

На правах рукописи



Филиппов Глеб Сергеевич

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЛУЧИСТОЙ ЭНЕРГИИ
ОТ СЛОЖНОГО ИЗЛУЧАТЕЛЯ**

Специальность 01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2014

Работа выполнена на кафедре «Прикладная физика» в Московском авиационном институте (национальном исследовательском университете)

Научный
руководитель: **Николаенко Владимир Сергеевич**,
кандидат технических наук, старший научный сотрудник,
доцент кафедры «Прикладная физика» ФГБОУ ВПО
Московского авиационного института (национального
исследовательского университета)

Официальные
оппоненты: **Кудинов Василий Александрович**,
доктор физико-математических наук, профессор, зав. каф.
"Теоретические основы теплотехники и гидромеханика"
Теплоэнергетического факультета Самарского
государственного технического университета

Храмичев Александр Анатольевич,
кандидат технических наук, начальник управления научно-
исследовательского центра г. Тверь, 4 центрального НИИ
Министерства обороны РФ

Ведущая
организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего профессионального образования
«Саратовский государственный технический университет
имени Гагарина Ю.А.»

Защита состоится «12» декабря 2014 года в 10.00 часов на заседании
диссертационного совета Д212.125.14 при ФГБОУ ВПО «Московский авиационный
институт (национальный исследовательский университет)» по адресу: 125993,
Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, д.4.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО «Московский
авиационный институт (национальный исследовательский университет)».

Отзыв на автореферат, заверенный печатью организации, просим направлять по
адресу 125993, Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, д.4

Автореферат разослан « » _____ 2014г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
кандидат физико-математических наук, доцент



Гидаспов В. Ю.

Общая характеристика работы

Актуальность темы. Современные технологии отслеживания и контроля летательных аппаратов (ЛА), включающие в себя зенитные управляемые ракеты с оптическими головками самонаведения, постоянно совершенствуются. Поэтому, при проектировании новой авиационной техники, конструкторским бюро необходимо уделять серьёзное внимание системе защиты ЛА от поражения.

На современном этапе развития средств поражения система наведения высокоточного оружия использует фотоприёмники, чувствительные к излучению в области инфракрасного (ИК) спектра. Инфракрасное излучение двигателя превалирует в суммарном излучении всего летательного аппарата. Одним из способов наведения на цель для современных ракет является ориентир на максимальное инфракрасное излучение. Таким образом, нахождение способов уменьшения излучения в ИК - диапазоне становится важной проблемой. В этой связи получение адекватного и качественного расчёта излучения двигательной установки самолёта необходимо для организации его жизнеспособности.

Основываясь на вышесказанном, можно сделать вывод о том, что задача математического моделирования пространственного распределения лучистой энергии от сложного излучателя является актуальной.

Основные решаемые задачи. Главными источниками ИК - излучения в составе двигательной установки (ДУ) являются детали двигателя, нагретые до высоких температур, и струя выхлопных газов. Излучающие элементы двигателя являются сложными составными геометрическими фигурами, что представляет значительную трудность для вычислений, а тот факт, что каждый элемент проявляет себя в качестве излучателя и отражателя, 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». Но для расчёта излучения ЛА он не подходит, так как не позволяет рассчитывать системы с отражением, отличным от зеркального. Расчёты, проводимые для спускаемых космических аппаратов и межпланетных зондов различных классов, проводимые под руководством Суржикова С.Т. имеют ряд преимуществ, но не учитывают отражающие свойства поверхностей, которые в условиях задачи расчёта излучения ДУ ЛА играют важную роль.

Исходя из этого, предлагается комплексный метод расчёта ИК излучения, основанный на математическом моделировании пространственного распределения потока лучистой энергии от сложного излучателя. Моделируются турбулентные течения газовой струи внутри сопла на основании системы осреднённых по

Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса. На этой основе осуществляется расчёт температур различных узлов двигательной установки. Разработанный алгоритм лёг в основу программного обеспечения с удобным интерфейсом. Результатом работы программ является построение пространственного распределения излучения ДУ ЛА. Исследована зависимость пространственного распределения ИК от входных параметров ДУ, распределения температур узлов ДУ, состава рабочей смеси, поступающей в сопло ДУ. Расчёт проводится с помощью метода Монте-Карло, который предполагает разработку физико-математические и численные модели для:

- прямого инфракрасного излучения элементов турбины и реактивного сопла в заднюю собирающую полусферу двигательной установки летательного аппарата;
- полного (с учётом переотражения, поглощения, рассеяния) инфракрасного излучения элементов турбины и реактивного сопла в заднюю собирающую полусферу двигательной установки летательного аппарата;

Целью настоящего исследования является:

- расчёт теплового состояния стенок сопла ДУ ЛА путём моделирования турбулентных течений горячей газовой струи, исследование зависимости теплового состояния от входных параметров течений;
- разработка математической и численной модели для эффективного решения задачи расчёта распределения лучистых потоков в пространстве от диффузно отражающих поверхностей методом Монте-Карло;
- анализ полученных результатов в рамках разработанной модели с учётом численного моделирования задачи о пространственном распределении энергии от сложного излучателя в зависимости от параметров газовой струи внутри сопла.

Научная новизна диссертационной работы состоит в следующем:

- Впервые разработано программное обеспечение, доступное для российских исследователей и разработчиков, имеющее дружелюбный интерфейс и описывающее распределение потока лучистой энергии от сложного твердотельного поверхностного теплового излучателя произвольной формы, с возможностью учёта распределения по поверхностям любых локальных спектрально-угловых зависимостей излучения и рассеяния (в т.ч. зеркального, диффузного рассеяния, различных значений степени черноты), верифицированное и валидированное сопоставлением с теоретическими, экспериментальными и расчётными данными. Учтены реальные оптические и теплофизические свойства излучающих поверхностей (характер отражения, степень черноты) для каждой точки разбиения. Разработаны вычислительные алгоритмы для диффузно отражающих поверхностей,

оптимизированные с целью использования их на ЭВМ средней мощности. Проведены обширные вычислительные эксперименты, в результате которых получены распределения температур внутри сопла ДУ АЛ-31Ф в зависимости от параметров газовой струи, индикатрисы отдельных элементов двигательной установки. Произведен анализ влияния этих элементов и их характеристик на общую индикатрису.

- Эффективность программы продемонстрирована на анализе впервые предложенного экранного устройства для снижения интенсивности ИК излучения и его эффективности. Предложенное устройство позволило снизить уровень ИК излучения более чем на порядок величины в 90% телесного угла задней полусферы.

Практическая ценность работы. Разработанные пакеты прикладных программ расчёта индикатрисы инфракрасного излучения внутренней поверхности сопла двигательной установки летательного аппарата методом Монте-Карло могут быть использованы при расчётах проектируемых и существующих ДУ для определения их оптимальных характеристик. Предложенное программное обеспечение может найти применение в исследовании на предпочтительную с точки зрения заметности средствами обнаружения форму и конфигурацию элементов турбины, центрального тела и внутренней поверхности ДУ. Созданная методика может быть использована для уточнённого расчёта охлаждения отдельных элементов, вносящих наибольший вклад в индикатрису. Предложенный метод расчёта может позволить сократить сроки разработки новых ДУ, снизить затраты на экспериментальное определение их ИК излучения и разработку в целом. Разработанный программный комплекс позволяет исследовать зависимость ИК от входных параметров задачи: скорости течения струи, её состава, температуры и др.

Положения, выносимые на защиту:

1. Результаты газодинамического расчёта для двухконтурного турбореактивного двигателя АЛ-31Ф, распределение температур внутри сопла в результате течения горячей газовой смеси.
2. Разработка алгоритма «Thermal Radiation» и программного обеспечения для решения методом Монте-Карло задачи о пространственном распределении энергии от сложного излучателя для случая прямого излучения без учёта отражённого излучения.
3. Результаты расчётов в рамках алгоритма «Thermal Radiation» индикатрисы отдельных излучающих поверхностей сопла ДУ.
4. Разработка усложнённого алгоритма и программного обеспечения пространственного распределению лучистой энергии от сложного излучателя с учётом отражения от внутренних поверхностей сопла ДУ ЛА.

5. Результаты расчётов в рамках усложнённого алгоритма «Thermal Radiation» индикатрисы всех излучающих поверхностей сопла ДУ с учётом многократного переотражения от внутренних поверхностей.
6. Зависимости интенсивности излучения от теплофизических свойств поверхностей излучающих элементов, позволяющие определить наиболее предпочтительные характеристики для оптимальной индикатрисы.
7. Результаты изменения мощности потока суммарного ИК излучения ДУ и суммарной энергии ДУ в единице телесного угла, позволяющие наглядно определить наиболее сильно излучающие элементы для проведения работ по их снижению.

Достоверность полученных в диссертации результатов подтверждается использованием надёжных алгоритмов турбулентного расчёта течения газовой смеси внутри сопла, фундаментальных положений теории переноса лучистой энергии, экспериментальной проверкой разработанной модели, проверкой пакетов прикладных программ для перечисленных выше случаев, проведением вычислительных экспериментов, с целью получения пространственного распределения лучистой энергии от сложного излучателя, а также анализа полученных результатов и оценки точности используемых моделей.

Апробация работы. Основные материалы диссертации докладывались на следующих научных конференциях:

Научно-практическая конференция студентов и молодых учёных МАИ «Инновации в авиации и космонавтике – 2010», Москва, 2010; 9-я Международная конференция «Авиация и космонавтика – 2010», Москва, 2010; 10-я Международная конференция «Авиация и космонавтика – 2011», Москва, 2011; V Всероссийская научно-техническая конференция молодых специалистов, Уфа, 2011; 10-ый Форум российского вертолётного общества, г. Москва, 2012; 11-я Международная конференция «Авиация и космонавтика – 2012», Москва, 2012; Московская молодёжная научно-практическая конференция «Инновации в авиации и космонавтике – 2013», Москва, 2013; 12-я Международная конференция «Авиация и космонавтика – 2013», Москва, 2013; V Молодёжный научно-технический форум «Молодёжь и будущее авиации и космонавтики», Москва, 2013; II Всероссийская научно-техническая конференция «Моделирование авиационных систем», Москва, 2013.

Результаты диссертационной работы неоднократно обсуждались в ОКБ им. А. Льюльки филиал ОАО УМПО и на кафедре «Прикладная физика» Московского авиационного института (национального исследовательского университета).

Личный вклад. Автор принимал активное участие в создании математических моделей и разработке расчётных программ, проведении расчётных экспериментальных исследований, анализ результатов экспериментов.

Публикации. По результатам научных исследований в рамках диссертационной работы опубликовано 23 работы, в том числе 5 статей в периодических изданиях, включенных в перечень ВАК; 14 публикаций в тезисах докладов Международных и Всероссийских конференций; получено 4 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, трёх глав, заключения, списка литературы из 114 наименований и Приложения. Работа изложена на 136 страницах, содержит 79 рисунков и 8 таблиц.

Основное содержание работы

Введение содержит обоснование актуальности, постановку задачи, обзор предшествующих публикаций по данной тематике.

Теоретической основой переноса лучистой энергии является интегродифференциальное уравнение переноса излучения для спектральной яркости $I = I(r, t, \omega, n)$:

$$dI / ds = -\alpha I + \int \sigma(n \leftarrow n') I(r, t, \omega, n') d\Omega_{n'} + Q(r, n),$$

где $d / ds = n \nabla + v_g^{-1} \partial / \partial t$ - производная вдоль луча, Q - функция источников,

$\alpha = \alpha_\alpha + \alpha_\sigma$ - коэффициент, в котором α_α коэффициент поглощения среды α_σ - коэффициент рассеяния, $\sigma(n \leftarrow n')$ - сечение рассеяния.

Особое место теория переноса излучения занимает для задач аэрокосмической техники, применяемая для расчёта излучения струй продуктов сгорания любых типов двигателей, теплообмен в энергетических устройствах, тепловая защита межпланетных и возвращаемый на Землю космических аппаратов.

Для решения вышеуказанных задач необходимы современные модели и алгоритмы расчёта. К таковым относятся: модели и методы переноса селективного теплового излучения в условиях локального термодинамического равновесия; методы сферических гармоник; методы конечного объёма; методы дискретных ординат; потоковые методы; метод статистического моделирования (с использованием имитационного программирования) для расчётов переноса теплового излучения в неоднородных объёмах светорассеивающих горячих газов; методы комплексного подхода к расчёту излучений с учётом течения газовой смеси, её температуры, состава, входных параметров задачи.

Особое внимание уделяется обзору метода «обратного хода луча» и методу Монте-Карло для решения задачи о лучистой теплопередаче в сером газе. Предварительные оценки позволили сделать вывод о применимости данного метода к решению поставленной задачи.

В первой главе диссертации описывается математическая модель теплообмена, приводятся краткие теоретические положения используемого метода расчёта, основанного на конечно-объёмной дискретизации уравнений Навье-Стокса, описывающих движущуюся сжимаемую среду и теплообмен вблизи стенки излучателя. Моделируется геометрия двухконтурного турбореактивного двигателя АЛ-31Ф (рис.1), проводится математическое моделирование движения потока газа внутри его сопла. Поскольку движение газовой струи сопровождается тепловым излучением, получена зависимость температуры потока от параметров задачи, а также распределение температур по внутренней поверхности сопла.

Рассматривается задача моделирования прямого потока лучистой энергии элементов реактивного сопла ДУ ЛА в собирающую полусферу двигательной установки летательного аппарата. Изменение излучения по отдельным направлениям определяется законом Ламберта

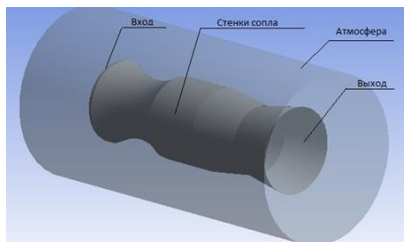


Рис. 1. Моделирование ДУ АЛ-31Ф

$$d^2 Q_\varphi = E_n d\Omega \cos \varphi_1 dE_1. \quad (1)$$

Расчёт лучистого теплообмена между поверхностями конечных размеров в рамках термодинамического равновесия (закон Стефана-Больцмана) принимает вид

$$d^2 Q_\varphi = \frac{\varepsilon}{\pi} c_0 \left(\frac{T}{100} \right)^4 d\Omega dF_1 \cos \varphi_1, \quad (2)$$

где телесный угол определяется как

$$d\Omega = dF_2 \cos \varphi_2 / r^2. \quad (3)$$

Для описания распределения лучистой энергии сформулирована физико-математическая модель, представляющая собой уравнение Ламберта для количества энергии $d^2 Q_1$, излучаемой элементом dF_1 в направлении элемента dF_2 (4), формула разыгрывания случайного направления единичного вектора, выходящего из начала координат (5), закон Стефана-Больцмана (6), закон поглощения (7) и рассеяния (8) для гомогенной и изотропной среды с относительной диэлектрической постоянной ε , магнитной проницаемостью μ и проводимостью σ , формула температуры газа на выходе сопла (9):

$$d^2 Q_1 = \frac{1}{\pi} E_1 \frac{\cos \varphi_1 \cos \varphi_2}{r^2} dF_1 dF_2, \quad (4) \quad I_{a\lambda} = I_{0\lambda} \alpha_\lambda = I_{0\lambda} e^{-\frac{4\pi k}{\lambda} z}, \quad (7)$$

$$\cos \varphi_1 = 1 - 2\gamma, \quad (5) \quad I_{m\lambda} = I_{0\lambda} m_\lambda = I_{0\lambda} e^{-r\lambda^2}, \quad (8)$$

$$E_0 = \sigma_0 T^4, \quad (6) \quad T_2 = T_1 \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\nu-1}{\nu}}, \quad (9)$$

где E_1 – собственное излучение поверхности dF_1 ; φ_1 - угол между нормалью к поверхности dF_1 и направлением r на площадку dF_2 ; φ_2 - угол между нормалью к площадке dF_2 и направлением r на dF_1 ; r – расстояние между центрами элементов dF_1 и dF_2 ; γ - случайная величина, равномерно распределённая в $(0, 1)$; E_0 - плотность потока излучения; σ_0 - постоянная Стефана-Больцмана; T - температура излучающей поверхности; $I_{0\lambda}$ — монохроматический лучистый поток, поступающий в слой толщиной z ; $I_{\alpha\lambda}$ — лучистый поток, поглощенный средой; $I_{m\lambda}$ — лучистый поток, рассеянный средой; r_λ — коэффициент ослабления потока за счет рассеяния; T_1 — температура газа в удлинительной трубе (близкая к ТВГ); p_2 — давление газа после расширения его на выходе сопла; p_1 — давление газа в удлинительной трубе; ν — показатель адиабаты.

Как видно из изображения ДУ (рис.1), внутренняя поверхность сопла представляет собой сложную геометрическую фигуру, поэтому рассматривается математическая модель, состоящая из центрального эллипсоидного тела (кока), сопла и турбины двигателя. Вклад остальных источников излучения используется при постановке граничных условий. Рассматривается излучение сопла ДУ, которое моделируются совокупностью геометрических фигур: гиперboloид, цилиндр, конус.

Суть модели заключается в том что, внутренняя поверхность сопла разбивается на сетку элементарных поверхностей. Проводя газодинамические расчёты турбулентного течения газовой струи, определяется 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 поверхностями ДУ. При пересечении луча с другой поверхностью ДУ рассчитываются координаты точки пересечения и определяется новое случайное направление отражённого луча (в виду 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. 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 ДУ или индикатриса излучения. Принимая во внимание сложность модели, обусловленную большим количеством микроэлементов, характер отражения и тот факт, что излучение внутри ДУ может испытывать отражение (и неоднократное), использование метода Монте-Карло является целесообразным по сравнению с другими существующими методами расчета.

При расчете теплового излучения, идущего от ДУ, в качестве основной принимается прямоугольная система координат (СК) X, Y, Z с центром в точке пересечения оси симметрии ДУ и плоскости среза сопла. Ось Z совпадает с осью симметрии ДУ и направлена в сторону, противоположную движению ЛА. Плоскость, образованная пересечением осей координат X, Y , совпадает с плоскостью среза сопла.

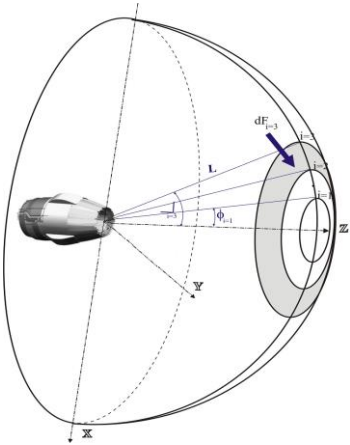


Рис. 2. Расположение СК и полусферы суммирования

Внутренняя поверхность сопла ДУ, представляющая собой перечисленные геометрические поверхности вращения, разбивается на ряд элементарных излучающих площадок по длине окружности на $m=1..m_{max}$, в виде изменения полярного угла $\theta_{c_m}=360^\circ m/m_{max}$, по длине на $n=1..n_{max}$, задающихся в НУ. Пересечение этих элементов образует ряд ячеек dS_n (рис. 3).

$$dF_{i,j} = 2\pi L^2 \frac{\cos(\varphi_{i-1,j}) - \cos(\varphi_{i,j})}{j_{max}}. \quad (10)$$

В основной (СК) производятся все расчёты, связанные с определением точек пересечения лучей от излучающих элементов с ограничивающими их распространение поверхностями.

Сферическая СК (L, θ_j, φ_i) с центром, совпадающим с центром основной прямоугольной СК, необходима для определения пространственного распределения теплового излучения ДУ (рис. 2).

Полусфера образуется вращением её радиуса L вокруг азимутального угла θ_j , и зенитного угла φ_i . Площадь ячейки собирающей полусферы $dF_{i,j}$ рассчитывается согласно (10). Величина шага j изменения угла θ_j и величина шага i изменения угла φ_i задаются в начальных условиях (НУ) в виде множества $j=1..j_{max}$ и $i=1..i_{max}$.

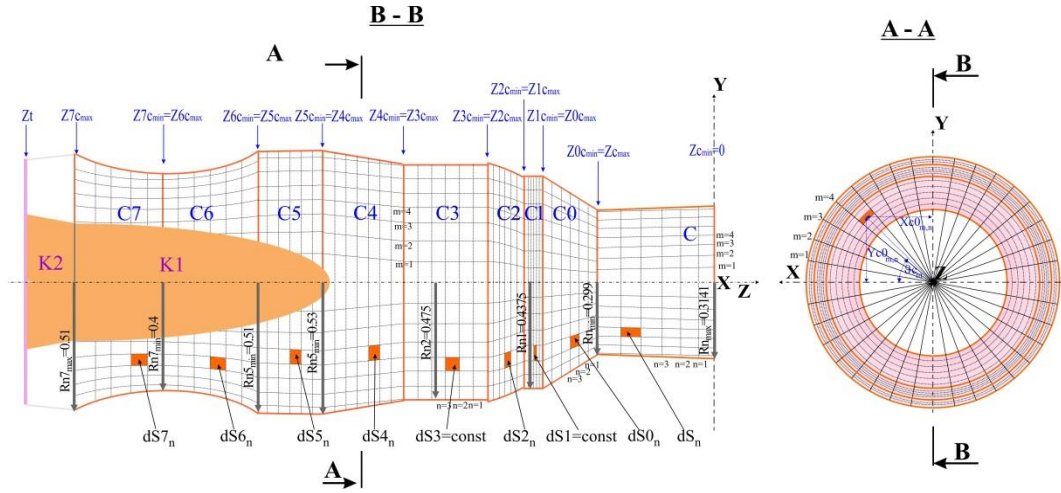


Рис. 3. Элементарные излучающие площадки сопла ДУ

Далее в основной СК центры ячеек рассчитываются для цилиндрических поверхностей по формулам:

$$X_{c,m,n} = R_n \cos\left(\frac{\theta_{c,m} + \theta_{c,m-1}}{2}\right), \quad Y_{c,m,n} = R_n \sin\frac{\theta_{c,m} + \theta_{c,m-1}}{2}, \quad (11)$$

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

где R_n - радиус соответствующей цилиндрической поверхности, $\theta_{c,m}$ - угол с центром на оси Z геометрической поверхности (лежащий в плоскости, параллельной плоскости X, Y). Площадь ячеек dS рассчитывается:

$$dS = (2\pi R_n / m_{max})(Z_{c,min} - Z_{c,max} / n_{max}). \quad (12)$$

Далее аналогичным образом рассчитывается площадь и центры ячеек для других фигур разбиения сопла ДУ ЛА.

Приводится подробное описание алгоритма расчёта прямого излучения элементов ДУ. Для всех излучающих поверхностей ДУ поочередно выбираются все ячейки и, по приведенным ранее формулам, рассчитывается их площадь и прямоугольные координаты центров ячеек в основной СК. Интенсивность излучения ячейки (энергия луча) равна:

$$dQ \dots_n = \alpha \sigma T_c \dots^4 dS \dots_n, \quad (13)$$

где $dS_{...n}$, - площадь ячейки соответствующей поверхности сопла, $T_{c...}$ - температура элементов сопла, α - степень черноты элементов сопла, $\sigma = 5,668 \times 10^{-8}$ - постоянная Стефана-Больцмана. Используя (7),(8) учитывается рассеяние, поглощение и уменьшение мощности потока.

Для центров (Xc_m, Yc_m, Zc_m) элементарной поверхности 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 путем задания локальных координат $XO1_{m,n}, YO1_{m,n}, ZO1_{m,n}$ вершины единичного вектора (длиной ρ), направленного из центра ячейки, в полусферу радиуса ρ (14).

$$YO1_{m,n} = \rho \sin(\beta_{m,n}) \sin(\theta_{r,m,n}), ZO1_{m,n} = \rho \sin(\beta_{m,n}) \cos(\theta_{r,m,n}), XO1_{m,n} = (\rho^2 + YO1_{m,n}^2 + ZO1_{m,n}^2)^{0.5} \quad (14)$$

Затем полученные результаты переводятся в основную СК.

Определяется пространственное распределение прямого излучения в сферической СК. Рассчитываются координаты $Xr_{m,n}, Yr_{m,n}, Zr_{m,n}$ пересечения луча с задней полусферой, путем совместного решения уравнений луча и радиуса L сферы согласно выражениям (15) с учётом затенения поверхностью сопла.

$$\frac{(Xrc_{m,n} - Xc_{m,n})}{(Xc_{m,n} - Xc_{m,n})} = \frac{(Yrc_{m,n} - Yc_{m,n})}{(Yc_{m,n} - Yc_{m,n})} = \frac{(Zrc_{m,n} - Zc_n)}{(Zc_{m,n} - Zc_n)} \quad (15)$$

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

Определяется поток энергии Q_i в пределах шага зенитного угла ϕ_i , путем сравнения углов $\phi_{r,m,n}$ координат $Xr_{m,n}, Yr_{m,n}, Zr_{m,n}$ лучей на заданной полусфере и суммирования энергий этих лучей. Для фигур сопла рассчитывается по формуле (16).

$$Q_i = \sum_{n=1}^{n \max} \sum_{m=1}^{m \max} \text{if} \left[\phi_{i-1} \leq \left(\arccos \frac{Zrc_{m,n}}{L} \right) \leq \phi_i, dQ_n, 0 \right] \quad (16)$$

Рассчитывается мощность потока Esi ИК излучения сопла ДУ в единице телесного угла (Вт/Ст):

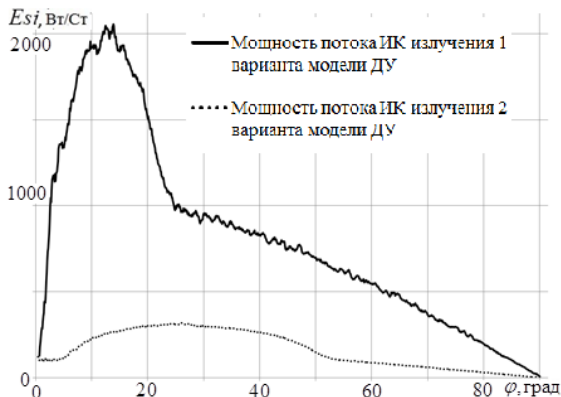


Рис. 4. Мощность потока ИК излучения сопла ДУ различной конфигурации

$$E_{si} = (Q_0 + Q_1 + \dots + Q_{\dots i}) L^2 / dF_i \cdot \quad (17)$$

Первая модель сопла больше второй в длину и в диаметре почти в 2 раза, её стенки горячее практически в 2 раза. К тому же, форма сопла незначительно препятствует попаданию лучистой энергии на собирающую полусферу. Этим объясняется значительное превышение мощности излучения первой модели над второй (рис. 4).

Во второй главе диссертации рассматривается задача моделирования прямого потока лучистой энергии элементов турбины и центрального эллипсоидного тела в заднюю полусферу двигательной установки летательного аппарата. Аналогично случаю, исследуемому в первой главе, для получения распределения температур, использовалась модель ДУ и проводились газодинамические расчёты. Для описания процесса распределения лучистой энергии от турбины и кока использовался метод статистических испытаний Монте-Карло, уравнение Ламберта для количества энергии, излучаемой одним элементом в направлении другого, формула разыгрывания случайного направления единичного вектора, выходящего из начала координат, закон Стефана-Больцмана.

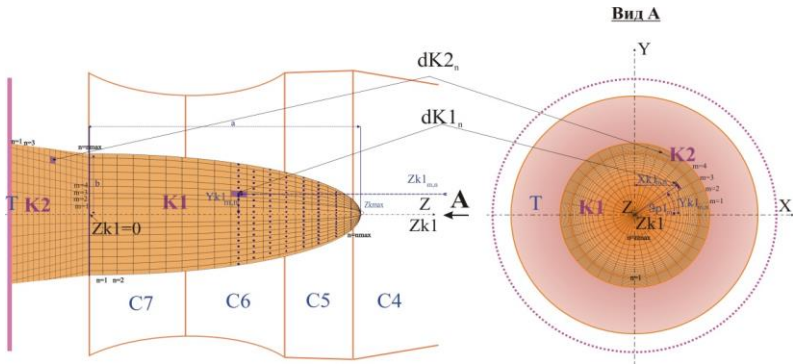


Рис. 5. Элементарные излучающие площадки центрального тела ДУ

Поверхность кока, представляющая собой эллипсоид вращения - K (рис. 5), разбивается на ряд элементов таким же образом, как и поверхность сопла: по длине окружности на $m=1..m_{max}$ в виде изменения полярного угла $\theta k_m = 360^\circ \times m / m_{max}$ и по длине на $n=1..n_{max}$, задающихся в НУ. Таким образом образуется ряд ячеек dK_n .

Полярный угол центра ячейки равен:

$$\theta p1_m = \left(360^\circ m / m_{max} + 360^\circ (m-1) / m_{max} \right) / 2. \quad (18)$$

Координаты центров ячеек кока для эллиптической поверхности $K1$ в основной СК рассчитываются согласно (19). Координаты центров ячеек кока для конической поверхности $K2$ в основной СК рассчитываются аналогичным образом.

$Xk_n = Rne_n \cos[\theta p1_m]$, $Yk_n = Rne_n \sin[\theta p1_m]$, $Zk_n = Zk_{max} - (Zk_{max} - Zk_{min})(n - 0.5) / n_{max}$, (19)
 где Rne_n - расстояние от оси Z до точки Xk_n , Yk_n .

Площади ячеек элементов эллиптической и конической частей центрального тела, распределение вероятности направления луча, поток энергии и его мощность рассчитываются аналогичным способом, описанным в первой главе.

На рисунке 6 приведены результаты расчётов прямого потока лучистой энергии элементов центрального эллипсоидного тела ДУ ЛА в заднюю собирающую полусферу.

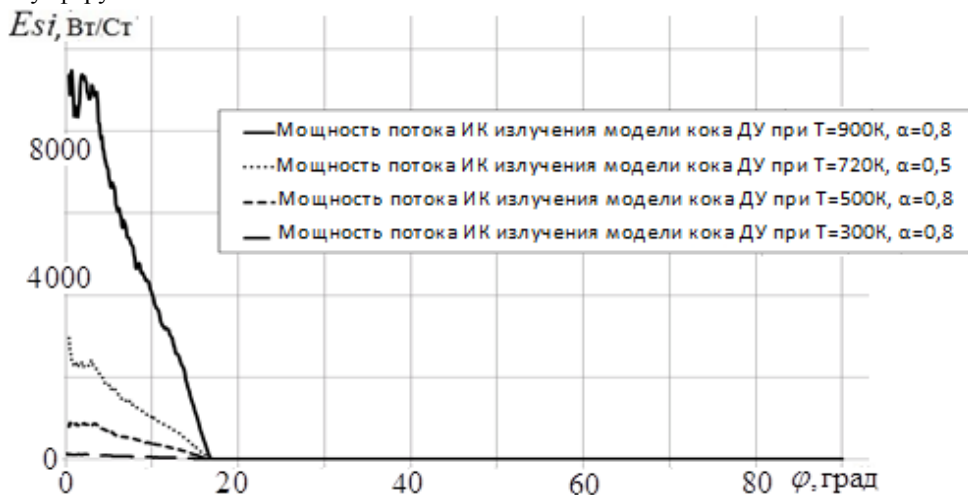


Рис. 6. Мощность потока ИК излучения кока ДУ различной конфигурации

Лопатки турбины при вращении образуют условное круговое кольцо. Для расчета излучения турбины поверхность кольца аналогично разбивается на ряд элементарных излучающих поверхностей dT_{n2} путем изменения полярного угла τ_{m2} в пределах от 0° до 360° с шагом $m2$ и радиуса Rt_{n2} в пределах $R_{min} \leq Rt_{n2} \leq R_{max}$ с шагом $n2$ (рис. 10). Увеличение значения угла происходит аналогично увеличению азимутального угла сферической системы координат. Величина шага принимается в виде множеств $m2=1..m2_{max}$ и $n2=1..n2_{max}$, задающихся в НУ.

$$\tau_{m2} = 360^0 m2 / m2_{max} . \quad (20)$$

Координаты центров излучающих ячеек элементов турбины в основной СК:

$$X_{t_{m2,n2}} = \frac{Rt_{n2} + Rt_{n2-1}}{2} \cos \frac{\tau_{m2} + \tau_{m2-1}}{2},$$

$$Y_{t_{m2,n2}} = \frac{Rt_{n2} + Rt_{n2-1}}{2} \sin \frac{\tau_{m2} + \tau_{m2-1}}{2}, \quad Z_t = const. \quad (21)$$

Площадь ячеек dT_n турбины равна:

$$dT_{n2} = \pi \frac{(Rtb_{n2})^2 - (Rtb_{n2-1})^2}{m2_{max}}. \quad (22)$$

Распределение вероятности направления луча, поток энергии и его мощность элементов турбины рассчитываются аналогичным способом, описанным в первой главе.

На рисунке 7 приведены результаты расчётов прямого потока лучистой энергии элементов турбины ДУ ЛА в заднюю собирающую полусферу.

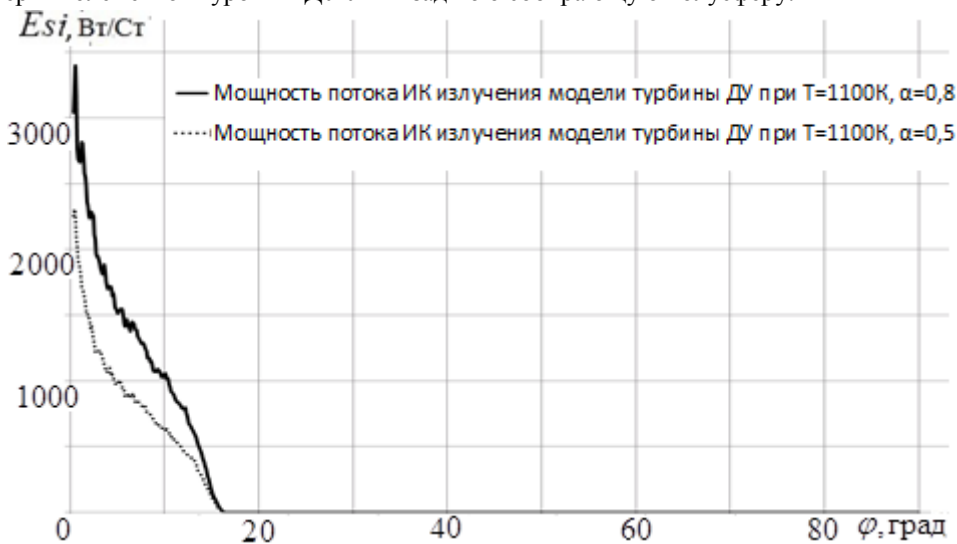


Рис. 7. Мощность потока ИК излучения турбины ДУ различной конфигурации

Глава 3 посвящена исследованию объединённого отражённого излучения всех элементов модели ДУ ЛА на общее излучение. Описывается физико-математическая модель инфракрасного излучения элементов турбины, кока и реактивного сопла в собирающую полусферу с использованием метода Монте-Карло. Общий подход к решению данной задачи аналогичен случаю, рассмотренному в предыдущих главах. Приводится техническое описание разработанного программного обеспечения, описание параметров, количественная оценка вычислительных ресурсов.

В качестве примера проведения расчётов и оценки ИК излучения реальных излучателей проведено исследование ДУ АЛ-31Ф. Данная силовая установка относится к серии авиационных высокотемпературных турбореактивных двухконтурных двигателей с форсажными камерами, разработанная под руководством

А. М. Люльки в НПО «Сатурн». Проведено математическое моделирование движения потока газа в сопле ДУ ЛА. Получена зависимость температуры потока от параметров задачи и распределение температур внутри расчётной области. Получена индикатриса излучения ДУ АЛ-31Ф (рис. 8).

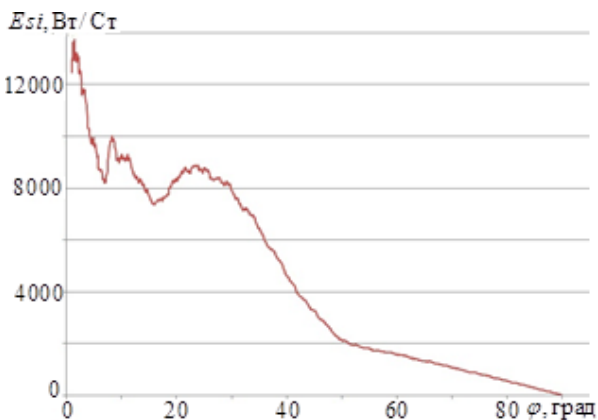


Рис. 8. Индикатриса излучения ДУ АЛ-31Ф

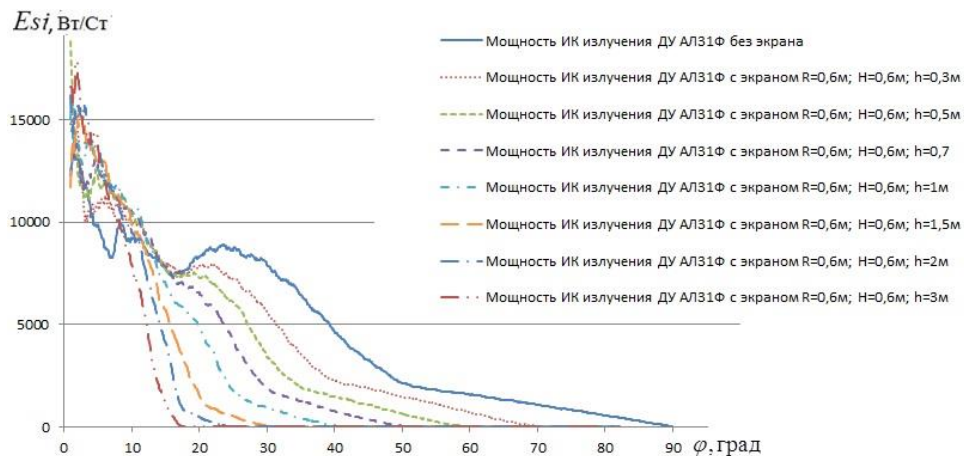


Рис. 9. Индикатриса излучения ДУ АЛ-31Ф

Ввиду того, что излучение имеет высокий уровень в широком диапазоне углов, для его снижения предложен специальный экран. Он представляет собой цилиндрическую поверхность, расположенную за срезом сопла. Диаметр экрана превышает диаметр сопла. Проведены расчёты для экранирующего элемента с

различным радиусом (r), длиной (H) и расстоянием до плоскости среза сопла (h). Результаты исследования приведены на рисунке 9.

Использование дополнительного элемента различных характеристик позволяет значительно снизить ИК излучение в диапазоне углов от 10° до 90° . Общая эффективность возрастает незначительно при увеличении размера экрана, начиная длины 0,85м. При использовании специального экранного устройства наблюдается значительной (до 98%) снижении 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 ДУ. Учитывая, что для наземной ИК аппаратуры наибольшее значение имеет излучение в радиальном направлении, использование устройства может быть эффективным.

Сравнение результатов расчёта прямого и полного расчёта излучения потока лучистой энергии элементов центрального эллипсоидного тела ДУ ЛА в заднюю собирающую полусферу позволяет сделать вывод о том, что доля отражённого излучения составляет 11-17% от общего (рис.10).

Проведённые исследования позволяют сделать выводы о том, что наибольший вклад в общую индикатрису вносят кок и турбина. Исследования по снижению интенсивности лучевого потока от данных элементов являются приоритетными. В качестве решения этих задач может являться изменение характеристик излучающих поверхностей, путём применения новых материалов и систем охлаждения, а также изменения конструкции сопла.



Рис. 10. Индикатриса излучения ДУ АЛ-31Ф

Заключение

1. Решена комплексная задача о связи газодинамического течения потока в ДУ с излучением ИК на выходе ЛА. Разработан пакет прикладных программ (ППП), написанный на языке C++, позволяющий проводить численные

эксперименты на ЭВМ средней мощности, и имеет интуитивно понятный, дружелюбный интерфейс. ППП имеет гибкую структуру, то есть позволяет задавать параметры геометрических фигур, их теплофизические характеристики, сочетаемость геометрических фигур может задаваться пользователем, причем данная сочетаемость может отличаться от предложенной модели. Исходными данными для проведения расчётов может быть файл, содержащий информацию о координатах и теплофизических параметрах каждого излучающего элемента сложного излучателя произвольной геометрии. Код программ имеет понятную структуру, используемые в нем функции могут быть легко встроены в другой программный код, а также их усовершенствование не несет необходимости значительного изменения первоначальных функций. При этом вывод результатов задаётся в желаемом пользователем виде.

2. Проведён расчёт ИК излучения модели ДУ АЛ-31Ф. Предложено экранирующее устройство, снижающее ИК излучение и проведён анализ её эффективности. Предложенное устройство позволило снизить уровень ИК излучения более чем на порядок величины в 90% телесного угла задней полусферы.

3. Экспериментально полученные данные ИК излучения совпадают с результатами расчётов разработанного ППП с точностью до 3%.

4. Рассчитана индикатриса прямого инфракрасного излучения элементов турбины, кока и реактивного сопла ДУ ЛА в собирающую полусферу. Исследована зависимость потока излучения от температуры отдельных излучающих поверхностей. Рассчитана индикатриса ИК излучения элементов турбины и внутренней поверхности сопла с учётом переотражения в заднюю полусферу сопла ДУ ЛА. Проведена оценка ИК излучения элементов турбины и реактивного сопла ДУ ЛА в собирающую полусферу. Получены зависимости интенсивности излучения от показателей коэффициента отражения поверхностей.

5. Разработанный алгоритм использует вероятностный подход, что приближает смоделированный процесс испускания и отражения луча к реальному физическому. Разработанный алгоритм подходит к любому геометрическому приближению двигателя.

Список публикаций по теме диссертации

1. Филиппов Г.С., Николаенко В.С., Яценко Б.Ю. «Математическое моделирование пространственного распределения энергии сложного излучателя», Журнал «Вестник Московского авиационного института», 2013, т.20, №3, стр. 76-85
2. Филиппов Г.С., Евдокимов И.Е., Яковлев А.А. «Проблемы снижения тепловой заметности двигателей ЛА» Журнал Научно-технический вестник Поволжья, №6, 2012, стр.223-227.

3. Филиппов Г.С., Евдокимов И.Е., Яковлев А.А. «Газодинамический и тепловой расчёт работы дозвукового сопла малогабаритного ТРД на базе турбостартера ТС-21» Журнал Научно-технический вестник Поволжья, №6, 2012, стр.228-233.
4. Филиппов Г.С., Николаенко В.С., Яценко Б.Ю., Евдокимов И.Е. «Расчет индикатрисы сложного излучателя» Журнал Научно-технический вестник Поволжья, №5, 2012, стр.50-54
5. Филиппов Г.С., Николаенко В.С., Яценко Б.Ю., Евдокимов И.Е. «Расчёт пространственного распределения энергии сложного излучателя» Журнал Вестник СГАУ, №1(39), 2013, стр.214-221
6. Филиппов Г.С. «Расчёт пространственного распределения индикатрисы теплового излучения внутренней поверхности сопла двигательной установки летательного аппарата методом Монте Карло», II Всероссийская научно-техническая конференция «Моделирование авиационных систем». 21-22 ноября 2013 года. Москва. Сборник тезисов докладов, 2013, с.72-73, -192 с.
7. Филиппов Г.С., Николаенко В.С., Яценко Б.Ю. «Расчёт теплового излучения внутренней поверхности сопла двигательной установки летательного аппарата», 12-я Международная конференция «Авиация и космонавтика – 2013». 12–15 ноября 2013 года. Москва. Сборник тезисов докладов. – СПб.: Мастерская печати, 2013, с. 411-413, -648 с.
8. Филиппов Г.С., Николаенко В.С., Яценко Б.Ю. «Математическое моделирование пространственного распределения индикатрисы инфракрасного излучения внутренней поверхности сопла двигательной установки летательного аппарата методом Монте Карло», V молодёжный научно-технический форум «Молодёжь и будущее авиации и космонавтики». 26 и 27 ноября 2013 года. Тезисы докладов.
9. Филиппов Г.С., Николаенко В.С., Яценко Б.Ю., Евдокимов И.Е. «Математическое моделирование пространственного распределения энергии сложного излучателя» Московская молодёжная научно-практическая конференция «Инновации в авиации и космонавтике – 2013». 16 – 18 апреля 2013 года. Москва. Сборник тезисов докладов. –М.: ООО «Принт-салон», 2013, с. 302-303, -354 с.
10. Филиппов Г.С. Евдокимов И.Е., Яковлев А.А. «Экспериментальное исследование эмиссии инфракрасного излучения малогабаритного двигателя ТС-21 с помощью тепловизора FLIR S60» 11-я Международная конференция «Авиация и космонавтика – 2012». 13–15 ноября 2012 года. Москва. Тезисы докладов. – СПб.: Мастерская печати, 2012, с. 187-188, – 415 с.
11. Филиппов Г.С., Николаенко В.С., Яценко Б.Ю., Евдокимов И.Е. «Расчёт индикатрисы сложного излучателя» 11-я Международная конференция «Авиация и космонавтика – 2012». 13–15 ноября 2012 года. Москва. Тезисы докладов. – СПб.: Мастерская печати, 2012, с. 398-399, – 415 с.
12. Филиппов Г.С., Николаенко В.С., Яценко Б.Ю., Евдокимов И.Е. «Математическое моделирование индикатрисы сложного излучателя» Международный Российско-Американский научный журнал "Актуальные проблемы авиационных и аэрокосмических систем", Казань-Дайтона Бич, International Russian-American Scientific Journal "Actual problems of aviation and aerospace systems", Kazan-Daytona Beach, № 1(34), v.17, 2012, с. 163-172.
13. Филиппов Г.С., Николаенко В.С., Яценко Б.Ю., Евдокимов И.Е. «Проблемы снижения тепловой заметности двигателей вертолетов» X Форум вертолетного общества 2012
14. Филиппов Г.С. Евдокимов И.Е., Николаенко В.С., Яковлев А.А., Яценко Б.Ю. «Исследование тепловой заметности малогабаритного авиационного двигателя. Стабильность индикатрисы излучения выходного устройства» V Всероссийская научно-техническая конференция молодых специалистов. Материалы конференции: Уфимск. моторостр. произв. объединении. – Уфа, УМПО 2011. – 108 стр.
15. Филиппов Г.С. Евдокимов И.Е., Николаенко В.С., Яковлев А.А., Яценко Б.Ю. «Исследование тепловой заметности малогабаритного авиационного двигателя. Разработка экспериментальной

- установки» V Всероссийская научно-техническая конференция молодых специалистов. Материалы конференции: Уфимск. моторостр. произв. объединении. – Уфа, УМПО 2011. – 111 стр.
16. Филиппов Г.С., Николаенко В.С., Ященко Б.Ю., Евдокимов И.Е. «Математическое моделирование индикатрисы сложного излучателя» 10-я Международная конференция «Авиация и космонавтика – 2011». 8–10 ноября 2011 года. Москва. Тезисы докладов. – СПб.: Мастерская печати, 2011, с. 283-284, – 328 с.
 17. Филиппов Г.С., Николаенко В.С., Ященко Б.Ю., Евдокимов И.Е. «Расчёт пространственного распределения энергии сложного излучателя» 9-я Международная конференция «Авиация и космонавтика – 2010». 16 – 18 ноября 2010 года. Москва. Тезисы докладов. – СПб.: Мастерская печати, 2010. с. 258-259, – 354 с.
 18. Филиппов Г.С., Николаенко В.С., Ященко Б.Ю., Евдокимов И.Е. «Математическое моделирование методом Монте-Карло процесса излучения сложного излучателя» Российско-Американский журнал № 2(31) 2010 "Актуальные проблемы Авиационных и аэрокосмических систем, Изд-во КГТУ им. А.Н. Туполева, с. 155-156 (русск), 166-167 (англ).
 19. Филиппов Г.С., Николаенко В.С., Ященко Б.Ю., Евдокимов И.Е. «Математическое моделирование методом Монте-Карло процесса излучения сложного излучателя» Научно-практическая конференция студентов и молодых учёных МАИ «Инновации в авиации и космонавтике – 2010». 26 – 30 апреля 2010 года. Москва. Сборник тезисов докладов. – СПб.: Мастерская печати, 2010, с. 178-179, -206с.
 20. Филиппов Г.С. Николаенко В.С. «Программа расчёта индикатрисы прямого инфракрасного излучения внутренней поверхности сопла двигательной установки летательного аппарата методом Монте Карло» // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2013615942 от 11.07.2013.
 21. Филиппов Г.С. Николаенко В.С. «Программа расчёта индикатрисы прямого инфракрасного излучения центрального тела сопла двигательной установки летательного аппарата методом Монте Карло» // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2013616507 от 11.07.2013.
 22. Филиппов Г.С. Николаенко В.С. «Программа расчёта индикатрисы прямого инфракрасного излучения форсажной камеры двигательной установки летательного аппарата методом Монте Карло» // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2013616510 от 11.07.2013.
 23. Филиппов Г.С. Николаенко В.С. «Программа расчёта индикатрисы прямого инфракрасного излучения турбины двигательной установки летательного аппарата методом Монте Карло Карло» // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2013616607 от 11.07.2013.