

## ОТЗЫВ НАУЧНОГО РУКОВОДИТЕЛЯ

о диссертации Шеметова Ивана Михайловича «Метод определения теплового потока на поверхности тел по результатам измерений температуры при неоднородной теплопередаче», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.5.12. Аэродинамика и процессы теплообмена летательных аппаратов

Диссертационная работа Шеметова Ивана Михайловича имеет целью повышение точности и расширение области применимости экспериментальных методов определения теплового потока в АДТ при помощи алгоритмов, учитывающих двух- и трехмерное распространение тепла в материале исследуемого тела. Актуальность данной тематики определяется высокими требованиями, предъявляемыми профильными КБ к точности и достоверности определения теплового потока на поверхности гиперзвуковых летательных аппаратов в экспериментальных установках. Особенно остро эта проблема стоит для аппаратов с большим аэродинамическим качеством в гиперзвуковом диапазоне скоростей. Аппараты такого рода имеют лобовые поверхности с малым радиусом закругления, который в масштабе модели не превышает 10 мм. В этом случае становятся неприменимы алгоритмы обработки экспериментальных результатов, основанные на решениях одномерного уравнения теплопроводности. Не помогают и эмпирические поправки на кривизну поверхности модели.

Серьезным препятствием на пути экспериментального определения плотности теплового потока является требование изготовления моделей из низкотеплопроводного материала, которое также следует из условий применимости одномерного уравнения теплопроводности в материале модели. В результате практически невозможно обеспечить геометрическое подобие формы слабозатупленных элементов модели и не гарантируется изотропность теплофизических свойств материала.

Указанные причины с неизбежностью наводят на мысль: нужно снять требование обеспечения одномерной теплопередачи в материале модели и разработать алгоритмы, учитывающие двух- и трехмерное распространение тепла. В этом и заключалась главная задача диссертации Шеметова И.М.

В тепловом эксперименте первичной информацией, как правило, являются данные измерений температуры на теле, а конечным результатом обработки должен быть тепловой поток на поверхности. В случае одномерной теплопередачи задача восстановления плотности теплового потока по температуре, измеренной в заданный момент времени, решена для большинства практически важных случаев, и существуют аналитические формулы, однозначно связывающие температуру и плотность теплового потока. Для двух- и трехмерного распространения тепла, в общем случае, нет однозначной зависимости распределения плотности теплового потока от распределения температуры. Более того, известно, что обратная задача теплопроводности не корректна.

Для построения робастных алгоритмов определения теплового потока, учитывающих неоднородность теплопередачи, Шеметов И.М. разработал и применил оригинальный итерационный метод, который предполагает, что плотность теплового потока на поверхности тела принадлежит заранее известному классу функций (соответствующему физической модели теплообмена) с несколькими неизвестными параметрами. Параметры теплообмена определяются итерационным алгоритмом, использующим многократное решение прямой задачи теплопроводности для последовательного уточнения значений искомых параметров из условия максимально точного совпадения расчетных и экспериментальных температур в точках измерений. Ключевым элементом метода является математический вид процедуры генерации следующего приближения, определяющий сходимость численных решений к экспериментальным данным.

В диссертации рассмотрены три класса функций, задающих граничное условие (закон теплообмена) на исследуемой поверхности: постоянный тепловой поток, конвективный теплообмен и комбинация конвективного теплообмена с излучением по закону Стефана-Больцмана. Алгоритмы, предложенные в работе, определяются только выбранной моделью теплообмена и универсальны относительно вида области, в которой решается уравнение теплопроводности. Они могут применяться к панорамным измерениям или дискретным датчикам любой конструкции.

В диссертации представлены результаты численных исследований итерационной сходимости и точности предложенных алгоритмов в нескольких модельных задачах, соответствующих тепловому эксперименту в аэродинамических установках. Показано, что итерационный метод применим в существенно (на 2-3 порядка) более широком диапазоне значений числа Фурье (для панорамных измерений) и числа Био (для локальных измерений), чем традиционные методы определения теплового потока. Исследовано влияние ошибок исходных данных. Приведены результаты экспериментальных исследований на установках ЦАГИ УТ-1М, ИТГУ, Т-117, подтверждающие работоспособность предложенных алгоритмов определения теплового потока и их достаточную точность. Показано, что внедрение итерационного метода позволило значительно расширить возможности теплового эксперимента в аэродинамических трубах.

Шеметов И.М. – высокообразованный, трудолюбивый и целеустремленный человек. Он является высококвалифицированным специалистом в области аэротермодинамики высокоскоростных летательных аппаратов.

Считаю, что кандидатская диссертация Шеметова Ивана Михайловича «Метод определения теплового потока на поверхности тел по результатам измерений температуры при неоднородной теплопередаче» выполнена на высоком научном уровне и соответствует всем требованиям ВАК, а Шеметов Иван Михайлович заслуживает присвоения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.5.12. Аэродинамика и процессы теплообмена летательных аппаратов.

Научный руководитель,  
начальник отделения ФАУ «ЦАГИ»,  
доктор физико-математических наук



Дроздов Сергей Михайлович  
Тел.: +7 (495) 556-49-21  
Эл. почта: sergey.drozdov@tsagi.ru

28 декабря 2023 г.

Подпись научного руководителя С.М. Дроздова заверяю  
Начальник управления персоналом ФАУ «ЦАГИ»



О.А. Власова

Организация:

Федеральное автономное учреждение «Центральный аэрогидродинамический институт имени профессора Н.Е. Жуковского» (ФАУ «ЦАГИ»)

Адрес:

140181, Российская Федерация, Московская обл., г. Жуковский, ул. Жуковского, д. 1