

<https://doi.org/10.15407/dopovidi2020.04.043>

УДК 535

**Е.А. Мележик¹, Ф.Ф. Сизов¹,
О.В. Шевчук², Ж.В. Гуменюк-Сычевская¹**

¹ Інститут фізики напівпровідників ім. В.Є. Лашкарева НАН України, Київ

² Государственное предприятие “Запорожское машиностроительное конструкторское бюро “Прогресс”
им. академика А.Г. Ивченко

E-mail: sizov@isp.kiev.ua

Методики численного моделирования ИК излучения газотурбинных двигателей для оценки возможностей снижения заметности летательных аппаратов

Представлено членом-корреспондентом НАН Украины Ф.Ф. Сизовым

Исследованы существующие в мировой научной литературе методики расчета ИК-излучения газотурбинных двигателей (ГТД). Описан состав газов в выхлопе ГТД и приведены данные об основных спектральных свойствах таких газов, которые необходимо учитывать при моделировании ИК излучения двигателя. Составлен обзор существующих численных методов расчета взаимодействия ИК-излучения с газом внутри ГТД, и приведены литературные данные о точности таких методов. Поданы преимущества и недостатки line-by-line, зональных и глобальных методов моделирования газа для применения в инженерных расчетах авиаконструкторами, и установлены наиболее приемлемые по точности, простоте реализации и скорости счета методы из приведенного перечня. Поданы основные методы численного решения уравнения переноса ИК излучения в ГТД между его внутренними стенками и газом внутри двигателя. Показаны особенности реализации численного алгоритма на основе метода Монте–Карло для различных постановок задачи расчета ИК-заметности ГТД и выбран наиболее оптимальный метод для численного моделирования углового распределения ИК излучения в задней полусфере за срезом сопла двигателя.

Ключевые слова: газотурбинный двигатель, ИК заметность, численные методы.

Одной из важнейших характеристик современной авиационной техники является ее живучесть, и в частности, уменьшение заметности и вероятности идентификации летательных объектов. Для наведения на цель современные средства обнаружения используют излучение летательного аппарата (ЛА) в ИК области спектра, где расположены спектральные линии излучения тел, нагретых до 800–2000 К. Поэтому снижение такого излучения является приоритетной задачей авиационных конструкторов.

Цитування: Мележик Е.А., Сизов Ф.Ф., Шевчук О.В., Гуменюк-Сычевская Ж.В. Методики численного моделирования ИК излучения газотурбинных двигателей для оценки возможностей снижения заметности летательных аппаратов. *Допов. Нац. акад. наук Укр.* 2020. № 4. С. 43–52. <https://doi.org/10.15407/dopovidi2020.04.043>

Одним из важнейших источников ИК излучения ЛА является его двигатель. Поэтому для минимизации его излучения еще на этапе проектирования необходимо численное моделирование ИК-характеристик этого двигателя.

Моделирование процессов переноса ИК излучения в газотурбинном двигателе можно разделить на два этапа. На первом этапе необходимо определиться с используемой моделью излучения и поглощения радиации исходящими газами и деталями внутри двигателя. На втором этапе необходимо рассчитать процессы излучения, поглощения и переноса излучения как с поверхности внутренних стенок и деталей двигателя, так и с объема выхлопной струи газов, на основе уравнения переноса излучения (radiation transfer equation, RTE) [1].

В данной статье приведен сравнительный анализ моделей численного счета, как для взаимодействия выхлопных газов внутри двигателя с ИК излучением, так и для моделирования ИК излучения в задней полусфере за срезом сопла ГТД в целом. Такой анализ будет полезен для моделирования новых образцов авиационных двигателей с пониженной ИК заметностью.

Газы в выхлопе ГТД и их спектры излучения. Численное моделирование работы ГТД также можно разделить на несколько этапов. На первом происходит расчет химических реакций процесса горения и движения горячих газов в ГТД на основе решения уравнения Навье—Стокса и, к примеру, таких методов, как Рейнольдс-усредненное моделирование (Reynolds-averaged simulation, RAS) или вихревые методы (Large eddy simulation, LES) [2]. В наиболее точном случае, вместе с этим моделированием считают ИК теплообмен, но в таком случае моделирование и вычислительная процедура становятся сложными и громоздкими.

Если известны температуры стенок двигателя и газа и другие параметры газовой смеси, полученные из каких-то оценок или экспериментов, то это дает возможность выделить ИК теплообмен в отдельную расчетную задачу, что существенно упрощает моделирование.

Газы в выхлопе газотурбинного двигателя образуются в результате сгорания топлива в камере сгорания. Соответственно при полном сгорании продуктами горения будут газы $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} + \text{N}_2$. В реальных двигателях, кроме этих газов также образуются O_2 , CO , SO_x , NO_x , HC и сажа [3]. Для некоторых газов их содержание в процессах истечения не является существенным. Так, при исследовании состава выхлопных газов типичного ГТД [4] показано, что содержание монооксида углерода CO в них составляет меньше 1–2 %.

Другие газообразные компоненты, такие как SO_2 , H_2 , O_2 , N_2 , и NO_x являются незначительными эмитентами ИК излучения [5]. Вкладом SO_2 и NO_x в излучение можно пренебречь вследствие их малых концентраций, а газы с симметричными молекулами, такие как H_2 , O_2 , N_2 , не дают значимого излучения даже при высоких температурах [5, 6].

Поэтому, как правило, в моделировании ИК излучения выхлопной струи газов рассматривают смесь двух газов $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$ в азоте (N_2). Эти два газа до температуры ~3000К дают основной вклад в ИК излучение [6]. Роль же азота в данном случае сводится к уширению некоторых спектральных линий паров воды и диоксида углерода. Излучение газообразного азота не рассматривается и в более комплексных расчетах [7].

Стоит отметить, что несмотря на широкий ИК спектр излучаемых объектов, в атмосфере Земли выделяют в основном два диапазона с высокой степенью пропускания, используемых для слежения, наблюдения и сопровождения объектов: 3–5 мкм и 8–12 мкм. Вне

этих диапазонов наблюдается высокое ослабление в атмосфере Земли ИК излучения из-за роли CO_2 и H_2O в поглощении и рассеивании.

Нагретые стенки и детали двигателя часто моделируются как черное или серое тело и, следовательно, излучают в непрерывном спектре частот согласно Планковской формуле излучения для абсолютно черного тела и своего коэффициента черноты.

В то же время газ имеет прерывистый (характеристический) спектр излучения, линии которого соответствуют энергиям перехода электронов между энергетическими уровнями молекул газа. Вследствие этого расчет процессов излучения и поглощения радиации газом усложняется. Еще одной сложностью в моделировании излучения газа становится температура. Например, для расчета поглощения излучения газом CO_2 при комнатной температуре в ИК области достаточно учесть около десятка полос поглощения, в то время как при 3000 К добавляются “горячие” полосы и количество полос в расчете возрастает до около 200 [1].

Существуют и периодически обновляются такие базы данных, как HITRAN [8] и HITEMP [9], содержащие детальные энергетические спектры газов при разных давлениях и температурах. Эти базы служат основой для проведения line-by-line расчетов (см. ниже), а также они используются для вычисления параметров приближенных методов численного счета ИК излучения.

Также важно учитывать, что энергетические уровни газов в газовой смеси могут перекрываться, вследствие чего будет меняться их спектр поглощения (корреляционные эффекты). Это также важно учитывать для корректного выбора базы параметров того или иного приближенного метода счета.

Сильная зависимость энергетического спектра газов от температуры приводит, например, к тому, что большая часть излучения из горячих областей газовой смеси проходит через холодные области этой смеси практически без поглощения [1]. В случае двухконтурного двигателя это может приводить к тому, что вследствие быстрого падения температуры газового факела за срезом сопла двигателя, излучение/поглощение ИК радиации таким факелом будет менее значимым.

Также следует отметить, что на спектр выхлопной струи газов влияет наличие в ней сажи. Если в выхлопных газах присутствуют частички сажи различных размеров, то спектральные осцилляции излучения такой смеси частично сглаживаются [10] и газовая смесь становится ближе по параметрам к серому газу.

Методы расчета взаимодействия излучения с выхлопными газами. Вследствие существования многочисленных спектральных линий для газов и изменения их количества в зависимости от температуры, точный расчет, учитывающий все известные линии поглощения того или иного газа, занимает много времени. Поэтому существует ряд приближенных расчетных методов, позволяющих значительно ускорить численное моделирование излучения в газе.

Эти методы можно поделить на три больших класса: line-by-line (LBL) метод, statistical band (зональные) методы и модели на основе глобальной функции распределения поглощения [1].

1. Line-by-line метод. Метод является точным, он учитывает каждую спектральную линию газа в отдельности, поэтому является самым трудоемким и затратным по времени. Используется он, как правило, в научных расчетах для валидации более быстрых, прибли-

женных методов расчета. Вследствие трудоемкости и больших затрат времени, в инженерных расчетах, как правило, не применяется. Характерная спектральная частота взаимодействия с газом ИК излучения может попасть как на центр той или иной линии поглощения (и тогда поглощение этого излучения газом будет сильным), либо на край линии или и вовсе между линиями (в этом случае поглощение будет слабым или отсутствовать). Поскольку линии поглощения газа узкие (1 см^{-1} и меньше), это выдвигает требования к точности определения частоты падающего излучения и точности счета и является одной из причин сложности метода line-by-line.

Statistical narrow band методы. Поэтому класс зональных методов предлагает аппроксимацию, разбивая весь спектр на интервалы, и рассчитывая внутри каждого такого интервала усредненные параметры для определения пропускания излучения в этом интервале.

Базовый расчетный метод этого класса statistical narrow band (SNB) и его модификация statistical wide band (SWB) отличаются выбором таких интервалов усреднения. В случае SWB, усреднение ведется по полосе колебательно-вращательных спектральных линий той или иной молекулы газа, в то время как в случае SNB, спектр разбивается на более узкие отрезки, содержащие меньшее количество линий и имеющие ширину $25\text{--}200 \text{ см}^{-1}$.

После такого разбиения уравнение переноса излучения в объеме двигателя решается для каждой полученной полосы отдельно, а затем результаты счета складываются.

Среди других методов этой группы можно упомянуть методы “k-distribution” (K-D), “correlated-k” (СК) и “correlated-k-fictitious gases” (СКFG). От метода SNB метод K-D отличается тем, что интегрирование по длине волны заменяется интегрированием по коэффициенту поглощения газа, преимуществом в данном случае является то, что подынтегральная функция является более гладкой, недостатком — то, что он не может быть применен к неоднородной среде.

Для такой среды применяется модификация этого метода, называемая “correlated-k” (СК), использующая более сложную функцию распределения по коэффициенту поглощения. Метод же СКFG является дальнейшим развитием метода СК, и разработан для минимизации погрешности СК в оценке спектральных корреляций излучающих и поглощающих линий газа.

Отличительной чертой narrow-band моделей является то, что спектральными корреляциями между газами H_2O и CO_2 внутри каждого спектрального интервала разбиения можно пренебречь практически без потери точности счета [11].

Достоинством методов этого класса является их достаточно высокая точность, проверяемая путем сопоставления с LBL расчетом (рис. 1 и 2). К недостаткам же методов следует отнести необходимость интегрирования по дополнительному измерению (то ли частоты, то ли коэффициента поглощения). Для системы сложного профиля, такой как ГТД, это на порядок увеличивает сложность задачи и время счета по сравнению с глобальными методами.

В системах сложной геометрии, таких как ГТД, как правило, применяется приближение декорреляции к отражаемому от стенок излучению [1, 11], которое означает, что после отражения от стенки излучение считается имеющим гладкий спектр, в котором сглажены отдельные пики. Вследствие такого приближения для сильно отражающих (белых) стенок погрешность сформулированных в терминах коэффициента пропускания методов (напр. SNB или СКFG) возрастает до 30–35 %. В то же время, погрешность моделей, сформули-

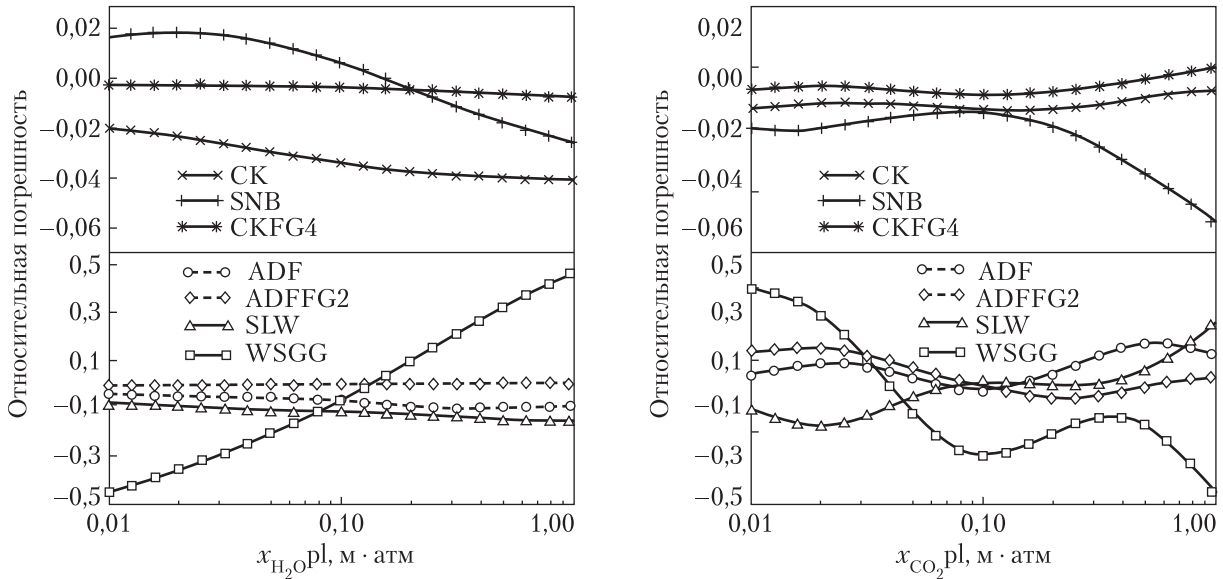


Рис. 1. Относительные погрешности при расчете теплового потока в газовой смеси H_2O / N_2 между черными стенками в сравнении с LBL-расчетом. Погрешности зональных (на верхней части рисунка) и глобальных (на нижней части рисунка) методов даны в зависимости от расстояния между стенками при $x_{H_2O} = 0,1$ и давлении $p = 1$ атм. Параболический температурный профиль с $T_{стенки} = 2500$ К и $T_{средней линии} = 500$ К. Рисунок взят из работы [1]

Рис. 2. Относительные погрешности при расчете теплового потока в газовой смеси CO_2 / N_2 между черными стенками, в сравнении с LBL-расчетом. Погрешности зональных (на верхней части рисунка) и глобальных (на нижней части рисунка) методов даны в зависимости от расстояния между стенками при $x_{CO_2} = 0,1$ и давлении $p = 1$ атм. Параболический температурный профиль, с $T_{стенки} = 500$ К и $T_{средней линии} = 2500$ К. Рисунок взят из работы [1]

рованных в терминах коэффициента поглощения, таких как СК, или описанных в следующей секции SLW, ADF, и ADFFG (за исключением WSSG), к степени черноты стенок не чувствительна [11].

Модели на основе глобальной функции распределения поглощения. Если стенки двигателя и частички сажи в выхлопной струе рассматриваются как серые тела, становится возможным использование в такой системе глобальных моделей для расчета потока мощности ИК излучения.

Такие методы расчета излучения газа полезны в задачах, где распределение ИК излучения ГТД по частоте не представляет интереса, а есть необходимость лишь найти пространственное распределение суммарной интенсивности излучения. Упрощение задачи позволяет существенно увеличить скорость численных расчетов. Эти методы включают в себя метод неоднородностей пропускания [12] и модели на основе функции распределения коэффициента поглощения с учетом распределения Планка [1]. Большая часть последних основана на приближении weighted-sum-of-gray-gases [10]. Ниже рассмотрено именно это приближение, поскольку оно является наиболее широко используемым.

Классической базой таких методов является модель WSGG, применяемая для пространственно однородного по параметрам газа. В данной модели излучательная способность реального однокомпонентного газа моделируется в виде разложения в смесь серых

газов, чье излучение подчиняется закону распределения Планка. В этом случае задача сводится к нахождению коэффициентов такого разложения, а решение уравнения переноса излучения в каждом из серых газов существенно упрощается. На практике используется от 3 до 5 серых газов. К недостаткам модели WSGG следует отнести ее сравнительно низкую точность — в то время как для CO_2 погрешность счета может составлять около 10 % (см. рис. 2), для H_2O такая погрешность может достигать 25–45 % (см. рис. 1) в зависимости от условий среды и длины оптического пути, для газа между черными стенками [1].

Модель SLW (spectral-line based WSGG model) является усовершенствованной и более точной версией WSGG, применимой в том числе к неоднородной среде с градиентом температуры. Модель позволяет достигать точности расчета 10–20 % [11, 1] при сохранении преимуществ в скорости счета. Для этой модели в литературе есть рассчитанные на основе точного LBL-метода параметры для H_2O и CO_2 газов.

Модель функции распределения поглощения (ADF) [13] отличается от SLW только в методике выбора весовых коэффициентов для серых газов. Эти коэффициенты тут выбираются таким образом, чтобы эмиссия изотермического газа строго воспроизводила реальный спектр.

Более точной, но и более сложной версией моделей SLW и ADF является модель функции распределения поглощения на основе фиктивных газов (ADFFG), предложенная для сред с сильными градиентами температуры [13]. Она основана на разделении линий излучения газа на подгруппы с близкими пороговыми энергиями, которые приписываются разным фиктивным газам. На практике используют разбиение на две такие подгруппы.

И хотя для сред с градиентами температуры метод ADFFG более точен, нежели методы SLW и ADF, последние два метода оперируют примерно восемью разными коэффициентами поглощения, в то время как первый — оперирует квадратом этого числа коэффициентов.

Также стоит отметить, что для задачи расчета видимости ИК излучателя на больших расстояниях, для которых рассчитывается видимость излучения горячего газа через оптически толстый слой холодного газа, хорошую точность сохраняют только модели на основе фиктивных газов, такие как СКFG или ADFFG [11]. Однако для задачи расчета углового распределения интенсивности ИК излучения в полусфере суммирования рядом с соплом двигателя, оптическая толщина слоя холодного газа будет значительно меньшей.

В целом, следует отметить, что при стандартных приближениях счета погрешность методов SNB и СКFG возрастает с увеличением коэффициента отражения стенок (уменьшением степени их черноты) [11]. Глобальные модели более быстрые для численного счета, нежели narrow-band модели, но как правило дают большую погрешность и могут применяться только в средах с серыми стенками и серыми частицами взвеси в газе.

Наиболее приближенным и исторически одним из первых методом этого класса является метод серого газа, оперирующий единым коэффициентом поглощения для газа во всем спектральном диапазоне [14].

При использовании глобальных методов для расчета ИК излучения в ГТД важно отметить две особенности. Во-первых, реальный спектр поглощения газа существенно зависит от частоты. Во-вторых, в то время как газ излучает отдельными линиями, нагретые серые стенки двигателя излучают в непрерывном спектре. Следовательно, излучение газа

будет им самим активно поглощаться, так как будет точно попадать на его спектральные линии поглощения. В то время как излучение от стенок с достаточно большой долей вероятности поглощено не будет, поскольку его частота может попадать между линиями поглощения газа. Соответственно существуют оценки, показывающие, что в зависимости от частоты, излучение от стенок может проходить расстояние в газе до почти на два порядка дальше до его поглощения, нежели собственное излучение газа. Вследствие этого для применения на практике глобальных методов расчета излучения газа необходима интегральная оценка их точности и сравнение полученных ими результатов с SNB или LBL методами счета. Такие оценки были выполнены в работах [1, 14].

Исследования точности различных зональных и глобальных методов расчета излучения газа, таких как SNB, СК, СКFG, WSGG, ADF, ADFFG и SLW при наличии серых отражающих и излучающих стенок проведены в работах [1, 11]. Полученные результаты были сравнены с реперными данными LBL расчета, для атмосферного давления и температур 500–2500 К. Погрешности методов ADF, ADFFG, SLW, СК, SNB, СКFG для паров воды в смеси с азотом и диоксида углерода в смеси с азотом составляли менее 10 – 15%.

Методы решения уравнения переноса излучения в ГТД. Существуют различные методы решения уравнения переноса излучения (RTE): CFD, методы конечного объема, методы дискретных ординат, метод “обратного хода луча”, метод Монте–Карло, метод квази-Монте–Карло и другие [1, 2].

Популярными методами являются метод дискретных ординат и метод сферических гармоник, которые аппроксимируют уравнение RTE системой дифференциальных уравнений в частных производных [2]. Однако метод дискретных ординат имеет проблему с производительностью при повышении точности, метод сферических гармоник также быстро становится ресурсоемким при повышении порядка разложения. Методы сферических гармоник с низкими степенями разложения могут давать результаты с большой погрешностью, особенно при наличии градиентов температуры или комплексных границ.

С другой стороны, методы Монте–Карло являются одними из наиболее точных и часто применяемых методов решения RTE [2], поскольку временные затраты на проведение расчета возрастают практически линейно с увеличением количества точек в симуляции, а статистическая ошибка изменяется обратно пропорционально корню из количества таких точек. Кроме того, методы этого класса хорошо подходят для систем сложной геометрии, какой является ГТД.

Методы Монте–Карло основываются на использовании генератора случайных чисел. Классические методы Монте–Карло основаны на прослеживании статистически большого количества историй распространения отдельных фотонов в среде (лучей). Их можно разделить на подгруппы.

Прямой метод Монте–Карло рассматривает излученные внутри двигателя фотоны (или лучи) и прослеживает их распространение до выхода из двигателя, а затем количество вылетевших лучей в различных участках полусферы суммирования за двигателем суммируется. Такой метод хорош для задачи определения излучения в заднюю полусферу в широком диапазоне углов.

Обратный метод Монте–Карло применяется, когда необходимо рассчитать видимый ИК профиль двигателя в конкретной точке нахождения наблюдателя. Поскольку в

этом случае речь идет об интенсивности излучения в очень малом угле задней полушеры суммирования, то для прямого метода Монте—Карло потребовалось бы очень и очень большое количество пробных лучей, чтобы получить статистически значимое количество их попаданий в этот малый угол. В такой ситуации рассматривается распространение лучей в обратном направлении от наблюдателя к двигателю.

Также методы Монте—Карло можно разделить на два подтипа по тому, как они описывают взаимодействие пробных лучей с газовой средой.

В методе трассирования по расстоянию случайным образом рассчитывается характеристическая длина пути луча и при прохождении расстояния больше этой длины луч считается поглощенным. Метод хорошо подходит для сред с малой оптической толщиной.

В методе трассирования по энергии при прохождении отрезка пути в газовой среде энергия луча уменьшается согласно коэффициенту поглощения этой среды. Метод хорошо подходит для сред с большой оптической толщиной, в которых характеристические расстояния до поглощения из первого метода практически всегда бы оказывались меньше длины пути лучей и количество необходимых для счета лучей выросло бы до огромных масштабов.

Выводы. Для проведения расчетов ИК излучения в задней полусфере за срезом сопла газотурбинного двигателя и последующих оценок уменьшения заметности и вероятности идентификации летательных объектов, оптимальным представляется использование классического прямого метода Монте—Карло. Для моделирования взаимодействия ИК излучения с газом достаточную точность имеют модели класса narrow band либо модели на основе глобальной функции распределения поглощения (кроме WSGG), причем вторые являются существенно более быстрыми для численного счета.

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Taine J., Soufiani A. Gas IR Radiative Properties: From Spectroscopic Data to Approximate Models. *Advances in Heat Transfer*. 1999. **33**. P. 295–414. [https://doi.org/10.1016/S0065-2717\(08\)70306-X](https://doi.org/10.1016/S0065-2717(08)70306-X)
2. Farmer J., Roy S. A quasi-Monte Carlo solver for thermal radiation in participating media. *J. Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*. 2020. **242**. P. 106753. <https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2019.106753>
3. Masiol M., Harrison R.M. Aircraft engine exhaust emissions and other airport-related contributions to ambient air pollution: A review. *Atmospheric Environment*. 2014. **95**. P. 409–455. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2014.05.070>
4. Robertson D., Elwood J., Groth R. Chemical composition of exhaust particles from gas turbine engines, U.S. Environmental Protection Agency, Washington, D.C., EPA/600/2-79/041. 1979.
5. Lefebvre A.H. Flame radiation in gas turbine combustion chambers. *Int. J. Heat and Mass Transfer*. 1984. **27**, Iss. 9. P. 1493–1510. [https://doi.org/10.1016/0017-9310\(84\)90262-X](https://doi.org/10.1016/0017-9310(84)90262-X)
6. Lefebvre A.H. Radiation from flames in gas turbines and rocket engines. *Symposium (International) on Combustion*. 1969. **12**, Iss. 1. P. 1247–1253. [https://doi.org/10.1016/S0082-0784\(69\)80501-1](https://doi.org/10.1016/S0082-0784(69)80501-1)
7. Reardon J.E., Lee Y.C. A computer program for thermal radiation from gaseous rocket exhaust plumes GASRAD. NASA Technical Reports, document ID 19800018922. 1979.
8. Rothman L.S., Gordon I.E., Babikov Y. et al. The HITRAN2012 molecular spectroscopic database. *J. Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*. 2013. **130**. P. 4–50. <https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2013.07.002>
9. Rothman L.S., Gordon I.E., Barber R.J. et al. HITEMP, the high-temperature molecular spectroscopic database. *J. Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*. 2010. **111**. P. 2139–2150. <https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2010.05.001>

10. Modest M.F. The Weighted-Sum-of-Gray-Gases Model for Arbitrary Solution Methods in Radiative Transfer. *J. Heat Transfer*. 1991. **113**, Iss. 3. P. 650–656. <https://doi.org/10.1115/1.2910614>
11. Pierrot L., Soufiani A., Taine J. Accuracy of narrow-band and global models for radiative transfer in H₂O, CO₂ and H₂O-CO₂ mixtures at high temperature. *J. Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*. 1999. **62**, Iss. 5. P. 523–548. [https://doi.org/10.1016/S0022-4073\(98\)00125-3](https://doi.org/10.1016/S0022-4073(98)00125-3)
12. Grosshandler W.L. Radiative Heat Transfer in Nonhomogeneous Gases: A Simplified Approach. *Int. J. Heat and Mass Transfer*. 1980. **23**, Iss. 11. P. 1447–1459. [https://doi.org/10.1016/0017-9310\(80\)90149-0](https://doi.org/10.1016/0017-9310(80)90149-0)
13. Pierrot L., Riviere P., Soufiani P., Taine J. A fictitious-gas-based absorption distribution function global model for radiative transfer in hot gases. *J. Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*. 1999. **62**, Iss. 5. P. 609–624. [https://doi.org/10.1016/S0022-4073\(98\)00124-1](https://doi.org/10.1016/S0022-4073(98)00124-1)
14. Wang P., Fan F., Li Q. Accuracy evaluation of the gray gas radiation model in CFD simulation. *Case Studies in Thermal Engineering*. 2014. **3**. P. 51–58. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2014.03.003>

Поступило в редакцию 16.02.2020

REFERENCES

1. Taine, J. & Soufiani, A. (1999). Gas IR Radiative Properties: From Spectroscopic Data to Approximate Models. *Advances in Heat Transfer*, 33, pp. 295-414. [https://doi.org/10.1016/S0065-2717\(08\)70306-X](https://doi.org/10.1016/S0065-2717(08)70306-X)
2. Farmer, J. & Roy, S. (2020). A quasi-Monte Carlo solver for thermal radiation in participating media. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 242, pp. 106753. <https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2019.106753>
3. Masiol, M. & Harrison, R. M. (2014). Aircraft engine exhaust emissions and other airport-related contributions to ambient air pollution: A review. *Atmospheric Environment*, 95, pp. 409-455. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2014.05.070>
4. Robertson, D., Elwood, J. & Groth, R. (1979). Chemical composition of exhaust particles from gas turbine engines, U.S. Environmental Protection Agency, Washington, D.C., EPA/600/2-79/041
5. Lefebvre, A. H. (1984). Flame radiation in gas turbine combustion chambers, *Int. J. Heat and Mass Transfer*, 27, Iss. 9, pp. 1493-1510. [https://doi.org/10.1016/0017-9310\(84\)90262-X](https://doi.org/10.1016/0017-9310(84)90262-X)
6. Lefebvre, A. H. (1969). Radiation from flames in gas turbines and rocket engines. *Symposium (International) on Combustion*, 12, Iss. 1, pp. 1247-1253. [https://doi.org/10.1016/S0082-0784\(69\)80501-1](https://doi.org/10.1016/S0082-0784(69)80501-1)
7. Reardon, J. E. & Lee, Y. C. (1979). A computer program for thermal radiation from gaseous rocket exhaust plumes GASRAD. NASA Technical Reports, document ID 19800018922
8. Rothman, L. S., Gordon, I. E., Babikov, Y. et al. (2013). The HITRAN2012 molecular spectroscopic database. *J. Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*, 130, pp. 4-50. <https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2013.07.002>
9. Rothman, L. S., Gordon, I. E., Barber, R. J. et al. (2010). HITEMP, the high-temperature molecular spectroscopic database. *J. Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*, 111, pp. 2139-2150. <https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2010.05.001>
10. Modest, M. F. (1991). The Weighted-Sum-of-Gray-Gases Model for Arbitrary Solution Methods in Radiative Transfer. *J. Heat Transfer*, 113(3), pp. 650-656. <https://doi.org/10.1115/1.2910614>
11. Pierrot, L., Soufiani, A. & Taine, J. (1999). Accuracy of narrow-band and global models for radiative transfer in H₂O, CO₂ and H₂O-CO₂ mixtures at high temperature. *J. Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 62(5), pp. 523-548. [https://doi.org/10.1016/S0022-4073\(98\)00125-3](https://doi.org/10.1016/S0022-4073(98)00125-3)
12. Grosshandler, W. L. (1980). Radiative Heat Transfer in Nonhomogeneous Gases: A Simplified Approach. *Int. J. Heat and Mass Transfer*, 23(11), pp. 1447-1459. [https://doi.org/10.1016/0017-9310\(80\)90149-0](https://doi.org/10.1016/0017-9310(80)90149-0)
13. Pierrot, L., Riviere, P., Soufiani, P. & Taine, J. (1999). A fictitious-gas-based absorption distribution function global model for radiative transfer in hot gases. *J. Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 62(5), pp. 609-624. [https://doi.org/10.1016/S0022-4073\(98\)00124-1](https://doi.org/10.1016/S0022-4073(98)00124-1)
14. Wang, P., Fan, F. & Li, Q. (2014). Accuracy evaluation of the gray gas radiation model in CFD simulation. *Case Studies in Thermal Engineering*, 3, pp. 51-58. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2014.03.003>

Received 16.02.2020

Є.О. Мележик¹, Ф.Ф. Сизов¹, О.В. Шевчук², Ж.В. Гуменюк-Сичевська¹

¹ Інститут фізики напівпровідників ім. В.Є. Лашкарьова НАН України, Київ

² Державне підприємство “Запорізьке машинобудівне конструкторське бюро “Прогрес” ім. академіка О.Г. Івченка

E-mail: sizov@isp.kiev.ua

МЕТОДИКИ ЧИСЕЛЬНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ІЧ-ВИПРОМІНЮВАННЯ ГАЗОТУРБІННИХ ДВИГУНІВ ДЛЯ ОЦІНКИ МОЖЛИВОСТЕЙ ЗНИЖЕННЯ ПОМІТНОСТІ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ

Досліджено існуючі у світовій науковій літературі методики розрахунку ІЧ-випромінювання газотурбінних двигунів (ГТД). Описано склад газів у вихлопі ГТД та наведено дані про основні спектральні властивості таких газів, які необхідно враховувати при моделюванні ІЧ випромінювання ГТД. Розглянуто існуючі чисельні методи розрахунку взаємодії ІЧ випромінювання із газом всередині ГТД, та наведено дані стосовно точності таких методів. Оцінено переваги та недоліки line-by-line, зональних та глобальних методів моделювання випромінювання та поглинання газів для застосування у інженерних розрахунках авіаконструкторами, та встановлено найбільш прийнятні за точністю, простотою реалізації та швидкістю рахунку методи із наведеного переліку. Наведено перелік основних методів чисельного вирішення рівняння переносу ІЧ випромінювання в ГТД між його внутрішніми стінками та газом всередині двигуна. Показано особливості реалізації чисельного алгоритму на основі методу Монте—Карло для різних постановок задачі розрахунку ІЧ помітності ГТД та вибрано найбільш оптимальний метод для чисельного знаходження кутового розподілу ІЧ випромінювання у задній напівсфері за зрізом сопла двигуна.

Ключові слова: газотурбінний двигун, ІЧ помітність, чисельні методи.

E.O. Melezhih¹, F.F. Sizov¹, O.V. Shevchuk², J.V. Gumenjuk-Sichevska¹

¹ V. E. Lashkaryov Institute for Semiconductor Physics of the NAS of Ukraine, Kyiv

² Academic O.G. Ivchenko Zaporizhzhya machine-building design bureau “Progress”

E-mail: sizov@isp.kiev.ua

METHODS OF NUMERICAL SIMULATION OF THE IR RADIATION OF GAS TURBINE ENGINES TO EVALUATE THE POSSIBILITY OF REDUCING THE VISIBILITY OF AIRCRAFTS

Numerical methods for modeling the infrared (IR) radiation of gas turbine engines (GTE) existing in the literature are considered. The composition of the exhaust gases of the GTE is described, and the data on the main spectral properties of such gases are considered. It is shown that while exhaust gases of gas turbine engine consist mainly of CO₂, H₂O, and N₂, the main contribution to their total IR emission is made by CO₂ and H₂O, while role of N₂, CO, and compounds like SO₂, H₂, O₂, or NO_x is negligible. The presence of soot in the exhaust plume results into the additional scattering of radiation on soot particles and a partial smoothing of the emission spectra of exhaust gases. This data should be taken into account when modeling the IR radiation of the engine.

An overview of the existing numerical methods for calculating the interaction of IR radiation with a gas inside the GTE is provided. The literature data on the accuracy of such methods is given, and the factors affecting such accuracy for different methods are considered. The advantages and disadvantages of line-by-line, narrow band, and global gas modeling methods for the use in engineering calculations by aircraft constructors are presented. The methods most acceptable in terms of accuracy, simplicity and speed of calculation are pointed. The list of the main approaches to the numerical modeling of radiation transfer in GTE between its inner parts and the gas inside is given.

The differences of implementations of the numerical algorithm based on the Monte Carlo method for different formulations of the problem of IR-visibility of GTE are shown. The appliance of gas modeling methods for calculations of IR field near the nozzle and at the large distances from the engine is discussed. The most optimal method for the numerical finding of the angular distribution of IR radiation in the rear hemisphere behind the engine nozzle is selected.

Keywords: gas turbine engine, IR visibility, numerical methods.