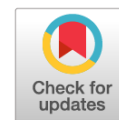


DOI: <https://doi.org/10.17816/2074-0530-110852>

Оригинальное исследование



Моделирование теплового состояния свечи зажигания

Д.Р. Яхутль¹, Р.А. Малеев², С.М. Зуев², Ю.М. Шматков², Е.А. Рябых²¹ Научно-исследовательский и экспериментальный институт автомобильной электроники и электрооборудования, Москва, Россия² Московский политехнический университет, Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Искровые свечи зажигания являются одним из важнейших компонентов системы зажигания ДВС. Искровой разряд, создаваемый системой зажигания, должен обладать энергией, необходимой для воспламенения горючей смеси на любом режиме работы двигателя во всех условиях эксплуатации. От совершенства конструкции и качества изготовления свечи зажигания существенно зависят пусковые характеристики, надежность, мощность, топливная экономичность, а также токсичность отработавших газов ДВС. С другой стороны, функциональные свойства свечей зажигания зависят от их соответствия ДВС по основным размерам, конструкции, тепловой характеристике и величине искрового зазора.

Цель. Использовать методы математического моделирования температурного поля свечи зажигания для сокращения объема экспериментальных исследований, а также сокращения количества вариантов опытных образцов, подлежащих моторным стендовым и эксплуатационным испытаниям.

Методы. В данной статье разработана математическая модель температурного поля искровой свечи зажигания двигателя внутреннего сгорания (ДВС).

Результаты. Получено выражение для распределения температур в тепловом конусе изолятора и других керамических элементах свечи. Определена зависимость теплопроводности и удельной теплоемкости корундовой керамики от температуры. Представлены зависимости коэффициента температуропроводности керамического изолятора свечи от температуры. Проведен анализ теплофизических свойства веществ из различных материалов. Разработаны уравнения, описывающие температурное поле всех деталей свечи зажигания (контактная головка, стеклогерметик, изолятор, центральный электрод, корпус свечи, теплоотводящая шайба, уплотнительное кольцо, головка цилиндра). Получено схематическое изображение геометрии свечи зажигания, используемое при расчете её температурного поля. Определены требования к граничным условиям для расчета температурных полей свечи зажигания. Представлена расчетная схема свечи зажигания. Рассмотрено условие теплообмена на границе между выделенной частью головки цилиндра и системой охлаждения двигателя внутреннего сгорания. Проведено исследование теплообмена между элементами конструкции свечи зажигания и воздухом в подкапотном пространстве ДВС. Определены зависимости, описывающие теплообмен между находящимися в тепловом контакте элементами конструкции свечи зажигания и установлены внутренние граничные условия.

Заключение. Представленные методики и алгоритмы численного моделирования теплового состояния свечи зажигания позволили выполнить расчеты зависимостей теплопроводности и удельной теплоемкости керамики изолятора, а также коэффициент температуропроводности керамических элементов свечи от температуры.

Ключевые слова: численное моделирование; свеча зажигания; тепловое состояние; тепловые характеристики; температурное поле.

Для цитирования:

Яхутль Д.Р., Малеев Р.А., Зуев С.М., Шматков Ю.М., Рябых Е.А. Моделирование теплового состояния свечи зажигания // Известия МГТУ «МАМИ». 2022. Т. 16, № 3. С. 273–280. DOI: <https://doi.org/10.17816/2074-0530-110852>

DOI: <https://doi.org/10.17816/2074-0530-110852>

Original study article

The spark plug's thermal state simulation

Daut R. Yakhutl¹, Ruslan A. Maleev², Sergey M. Zuev², Yuri M. Shmatkov², Evgeniy A. Ryabykh²¹ Scientific Research and Experimental Institute of Vehicle Electronics and Electric Equipment, Moscow, Russia² Moscow Polytechnic University, Moscow, Russia

ABSTRACT

BACKGROUND: Spark plugs are among the most important components of the ignition system of an internal combustion engine (ICE). The spark-over produced by the ignition system should have sufficient energy for combustion initiation at any engine operation mode in all the service conditions. Start properties, reliability, power, fuel efficiency and exhaust toxicity of an ICE essentially depend on excellence of design and manufacturing quality of a spark plug. On the other hand, functional properties of spark plugs depend on concordance to ICE with main dimensions, design, heat properties and value of a spark gap. **AIMS:** Use of the methods of the spark plug's temperature field simulation in order to reduce the amount of experimental studies and to reduce the number of specimen options subjected to laboratory and on-road engine tests.

METHODS: The simulation model of the temperature field of a spark plug of an internal combustion engine (ICE) was developed in this study.

RESULTS: The representation of temperature distribution in the insulator's thermal cone and other ceramic elements of a spark plug was obtained. The dependence of thermal conductivity and specific thermal capacity of corundum ceramics on temperature was derived. The dependencies of thermal conductivity coefficient of the plug's ceramic insulator are presented. The analysis of thermophysical properties of the substances made of various materials was carried out. The equations of the temperature field of all parts of a spark plug (a contact head, glass sealant, an insulator, a central electrode, a spark plug's body, a heat-sinking washer, a sealing ring, a cylinder head) were developed. The schematic representation of the spark plug geometry, used in the temperature field calculation, was obtained. The requirements for boundary conditions for calculation of the temperature field of a spark plug were determined. The calculation scheme of the spark plug is presented. The condition of heat exchange at the boundary between the selected part of a cylinder head and the cooling system of an internal combustion engine was considered. The study of heat transfer between the structural elements of a spark plug and the air inside the ICE compartment was carried out. The dependencies describing the heat exchange between the structural elements of a spark plug being in thermal contact with each other were determined and the internal boundary conditions were established.

CONCLUSIONS: The presented methods and algorithms of spark plug's thermal state simulation helped to perform the calculation of dependencies of thermal conductivity and specific thermal capacity of the insulator's ceramics as well as the thermal conductivity coefficient of the plug's ceramic elements on temperature.

Keywords: numerical simulation; spark plug; thermal state; thermal properties; temperature field.

Cite as:

Yakhutl DR, Maleev RA, Zuev SM, Shmatkov YuM, Ryabykh EA. The spark plug's thermal state simulation . *Izvestiya MG TU «MAMI»*. 2022;16(3):273–280. DOI: <https://doi.org/10.17816/2074-0530-110852>

Received: 09.04.2022

Accepted: 09.09.2022

Published: 15.10.2022

ВВЕДЕНИЕ

Искровые свечи зажигания являются одним из важнейших компонентов системы зажигания ДВС. Искровой разряд, создаваемый системой зажигания, должен обладать энергией, необходимой для воспламенения горючей смеси на любом режиме работы двигателя при всевозможных условиях эксплуатации. От совершенства конструкции и качества изготовления свечи зажигания существенно зависят пусковые характеристики, надежность, мощность, топливная экономичность, а также токсичность отработавших газов ДВС. С другой стороны, функциональные свойства свечей зажигания зависят от их соответствия ДВС по основным размерам, конструкции, тепловой характеристике и величине искрового зазора. Экспериментальное определение температуры в определенных точках свечи зажигания требует встраивания миниатюрных термодатчиков, что весьма непросто, учитывая условия работы свечи.

Для этой цели предпочтительнее использовать методы математического моделирования температурного поля свечи зажигания, которые позволяют сократить объем экспериментальных исследований, а также сократить количество вариантов опытных образцов, подлежащих моторным стендовым и эксплуатационным испытаниям [1].

Зависимость теплопроводности $\lambda(T)$ и удельной теплоемкости корундовой керамики $c(T)$ от температуры описывается выражениями:

$$\lambda(T) = \frac{1.063 \times 10^4}{T} + 0.420 - 8.08 \times 10^{-3} T + 4.35 \times 10^{-6} T^2, \quad (4)$$

$$c(T) = \frac{0.345 \times 10^5}{T} + 1.123 + 0.126 \times 10^{-3} T. \quad (5)$$

Используя уравнения (4) и (5), а также вводя понятие коэффициента температуропроводности

$\chi(T) = \frac{\lambda(T)}{\rho(T)c(T)}$, и учитывая, что плотность боркорунда равна $\rho = 3200 \text{ кг/м}^3$ получаем выражение:

$$\chi(T) = \frac{26.364T + 10.424 \times 10^{-3} T^2 - 20.028 \times 10^{-6} T^3 + 10.789 \times 10^{-9} T^4}{-2.738 \times 10^8 + 1.819 \times 10^{-10} T + 8.913 \times 10^3 T^2 + T^3}. \quad (6)$$

На рис. 1 представлена зависимость коэффициента температуропроводности от температуры

Функция $\psi(T) = \chi(T) \cdot \frac{d \ln(\rho c)}{dT}$, представленная на рис. 2, вычисляется согласно:

$$\Psi(T) = \frac{2.292 \cdot 10^5 + 9.063T - 0.1741T^2 + 5.124 \cdot 10^{-4} T^3}{(3.45 \cdot 10^4 - 1.123T - 1.26 \cdot 10^{-4} T^2)^2} + 10^{-8} T^4 \cdot \frac{1.655 - 3.18 \cdot 10^{-2} T + 1.713 \cdot 10^{-3} T^2}{(3.45 \cdot 10^4 - 1.123T - 1.26 \cdot 10^{-4} T^2)^2}. \quad (7)$$

Наряду с теплофизическими свойствами керамики, для расчета температурного поля свечи нам понадобятся теплофизические свойства металлических деталей её конструкции, а также теплофизические свойства воздуха и продуктов сгорания [2, 3]. Эти величины приведены в таблице 1.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Математическая модель температурного поля элементов конструкции свечи описывается уравнением теплопроводности:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right). \quad (1)$$

При расчете распределения температур в тепловом конусе изолятора и других керамических элементах свечи необходимо использовать уравнение:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \text{div}(\lambda \text{grad} T), \quad (2)$$

где ρ – плотность вещества, кг/м^3 ; c – его теплоемкость, λ – коэффициент теплопроводности, $\text{Вт/м}\cdot\text{К}$.

Используя известные соотношения векторного анализа $\text{div}(\varphi a) = \text{div}(\varphi a) + a \text{div}(\varphi a)$ и

$\text{grad}(\varphi f) = \left(\frac{d\varphi}{df} \right) \text{grad} f$ (где φ – векторное поле, f и f – скалярные поля), уравнение (2) можно преобразовать к виду:

$$\frac{dT}{dt} = \text{div}(x \text{grad} T) + x \frac{d \ln(\rho c)}{d\phi T} (\text{grad} T)^2. \quad (3)$$

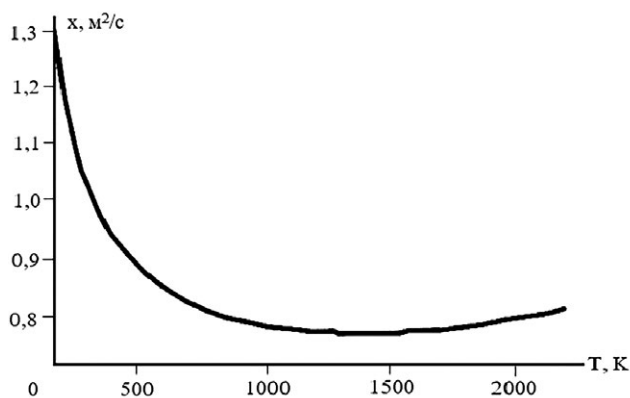


Рис. 1. Температурная зависимость коэффициента керамических элементов свечи от температуры.

Fig. 1. The dependence of the thermal conductivity coefficient of the plug's ceramic elements on temperature.

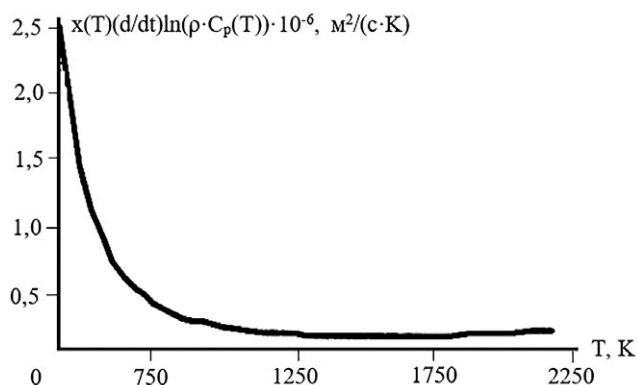


Рис. 2. Зависимость коэффициента от температуры при квадрате градиента температуры (grad T)².

Fig. 2. The dependence of the coefficient on temperature with the second degree of the temperature gradient (grad T)².

Таблица 1. Теплофизические свойства веществ

Table 1. Thermophysical properties of substances

Вещество	$\rho \cdot 10^3$, кг/м ³	$C \cdot 10^2$, Дж/(кг·К)	$\lambda \cdot 10^2$, Вт/(м·К)	$\chi \cdot 10^{-4}$, м ² /(с·К)
Алюминий	10,49	2,33	4,19	1,71
Медь	8,94	1,29	2,93	1,18
Серебро	2,70	8,63	2,01	0,86
Платина	21,46	1,32	0,71	0,25
Сталь	7,85	4,94	0,46	0,12
Чугун	7,4	5,69	0,50	0,12

Теплоёмкость воздуха при постоянном давлении в диапазоне значений температур $273\text{K} < T \leq 900\text{K}$ определяется по формуле:

$$c_p = 1005 + 0,0963T, \quad (8)$$

а его теплопроводность в указанном диапазоне температур и теплопроводность продуктов сгорания в диапазоне $900\text{K} < T \leq 1800\text{K}$ – по формуле:

$$\lambda_p = 3,61 \cdot 10^{-4} T^{0,75}. \quad (9)$$

Теплоёмкость продуктов сгорания в диапазоне $900\text{K} < T \leq 1800\text{K}$ определяют по формуле:

$$c_p = 837,4 + 0,0762T. \quad (10)$$

Схематическое изображение геометрии свечи зажигания, используемое при расчете её температурного поля, приведено на рис. 3.

Существенной особенностью рассматриваемой геометрической модели является то, что в неё включена прилегающая к свече часть головки цилиндра [4]. Не трудно убедиться, что температурное поле свечи

в соответствии с приведенной схемой описывается следующими уравнениями:

- контактная головка:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \chi \operatorname{div}(\operatorname{grad} T); \quad (11)$$

- стеклогерметик:

$$\frac{\partial T_2}{\partial t} = \chi_2 \operatorname{div}(\operatorname{grad} T_2); \quad (12)$$

- изолятор:

$$\begin{aligned} \frac{\partial T_3}{\partial t} = & \operatorname{div}(\chi_3(T_3) \operatorname{grad} T_3) + \\ & + \chi_3(T_3) \frac{\partial \ln(\rho_3 c_3(T_3))}{dT_3} (\operatorname{grad} T_3)^2; \end{aligned} \quad (13)$$

- центральный электрод:

$$\frac{\partial T_4}{\partial t} = \chi_4 \operatorname{div}(\operatorname{grad} T_4); \quad (14)$$

- корпус свечи:

$$\frac{\partial T_5}{\partial t} = \chi_5 \operatorname{div}(\operatorname{grad} T_5); \quad (15)$$

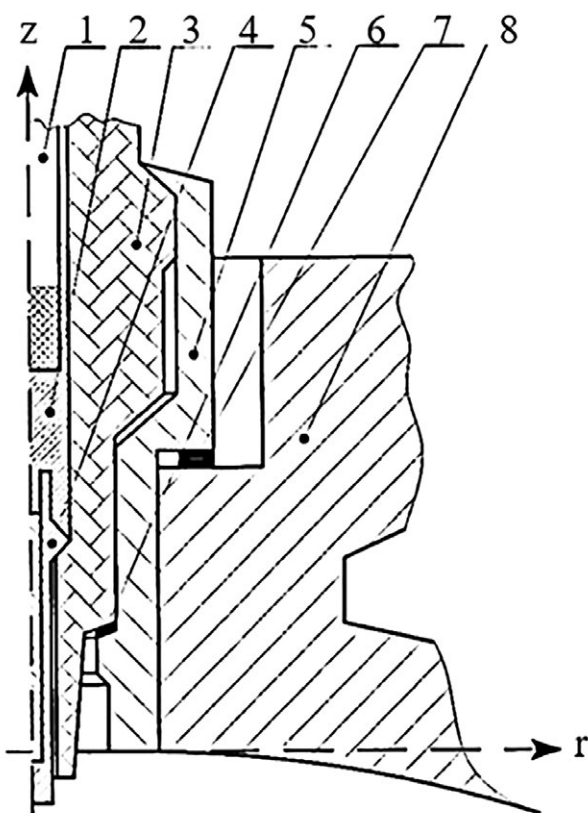


Рис. 3. Расчетная схема свечи зажигания: 1 – контактная головка; 2 – стеклогерметик; 3 – изолятор; 4 – центральный электрод; 5 – корпус свечи; 6 – теплоотводящая шайба; 7 – уплотнительное кольцо; 8 – головка блоков цилиндров.

Fig. 3. The calculation scheme of a spark plug: 1 – a contact head; 2 – glass sealant; 3 – an insulator; 4 – a central electrode; 5 – a plug's body; 6 – a heat-sinking washer; 7 – a sealing ring; 8 – a cylinder head.

- теплоотводящая шайба:

$$\frac{\partial T_6}{\partial t} = \chi_6 \operatorname{div}(\operatorname{grad} T_6); \quad (16)$$

- уплотнительное кольцо:

$$\frac{\partial T_7}{\partial t} = \chi_7 \operatorname{div}(\operatorname{grad} T_7); \quad (17)$$

- головка цилиндра:

$$\frac{\partial T_8}{\partial t} = \chi_8 \operatorname{div}(\operatorname{grad} T_8). \quad (18)$$

Для расчета температурного поля свечи уравнения (11)–(19) необходимо дополнить граничными условиями [5, 6]. Эти условия удобно подразделить на два класса – внешние и внутренние. К внешним граничным условиям следует отнести:

- Условия на границе между геометрическими компонентами модели по схеме рис. 3 и рабочим телом в цилиндре ДВС. Эти граничные условия описываются уравнениями:

$$\lambda_i \frac{\partial T_i(t, x, y, z)}{\partial n_{i,g}} = \quad (19)$$

$$= \alpha_w(t) T_i(t, x, y, z) - q_w(t), \{x, y, z\} \in S_{i,g},$$

в которых индекс $i = 3, 4, 5, 8$; $S_{i,g}$ – граница между i -и элементами схемы (см. рис. 3) и рабочим телом, $n_{i,g}$ – внешняя нормаль к этой поверхности, а функции $\alpha_w(t)$ и $q_w(t)$ определяются согласно соотношениям профессора Вошни соответственно.

- Условия на границе $S_{8,alt}$ выделенной части головки цилиндра ($i = 8$) с её отброшенной частью, обозначенной индексом «alt», которые записываются в предположении, что теплообмена между этими частями головки блока не происходит. Они имеют вид:

$$\frac{\partial T_8(t, x, y, z)}{\partial n_{8,alt}} = 0, \{x, y, z\} \in S_{8,alt}. \quad (20)$$

- Условия теплообмена на границе $S_{8,cld}$ между выделенной частью головки цилиндра и системой охлаждения, которые записываются в виде:

$$\lambda_8 \frac{\partial T_8(t, x, y, z)}{\partial n_{8,alt}} = \alpha_{cld} T_8(t, x, y, z) - T_{cld}, \quad (21)$$

$$\{x, y, z\} \in S_{8,cld},$$

где T_{cld} – температура охлаждающей жидкости, а формулы для вычисления коэффициента теплообмена α_{cld} между головкой цилиндра и охлаждающей жидкостью приводятся в курсах проектирования ДВС.

- Опыт показывает, что теплообменом между элементами конструкции свечи и воздухом в подкапотном пространстве ДВС можно пренебречь [7, 8]. Поэтому на границах $S_{i,air}$ $i = 1, 3, 5, 8$ контакта этих элементов с воздухом можно положить:

$$\frac{\partial T_i}{\partial n_{i,air}} = 0. \quad (22)$$

К внутренним граничным условиям относятся условия, описывающие теплообмен между находящимися в тепловом контакте элементами конструкции свечи [9, 10]. Для описания контактного теплообмена между i -и и j -и элементами конструкции используется система уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} \lambda_i \frac{\partial T_i}{\partial n_{ij}} = \partial n_{ij} (T_i - T_j), \\ \lambda_i \frac{\partial T_i}{\partial n_{ij}} + \lambda_j \frac{\partial T_j}{\partial n_{ij}} = 0. \end{array} \right. \quad (23)$$

Здесь $\partial / \partial n_{ij}$ – производная по внешней нормали к поверхности i -и элемента конструкции, а α_{ij} –

коэффициент теплообмена между $i-i$ и $j-i$ элементами. Значение этого коэффициента зависит от геометрии и микрогеометрии поверхностей контактирующих деталей, контактных напряжений и ряда других факторов. Методы определения числовых значений этих коэффициентов описаны в специальной литературе.

Далее рассмотрим алгоритм расчета тепловых характеристик свечи.

Как было описано выше, расчет тепловых характеристик свечи зажигания состоит из трех этапов, использующих различные по своему назначению программные средства [10, 11].

На первом этапе работы задаемся перечнем нагрузочных и скоростных установившихся режимов работы двигателя и для каждого из этих режимов выполняется моделирование рабочего цикла [1, 2]. По результатам моделирования формируется массив исходных данных для расчета температурного поля свечи зажигания, включающий:

1. Частоту вращения коленчатого вала ДВС n , угол опережения зажигания ϑ , коэффициент избытка воздуха α , продолжительность сгорания φ_z , показатель сгорания по Вибе m , среднее индикаторное давление p_{ind} .
2. Таблицу зависимости температуры рабочего тела T_{∞} в окрестности свечи зажигания от угла поворота коленчатого вала.
3. Таблицу гармонических составляющих αw_n , $b w_n$, $n=0,1-N$ коэффициента теплопередачи αw между рабочим телом и огневым ограждением цилиндра (коэффициент Вошни).
4. Таблицу гармонических составляющих α_{wqn} , $b q_n$, $n=0,1-N$ плотности теплового потока $q_w = \alpha_w T_{\infty}$.

На втором этапе работы для каждого из выбранных режимов работы двигателя выполняется расчет температурного поля свечи [1]. Расчет ведется с использованием метода конечных элементов (МКЭ). Программная реализация МКЭ выполнена в таких известных программных комплексах, как «ANSYS», «Solid Works», «Inventor» и др. [2, 3]. Остановимся подробно на особенностях применения МКЭ к рассматриваемой задаче.

1. Расчет в предположении цилиндрической симметрии задачи, пренебрегая возмущениями температурного поля свечи, вызванными влиянием бокового электрода. Таким образом, трехмерная исходная задача в координатах $\{x, y, z\}$ заменяется двумерной задачей в координатах $\{r, z\}$, где r – полярный радиус, а z – аппликата.
2. Препроцессорная обработка информации включает в себя не только триангуляцию чертежа объекта (рис. 3) в интерактивном режиме, традиционно выполняемую при применении МКЭ, но и вычисление коэффициентов теплообмена на внутренних границах элементов конструкции по методике Попова. При этом теплофизические свойства рабочего тела в зазорах между элементами конструкции вычисляются

с использованием среднего за цикл значения температуры в цилиндре.

3. Расчет температурного поля свечи содержит две стадии, первая из которых – это определение стационарной составляющей элементов конструкции из уравнений (7) – (14), в которых положено $\partial T_i / \partial t \equiv 0$, а в уравнениях (15) коэффициент теплообмена $\alpha_w(t)$ и плотности теплового потока $q_w(t)$ заменены их усредненными за рабочий цикл значениями $\bar{\alpha}_w$ и \bar{q}_w соответственно. Вторая стадия заключается в определении пульсирующей составляющей температуры методами теории возмущений.
4. Учитывая нелинейность уравнения (9), расчет температурного поля на первой стадии выполняется методом простой итерации, т.е. решается последовательность уравнений:

$$\operatorname{div} \left[\chi_3 \left(T_3^{[k-1]} \right) \operatorname{grad} T_3^{[k]} \right] = -\chi_3 \left(T_3^{[k-1]} \right) \cdot \frac{d \ln \left(\rho_3 c_3 \left(T_3^{[k-1]} \right) \right)}{dT_3} \cdot \left(\operatorname{grad} \left(T_3^{[k-1]} \right) \right)^2, \quad (24)$$

где $[k]$ – номер итерации. В качестве начального приближения T_3^0 выбирается значение температуры головки цилиндра, использованное при моделировании рабочего цикла ДВС.

Третий этап работы заключается в компьютерном анализе температур узлов расчетной сетки и определении нагрузочного и скоростного режима, при котором для точек, принадлежащих тепловому конусу свечи, выполняется условие:

$$T(r, z) \geq T_{crit}^e, \quad (25)$$

где T_{crit}^e – экспериментально полученное значение порога калильного зажигания.

Среднее индикаторное давление p_i , соответствующее этому режиму работы двигателя, определяет калильное число КЧ свечи зажигания рассматриваемой конструкции.

Учет изменения температурного поля свечи зажигания по времени позволяет предсказать появление калильного зажигания в зависимости от конструктивных особенностей двигателей и состава (марки) бензина [2]. Для этого необходимо оценить скорость предпламенных реакций в окрестности теплового конуса свечи, а также количество тепла, передаваемого тепловым конусом рабочему телу на такте сжатия [1].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной статье исследованы основные факторы, определяющие тепловую характеристику свечи зажигания в диапазоне температур $300\text{K} \leq T \leq 2500\text{K}$. Наличие

минимума функции $\chi(T)$ при температуре $T \sim 1500\text{K}$ обеспечивает стабильность температуры теплового конуса свечи при колебаниях температуры рабочего тела T_∞ . Представленные методики и алгоритмы численного моделирования теплового состояния свечи зажигания позволили выполнить расчеты зависимостей теплопроводности и удельной теплоемкости керамики изолятора, а также коэффициент температуропроводности керамических элементов свечи от температуры. Представлены достоинства и недостатки предложенного алгоритма расчета тепловых характеристик свечи и выработаны предложения по безопасным и оптимальным режимам работы свечей зажигания, что позволит выявить безопасные режимы работы ДВС.

Статья посвящается И.М. Шендеровскому.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Вклад авторов. *Д.Р. Яхутль* — поиск публикаций по теме статьи, написание текста рукописи; *Е.А. Рябых* — редактирование текста рукописи, создание изображений; *С.М. Зуев* — редактирование текста рукописи, создание изображений; *Ю.М. Шматков* — поиск публикаций по теме статьи; *Р.А. Малеев* — экспертная оценка, утверждение финальной версии. Все авторы подтверждают соответствие своего авторства международным критериям *ICMJE* (все авторы внесли равноправный

вклад в разработку концепции, проведение исследования и подготовку статьи).

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Источник финансирования. Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования при проведении исследования.

ADDITIONAL INFORMATION

Authors' contribution. *D.R. Yahutl* — search for publications on the topic of the article, writing the text of the manuscript; *E.A. Ryabykh* — editing the text of the manuscript, creating images; *S.M. Zuev* — editing the text of the manuscript, creating images; *Y.M. Shmatkov* — search for publications on the topic of the article; *R.A. Maleev* — expert evaluation, approval of the final version. All authors confirm that their authorship meets the international *ICMJE* criteria (all authors have made an equal contribution to the development of the concept, research and preparation of the article).

Competing interests. The authors declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

Funding source. The authors state that there is no external funding for the study.

ЛИТЕРАТУРА

1. Яхутль Д.Р., Басс Б.А., Малеев Р.А., и др. Искровые свечи зажигания. Основы проектирования и производства: учебное пособие. М.: МГТУ «МАМИ», 2010.
2. Maleev R.A., Zuev S.M., Fironov A.M., et al. The starting processes of a car engine using capacitive energy storages // *Periodico Tche Quimica*. 2019. Vol. 16, N 33. P. 877–888.
3. Skvortsov A.A., Khortov V.P., Zuev S.M. High-voltage starting systems of combustion engines // *Int. J. Pure Appl. Math*. 2016. Vol. 111, N 3. P. 455–465. doi: 10.12732/ijpam.v111i3.9
4. Breden D., Karpatne A., Suzuki K., et al. 2.1. High-fidelity numerical modeling of spark plug erosion // *Ignition Systems for Gasoline Engines: Internationale Tagung Zündsysteme für Ottomotoren*. 4th Int. Conf. Dec. 6–7, 2018, Berlin, Germany. Tübingen: Expert-Verlag GmbH, 2018. P. 55–74.
5. Wolk B., DeFilippo A., Chen J.-Y., et al. Basic explorations of limits of microwave assisted spark plug in constant volume combustion chamber // *Fall Technical Meeting of the Western States Section of the Combustion Institute 2011 (WSS/CI 2011 Fall Meeting)* Riverside, California, USA 17–18 October 2011. New York: Curran Associates, 2011. P. 590–602.
6. Zheng D. The advantages of non-thermal plasma for detonation initiation compared with spark plug // *Plasma*

Science and Technology. 2016. Vol. 18, N 2. P. 162–167. doi: 10.1088/1009-0630/18/2/11

7. Crispim L.W.S., Hallak P.H., Benilov M.S., et al. Modelling spark plug discharge in dry air // *Combustion and Flame*. 2018. Vol. 198. P. 81–88. doi: 10.1016/j.combustflame.2018.09.007

8. Bellenoue M., Labuda S., Ruttun B., et al. Spark plug and corona abilities to ignite stoichiometric and lean methane/air mixtures // *Combustion Science and Technology*. 2007. Vol. 179, N 3. P. 477–496. doi: 10.1080/00102200600637584

9. Oliveira C., Souza-Corrêa J.A., Amorim J., et al. Optical and electrical diagnostics of a spark-plug discharge in air // *Journal of Physics. D: Applied Physics*. 2012. Vol. 45, N 25. P. 255201. doi: 10.1088/0022-3727/45/25/255201

10. Kawahara N., Tomita E., Takemoto S., et al. Fuel concentration measurement of premixed mixture using spark-induced breakdown spectroscopy // *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*. 2009. Vol. 64, N 10. P. 1085–1092. doi: 10.1016/j.sab.2009.07.016

11. Yang C., Wu X., Ma H., et al. Experimental research on initiation characteristics of a rotating detonation engine // *Experimental Thermal and Fluid Science*. 2016. Vol. 71. P. 154–163. doi: 10.1016/j.expthermflusci.2015.10.019

REFERENCES

1. Yakhutl DR, Bass BA, Maleev RA, et al. *Spark spark plugs. Design and Manufacturing Fundamentals: Tutorial*. Moscow: MGТУ «MAMI»; 2010. (in Russ).
2. Maleev RA, Zuev SM, Fironov AM, et al. The starting processes of a car engine using capacitive energy storages. *Periodico Tche Quimica*. 2019;16(33):877–888.
3. Skvortsov AA, Khortov VP, Zuev SM. High-voltage starting systems of combustion engines. *Int. J. Pure Appl. Math*. 2016;111(3):455–465. doi: 10.12732/ijpam.v111i3.9
4. Breden D, Karpatne A, Suzuki K, et al. 2.1. High-fidelity numerical modeling of spark plug erosion. In: *Ignition Systems for Gasoline Engines: Internationale Tagung Zündsysteme für Ottomotoren. 4th Int. Conf. Dec. 6–7, 2018, Berlin, Germany*. Tübingen: Expert-Verlag GmbH; 2018:55–74.
5. Wolk B, DeFilippo A, Chen J-Y, et al. Basic explorations of limits of microwave assisted spark plug in constant volume combustion chamber. In: *Fall Technical Meeting of the Western States Section of the Combustion Institute 2011 (WSS/CI 2011 Fall Meeting) Riverside, California, USA 17–18 October 2011*. New York: Curran Associates; 2011:590–602.
6. Zheng D. The advantages of non-thermal plasma for detonation initiation compared with spark plug. *Plasma Science and Technology*. 2016;18(2):162–167. doi: 10.1088/1009-0630/18/2/11
7. Crispim LWS, Hallak PH, Benilov MS, et al. Modelling spark plug discharge in dry air. *Combustion and Flame*. 2018;198:81–88. doi: 10.1016/j.combustflame.2018.09.007
8. Bellenoue M, Labuda S, Ruttun B, et al. Spark plug and corona abilities to ignite stoichiometric and lean methane/air mixtures. *Combustion Science and Technology*. 2007;179(3):477–496. doi: 10.1080/00102200600637584
9. Oliveira C, Souza-Corrêa JA, Amorim J, et al. Optical and electrical diagnostics of a spark-plug discharge in air. *Journal of Physics. D: Applied Physics*. 2012;45(25):255201. doi: 10.1088/0022-3727/45/25/255201
10. Kawahara N., Tomita E., Takemoto S., et al. Fuel concentration measurement of premixed mixture using spark-induced breakdown spectroscopy. *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*. 2009;64(10):1085–1092. doi: 10.1016/j.sab.2009.07.016
11. Yang C, Wu X, Ma H, et al. Experimental research on initiation characteristics of a rotating detonation engine. *Experimental Thermal and Fluid Science*. 2016;71:154–163. doi: 10.1016/j.expthermflusci.2015.10.019

ОБ АВТОРАХ

***Рябых Евгений Александрович**, аспирант кафедры «Электрооборудование и промышленная электроника»; адрес: Россия, 107023, Москва, улица Большая Семеновская, д. 38; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7112-1019>; eLibrary SPIN: 4843-6000; e-mail: fczl98@bk.ru

Яхутль Даут Ромазанович, к.т.н., зам. директора института; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6650-1180>; eLibrary SPIN: 6567-0332; e-mail: niiae2@yandex.ru

Малеев Руслан Алексеевич, доцент, к.т.н., профессор кафедры «Электрооборудование и промышленная электроника»; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3430-6406>; eLibrary SPIN: 7801-3294; e-mail: 19rusmal@gmail.com

Зуев Сергей Михайлович, доцент, к.ф.-м.н., заведующий кафедрой «Электрооборудование и промышленная электроника»; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7033-1882>; eLibrary SPIN: 6602-6618; e-mail: sergei_zuev@mail.ru

Шматков Юрий Михайлович, старший преподаватель кафедры «Электрооборудование и промышленная электроника»; eLibrary SPIN: 8107-6692; e-mail: yuru.schmatkov@yandex.ru

*Автор, ответственный за переписку

AUTHORS' INFO

***Evgeniy A. Ryabikh**, postgraduate student of the Electrical Equipment and Industrial Electronics Department; address: 38 Bolshaya Semenovskaya street, 107023 Moscow, Russia; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7112-1019>; eLibrary SPIN: 4843-6000; e-mail: fczl98@bk.ru

Daut R. Yakhutl, Cand. Sci. (Tech.), Deputy Director of the Institute; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6650-1180>; eLibrary SPIN: 6567-0332; e-mail: niiae2@yandex.ru

Ruslan A. Maleev, Associate Professor, Cand. Sci. (Tech.), Professor of the Electrical Equipment and Industrial Electronics Department; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3430-6406>; eLibrary SPIN: 7801-3294; e-mail: 19rusmal@gmail.com

Sergey M. Zuev, Associate Professor, Cand. Sci. (Physics and Mathematics), Head of the Electrical Equipment and Industrial Electronics Department; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7033-1882>; eLibrary SPIN: 6602-6618; e-mail: sergei_zuev@mail.ru

Yuri M. Shmatkov, Senior Lecturer of the Electrical Equipment and Industrial Electronics Department; eLibrary SPIN: 8107-6692; e-mail: yuru.schmatkov@yandex.ru

*Corresponding author