

DOI: 10.18698/0236-3941-2016-1-68-79

УДК 621.43

РЕШЕНИЕ ОБРАТНЫХ ВНЕШНИХ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ЗАДАЧ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ НА ПОВЕРХНОСТЯХ КАМЕРЫ СГОРАНИЯ ДВС

Н.А. Ивашенко, Л.Р. Неубург, Р.З. Кавтарадзе, И.Н. Алиев

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

e-mail: lloyd.neuburg@gmail.com; kavtaradzerz@mail.ru;

alievprof@yandex.ru

Разработаны метод и алгоритм решения обратных внешних нестационарных задач теплопроводности применительно к камере сгорания двигателей внутреннего сгорания, предназначенных для определения термических граничных условий на тепловоспринимающих поверхностях деталей. Проанализированы преимущества и недостатки различных методов. Представлен пример решения обратных внешних нестационарных задач теплопроводности для теплометрического элемента.

Ключевые слова: обратная задача, теплопроводность, граничные условия, датчик теплового потока.

SOLVING INVERSE TIME-DEPENDENT EXTERNAL HEAT CONDUCTION PROBLEMS FOR COMBUSTION CHAMBER SURFACES OF INTERNAL COMBUSTION ENGINE

N.A. Ivaschenko, L.R. Neuburg, R.Z. Kavtaradze, I.N. Aliev

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

e-mail: lloyd.neuburg@gmail.com; kavtaradzerz@mail.ru;

alievprof@yandex.ru

The article presents a method and algorithm for solving the inverse time-dependent external heat conduction problems in the combustion chamber of the internal combustion engine. Both the method and algorithm provide calculation of the thermal boundary conditions on the heat receiving surface parts. The authors analyze the advantages and disadvantages of different methods. The article describes an example of solving the inverse time-dependent external heat conduction problem for a heat sensor.

Keywords: inverse problem, heat conductivity, boundary condition, heat flux sensor.

Состояние вопроса. Цель исследования. Циклические изменения параметров граничных условий и вызываемые ими колебания температуры тепловоспринимающих поверхностей следует учитывать при анализе особенностей теплопередачи в пределах рабочего цикла поршневого двигателя. Закономерности сложного конвективно-радиационного теплообмена в цилиндрах поршневых двигателей устанавливают как расчетно-теоретическими методами, так и на базе

экспериментального изучения распределения плотностей нестационарного теплового потока по поверхностям камеры сгорания [1, 2]. Для измерения периодически изменяющихся плотностей теплового потока на поверхностях поршней, клапанов, головок и гильз цилиндров с успехом использовались поверхностные термопары и платиновые термометры сопротивления [3, 4]. Измеренные с помощью этих термоприемников колебания температуры поверхности раскладываются в ряд Фурье на гармонические составляющие, для каждой гармоники находится соответствующая ей гармоническая составляющая плотности теплового потока на поверхности тела в предположении одномерного распространения теплоты в полубесконечном пространстве, а затем суммируются составляющие плотности теплового потока. Таким образом оцениваются колебания плотности теплового потока в месте установки термоприемника, но для оценки постоянной составляющей плотности теплового потока необходимы дополнительные измерения. В работах А.К. Костина, Г.Б. Розенблита, G. Woschni и других, анализ которых приведен в [4], для нахождения нулевой линии использовался искусственный прием — определение момента равенства средней термодинамической температуры рабочего тела в цилиндре и температуры поверхности термоприемника. Средняя термодинамическая температура рабочего тела находилась путем обработки индикаторных диаграмм. Условность описанного приема очевидна. Во-первых, в рабочем теле наблюдается явная неоднородность температурного поля по пространству камеры сгорания в любой момент времени. Во-вторых следует учитывать, что в камере сгорания имеет место сложный радиационно-конвективный теплообмен. В-третьих, индикаторная диаграмма регистрируется и обрабатывается с определенными погрешностями, которые скажутся на погрешности оценки нулевой линии плотности теплового потока и постоянной его составляющей. Кроме того, равенство температуры газа и поверхности имеет место в зоне слабого изменения этих температур, что приводит к большим временным погрешностям в оценке момента равенства нулю плотности теплового потока и оценки постоянной составляющей. Одновременно с пульсациями температуры поверхности термоприемника (поверхностной термопары) требуется измерение температуры на глубине стенки, где отсутствуют колебания температуры (не проникают температурные волны), что градиентным методом давало возможность оценить величину среднего за цикл теплового потока (постоянную составляющую плотности теплового потока). Однако использование градиентного метода связано с проблемой надежной оценки координат спаев стационарных термопар и обеспечением одномерности теплового потока в месте измерения.

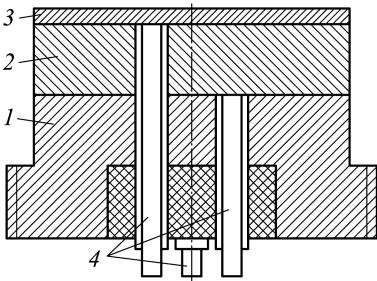


Рис. 1. Датчик теплового потока:
 1 — корпус; 2 — теплотметрический элемент (дополнительная стенка); 3 — защитный слой; 4 — электроды

Более предпочтительным представляется использование для оценки нестационарных плотностей тепловых потоков в поршневых двигателях датчиков тепловых потоков, основанных на принципе дополнительной стенки, впервые предложенных в [3]. При установке этих датчиков в камере сгорания ДВС предусматриваются мероприятия, обеспечивающие одномерность теплового потока в месте измерения и определение с высокой точностью координат спаев термопар [4],

а также уменьшение погрешностей измерений путем статической и динамической градуировки датчиков [3, 4].

Цель настоящего исследования — разработка и практическая реализация метода решения внешних обратных нестационарных задач теплопроводности для многослойной структуры датчика теплового потока с учетом наличия теплоизолирующего слоя нагара, а также пленок окислов и других подобных неоднородностей.

Краткое описание датчика. Основные уравнения. Конструкция датчика, используемого для определения нестационарного теплового потока на тепловоспринимающих поверхностях камеры сгорания, приведена на рис. 1.

Датчик состоит из корпуса 1, изготовленного из материала, теплопроводность которого близка к теплопроводности материала детали, в которой предполагается устанавливать датчик, константанового теплотметрического элемента 2 толщиной 1 мм, покрытого защитным слоем 3 меди толщиной 0,1...0,05 мм. Последний выполняет функцию контакта между электродом и теплотметрическим элементом для образования спая термопары и защиты теплотметрического элемента от непосредственного контакта с агрессивной средой в цилиндре двигателя. Теплотметрический элемент крепится диффузионной сваркой к торцу корпуса. В средней части датчика установлены три электрода 4. Простота и надежность конструкции такого датчика обеспечивает широкое использование их для измерений плотностей тепловых потоков в энергоустановках. Чувствительность таких датчиков оценивается в среднем величиной 400...500 Вт/(м·мкВ). В работе [3] датчики такого типа описаны достаточно подробно, а в работах [4, 5] приведено обоснование применению их для измерения нестационарных тепловых потоков в цилиндрах поршневых двигателей. Для восстановления плотности теплового потока на поверхности теплозащитного слоя датчика рассматривается нестационарная задача теплопроводности

для неоднородной пластины (теплометрический элемент с защитным слоем):

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a_1 \frac{\partial^2 T}{\partial X^2} \text{ при } X \in (0, l_1), \quad \frac{\partial T}{\partial t} = a_2 \frac{\partial^2 T}{\partial X^2} \text{ при } X \in (l_1, l_2), \quad (1)$$

$$\begin{aligned} T(X, 0) &= G(X), \quad T(l_1, t) = F(t), \\ \lambda \frac{\partial T(-l_2, t)}{\partial X} &= q(t), \quad \lambda_1 \frac{\partial T(0, t)}{\partial X} = \lambda_2 \frac{\partial T(0, t)}{\partial X}, \end{aligned} \quad (2)$$

где l_1 — толщина теплометрического элемента; l_2 — толщина защитного слоя; a_1, λ_1 — коэффициенты температуропроводности и теплопроводности теплометрического элемента; a_2, λ_2 — коэффициенты температуропроводности и теплопроводности защитного слоя.

Такая задача соответствует случаю двуслойной пластины (теплометрический элемент и защитный слой датчика теплового потока). В условиях рабочего процесса двигателя, особенно дизеля, где гетерогенный процесс сгорания сопровождается выделением сажи [6, 7], защитный слой датчика покрывается сажей, имеющей низкую теплопроводность, поэтому целесообразно рассматривать трехслойную структуру. Для многослойных пластин в принципе можно попытаться построить аналитическое решение и свести задачу к задаче с однородными граничными условиями. Однако математические трудности, возникающие при этом, очевидны. Поэтому имеет смысл использовать для решения задачи восстановления плотности нестационарного теплового потока на поверхности многослойной пластины численный метод решения, позволяющий получить решение для многослойных структур. Рассмотрим в качестве примера трехслойную структуру (пластину), состоящую из теплометрического элемента, защитного слоя и слоя сажи (рис. 2).

Необходимо оценить плотность теплового тока на поверхностях теплометрического элемента, поверхностях контакта защитного слоя и слоя сажи, имея значения колебаний температур поверхностей теплометрического элемента в пределах одного цикла двигателя. Пред-

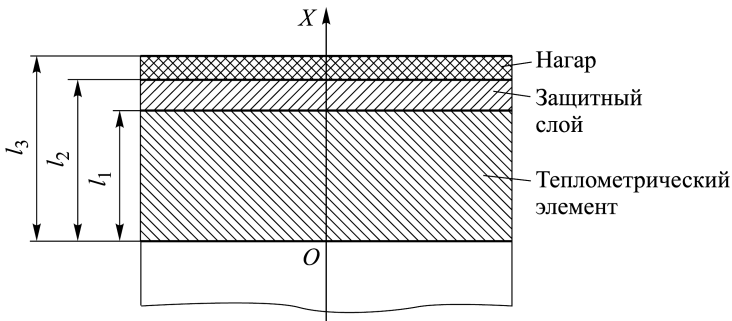


Рис. 2. Схема расчета датчика теплового потока, покрытого слоем нагара

полагая свойства материала в пределах слоев однородными, а температурное поле одномерным, системе уравнений, описывающей периодическое нестационарное температурное поле в рассматриваемой области, добавляется уравнение

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a_3 \frac{\partial^2 T}{\partial X^2} \quad \text{при } X \in (l_2, l_3), \quad (3)$$

соответствующее начальное условие (условие периодичности)

$$T(X, 0) = T(X, t) = G(X) \quad (4)$$

и условия сопряжения на поверхностях раздела слоев

$$\lambda_1 \frac{\partial T(l_1, t)}{\partial X} = \lambda_2 \frac{\partial T(l_1, t)}{\partial X}, \quad \lambda_2 \frac{\partial T(l_2, t)}{\partial X} = \lambda_3 \frac{\partial T(l_2, t)}{\partial X}. \quad (5)$$

Граничные условия первого рода (экспериментальная информация) на охлаждаемой и нагреваемой поверхностях теплотметрического элемента, а также условие второго рода на поверхности слоя сажи (восстанавливаемая плотность теплового потока) соответственно имеют вид

$$\begin{aligned} T(0, t) &= f(t), \\ T(l_1, t) &= F(t), \\ -\lambda_3 \frac{\partial T(l_3, t)}{\partial X} &= q(t), \end{aligned} \quad (6)$$

где l_1, l_2, l_3 – координаты верхних поверхностей слоев датчика (теплотметрического элемента).

Задача восстановления плотности теплового потока на поверхности слоя нагара может быть решена в два этапа. На первом этапе решается ОЗТ для теплотметрического элемента с заданием граничных условий первого рода на его поверхностях (экспериментально измеренные $f(0, t)$ и $F(l_1, t)$). Результатом этого этапа будет восстановленная плотность теплового потока на нагреваемой поверхности теплотметрического элемента $q(l_1, t)$.

На втором этапе, решив ОЗТ для системы защитный слой – слой сажи с комбинированным граничными условиями на поверхности $x = l_1$ (экспериментально зарегистрированная температура $T(l_1, t)$ и восстановленная при выполнении первого этапа плотность теплового потока $q(l_1, t)$), получим восстановленные значения плотностей тепловых потоков $q(l_2, t), q(l_3, t)$ и восстановленные колебания температуры $T(l_2, t)$ и $T(l_3, t)$.

Особенностью решения ОЗТ для двух этапов является необходимость учета условия периодичности (рассматриваем периодический установившийся режим, характерный для процесса в цилиндре ДВС).

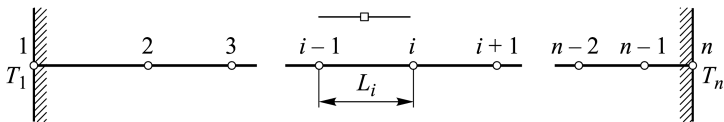


Рис. 3. Конечно-элементная модель теплотметрического элемента

Это условие может быть достигнуто методом установления. Для ускорения процесса установления в качестве начального условия целесообразно задавать в рассматриваемых подобластях начальное распределение температуры, соответствующее условному стационарному режиму (рассчитав начальное распределение температуры в каждой подобласти с заданием осредненных по времени граничных условий).

Для решения ОЗТ на каждом этапе используем модифицированный вариант МКЭ–МКО, при этом при решении ОЗТ на первом этапе целесообразно применить явную схему аппроксимации ОЗТ, а на втором этапе неявную схему.

Решение ОЗТ для теплотметрического элемента. Область теплотметрического элемента аппроксимируем одномерными конечными элементами (рис. 3), в пределах которых распределение температуры имеет вид линейной зависимости

$$T = [N_i, N_j] \cdot \left\{ \begin{matrix} T_i \\ T_j \end{matrix} \right\}, \quad (7)$$

где N_i, N_j — функция формы; T_i, T_j — значения температуры в узлах i и j .

Узлы конечно-элементной модели распределим в области со сгущением от узла 1 ($X = 0$) к узлу n , учитывая нарастание амплитуды колебания температуры при приближении к нагреваемой поверхности теплотметрического элемента. Каждому элементу поставим в соответствие значения теплофизических характеристик ($\lambda, c\rho$) для учета их зависимости от температуры. Поставив в соответствие каждому узлу контрольный объем и выполнив стандартные операции МКО, получим дискретный аналог уравнения теплопроводности и соответствующие конечно-разностные уравнения:

$$\begin{aligned} q_1 + \frac{\lambda_1}{L_1} (\bar{T}_2 - \bar{T}_1) &= \frac{1}{2\Delta t} c\rho_1 L_1 (T_1 - \bar{T}_1), \quad i = 1; \\ \frac{\lambda_{i-1}}{L_{i-1}} (\bar{T}_{i-1} - \bar{T}_i) + \frac{\lambda_i}{L_i} (\bar{T}_{i+1} - \bar{T}_i) &= \\ &= \frac{1}{2\Delta t} (c\rho_{i-1} L_{i-1} + c\rho_i L_i) (T_i - \bar{T}_i), \quad i = 2, \dots, n-1; \\ q_n + \frac{\lambda_{n-1}}{L_{n-1}} (\bar{T}_{n-1} - \bar{T}_n) &= \frac{1}{2\Delta t} c\rho_{n-1} L_{n-1} (T_n - \bar{T}_n), \quad i = n, \end{aligned} \quad (8)$$

где L_i — длина элемента; Δt — шаг по времени, выбираемый по условию устойчивости; \bar{T} — значение температуры на предыдущем вре-

менном слое. Поскольку значения температуры в граничных узлах известны, то, задав $T_1 = f(t)$ и $T_2 = F(t)$, можно на очередном временном слое вычислить значения температуры в узлах $i = 2, \dots, n-1$ из второго уравнения системы (8):

$$T_i = \bar{T}_i + \frac{2\Delta t}{(c\rho_{i-1}L_{i-1})} \left(\frac{\lambda_{i-1}}{L_{i-1}} (\bar{T}_{i-1} - \bar{T}_i) + \frac{\lambda_i}{L_i} (\bar{T}_{i+1} - \bar{T}_i) \right), \quad i = 2, \dots, n-1, \quad (9)$$

а после этого вычислить значения плотностей тепловых потоков в узлах 1 и n по формулам

$$\begin{aligned} q_1 &= \frac{\lambda_1}{L_1} (\bar{T}_1 - \bar{T}_2) + \frac{1}{2\Delta t} c\rho_1 L_1 (T_1 - \bar{T}_1), \\ q_n &= -\frac{\lambda_{n-1}}{L_{n-1}} (\bar{T}_{n-1} - \bar{T}_n) = \frac{1}{2\Delta t} c\rho_{n-1} L_{n-1} (T_n - \bar{T}_n). \end{aligned} \quad (10)$$

Перед началом вычислений по временным шагам на первом временном слое необходимо рассчитать стационарное распределение температуры в узлах $i = 2, \dots, n$, задав в узлах 1 и 2 граничные условия первого рода

$$T_1 = \frac{1}{\theta} \int_{\theta} f(t) dt, \quad T_n = \frac{1}{\theta} \int_{\theta} f(t) dt. \quad (11)$$

Вычисления по временным шагам необходимо продолжать до выполнения условий периодичности. Итерационный процесс завершается при выполнении условия $q_{1s} = q_{ns}$, где q_{1s} и q_{ns} — средние за период цикла θ значения плотностей тепловых потоков на теплопринимающей и теплоотдающей поверхностях теплотрического элемента (узлы 1 и n).

Решение ОЗТ для теплозащитного слоя с нагаром. Область теплозащитного слоя (0,1 мм) с нагаром заданной толщины (см. рис. 2) аппроксимируем системой конечных элементов с таким же линейным распределением температуры, как и при решении ОЗТ теплотрического элемента (рис. 4). Поставив в соответствие каждому узлу контрольный объем и выполнив стандартные операции МКО для построения неявной схемы, получим конечно-разностные уравнения:

$$\begin{aligned} q_1 + \frac{\lambda_1}{L_1} (T_2 - T_1) &= \frac{1}{2\Delta t} c\rho_1 L_1 (T_1 - \bar{T}_1), \quad (X = L_2); \\ \frac{\lambda_{i-1}}{L_{i-1}} (T_{i-1} - \bar{T}_i) + \frac{\lambda_i}{L_i} (T_{i+1} - T_i) &= \\ &= \frac{1}{2\Delta t} (c\rho_{i-1} L_{i-1} + c\rho_i L_i) (T_i - \bar{T}_i), \quad i = 2, \dots, n-1; \\ q_n + \frac{\lambda_{n-1}}{L_{n-1}} (T_{n-1} - T_n) &= \frac{1}{2\Delta t} c\rho_{n-1} L_{n-1} (T_n - \bar{T}_n), \quad (X = L_3). \end{aligned} \quad (12)$$

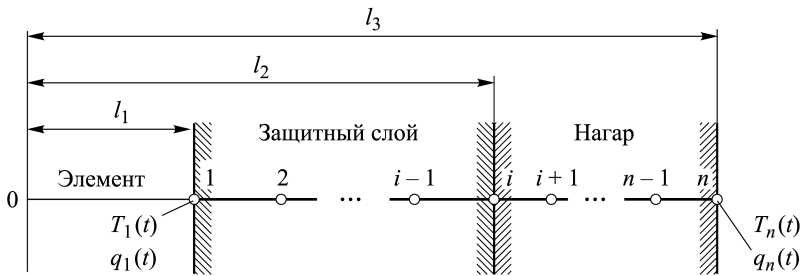


Рис. 4. Одномерная конечно-элементная модель защитного слоя и слоя нагара

В рассматриваемой задаче в узле 1 известна температура в любой момент цикла (измеренная на нагреваемой поверхности теплотрического элемента) и восстановленная при исполнении процедуры предыдущего этапа плотность теплового потока на нагреваемой поверхности теплотрического элемента $q_1(t)$. Наличие на левой границе двух граничных условий (первого и второго рода) позволяет построить относительно простой алгоритм оценивания неизвестной плотности теплового потока и температуры в узле n ($X = l_3$).

1. Вычисляются средние за цикл колебаний в узле 1 плотности теплового потока q_{1s} и T_{1s}

$$q_{1s} = \frac{1}{\theta} \int_{\theta} q_1(t) dt, \quad T_{1s} = \frac{1}{\theta} \int_{\theta} T_1(t) dt \quad (13)$$

и рассчитывается начальное распределение температуры в узлах МКЭ модели, для чего решается задача стационарной теплопроводности для неоднородной пластины с известной температурой в узле 1 ($T_1 = T_{1s}$) и известной плотностью теплового потока в узле n ($q_n = q_{1s}$).

2. Выполняется расчет по временным шагам со следующим алгоритмом в пределах каждого временного шага:

– в узле 1 задается соответствующее данному моменту цикла значение температуры

$$T_1 = T_1(t); \quad (14)$$

– температура в узле 2 вычисляется по зависимости

$$T_2 = T_1 + \frac{c\rho_1 L_1^2}{2\Delta t \lambda_1} (T_1 - \bar{T}_1) - q_1 \frac{L_1}{\lambda_2}. \quad (15)$$

Поскольку значения температуры в двух узлах на данном временном слое уже известны, то значения температуры в узлах 3, ..., n можно рассчитать как

$$T_{i+1} = \frac{L_i}{\lambda_i} \left(\left(\frac{\lambda_{i-1}}{L_{i-1}} + \frac{\lambda_1}{L_1} \right) T_i - \frac{\lambda_{i-1}}{L_{i-1}} T_{i-1} + \right. \\ \left. + \frac{c\rho_{i-1} L_{i-1} + c\rho_i L_i}{2\Delta t} (T_i - \bar{T}_i) \right), \quad i = 2, \dots, n-1 \quad (16)$$

и плотность теплового потока в узле n по уравнению

$$q_n = \frac{1}{2\Delta t} c \rho_{n-1} L_{n-1} (T_n - \bar{T}_{n-1}) - \frac{\lambda_{n-1}}{L} (T_{n-1} - T_n). \quad (17)$$

Вычисления по шагам по времени необходимо продолжать до выполнения условий периодичности. Завершение итерационного процесса осуществляется при выполнении условия $q_{ls} = q_{ns}$, где q_{ls} , q_{ns} — средние за период цикла θ значения плотностей тепловых потоков на тепловоспринимающей и теплоотдающей поверхностях теплотрического элемента (узлы l и n).

На рис. 5 приведен результат решения ОЗТ при отсутствии нагара на поверхности защитного слоя, а на рис. 6 и 7 — результаты решения ОЗТ для датчика с нагаром. При этом на рис. 6 приведено решение ОЗТ для датчика со слоем нагара толщиной 0,05 мм, а на рис. 7 — решение той же задачи, но в предположении отсутствия слоя нагара на поверхности защитного слоя. Отметим, что толщину слоя нагара можно определить по методу, предложенному в [4, 5].

Полученные результаты показывают высокую демпфирующую способность отложений сажи на поверхностях датчика и существенную ошибку, возникающую при восстановлении плотности теплового потока по показаниям датчика при наличии на его поверхности неконтролируемых отложений, структура и свойства которых могут существенно изменяться на различных режимах работы двигателя.

Заключение. Разработанный метод решения внешних обратных нестационарных задач теплопроводности для многослойных структур, и созданное соответствующее программное обеспечение предназначены для исследования локального теплообмена в камерах сгорания ДВС. Полученные в настоящей работе результаты, а также проведен-

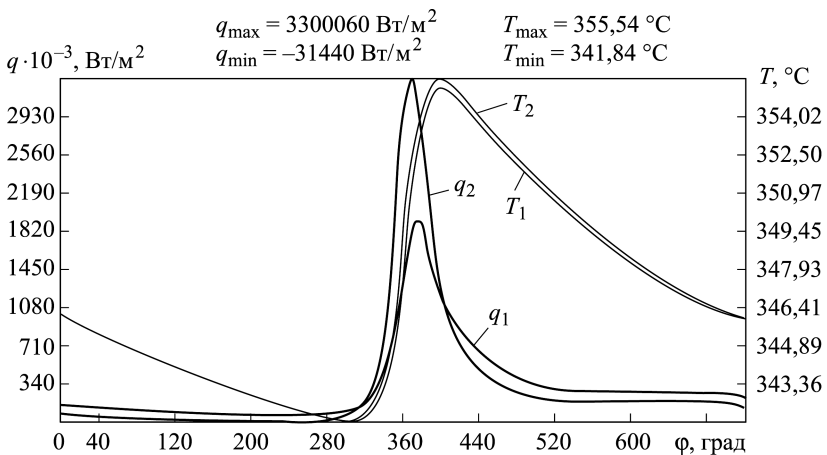


Рис. 5. Восстановленная плотность теплового потока на поверхности защитного слоя (q_2) и поверхности теплотрического элемента (q_1) и колебания температуры поверхностей защитного слоя (T_2) и теплотрического элемента (T_1)

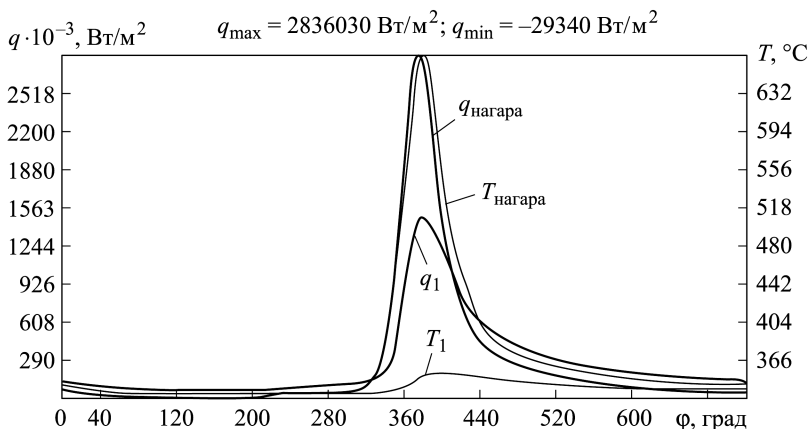


Рис. 6. Восстановленная плотность теплового потока и колебания температуры на поверхностях датчика, покрытого нагаром:

1 — поверхность теплотметрического элемента

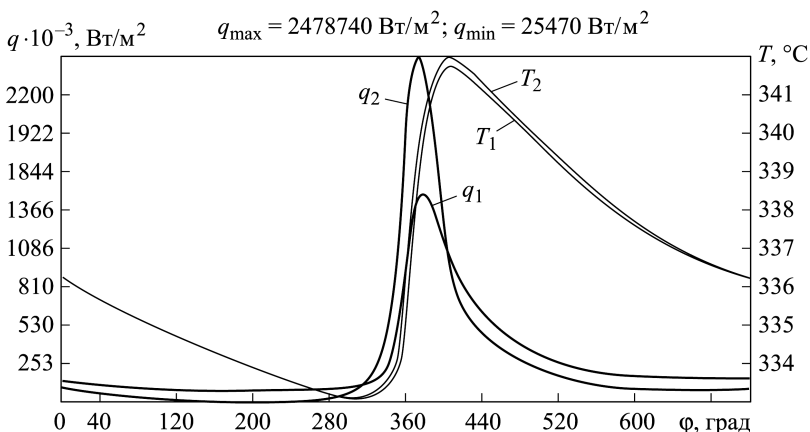


Рис. 7. Восстановленная плотность теплового потока в предположении отсутствия нагара на поверхности датчика (сигнал с датчика, покрытого слоем нагара):

1 — на поверхности теплотметрического элемента; 2 — параметры на поверхности защитного слоя

ная оценка точности предложенного метода доказывают его практическую значимость при обработке результатов эксперимента и надежность. Отметим, что разработанный метод в отличие от ранее опубликованных [11], позволяет учитывать, не только нестационарность (периодичность) процесса теплообмена, но и наличие на поверхностях камеры сгорания отложений нагара, пленок окислов и других неоднородностей, влияние которых на локальный нестационарный теплообмен существенно.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Машиностроение*. Энциклопедия. Двигатели внутреннего сгорания. Т. IV-14 / под общ. редакцией А.А. Александрова и Н.А. Иващенко. 2013. 784 с.

2. *Basshuesen R., Scäfer F. Handbuch. Verbrennungsmotor. 4. Aufgabe.* Wiesbaden: Vieweg & Sohn Verlag, 2007. 1032 s.
3. *Геращенко О.А., Гордов А.Н., Лях В.И., Еремина А.К.* Температурные измерения: Справочник. Киев: Наук. думка, 1984. 494 с.
4. *Кавтарадзе Р.З.* Локальный теплообмен в поршневых двигателях. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2007. 472 с.
5. *Heat Insulating Effect of Soot Deposit on Local Transient Heat Transfer in Diesel Engine Combustion Chamber / R.Kavtaradze, A.Zelentsov, S.Gladyshev, Z.Kavtaradze, D.Onishchenko // SAE International Paper № 2012-01-1217. P. 2012–12.*
6. *Кавтарадзе Р.З., Сергеев С.С.* Новый альтернативный (частично-гомогенный) процесс сгорания как способ снижения концентраций оксидов азота и сажи в продуктах сгорания дизеля // РАН. Теплофизика высоких температур. 2014. Т. 52. № 2. С. 294–309.
7. *Влияние формы камеры на нестационарные процессы переноса и турбулентного сгорания в дизеле, конвертированном в газовый двигатель / А.И. Леонтьев, Р.З. Кавтарадзе, А.В. Шибанов, А.А. Зеленцов, С.С. Сергеев // Изв. РАН. Сер. Энергетика. 2009. № 2. С. 49.*
8. *Грехов Л.В., Иващенко Н.А., Кавтарадзе Р.З., Рогов В.С.* Методика и алгоритм решения обратных внешних стационарных задач теплопроводности // Рабочие процессы дизелей. Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 1995. С. 9–21.

REFERENCES

- [1] *Mashinostroenie. Entsiklopediya. Dvigateli vnutrennego sgoraniya. T. IV-14 [Mechanical Engineering. Encyclopedia. Internal Combustion Engines. Vol. IV-14]. Aleksandrov A.A., Ivashchenko N.A., eds., 2013. 784 p.*
- [2] *Basshuesen R., Schöfer F. Handbuch. Verbrennungsmotor. 4. Aufgabe.* Wiesbaden, Vieweg & Sohn Verlag, 2007. 1032 s.
- [3] *Gerashchenko O.A., Gordov A.N., Lakh V.I. et al. Temperaturnye izmereniya. Spravochnik [Temperature Measurements]. Kiev, Nauk. Dumka Publ., 1984. 494 p.*
- [4] *Kavtaradze R.Z. Lokal'nyy teploobmen v porshnevykh dvigatelyakh [The Local Heat Transfer in Reciprocating Engines]. Moscow, MGТУ im. N.E. Bauman Publ., 2007. 472 p.*
- [5] *Kavtaradze R., Zelentsov A., Gladyshev S., Kavtaradze Z., Onishchenko D. Heat Insulating Effect of Soot Deposit on Local Transient Heat Transfer in Diesel Engine Combustion Chamber. SAE International Paper, no. 2012-01-1217, p. 2012–12.*
- [6] *Kavtaradze R.Z., Sergeev S.S. New alternative (partially homogeneous) combustion process as a method for reduction of concentrations of nitric oxides and soot in combustion products of diesel. High Temperature, 2014, vol. 52, no. 2, pp. 282–296.*
- [7] *Leont'ev A.I., Kavtaradze R.Z., Shibanov A.V., Zelentsov A.A., Sergeev S.S. Effect of Camera Forms on Non-Stationary Transport and Turbulent Combustion Processes in a Diesel Engine Converted to a Gas Engine. Izv. RAN. Ser. Energetika [Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Power Engineering Journal], 2009, no. 2, p. 49 (in Russ.).*
- [8] *Grekhov L.V., Ivashchenko N.A., Kavtaradze R.Z., Rogov V.S. The Techniques and Algorithm for Solving the Heat Conduction Inverse Stationary External Problems. Sb. Tr. "Rabochie protsessy dizeley" [Proc. Diesel Workflows]. MGТУ im. N.E. Bauman, AltGTU im. I.I. Polzunova Publ., 1995, pp. 9–21 (in Russ.).*

Статья поступила в редакцию 24.03.2015

Иващенко Николай Антонович (1940–2016) — д-р техн. наук, профессор, работал на кафедре “Поршневые двигатели” МГТУ им. Н.Э. Баумана.
МГТУ им. Н.Э. Баумана, Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5.

Ivaschenko N.A. (1940–2016) — Dr. Sci. (Eng.), Professor, worked at Piston Engines department, Bauman Moscow State Technical University.
Bauman Moscow State Technical University, 2-ya Baumanskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation.

Неубург Ллойд Рексфорд — аспирант кафедры “Поршневые двигатели” МГТУ им. Н.Э. Баумана.
МГТУ им. Н.Э. Баумана, Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5.

Neuburg L.R. — post-graduate student of Piston Engines department, Bauman Moscow State Technical University.
Bauman Moscow State Technical University, 2-ya Baumanskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation.

Кавтарадзе Реваз Зурабович — д-р техн. наук, профессор кафедры “Поршневые двигатели” МГТУ им. Н.Э. Баумана.
МГТУ им. Н.Э. Баумана, Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5.

Kavtaradze R.Z. — Dr. Sci. (Eng.), Professor of Piston Engines department, Bauman Moscow State Technical University.
Bauman Moscow State Technical University, 2-ya Baumanskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation.

Алиев Исмаил Новруз оглы — д-р физ.-мат. наук, профессор кафедры “Физика” МГТУ им. Н.Э. Баумана.
МГТУ им. Н.Э. Баумана, Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5.

Aliev I.N. — Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor of Physics department, Bauman Moscow State Technical University.
Bauman Moscow State Technical University, 2-ya Baumanskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation.

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Иващенко Н.А., Неубург Л.Р., Кавтарадзе Р.З., Алиев И.Н. Решение обратных внешних нестационарных задач теплопроводности на поверхностях камеры сгорания ДВС // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2016. № 1. С. 68–79. DOI: 10.18698/0236-3941-2016-1-68-79

Please cite this article in English as:

Ivaschenko N.A., Neuburg L.R., Kavtaradze R.Z., Aliev I.N. Solving inverse time-dependent external heat conduction problems for combustion chamber surfaces of internal combustion engine. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Mashinost.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Mech. Eng.], 2016, no. 1, pp. 68–79. DOI: 10.18698/0236-3941-2016-1-68-79