сложного излучателя // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С.П. Королёва. 2013. №1 (39). С. 214-221.
5. Суринов Ю.А. Интегральные уравнения теории переноса излучения в анизотропно рассеивающей среде (для обобщенной постановки пространственной задачи) // Теплофизика высоких температур. 1965. Т. 3, № 3. С. 122-131.
6. Филиппов Г.С., Евдокимов И.Е., Яковлев А.А. Проблемы снижения тепловой заметности двигателей ЛА // Научно-технический вестник Поволжья. 2012. № 6. С. 223-227.
7. Леонтьев М.К. Атлас деталей и узлов двухконтурного турбореактивного двигателя АЛ-31Ф. М: ОАО «НПО «Сатурн» НТЦ имени А. Льюльки, 2008. 20 с.
8. Филиппов Г.С., Евдокимов И.Е., Яковлев А.А. Газодинамический и тепловой расчёт работы дозвукового сопла малогабаритного ТРД на базе турбостартера ТС-21 // Научно-технический вестник Поволжья. 2012. № 6. С. 228-233.

Информация об авторе

Филиппов Глеб Сергеевич, аспирант, Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет). E-mail: Filippov.Gleb@gmail.com. Область научных интересов: инфракрасное излучение, заметность двигателей, малогабаритные авиационные двигатели, математическое моделирование.

MATHEMATIC SIMULATION OF AL-31F POWERPLANT RADIATION IN THE IR RANGE

© 2014 G. S. Filippov

Moscow Aviation Institute (National Research University),
Moscow, Russian Federation

The paper is devoted to the modeling of aircraft power plant radiation. The object of investigation is the AL-31F aircraft afterburning turbojet bypass engine. The results of research dealing with the calculation of spatial distribution of radiation from complex radiators are presented. A complex method of calculating the infrared radiation based on mathematic simulation of radiant energy spatial distribution is proposed. An algorithm using the probabilistic Monte Carlo method is developed, which makes the modeled process of the beam emission and reflection similar to the physical one. A new method of calculating the indicator function in an absorbing medium from complex radiators is used. Calculations of temperature distribution inside the nozzle

and modeling of the power plant geometry are performed. Spatial distribution of infrared radiation is determined on the basis of the computations made. A device for reducing the intensity of radiation over a wide angle range is developed, the analysis of its efficiency is carried out. The device proposed makes it possible to reduce the design level of infrared radiation by more than 90% in the range of the solid angle of the rear hemisphere. The results of calculating the direct (without reflections of radiation inside the nozzle) and complete (including reflections) radiation from the central ellipsoidal body are presented. The results of the comparison of these calculations are also presented.

Monte Carlo method, distribution of infrared radiation, heat radiation, aircraft radiation.

References

1. Gavrilentov V.A., Skorik V.I., Trembach V.V. Calculation of the paraboloid reflector light intensity curve // *Svetotekhnika*. 1965. No 3, P. 23-25. (In Russ.)
2. Surzhikov S.T. Ratsional'nyy nagrev spuskaemogo kosmicheskogo apparata v letnom eksperimente FIRE-II // *Sbornik nauchnykh trudov IX mezhdunarodnogo simpoziuma po radiatsionnoy plazmodinamike*. Moscow: Inzhener Publ., 2012. P. 48-52. (In Russ.)
3. Filippov G.S., Nikolaenko V.S., Jaschenko B.J. Calculation of energy spatial distribution for complicated emitter // *Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo instituta*. 2013. V. 20, no. 3. P. 76-85. (In Russ.)
4. Filippov G.S., Nikolaenko V.S., Jaschenko B.J., Evdokimov I.E. Calculation of spatial distribution of energy of a complex radiator // *Vestnik of the Samara State Aerospace University*. 2013. No. 1 (39). P. 214-221. (In Russ.)
5. Surinov Y.A. Integral equations of the theory of radiation transfer in anisotropic scattering medium (for the generalized formulation of the spatial problem) // *Teplofizika vyisokih temperatur*. 1965. V. 3, no. 3. P. 122-131. (In Russ.)
6. Filippov G.S., Evdokimov I.E., Yakovlev A.A. Thermal signature reduction problems of aircraft engines // *Nauchno-tehnicheskii vestnik Povolzh'ya*. 2012. V. 6. P. 223-227. (In Russ.)
7. Leontev M.K. Atlas detaley i uzlov dvuhkonturnogo turboreaktivnogo dvigatelya AL-31F [Atlas of parts and assemblies of the AL-31F turbojet engine]. Moscow: NPO Saturn Publ., 2008. 20 p.
8. Filippov G.S., Evdokimov I.E., Yakovlev A.A. TC-21 turbine-starter-based gas-dynamic and thermal calculation of subsonic small-size turbojet engine nozzle operation // *Nauchno-tehnicheskii vestnik Povolzh'ya*. 2012. No. 6. P. 228-233. (In Russ.)

About the author

Filippov Gleb S., postgraduate student, Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russian Federation.

E-mail: Filippov.Gleb@gmail.com. Area of Research: infrared radiation, engine heat signature, small-sized aircraft engines, mathematic simulation.