

На правах рукописи

Шеметов Иван Михайлович

**Метод определения теплового потока на поверхности тел
по результатам измерений температуры при неоднородной
теплопередаче**

Специальность: 2.5.12. Аэродинамика и процессы теплообмена
летательных аппаратов

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Жуковский – 2024

Работа выполнена на базе Федерального автономного учреждения «Центральный аэрогидродинамический институт имени профессора Н.Е. Жуковского» (ФАУ «ЦАГИ»)

Научный руководитель: **Дроздов Сергей Михайлович**, доктор физико-математических наук, начальник отделения Федерального автономного учреждения «Центральный аэрогидродинамический институт имени профессора Н.Е. Жуковского» (ФАУ «ЦАГИ»)

Официальные оппоненты: **Алексеев Алексей Кириллович**, доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник Публичного акционерного общества «Ракетно-космическая корпорация «Энергия» имени С.П. Королёва» (ПАО «РКК «Энергия»)

Резник Сергей Васильевич, доктор технических наук, заведующий кафедрой Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (МГТУ им. Н. Э. Баумана)

Ведущая организация: Акционерное общество «Центральный научно-исследовательский институт машиностроения» (АО «ЦНИИМаш»)

Защита состоится «___» _____ 2024 г. в ___ часов ___ минут на заседании диссертационного совета 31.1.006.01 при Федеральном автономном учреждении «Центральный аэрогидродинамический институт имени профессора Н.Е. Жуковского» (ФАУ «ЦАГИ»)

по адресу: 140180, Московская обл., г. Жуковский, ул. Жуковского, д. 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФАУ «ЦАГИ» и на сайте http://www.tsagi.ru/institute/dissertation_council/dissertations/

Автореферат разослан «___» _____ 2024 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета 31.1.006.01,
доктор физико-математических наук

Брутян Мурад Абрамович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Диссертационная работа посвящена развитию экспериментальных методов определения теплового потока на поверхности тел в аэродинамических трубах (АДТ). Экспериментальные исследования теплообмена являются неотъемлемой составляющей цикла разработки высокоскоростных летательных аппаратов (ЛА), их элементов и средств тепловой защиты.

Классические методы определения теплового потока по результатам тепловых испытаний в АДТ, в которых на исследуемом теле измеряется распределение или локальная эволюция температуры, обычно основаны на решении одномерного уравнения теплопроводности в материале тела или на упрощённой модели теплообмена установленного в теле датчика. Такие методы имеют ряд ограничений:

1) снижается точность оценки теплового потока на участках поверхности с сильной кривизной и неоднородной теплопередачей (например, на носках, кромках и других малогабаритных элементах, в областях взаимодействия с пограничным слоем скачков уплотнения и отрывных течений);

2) для панорамных измерений требуются условия эксперимента, при которых поле температур близко к одномерному, для локальных измерений – датчики специальной конструкции;

3) при изготовлении моделей и датчиков необходимо использовать теплоизоляционные материалы, обычно имеющие низкую прочность и теплостойкость;

4) как следствие, ограничиваются допустимые параметры эксперимента – длительность теплового воздействия, предельные температуры, минимальный размер и радиус кривизны элементов модели, выбор средств измерений, диапазон моделируемых режимов обтекания.

Чтобы ослабить указанные выше ограничения, необходимы методы, позволяющие при обработке экспериментальных данных использовать более

сложные математические модели, учитывающие неоднородное распространение тепла.

Актуальность диссертационной работы связана с необходимостью применения двух- и трехмерных моделей теплопроводности для определения теплового потока в следующих случаях:

1) при исследовании пространственно неоднородного теплообмена моделей ЛА сложной формы;

2) для повышения точности определения теплового потока при высокой теплопроводности материала модели, большой продолжительности теплового воздействия, значительной кривизне поверхности и неоднородности теплопередачи;

3) для расширения допустимых условий теплового эксперимента в АДТ, снижения требований к материалам и параметрам испытаний, совершенствования конструкции тепловых моделей и датчиков.

Степень разработанности темы исследования

К настоящему времени известно, по меньшей мере, пять подходов к определению теплового потока при неоднородном распространении тепла.

1. Оценка погрешности, обусловленной влиянием многомерной теплопередачи, при использовании упрощённых моделей теплообмена (применяется с 1960-х годов).

2. Введение поправок на распространение тепла вдоль поверхности при использовании упрощённых моделей теплообмена (применяется с 1960-х годов).

3. Решение прямой двух- или трёхмерной задачи теплопроводности в теле при измеренных в эксперименте температурах на границах и определение теплового потока по расчётному градиенту температуры у поверхности. Такой подход применялся в нескольких работах, опубликованных в 2000-х годах.

4. Решение граничной обратной задачи теплопроводности в двух- или трёхмерной постановке: по температурам, измеренным в заданных точках тела, отыскивается функция, задающая распределение и эволюцию теплового потока

на границах. Обратные задачи теплопроводности в общем случае некорректны. Специальные методы, позволяющие получить устойчивые решения многомерных обратных задач, развиваются с 1970-х годов по настоящее время.

5. Итерационный поиск параметров теплообмена (итерационный метод): при заранее известном классе функции, задающей искомый тепловой поток, определяются значения параметров теплообмена, минимизирующие отклонение решения прямой задачи теплопроводности от измеренных температур. Этот подход применялся в работах, опубликованных в 2000-х и 2010-х годах. Именно он используется в данном исследовании.

Цели и задачи работы

Цель работы – повышение точности и расширение области применимости экспериментальных методов определения теплового потока в АДТ при помощи алгоритмов, учитывающих двух- и трёхмерное распространение тепла в материале исследуемого тела.

Задачи работы состояли в следующем:

1. Предложить метод и алгоритмы определения теплового потока на поверхности тел по результатам измерений температуры при неоднородной теплопередаче.
2. Проверить работоспособность алгоритмов и определить область их применимости.
3. Применить разработанные алгоритмы в практически значимых задачах и показать, что их внедрение существенно расширяет возможности по измерению тепловых потоков в аэродинамических трубах.

Научная новизна работы

В отличие от опубликованных работ других авторов, в которых описывалось применение итерационного метода к результатам панорамных измерений температуры, в данном исследовании

- 1) рассмотрен более широкий класс функций, определяющих граничное условие (закон теплообмена) на исследуемой поверхности;
- 2) предложены и апробированы на практически важных случаях новые алгоритмы определения неизвестных параметров теплообмена;
- 3) рассмотрено применение метода не только к панорамным измерениям температуры, но и к локальным измерениям дискретными датчиками.

Теоретическая значимость работы

Учёт двух- или трёхмерного распространения тепла даёт возможность корректно определять тепловой поток по результатам панорамных измерений температуры при значениях числа Фурье на несколько порядков выше, чем классические методы на основе одномерного уравнения теплопроводности.

Для обработки результатов локальных измерений в работе предложены универсальные алгоритмы, применимые к датчикам любой конструкции.

Практическая значимость работы

Разработанные алгоритмы обработки панорамных измерений позволяют точнее определять тепловой поток на малогабаритных элементах конструкции, при сильно неоднородном теплообмене, на телах из теплопроводных материалов (металлов). По сравнению с моделями из теплоизоляционных материалов, металлические модели проще в изготовлении, имеют более высокую прочность и теплостойкость, менее резкие градиенты температур во время эксперимента, однородные и подробно изученные теплофизические свойства.

Разработанные алгоритмы обработки локальных измерений дают возможность детально учесть теплообмен датчика с телом, не проводя градуировок, и определить дополнительные параметры теплообмена.

Методология и методы исследования

В работе применялись аналитические методы различных областей математики и физики (теория теплопроводности, теория подобия, метод

разделения переменных для решения уравнений в частных производных, метод наименьших квадратов для аппроксимации функций), численные методы (метод простой итерации, метод секущих, метод конечного объёма, метод прямых), метод математического моделирования, методы экспериментального исследования теплообмена тел в газодинамических установках: метод люминесцентных преобразователей температуры, метод термоиндикаторов плавления, тепловизионный метод, датчики теплового потока – калориметры и поверхностные термопары.

Научные положения, выносимые на защиту

1. Алгоритмы определения параметров теплообмена по результатам панорамных измерений температуры при нескольких видах граничных условий.
2. Алгоритмы определения параметров теплообмена по результатам локальных измерений температуры датчиками при нескольких видах граничных условий.
3. Результаты апробации разработанных алгоритмов в расчётных и экспериментальных исследованиях.

Степень достоверности и апробация результатов

Обоснованность и достоверность результатов обеспечиваются использованием известных научных теорий и методов, валидированных коммерческих программных пакетов, анализом сеточной сходимости численных решений и итерационной сходимости разработанных алгоритмов, применением известных методик тепловых испытаний в установках ЦАГИ, сопоставлением данных, полученных различными методами и средствами измерений.

Результаты исследования были представлены на 5 научных конференциях (в том числе 4 международных) и опубликованы в 3 печатных работах (2 работы – в изданиях, входящих в перечень ВАК). Работа заняла II место в научно-техническом конкурсе молодёжи «Будущее ЦАГИ – 2021» в номинации «Лучшее научное исследование». Разработанные алгоритмы обработки

локальных измерений применялись в научно-исследовательских работах ФАУ «ЦАГИ», что подтверждено научно-техническими отчётами и актом о внедрении.

Личный вклад автора:

- анализ литературы по теме исследования;
- разработка метода и алгоритмов определения теплового потока при неоднородной теплопередаче;
- численное исследование сходимости и точности предложенных алгоритмов (постановка и решение модельных задач аналитическими и численными методами, анализ результатов);
- апробация итерационного метода и алгоритмов определения теплового потока в экспериментальных исследованиях (участие в подготовке и проведении эксперимента, обработка полученных данных, анализ результатов).

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, 3 глав, заключения, благодарностей и списка литературы. Общий объем диссертации составляет 107 страниц, включая 51 рисунок и 13 таблиц. Библиография включает 76 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** даётся общая характеристика диссертационной работы: актуальность и степень разработанности темы, цели и задачи работы, научная новизна, теоретическая и практическая значимость результатов, методы исследования, положения, выносимые на защиту, степень достоверности результатов и сведения об их апробации.

Глава 1 посвящена разработке метода и алгоритмов определения теплового потока на поверхности тел по результатам измерений температуры при неоднородной теплопередаче.

В пункте 1.1 изложены принятые в работе требования к методу определения теплового потока: вид первичных данных (результаты панорамных измерений температуры в один момент времени или локальных измерений эволюции температуры отдельным датчиком), начальные условия (однородное распределение температуры), вид граничных условий на поверхности исследуемого тела (тепловой поток к поверхности – функция температуры и стационарных локальных параметров теплообмена). Требования соответствуют характерным условиям теплового эксперимента в установках ЦАГИ.

В пункте 1.2 описывается предложенный с учётом требований итерационный метод определения теплового потока. Метод предполагает, что плотность теплового потока принадлежит известному классу функций (модели теплообмена) с одним или несколькими параметрами, постоянными по времени. В работе рассмотрены три закона теплообмена, характерные для эксперимента в АДТ и натурного полёта: постоянный тепловой поток (1), конвективный теплообмен по модели Ньютона (2) и комбинация конвективного теплообмена с излучением по закону Стефана–Больцмана (3):

$$q_w = q = \text{const}, \quad (1)$$

$$q_w = \alpha \cdot (T_e - T_w), \quad (2)$$

$$q_w = \alpha \cdot (T_e - T_w) - \varepsilon \sigma (T_w^4 - T_\infty^4). \quad (3)$$

Здесь q_w – плотность теплового потока на исследуемой поверхности, T_w – температура поверхности, T_∞ – температура среды, с которой тело обменивается теплом посредством излучения. Неизвестными параметрами в случае панорамных измерений являются постоянная плотность теплового потока q или коэффициент теплоотдачи α , в случае измерений датчиками – локальные значения параметров q , α и T_e – температуры на внешней границе теплового пограничного слоя.

Для реализации итерационного метода требуются две составляющие: исходные данные и итерационный алгоритм (Рис. 1). Исходные данные включают измеренные температуры, геометрию и физические свойства исследуемого тела, известные граничные условия (например, на поверхностях, не нагреваемых потоком) и начальное распределение температур.

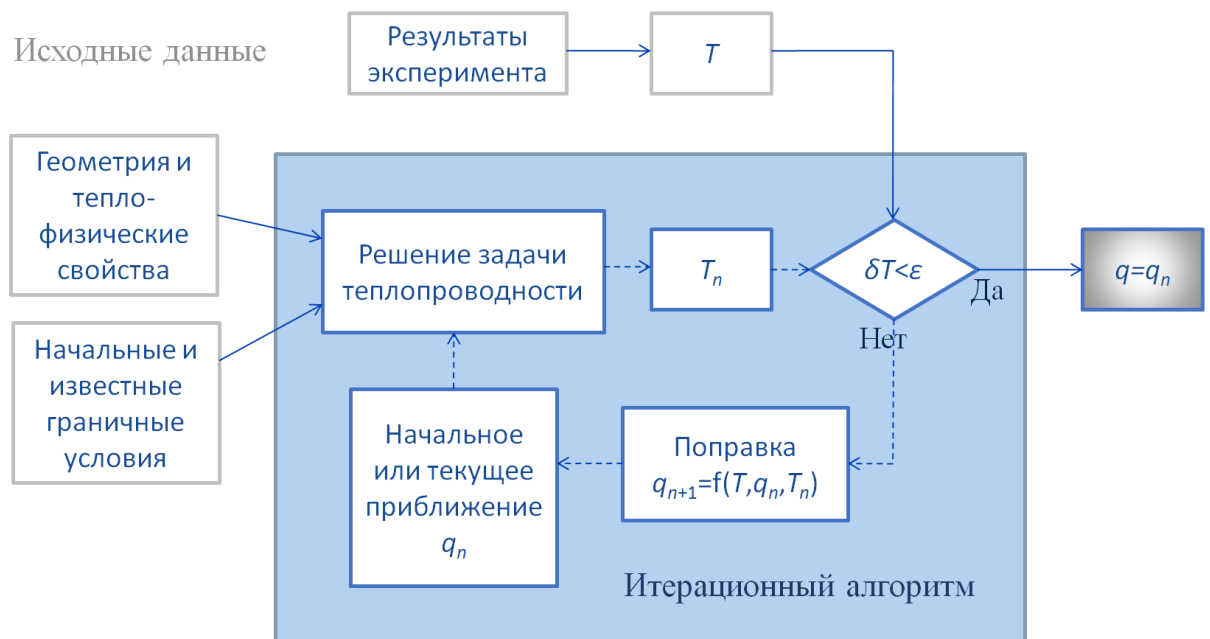


Рис. 1. Процедура определения плотности теплового потока итерационным методом.

Итерационный алгоритм состоит в следующем. Для исследуемой геометрии отыскивается решение двух- или трёхмерной прямой задачи теплопроводности при некоторой грубой оценке неизвестного распределения плотности теплового

потока (q_n) (см. Рис. 1). Вычисленные температуры (T_n) сравниваются с данными эксперимента (T), и, если отклонение между ними (δT) превышает заданный порог, в граничные условия вносится поправка, и рассчитывается решение задачи теплопроводности при новой оценке плотности теплового потока (q_{n+1}).

Процедура поочередного решения прямой задачи и модификации граничного условия повторяется многократно. На каждой следующей итерации отклонение между измеренными и рассчитанными температурами должно уменьшаться, а распределение плотности теплового потока – приближаться к действительному. Поэтому ключевой элемент метода – это формула вычисления поправки к тепловому потоку, которая учитывает экспериментальные данные и результаты предыдущих приближений и обеспечивает сходимость итерационного процесса.

В пункте 1.3 представлены алгоритмы для обработки результатов панорамных измерений. В эксперименте регистрируется распределение температуры на поверхности, нагреваемой неизвестным тепловым потоком, или на небольшой глубине под поверхностью (в термочувствительном покрытии). Алгоритмы поиска неизвестных параметров основаны на предположении о том, что в каждой точке измерений изменение температуры ΔT пропорционально средней по времени локальной плотности теплового потока \bar{q} :

$$\Delta T \propto \bar{q} = \frac{1}{t_m} \int_0^{t_m} q(t) dt . \quad (4)$$

Тогда имеет место пропорция между вычисленными температурами T_n , температурами T , измеренными в эксперименте, текущей оценкой плотности теплового потока q_n и истинным значением q :

$$\frac{\Delta T_n}{\Delta T} = \frac{\bar{q}_n}{\bar{q}} . \quad (5)$$

Подстановка в (5) законов теплообмена (1)–(3) позволяет выразить искомые параметры q или α через известные величины T , T_n , q_n . Эти выражения используются как оценка параметра в следующем приближении:

$$q \approx q_n \frac{\Delta T}{\Delta T_n} \equiv q_{n+1} , \quad (6)$$

$$\alpha \approx \alpha_n \frac{\Delta T}{\Delta T_n} \frac{T_e - \bar{T}_n}{T_e - \bar{T}} \equiv \alpha_{n+1}, \quad (7)$$

$$\alpha \approx \frac{1}{T_e - \bar{T}} \left\{ \frac{\Delta T}{\Delta T_n} \left[\alpha_n (T_e - \bar{T}_n) - \varepsilon \sigma (\bar{T}^4 - T_\infty^4) \right] + \varepsilon \sigma (\bar{T}_n^4 - T_\infty^4) \right\} \equiv \alpha_{n+1}. \quad (8)$$

Формулы (6)–(8) представляют собой алгоритмы определения параметров теплообмена методом простой итерации, построенные для граничных условий (1)–(3) соответственно. В общем случае сходимость данных алгоритмов аналитически не доказана, но исследована в главах 2 и 3 диссертации численно и экспериментально для типичных случаев неоднородного теплообмена.

В пункте 1.4 представлены алгоритмы определения локальной плотности теплового потока по результатам измерений эволюции температуры датчика, установленного вблизи поверхности. В этом случае рассматривается задача теплопроводности (9) в области, включающей участок поверхности, датчик и фрагмент тела (Рис. 2):

$$\begin{aligned} \rho_{1,2} c_{1,2} \frac{\partial T_{1,2}}{\partial t} &= \lambda_{1,2} \nabla^2 T_{1,2} \\ S_{12} : T_1 &= T_2, \quad q_1 = -q_2 \\ S_w : q &= q_w(t) \\ S_e : &\text{условие Дирихле или Неймана} \\ t = 0 : T_{1,2} &= T_m \end{aligned} \quad (9)$$

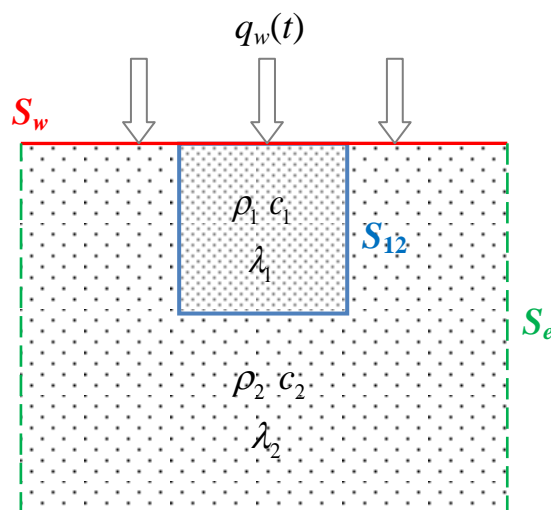


Рис. 2. Иллюстрация к задаче (9).

Параметры теплообмена на поверхности считаются локально однородными. Если функция $q_w(t)$ соответствует законам (1) или (2), задача определения неизвестных параметров упрощается при переходе к безразмерным переменным

$$X = \frac{x}{L}; Y = \frac{y}{L}; Z = \frac{z}{L}; \tau = \frac{\lambda_1}{\rho_1 c_1 L^2} \cdot t; \theta = \frac{\lambda_1}{L q_0} \cdot (T - T_w), \quad (10)$$

где L – условный характерный размер, $q_0 = q_w(0)$ – масштаб теплового потока.

В случае постоянного теплового потока (1) граничное условие на поверхности S_w в переменных (10) не содержит искомого параметра q :

$$S_w : -\frac{\partial \theta}{\partial \vec{n}_w} = 1. \quad (11)$$

Получив безразмерное решение прямой задачи теплопроводности в исследуемой области с условием (11) на границе, из условия минимума меры отклонения – суммы квадратов разностей безразмерных температур (12) – можно аналитически найти значение плотности теплового потока, и итерационный процесс не требуется:

$$D = \sum_i \left[\theta_s(\tau_i) - \frac{\lambda_1}{Lq} \cdot \Delta T(\tau_i) \right]^2 \rightarrow \min_q, \quad (12)$$

$$\frac{\partial D}{\partial q} = 0: q = \frac{\lambda_1}{L} \frac{\sum_i \Delta T^2(\tau_i)}{\sum_i \Delta T(\tau_i) \cdot \theta_s(\tau_i)}. \quad (13)$$

Здесь и далее θ_s – расчётная безразмерная температура датчика, T – данные эксперимента, индексом i нумеруются отсчёты времени τ_i .

В случае конвективного теплообмена (2) в безразмерное граничное условие на поверхности S_w входит число Био Bi :

$$S_w : -\frac{\partial \theta}{\partial \vec{n}_w} = 1 - Bi \cdot \theta_w, \quad Bi = \frac{\alpha L}{\lambda_1}. \quad (14)$$

Мера отклонения расчётных и экспериментальных температур датчика содержит второй неизвестный параметр – масштаб температур β :

$$D = \sum_i [\theta_s(Bi, \tau_i) - \beta \cdot \Delta T(\tau_i)]^2, \quad \beta = \frac{\lambda_1}{L q_0}. \quad (15)$$

Для поиска минимума D при неизвестном виде функции $\theta_s(\text{Vi})$ предложен итерационный алгоритм на основе метода секущих. По двум частным решениям задачи (9) с условием (2) при Vi_1 и Vi_2 строится локальная зависимость $\theta_s(\text{Vi})$ в линейном приближении

$$\theta_s(\text{Vi}) \approx \theta_s(\text{Vi}_1) + \frac{\theta_s(\text{Vi}_2) - \theta_s(\text{Vi}_1)}{\text{Vi}_2 - \text{Vi}_1} \cdot (\text{Vi} - \text{Vi}_1), \quad (16)$$

и минимизируется линеаризованная мера отклонения D_L :

$$D_L = \sum_i [\theta_1(\tau_i) + \delta \cdot \varphi(\tau_i) - \beta \cdot \Delta T(\tau_i)]^2 \rightarrow \min_{\delta, \beta}, \quad (17)$$

$$\frac{\partial D_L}{\partial \beta}, \frac{\partial D_L}{\partial \delta} = 0: \begin{pmatrix} \sum_i \varphi^2(\tau_i) & -\sum_i \varphi(\tau_i) \Delta T(\tau_i) \\ -\sum_i \varphi(\tau_i) \Delta T(\tau_i) & \sum_i \Delta T^2(\tau_i) \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \delta \\ \beta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\sum_i \varphi(\tau_i) \theta_1(\tau_i) \\ \sum_i \Delta T(\tau_i) \theta_1(\tau_i) \end{pmatrix}, \quad (18)$$

где $\delta = \text{Vi} - \text{Vi}_1$, $\varphi = (\theta_2 - \theta_1) / (\text{Vi}_2 - \text{Vi}_1)$, $\theta_{1,2} = \theta_s(\text{Vi}_{1,2})$.

Из решения системы (18) найдём значения β и $\text{Vi}_3 = \text{Vi}_1 + \delta$. Если при этих значениях отклонение D (15) больше допустимого, выберем новую пару частных решений $\theta_3 = \theta(\text{Vi}_3)$ и θ_1 либо θ_2 (предпочтение отдаётся решению, которое лежит ближе к экспериментальным данным) и по (16)–(18) определим следующее приближение. Продолжая процесс, найдём точку минимума $D(\text{Vi}, \beta)$ и соответствующие значения параметров α и T_e граничного условия (2):

$$\alpha = \frac{\lambda_1}{L} \cdot \text{Vi}, \quad T_e = \frac{1}{\beta \cdot \text{Vi}} + T_{in}. \quad (19)$$

Таким образом, параметры конвективного теплообмена можно определить итерационным методом, варьируя при повторных решениях задачи теплопроводности только число Vi .

Для граничного условия конвективного теплообмена с излучением (3) обезразмеривание (10) не упрощает постановку задачи минимизации отклонения температур, и необходимо применять общие методы численной оптимизации.

Глава 2 посвящена численному исследованию сходимости и точности разработанных итерационных алгоритмов определения теплового потока. Исследование проводилось методом математического моделирования для

характерных случаев двух- и трёхмерного теплообмена, соответствующих тепловому эксперименту в установках ЦАГИ. Моделирование включало следующие этапы:

1. Расчёт температур T при заданном распределении тепловых потоков q .
2. Определение теплового потока итерационным методом:
 - 1) расчёт начального приближения $q_{\text{нач}}$;
 - 2) расчёт последующих приближений q_n и температур T_n .
3. Анализ отклонений между q_n и q и между T_n и T .

В пункте 2.1 кратко описаны методы, которые применялись для численного моделирования в главе 2 (а также при обработке результатов эксперимента в главе 3). Численное решение задач теплопроводности в двух- и трёхмерной постановке отыскивалось методом конечного объёма (использовалась разностная схема 3-го порядка аппроксимации по пространству и 2-го – по времени, число ячеек в расчётных сетках – от 10^4 до 10^6 , число шагов по времени – не менее 100), в одномерной постановке – аналитическими методами или методом прямых. Процедуры численного моделирования и обработки расчётных и экспериментальных данных были реализованы средствами программных пакетов ANSYS и MathCad (лицензии ФАУ «ЦАГИ»).

В пункте 2.2 рассмотрена модельная задача двумерного распространения тепла в объёме цилиндра с толстой стенкой при неоднородном внешнем тепловом потоке. Для случая постоянного по времени теплового потока (1) предложена процедура решения прямой и обратной граничной задач теплопроводности с помощью метода разделения переменных. Решение прямой задачи использовалось для исследования сходимости итерационного алгоритма (6). Был выбран цилиндр с отношением толщины стенки к внешнему радиусу $h/R=0.3$ (Рис. 3), что соответствует условиям эксперимента, описанного в 3-й главе работы. Внешний тепловой поток задавался экспоненциальной функцией

$$q(\varphi) = q_0 \exp\left(-\frac{\varphi^2 R^2}{2\sigma^2}\right). \quad (20)$$

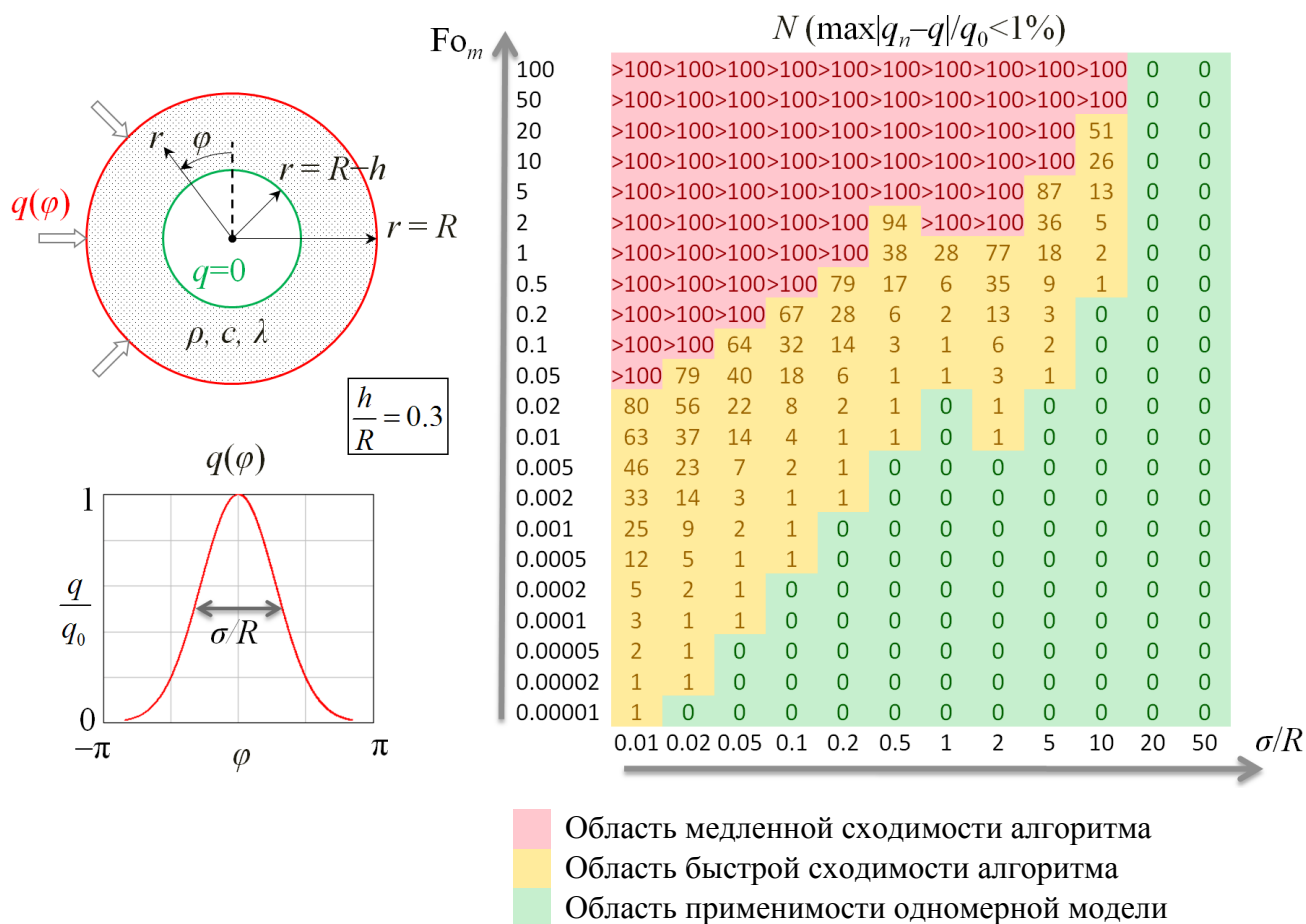


Рис. 3. Параметры модельной задачи и число итераций N , требуемое для оценки распределения q с точностью 1%.

Моделирование проводилось для набора задач, в котором варьировались ширина максимума теплового потока σ и число Фурье

$$Fo_m = \frac{\lambda}{\rho c} \frac{t_m}{R^2}. \quad (21)$$

При каждой комбинации значений σ и Fo_m вычислялось распределение температуры на внешней поверхности цилиндра ($r=R$) в момент времени t_m . Затем с помощью алгоритма (6) и решения прямой двумерной задачи теплопроводности определялось распределение теплового потока $q_n(\varphi)$ и сравнивалось с истинным распределением (20). Начальное приближение рассчитывалось по упрощённой одномерной модели теплопроводности. После выполнения условия $\max|q_n - q|/q_0 < 1\%$ алгоритм останавливался.

Требуемое в каждом случае число итераций N приведено в таблице на Рис. 3. Жёлтым цветом выделена область значений σ и Fo_m , в которой алгоритм сходится достаточно быстро ($1 < N \leq 100$). Её размеры показывают, что итерационный метод с двумерной моделью теплопроводности позволяет расширить допустимые условия измерения температур на 2–3 порядка по числу Фурье и на несколько порядков по степени неоднородности теплового потока относительно границ применимости одномерной модели (границ области, выделенной зелёным, в которой $N=0$). Также для данного набора задач было исследовано влияние ошибок исходных данных (распределения температур) на скорость сходимости алгоритма.

В пункте 2.3 рассмотрены пять модельных задач, в которых с помощью алгоритмов (7) и (8) определялось распределение коэффициента теплоотдачи при числах Фурье порядка 1. Условия задач (Рис. 4) соответствовали эксперименту в установках ЦАГИ.

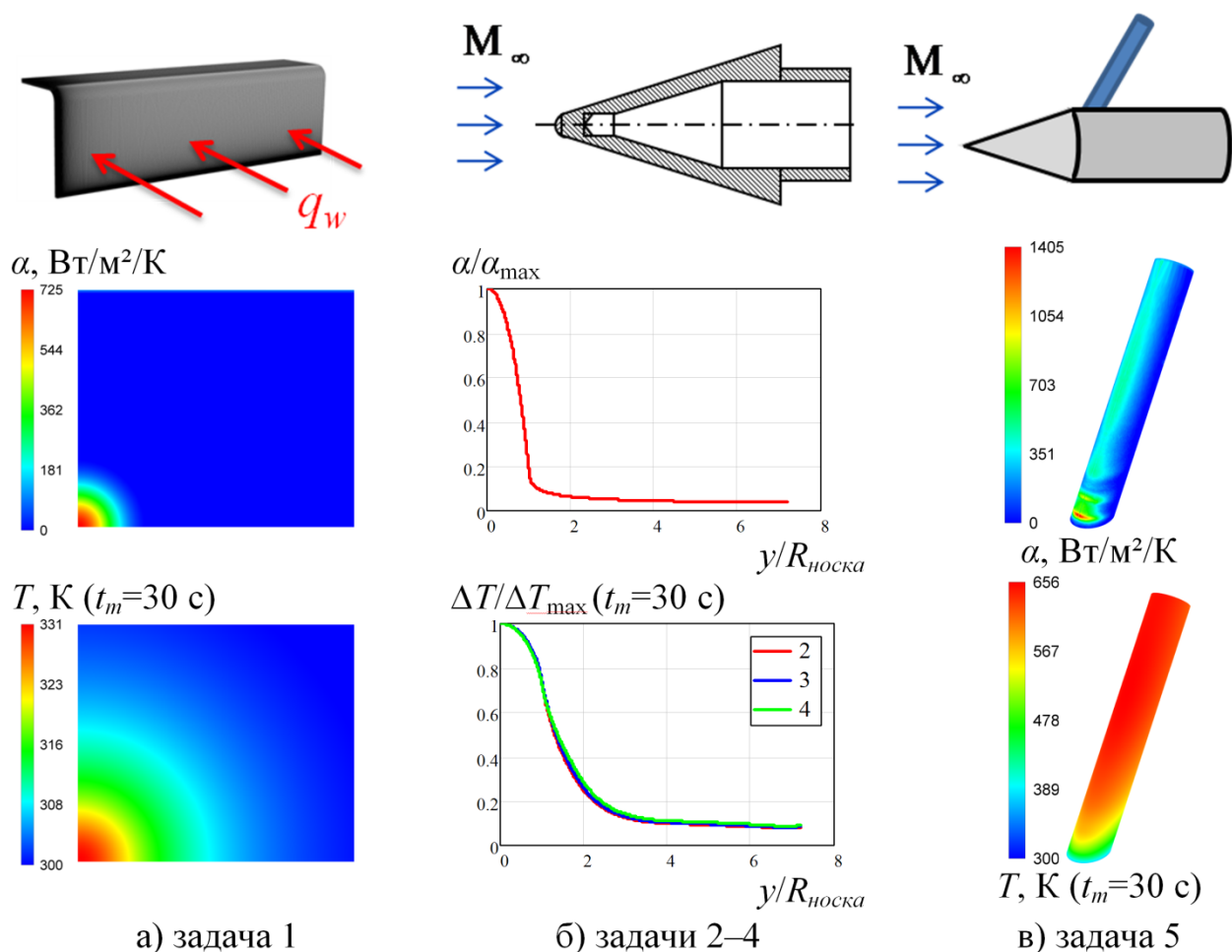


Рис. 4. Условия модельных задач 1–5.

В задаче 1 (Рис. 4а) рассматривался теплообмен плоской пластины, нагреваемой струёй горячего воздуха на стенде ИТГУ ($M \ll 1$, $T_0=370$ К). В задачах 2–4 (Рис. 4б) моделировался нагрев затупленного конуса в условиях испытаний на ИТГУ ($M \ll 1$, $T_0=370$ К), в АДТ Т-117 ($M_\infty=7.5$, $T_0=750$ К) и ВАТ-104 ($M_\infty=5$, $T_0=9000$ К). В последнем случае учитывалось тепловое излучение. В задаче 5 (Рис. 4в) моделировался теплообмен цилиндра, установленного под углом скольжения 30° в державку с конической носовой частью, в потоке АДТ Т-117 ($M_\infty=7.5$, $T_0=750$ К). Для каждого случая на Рис. 4 приведено заданное распределение коэффициента теплоотдачи α на нагреваемой поверхности (температура T_e полагалась равной T_0) и поле температур T в момент времени $t_m=30$ с, используемое для определения коэффициента теплоотдачи итерационным методом.

Результаты моделирования показали сходимость и высокую точность алгоритмов (7) (задачи 1,2,3,5) и (8) (задача 4) при числах Фурье порядка 1. Контрольные величины $\max|T_n - T|/\Delta T_{\max}$ и $\max|\alpha_n - \alpha|/\alpha_{\max}$ монотонно уменьшались, и в задачах 1–4 искомое распределение удалось определить с точностью 1% менее чем за 100 итераций (Рис. 5).

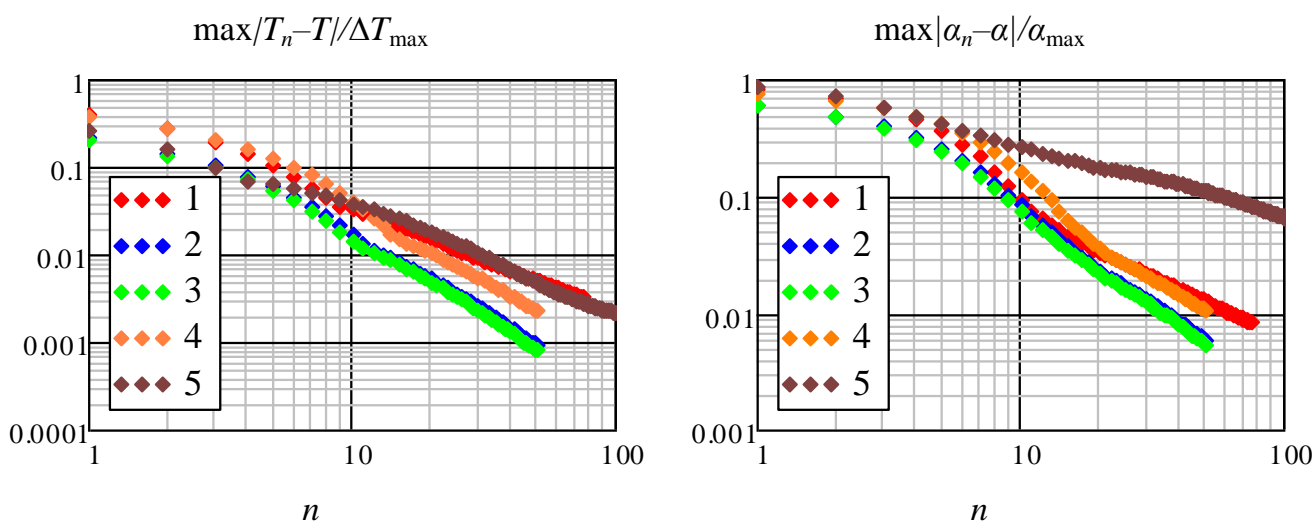


Рис. 5. Относительное отклонение расчётных и измеренных (заданных) температур и точность оценки коэффициента теплоотдачи в задачах 1–5 в зависимости от номера итерации n .

В пункте 2.4 приведены результаты моделирования теплообмена датчиков локального теплового потока двух типов: калориметра цилиндрической формы и поверхностной термопары в форме тонкой ленточки (Рис. 6).

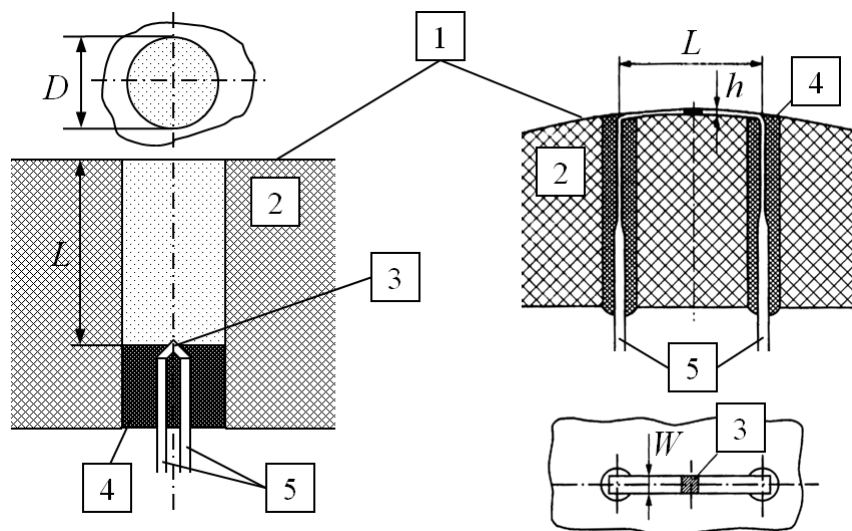


Рис. 6. Схема датчика-калориметра (слева) и поверхностной термопары (справа): 1 – нагреваемая поверхность, 2 – материал тела, 3 – спай термопары, 4 – клей, 5 – термоэлектродные провода.

Для двух датчиков типичной конфигурации с помощью двумерной модели теплопроводности вычислялась эволюция температуры спая термопары $T(t)$ при 6 значениях числа Bi в условии (14) на нагреваемой поверхности. К временному ряду $T(t_i)$ применялись алгоритмы (13) и (16)–(18) и традиционные методы определения теплового потока, основанные на упрощённой модели теплообмена датчика и градуировке. Было исследовано также влияние ошибок исходных данных – теплофизических свойств датчика и тела.

Результаты моделирования показали быструю сходимость алгоритма (16)–(18). Ошибка определения параметров теплообмена составила менее 1% после 1÷12 итераций. При использовании традиционных методов ошибка достигала 20÷30% в зависимости от числа Bi , что объясняется включением постоянных градуировочных коэффициентов в упрощённую модель теплообмена датчика (на практике определяемых лишь при одном значении Bi).

В главе 3 представлены результаты апробации итерационного метода и алгоритмов определения теплового потока в экспериментальных исследованиях.

Пункты 3.1, 3.2, 3.3 посвящены исследованиям, в которых применялись алгоритмы (6) и (7) для обработки панорамных измерений температуры.

В АДТ УТ-1М при $M_\infty=8$, $T_0=750$ К были выполнены тепловые испытания цилиндра малого радиуса при трёх значениях числа Рейнольдса и числа Фурье (пункт 3.1). Цилиндры радиусом 5 мм, изготовленные из различных материалов, устанавливались под углом скольжения 30° в державку с конической носовой частью (см. Рис. 4в). При обтекании модели в нижней части цилиндра возникала область неоднородного трёхмерного теплообмена (Рис. 7). По измеренному методом ЛПТ распределению температуры определялась плотность теплового потока при условии (1) с помощью алгоритма (6).

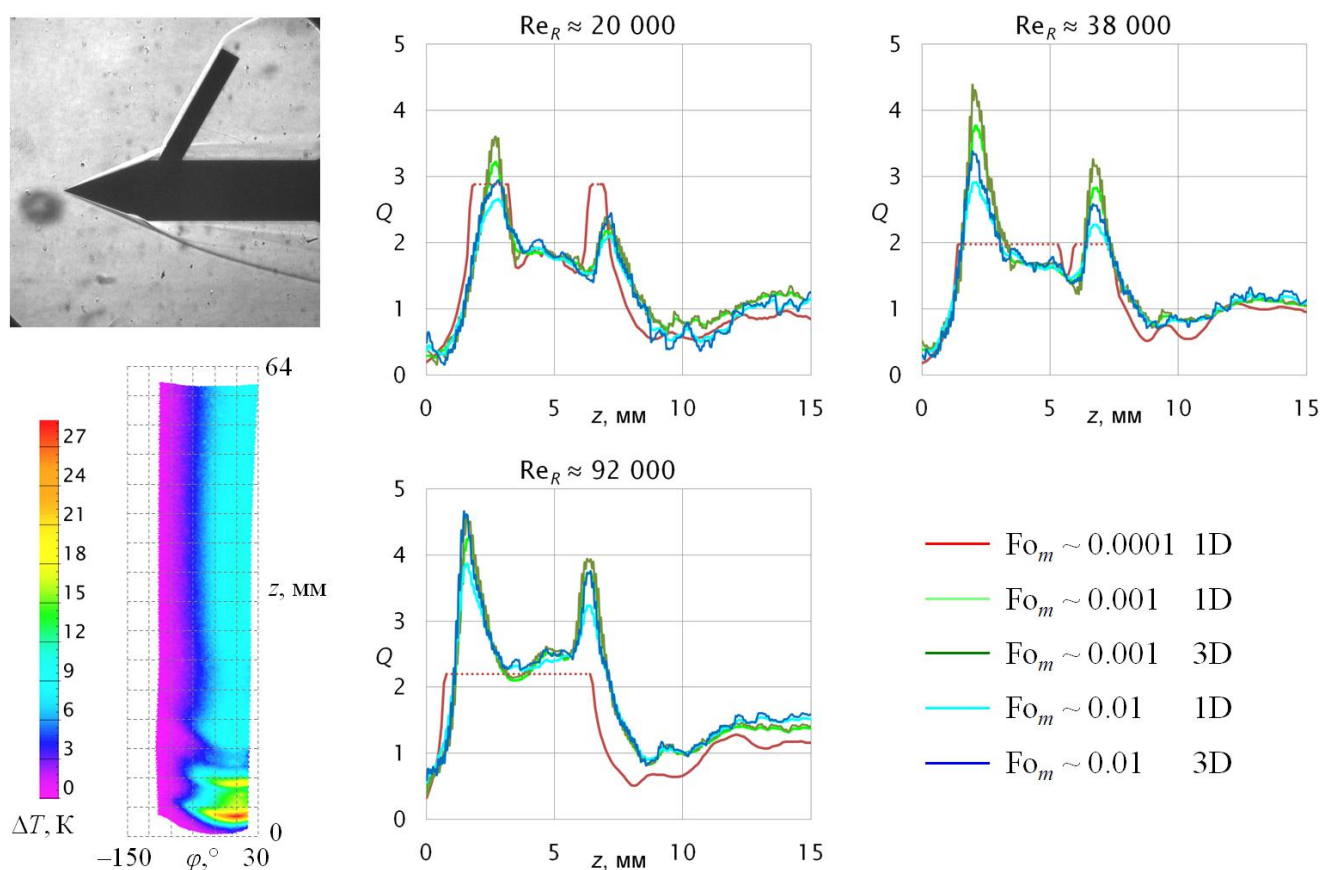


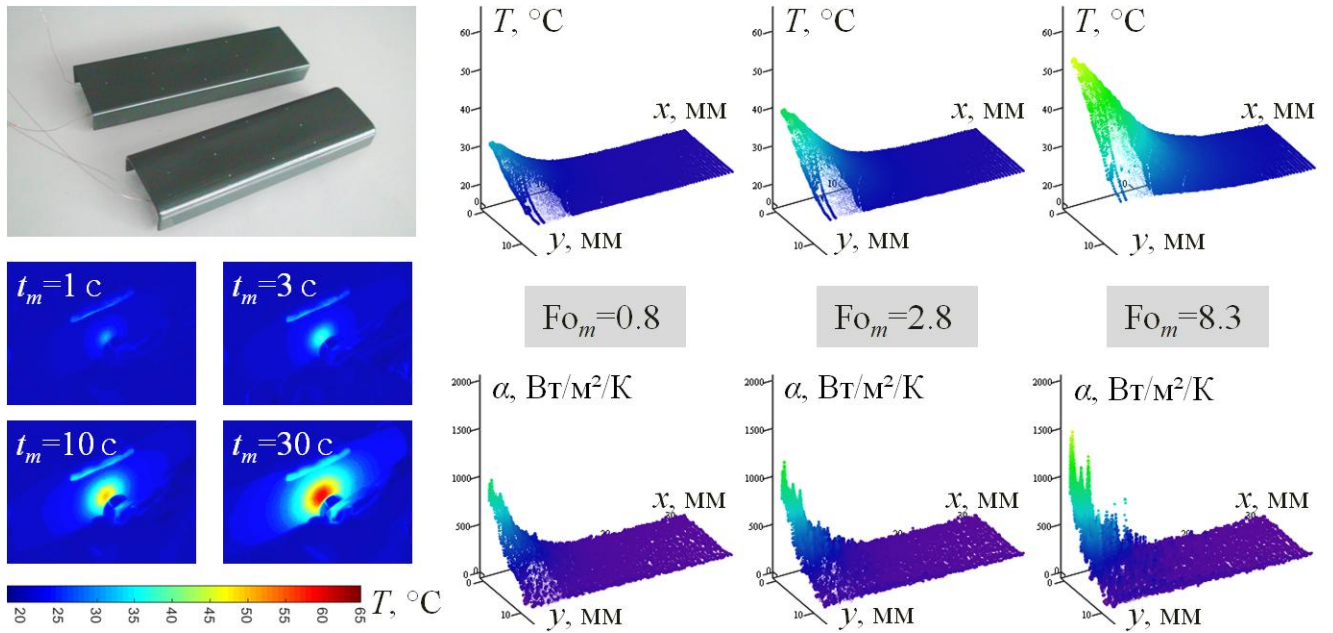
Рис. 7. Картина визуализации обтекания, пример распределения температуры и профили безразмерной плотности теплового потока $Q=q/q_0$ вдоль линии торможения ($\varphi=0$) на поверхности цилиндра в эксперименте в АДТ УТ-1М.

Итерационный метод с трёхмерной моделью теплопроводности позволил уточнить распределение плотности теплового потока $q(\varphi, z)$ в нижней части цилиндра при числах Фурье (21) $Fo_m \sim 0.001$ и $Fo_m \sim 0.01$, при которых одномерная модель теплопроводности неприменима, и оценка q с её помощью занижена в области максимумов (см. Рис. 7). Требуемое число итераций составило $N \leq 5$. Эксперимент также показал преимущество моделей из металлов – менее резкий градиент температур при сильной неоднородности теплообмена. Только на металлических цилиндрах удалось измерить максимумы температуры и теплового потока. На цилиндре из теплоизоляционного материала температура превысила верхнюю границу диапазона градуировки термочувствительного покрытия, и часть информации была утеряна (пунктирные отрезки красной кривой на Рис. 7).

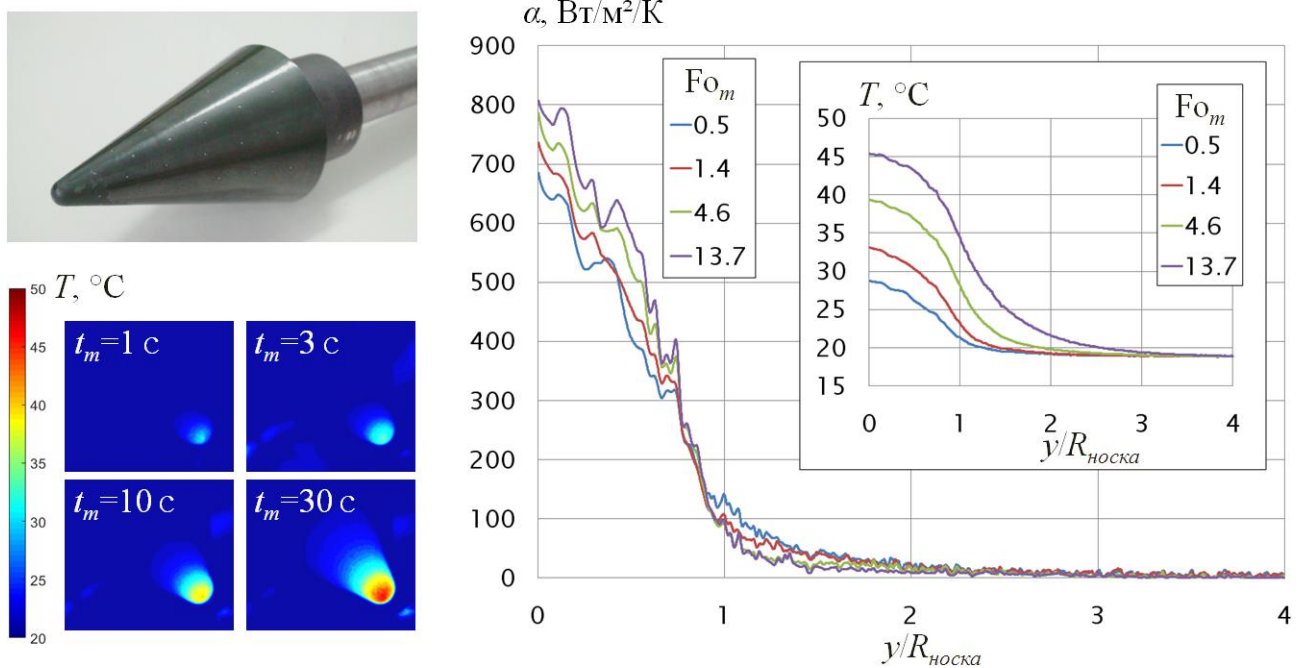
В исследовании на градуировочной установке ИТГУ (пункт 3.2) определялось распределение коэффициента теплоотдачи α в граничном условии (2) с помощью алгоритма (7) на поверхности металлических тел, обтекаемых струей горячего воздуха – пластины (Рис. 4а, 8а) и затупленного конуса (Рис. 4б, 8б) – по распределению температуры поверхности, измеренному с помощью тепловизора при числах Фурье около 1 и выше.

Для пластины (Рис. 8а) с увеличением числа Фурье возрастала чувствительность оценки α к ошибкам исходных данных, и алгоритм конструировал распределение коэффициента теплоотдачи с множеством узких высоких пиков. Для конуса (Рис. 8б) при всех значениях Fo_m получены сравнительно гладкие распределения коэффициента теплоотдачи, что объясняется осреднением измеренных температур по нескольким образующим и меньшей размерностью модели теплопроводности (2D). В целом результаты показали работоспособность алгоритма (7) при больших числах Фурье и его быструю сходимость ($N=3 \div 20$ итераций для конуса).

В АДТ Т-117 были проведены тепловые испытания металлической модели десантного модуля ДМ-18 проекта «ЭкзоМарс» при осесимметричном обтекании (пункт 3.3).



а) пластины с лицевой поверхностью 100x30 мм



б) затупленный конус ($R_{носка}=5$ мм, угол полураствора – 17°)

Рис. 8. Фотографии тел, примеры термограмм в эксперименте на ИТГУ, распределения температуры и коэффициента теплоотдачи при различных значениях числа Фурье $Fo_m = \lambda t_m / \rho c d^2$ ($d=3$ мм): а) на $1/4$ части лицевой поверхности пластины, б) вдоль образующей конуса.

По распределению температуры поверхности, измеренному с помощью тепловизора, определялось распределение коэффициента теплоотдачи α в граничном условии (2) с помощью алгоритма (7) и двумерной модели теплопроводности при нескольких значениях числа $Fo_m = \lambda t_m / \rho c r^2$ ($r=2.4$ мм, см. Рис. 9). Результаты сравнивались с данными, полученными ранее методом термоиндикаторов плавления на геометрически подобной модели из теплоизоляционного материала.

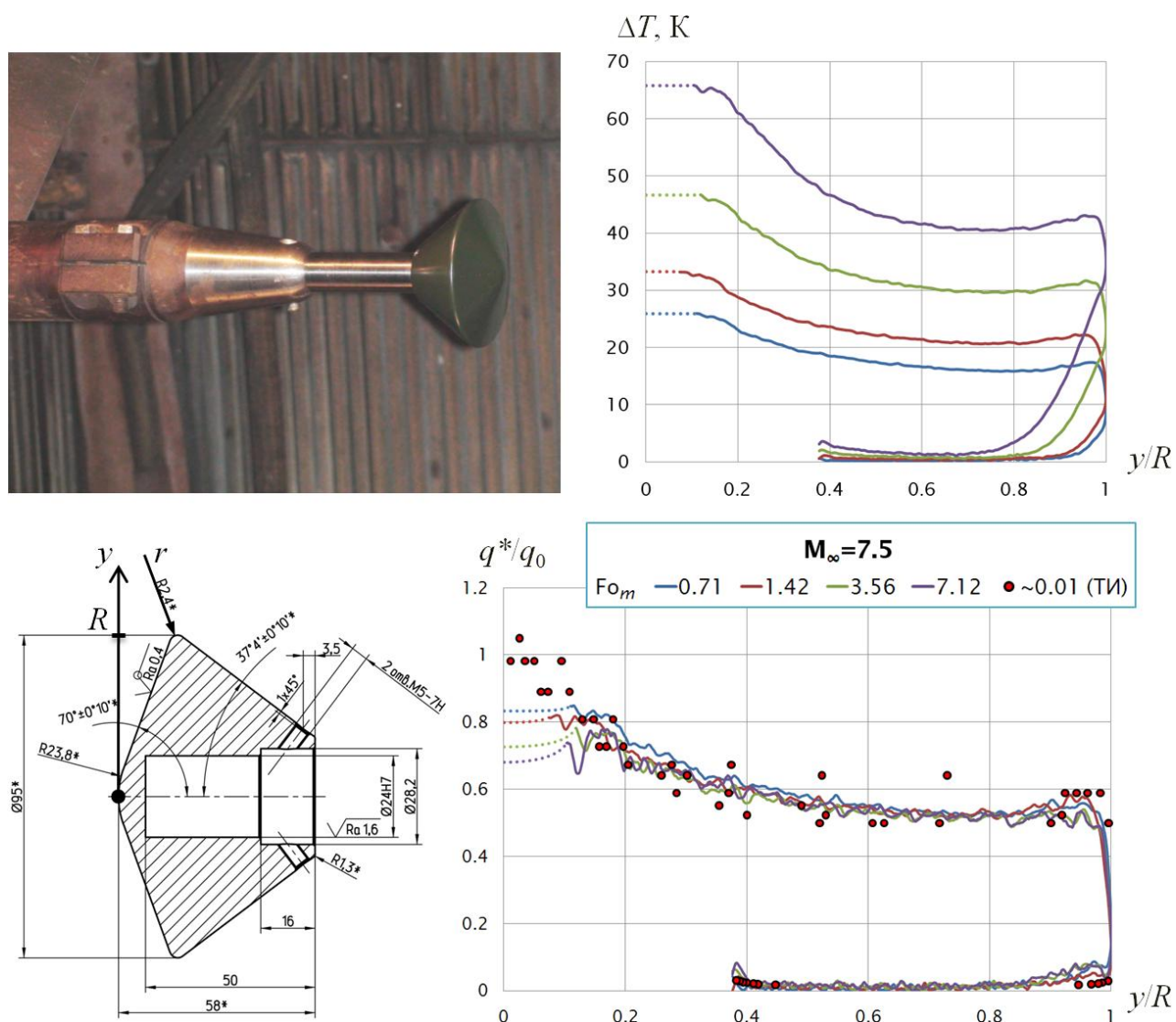


Рис. 9. Фотография и схема металлической модели ДМ-18, пример результатов тепловых испытаний модели в АДТ Т-117 на режиме $M_\infty=7.5$. ТИ – термоиндикатор плавления; $q^* \equiv q_w|_{t=0} = \alpha \cdot (T_0 - T_{in})$, q_0 – характерная плотность теплового потока в критической точке модели.

Эксперимент показал возможность практического применения итерационного метода и алгоритма (7). Требуемое число итераций составило $N=10\div 100$ (в зависимости от числа Фурье), а результаты согласуются с имеющимися данными. На Рис. 9 показан пример распределений температуры и теплового потока по внешней образующей модели на режиме $M_\infty=7.5$, $T_0=720$ К. Вблизи носка модели не удалось измерить температуру поверхности из-за малого угла наблюдения, и для замыкания задачи теплопроводности исходные данные были искусственно дополнены постоянным значением (пунктирная линия).

Пункты 3.4 и 3.5 посвящены применению алгоритмов обработки локальных измерений температуры датчиками.

В эксперименте на установке ИТГУ (пункт 3.4) с помощью 4 датчиков (2 датчиков-калориметров и 2 поверхностных термопар), установленных в плоскую поверхность тела из теплоизоляционного материала, определялись параметры конвективного теплообмена на поверхности при условии (2) и сравнивались с ожидаемыми значениями, соответствующими режиму работы установки. Использовался как итерационный алгоритм (16)–(18), так и традиционные методы с градуировкой датчиков на одном из режимов. Также был применён метод термоиндикаторов плавления.

Результаты (Таблица 1) показали, что итерационный метод сравним по точности с классическими методами на основе градуировки в области их применимости (установка не позволяет варьировать число Био, поэтому постоянные градуировочные коэффициенты в данном случае соответствовали условиям эксперимента). При этом итерационный метод не требует градуировки, позволяет оценить два параметра α и T_e , универсален относительно конструкции датчика, применим в широком диапазоне условий теплообмена (значений числа Био), реализующихся на поверхности тел в АДТ.

В пункте 3.5 представлены результаты тепловых испытаний в АДТ Т-117 модели спускаемого аппарата, в которых для определения теплового потока применялись три метода: метод термоиндикаторов плавления, тепловизионный метод, измерения с помощью поверхностных термопар. Данные измерений

температуры термопарами были обработаны с использованием двумерной модели теплообмена датчика и алгоритмов (13) и (16)–(18). Результаты, полученные различными средствами и методами измерений, согласуются друг с другом (Рис. 10). Применение датчиков и алгоритма (16)–(18) позволило оценить второй параметр теплообмена T_e .

Таблица 1. Результаты определения теплового потока на 3 режимах работы ИТГУ по данным двукратных измерений 4 датчиками

Метод определения теплового потока	Итерационный метод, двумерная модель теплопроводности			Классический метод, градуировка на режиме-2	
	Режим-1	Режим-2	Режим-3	Режим-1	Режим-3
Режим работы установки					
$\max N$	4	3	3	-	-
$\max q^* - q /q$	4%	6%	7%	7%	2%

N – число итераций алгоритма (16)–(18); q – плотность теплового потока по данным датчика режима работы установки; q^* – оценка плотности теплового потока; при использовании условия (2) $q^* \equiv q_w|_{t=0} = \alpha \cdot (T_e - T_{in})$.

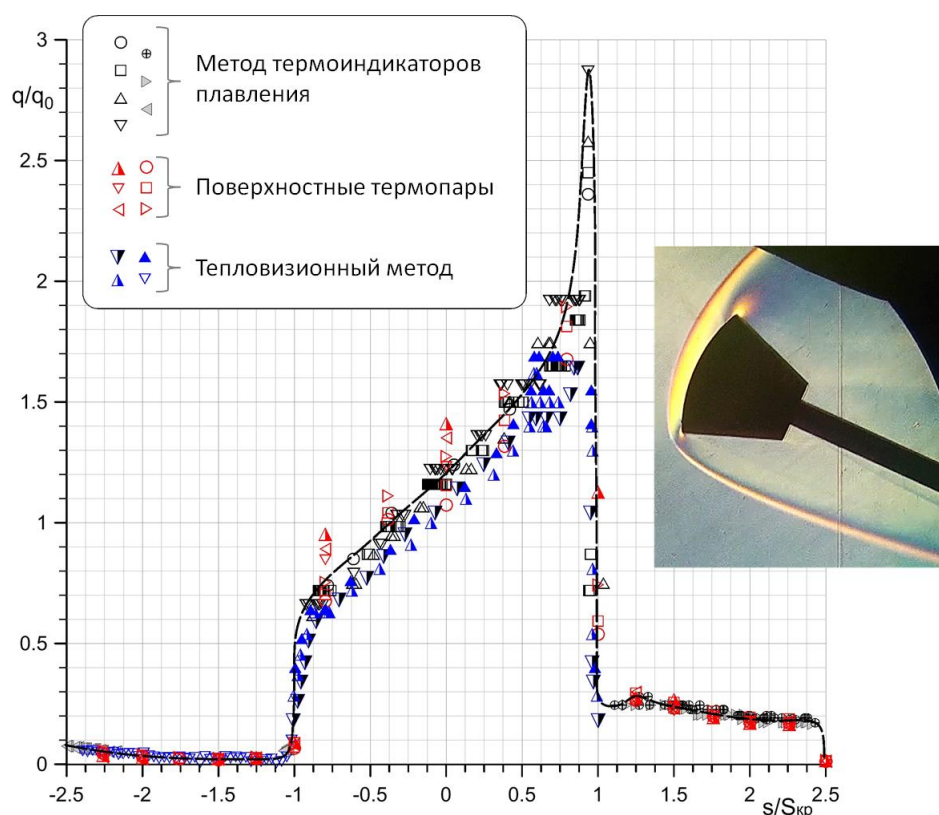


Рис. 10. Результаты тепловых испытаний модели спускаемого аппарата в АДТ Т-117 на режиме $M_\infty=7.5$, $\alpha=24^\circ$: распределение плотности теплового потока в плоскости угла атаки модели, картина визуализации обтекания.

В **заключении** кратко изложены основные результаты работы.

1. Разработан новый вариант итерационного метода определения теплового потока при неоднородном распространении тепла, в рамках которого рассмотрены три вида граничных условий на поверхности твёрдого тела (постоянный тепловой поток, конвективный теплообмен, конвективный теплообмен с излучением) и сформулированы оригинальные алгоритмы определения неизвестных параметров теплообмена по результатам панорамных или локальных измерений температуры.

2. Представлены результаты численных исследований итерационной сходимости и точности предложенных алгоритмов в нескольких модельных задачах, соответствующих тепловому эксперименту в установках ЦАГИ. Показано, что итерационный метод применим в более широком диапазоне значений числа Фурье (для панорамных измерений) и числа Био (для локальных измерений), чем традиционные методы определения теплового потока. Для некоторых случаев исследовано влияние ошибок исходных данных.

3. Приведены результаты экспериментальных исследований на установках ЦАГИ УТ-1М, ИТГУ, Т-117, подтверждающие работоспособность предложенных алгоритмов и их достаточную точность (не ниже точности традиционных методов в области их применимости). Показано, что внедрение итерационного метода позволило существенно расширить возможности теплового эксперимента в аэродинамических трубах, а именно:

- при проведении панорамных измерений удалось увеличить на 1–2 порядка допустимые значения числа Фурье и, следовательно, ослабить ограничения по теплопроводности применяемых материалов, кривизне поверхности тела, продолжительности эксперимента и степени неоднородности распределения тепловых потоков;

- при обработке результатов локальных измерений теплового потока дискретными датчиками учитывался теплообмен датчика с материалом тела на различных тепловых режимах без проведения градуировок, а также были определены дополнительные параметры теплообмена.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, входящих в перечень ВАК:

1. **[Индексируется базой данных RSCI]** Экспериментальное исследование аэротермодинамических характеристик десантного модуля проекта «ЭкзоМарс» при гиперзвуковых скоростях / Бражко В.Н., Давлеткильдеев Р.А., Дроздов С.М., Федоров Д.С., Шеметов И.М. // Ученые записки ЦАГИ, 2020, т. 51, №1, с. 48–53.

2. **[Индексируется базой данных RSCI]** Метод определения теплового потока на поверхности тел по результатам измерений температуры при неоднородной теплопередаче / Шеметов И.М. // Ученые записки ЦАГИ, 2022, т. 53, №2, с. 45–57.

Другие публикации:

[Индексируется базой данных RSCI] Экспериментальное определение аэротермодинамических характеристик десантного модуля Экзомарс-2018 при гиперзвуковых скоростях / Бражко В.Н., Дроздов С.М., Давлеткильдеев Р.А., Федоров Д.С., Шеметов И.М. // В сборнике: Актуальные вопросы проектирования автоматических космических аппаратов для фундаментальных и прикладных научных исследований. Посвящается 80-летию Акционерного общества «Научно-производственное объединение им. С.А. Лавочкина». АО «НПО Лавочкина»; составитель В.В. Ефанов, 2017, с. 212–216.

Доклады на научных конференциях:

1. **59-я Всероссийская научная конференция МФТИ с международным участием (21-26.11.2016, г. Москва–Долгопрудный–Жуковский): Шеметов И.М., Дроздов С.М.** – Новые алгоритмы обработки данных измерений теплового потока на поверхности тел калориметрическими и термопарными датчиками.

2. **2-я научно-техническая конференция с международным участием «Инновационные автоматические космические аппараты для фундаментальных и прикладных научных исследований. Проблемы создания служебных и научных систем» (04-09.09.2017, г. Анапа): Бражко В.Н., Дроздов С.М., Давлеткильдеев Р.А., Федоров Д.С., Шеметов И.М.** –

Экспериментальное определение аэротермодинамических характеристик ДМ Экзомарс-2018 при гиперзвуковых скоростях.

3. Международная Конференция «Наука и технологии высокоскоростных ЛА 2018» (HiSST: International Conference on High-Speed Vehicle Science Technology) (26-29.11.2018, г. Москва): Drozdov S.M., Brazhko V.N., Davletkildiev R.A., Fedorov D.S., Shemetov I.M. – Experimental investigation of aero-thermodynamic characteristics of “ExoMars” project descent module at hypersonic velocities.

4. 17-я Российско-китайская конференция «Фундаментальные задачи аэродинамики, динамики, прочности и безопасности полетов ЛА.» (17th Russian-Chinese Conference on Fundamental Problems of Aircraft Aerodynamics, Flight Dynamics, Strength and Flight Safety) (11-14.10.2021, г. Жуковский, ЦАГИ): Shemetov I.M. – A method of surface heat flux determination from temperature measurements in case of multi-dimensional heat conduction.

5. Отраслевая конференция «Аэрогазодинамика и теплообмен летательных аппаратов» (27-28.09.2022, г. Королёв, ЦНИИМаш): Шеметов И.М. – Расчётная и экспериментальная апробация метода определения теплового потока при неоднородной теплопередаче в материале модели.