

коррозионных свойств нового моторного масла АЗМОЛ ГАРАНТ М-4042 ВТ, что позволило получить лучшие результаты даже при применении его в более форсированном двигателе 6ТД-2Е (55 кВт/л).

Решением технического комитета «НАФТА-СТАНДАРТ» Украины масло АЗМОЛ ГАРАНТ М-4042 ВТ допущено к применению в качестве основного для двух- и четырехтактных форсированных транспортных двигателей ВГМ, промышленное про-

изводство этого масла организовано в ОАО «АЗМОЛ», г. Бердянск, Запорожской области.

**Список литературы:**

1. . Рязанцев Н.К. Химия и технология топлив и масел / Н.К. Рязанцев, Ю.С. Бородин, В.З. Бычков, Н.В. Клименко, Г.В. Щербаненко // Химия и технология топлив и масел . – 2002. - №5. – с.12 – 14. 2. Гуреев А.А. Химмотология / Гуреев А.А., Фукс И.Г., Лаихи В.Л. – М.: «Химия», 1986. – 264 с. 3. Анисимов И.Г. Топлива, смазочные материалы, технические жидкости. Ассортимент и применение / Анисимов И.Г., Бадыштова К.М., Бнатов С.А.; под ред. В.М. Школьникова. – Донецк: «Техинформ», 1999, 232 с.

УДК 621.18

*Е.Б. Медведев, инж., Л.Ш. Шустер, д-р техн. наук*

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОЙ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ БИМЕТАЛЛИЧЕСКОГО ЦЕНТРАЛЬНОГО ЭЛЕКТРОДА СВЕЧИ ЗАЖИГАНИЯ ДВС**

**Введение**

Широкое распространение в автомобилестроении получили в настоящее время искровые свечи зажигания с биметаллическим центральным электродом. Биметаллический электрод представляет собой конструкцию, состоящую из высокотеплопроводного медного сердечника и жаростойкой никелевой оболочки, закрывающей боковую и торцевую поверхность сердечника. Такой электрод увеличивает теплопроводность свечи в целом и, тем самым, улучшает её тепловую характеристику и повышает надёжность [1]. Получают биметаллический электрод методом холодного прямого выдавливания составных заготовок.

Биметаллический электрод в отличие от монометаллического обладает ещё одним важным достоинством, которое заключается в том, что эффективная теплопроводность биметаллического электрода, как и любого композиционного материала, зависит от относительных объёмов составляющих его компонентов – оболочки и сердечника [2]. Это свойство биметаллического электрода может быть использовано для подбора тепловых характеристик свечей зажигания, которые существенным образом зависят от теплопроводности центрального электрода. Такая зависимость показана на рис.1, где оценочным критерием тепловой характеристики свечи служит калильное число (КЧ) [3]. Из рисунка следует, что при

изменении теплопроводности электрода КЧ свечи может изменяться до 12 ед.

В соответствии со стандартной методикой изменение тепловых характеристик свечей зажигания осуществляется путём изменения размеров теплового конуса изолятора при фиксированных размерах центрального электрода [1].

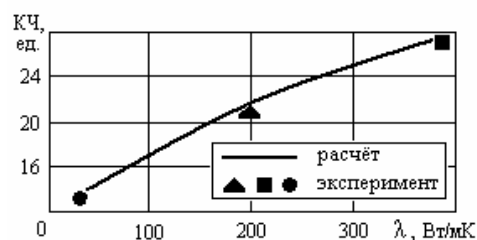


Рис.1. Зависимость калильного числа (КЧ) свечи зажигания от теплопроводности  $\lambda$  материала центрального электрода:

● – сплав X25T; ▲ – алюминий АД1; ■ – медь М1;

В отличие от указанной методики применение биметаллического электрода даёт возможность управлять тепловыми характеристиками свечей зажигания, не прибегая к изменению размеров теплового конуса изолятора, что позволяет сократить затраты и время на подбор тепловых характеристик свечей зажигания и повысить уровень технологичности их конструкции.

Для использования предлагаемой методики необходимо определить закономерности изменения эффективной теплопроводности биметаллического

электрода в зависимости от изменения размеров составляющих его компонентов – оболочки и сердечника. В обзоре научно-технической литературы, выполненном по данному вопросу, решение такой задачи нами не найдено.

Целью настоящей работы является получение аналитической зависимости, позволяющей приближённо определить эффективную теплопроводность биметаллического электрода свечи зажигания ДВС.

### Теоретическая часть

Рассмотрим порядок расчёта эффективной теплопроводности биметаллического электрода. Для этого воспользуемся схемой электрода, представленной на рис.2.

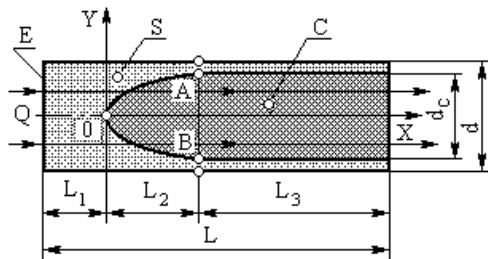


Рис.2. Схема продольного сечения биметаллического электрода

$L$  – длина электрода;  $d$  – диаметр электрода;  $d_c$  – диаметр сердечника;  $L_1$ ,  $L_2$ , и  $L_3$  – длины участков электрода с различным соотношением объемов оболочки и сердечника;  $Q$  – тепловой поток;  $E$  – передняя торцевая поверхность электрода;  $S$  – никелевая оболочка;  $C$  – медный сердечник;  $AOB$  – криволинейная часть границы раздела оболочки и сердечника (формируется при изготовлении электрода – в процессе прямого выдавливания)

Точное аналитическое решение поставленной задачи с учётом осевого и радиального тепловых потоков, подводимых к электроду, весьма затруднительно. Поэтому предлагается приближённое решение задачи, для чего принимается ряд следующих допущений:

- тепловой поток подводится только к передней торцевой поверхности электрода. Радиальный тепловой поток отсутствует;
- тепловой поток, подводимый к электроду, проходит вдоль его оси по направлению от переднего торца электрода к заднему, т.е. является одномерным;
- боковая цилиндрическая поверхность электрода является адиабатной;

– поверхности электрода, расположенные перпендикулярно линиям тока, являются изотермическими;

– контакт поверхностей оболочки и сердечника электрода является идеальным, т. е. термическое сопротивление в зоне контакта отсутствует.

Такое решение задачи позволяет приближённо оценить степень влияния геометрических параметров электрода на его теплопроводность и, тем самым, показать перспективность применения предложенного способа подбора тепловых характеристик свечей зажигания.

Допущение об изотермическом характере поперечных поверхностей электрода обосновано тем, что площадь этих поверхностей весьма мала и поэтому температуру во всех точках поверхностей можно считать одинаковой.

Допущение об идеальном контакте оболочки и сердечника электрода принято на основании того, что технология изготовления биметаллических электродов обеспечивает получение высококачественного соединения этих элементов, обладающего минимальным термическим сопротивлением.

Для решения поставленной задачи весь электрод условно разобьём на три участка (слоя) длиной  $L_1$ ,  $L_2$  и  $L_3$ , отличающихся между собой характером относительного расположения материалов оболочки и сердечника. В результате получим вариант прохождения теплового потока  $Q$  через трёхслойную плоскую «стенку» с последовательным расположением слоёв. Общее термическое сопротивление такой «стенки» определится следующим образом [4]:

$$R = R_1 + R_2 + R_3, \quad (1)$$

где  $R_1$ ,  $R_2$ , и  $R_3$  – соответственно термическое сопротивление первого, второго и третьего участков электрода.

Это же термическое сопротивление можно представить в другом виде, используя для этого коэффициент эффективной теплопроводности [2]:

$$R = \frac{L}{F \lambda_{эф}}, \quad (2)$$

где  $L$  – длина электрода;  $F$  – площадь поперечного сечения электрода;  $\lambda_{эф}$  – коэффициент эффективной теплопроводности биметаллического электрода.

Из формул (1) и (2) следует, что коэффициент эффективной теплопроводности биметаллического электрода можно определить следующим образом:

$$\lambda_{эф} = \frac{L}{F(R_1 + R_2 + R_3)} = \frac{L}{\pi r^2 (R_1 + R_2 + R_3)}, \quad (3)$$

где  $r$  – радиус электрода.

Для получения окончательной формулы для расчёта  $\lambda_{эф}$  определим термические сопротивления  $R_1$ ,  $R_2$  и  $R_3$  для каждого из участков электрода.

**Участок первый.** Термическое сопротивление  $R_1$  первого участка определится по следующей формуле [4]:

$$R_1 = \frac{L_1}{F \lambda_s} = \frac{L_1}{\pi r^2 \lambda_s}, \quad (4)$$

где  $L_1$  – длина участка;  $F$  – площадь поперечного сечения участка;  $\lambda_s$  – коэффициент теплопроводности материала оболочки;  $r$  – радиус электрода.

**Участок второй.** Второй участок можно представить состоящим из  $n$ -го числа последовательно расположенных поперечных слоёв электрода толщиной  $\Delta x_i$  (рис. 3). Каждый из них, в свою очередь, состоит из параллельно соединённых слоёв (проводников тепла) – оболочки и сердечника, относительный объём которых при переходе от одного поперечного слоя к другому изменяется в соответствии с аппроксимирующей функцией  $f(x)$ .

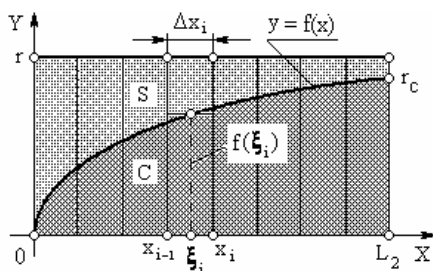


Рис. 3. Схема к расчёту термического сопротивления второго участка

Термическое сопротивление элементарного слоя толщиной  $\Delta x_i$ , представляющего собой параллельное соединение проводников тепла, можно рассчитать по следующей формуле [5]:

$$R_i = \frac{1}{\pi (\lambda_c - \lambda_s) f^2(\xi_i) + r^2 \lambda_s} \Delta x_i \quad (5)$$

Тогда общее термическое сопротивление всех последовательно соединённых элементарных слоёв участка определится следующим образом:

$$R_2 = \frac{1}{\pi} \sum_{i=1}^n \frac{\Delta x_i}{(\lambda_c - \lambda_s) f^2(\xi_i) + r^2 \lambda_s} \quad (6)$$

А термическое сопротивление всего участка будет равно:

$$R_2 = \lim_{\Delta x_i \rightarrow 0} \frac{1}{\pi} \sum_{i=1}^n \frac{\Delta x_i}{(\lambda_c - \lambda_s) f^2(\xi_i) + r^2 \lambda_s} = \frac{1}{\pi} \int_0^{L_2} \frac{dx}{(\lambda_c - \lambda_s) [f(x)]^2 + r^2 \lambda_s}, \quad (7)$$

где  $\lambda_c$  – коэффициент теплопроводности материала сердечника;  $f(x)$  – аппроксимирующая непрерывная функция, описывающая криволинейную границу раздела оболочки и сердечника. Согласно работе [6] эта криволинейная граница достаточно хорошо описывается каноническим уравнением параболы  $y^2 = 2px$ . Подставив эту параболическую функцию в выражение (7) и выполнив соответствующие преобразования, получим:

$$R_2 = \frac{1}{2\pi p (\lambda_c - \lambda_s)} \ln \left[ \frac{2pL_2 (\lambda_c - \lambda_s)}{r^2 \lambda_s} + 1 \right] \quad (8)$$

где  $p$  – параметр параболы, зависящий от условий деформирования.

**Участок третий.** Данный участок можно рассматривать в виде параллельного соединения двух проводников тепла – оболочки и сердечника. Термическое сопротивление такого участка равно:

$$R_3 = \frac{L_3}{F_s \lambda_s + F_c \lambda_c}, \quad (9)$$

где  $F_s$  и  $F_c$  – площадь поперечного сечения оболочки и сердечника соответственно;

Выразив площади сечений  $F_s$  и  $F_c$  через их радиусы  $r$  и  $r_c$  (где  $r_c = d_c/2$ ), получим:

$$R_3 = \frac{L_3}{\pi (r_c^2 (\lambda_c - \lambda_s) + r^2 \lambda_s)} \quad (10)$$

Подставив найденные для определения термических сопротивлений выражения (4), (8) и (10) в формулу (3), получим искомое выражение для определения коэффициента эффективной теплопроводности биметаллического центрального электрода свечи зажигания:

$$\lambda_{эф} = L \left[ \frac{L_1}{\lambda_s} + \frac{r^2}{2p(\lambda_c - \lambda_s)} \ln \left( \frac{2p(\lambda_c - \lambda_s)L_2}{r^2 \lambda_s} + 1 \right) + \frac{r^2 L_3}{r_c^2 (\lambda_c - \lambda_s) + r^2 \lambda_s} \right]^{-1} \quad (11)$$

Для проверки достоверности полученного результата рассмотрим два предельных случая относительного объёма одного из компонентов электрода, например компонента  $C$  (сердечника). Относительный объём сердечника представляет собой следующую величину:  $m_C = V_C/V$ , где  $V_C$  – объём сердечника,  $V$  – объём электрода. Очевидно, что в предельных случаях для относительного объёма любого из компонентов, равного 0 или 1, функция (11) должна дать величину теплопроводности соответствующего компонента. Рассмотрим эти случаи.

**Случай первый.** Относительный объём сердечника  $m_C \rightarrow 0$ . Это происходит при следующих условиях:  $p \rightarrow 0$  и  $r_C \rightarrow 0$ . При этом биметаллический электрод трансформируется в монометаллический, состоящий из материала оболочки, теплопроводность которого равна  $\lambda_S$ . Это следует из нахождения предела функции (11) при  $p \rightarrow 0$  и  $r_C \rightarrow 0$ :

$$\lim_{\substack{p \rightarrow 0 \\ r_C \rightarrow 0}} L \left[ \frac{L_1}{\lambda_S} + \frac{r^2}{2p(\lambda_C - \lambda_S)} \ln \left( \frac{2pL_2(\lambda_C - \lambda_S)}{r^2\lambda_S} + 1 \right) + \frac{r^2L_3}{r_c^2(\lambda_C - \lambda_S) + r^2\lambda_S} \right]^{-1} = \lambda_S \quad (12)$$

**Случай второй.** Относительный объём сердечника  $m_C \rightarrow 1$ . Происходит это при следующих условиях:  $p \rightarrow \infty$ ,  $r_C \rightarrow r$ ,  $L_1 \rightarrow 0$  и  $L_3 \rightarrow L$ . В этом случае биметаллический электрод также трансформируется в монометаллический, но состоит из материала сердечника, теплопроводность которого равна  $\lambda_C$ . Это следует из нахождения предела функции (11) при указанных выше условиях:

$$\lim_{\substack{p \rightarrow \infty \\ r_C \rightarrow r \\ L_1 \rightarrow 0 \\ L_3 \rightarrow L}} L \left[ \frac{L_1}{\lambda_S} + \frac{r^2}{2p(\lambda_C - \lambda_S)} \ln \left( \frac{2pL_2(\lambda_C - \lambda_S)}{r^2\lambda_S} + 1 \right) + \frac{r^2L_3}{r_c^2(\lambda_C - \lambda_S) + r^2\lambda_S} \right]^{-1} = \lambda_C \quad (13)$$

Таким образом, полученные по формулам (12) и (13) результаты подтверждают достоверность найденной функциональной зависимости (11). Для практического применения этой зависимости целесообразно представить её в другом, более удобном для расчётов виде, выразив радиусы  $r_C$  и  $r$  через

соответствующие диаметры, и приняв во внимание, что  $2p = r^2C/L_2$  и  $2pL_2 = r^2C$ :

$$\lambda_{\text{эф}} = L \left\{ \frac{L_1}{\lambda_S} + \left( \frac{d}{d_C} \right)^2 \frac{L_2}{(\lambda_C - \lambda_S)} \ln \left[ 1 + \left( \frac{d_C}{d} \right)^2 \times \left( \frac{\lambda_C}{\lambda_S} - 1 \right) \right] + \frac{L_3}{(d_C/d)^2(\lambda_C - \lambda_S) + \lambda_S} \right\}^{-1} \quad (14)$$

### Экспериментальная часть

Для проверки адекватности полученной математической модели (14) и реального объекта были выполнены эксперименты по определению коэффициентов эффективной теплопроводности биметаллических электродов, имеющих различные геометрические параметры сердечника. Методика экспериментов заключалась в следующем.

С помощью метода вольтметра-амперметра при комнатной температуре измерялись полные электрические сопротивления  $R_{\text{эл}}$  исследуемых электродов. Затем по приведённой ниже формуле рассчитывались удельные электрические сопротивления электродов:

$$\rho = R_{\text{эл}} F / L \quad (15)$$

и далее по закону Видемана-Франца и Лоренца – коэффициенты эффективной теплопроводности электродов:

$$\lambda^{\text{эф}}_{\text{эф}} = L_0 T / \rho, \quad (16)$$

где  $L_0$  – число Лоренца (для чистых металлов  $L_0 \approx 2,47 \cdot 10^{-8}$  Вт Ом/К<sup>2</sup>).

Для повышения объективности и точности результатов теоретических исследований в формулу (14) подставляли значения коэффициентов  $\lambda_C$  и  $\lambda_S$ , найденные по этой же методике. При этом испытываемые образцы изготавливались из тех же материалов, что и электроды – из меди М1 (99,9 % Cu) и никеля НП2 (99,5 % Ni). Результаты исследований приведены в таблице.

По результатам исследований построены графики зависимостей  $\lambda^{\text{эф}}_{\text{эф}} = \lambda^{\text{эф}}_{\text{эф}}(m_C)$  и  $\lambda^{\text{эф}}_{\text{эф}} = \lambda^{\text{эф}}_{\text{эф}}(m_C)$ , представленные на рис. 4 и показывающие влияние относительного объёма сердечника биметаллического электрода на величину его эффективной теплопроводности.

Таблица. Теоретические ( $\lambda^T_{эф}$ ) и экспериментальные ( $\lambda^э_{эф}$ ) значения коэффициентов эффективной теплопроводности биметаллических электродов, имеющих различные размеры сердечника

№ электрода	Параметры электрода (см. рис.2)							$t, ^\circ\text{C}$	$\lambda_C, \text{Вт/мК}$	$\lambda_S, \text{Вт/мК}$	$R_{эл}, \text{МОм}$	$\lambda^э_{эф}, \text{Вт/мК}$	$\lambda^T_{эф}, \text{Вт/мК}$
	$d, \text{мм}$	$L, \text{мм}$	$L_1, \text{мм}$	$L_2, \text{мм}$	$L_3, \text{мм}$	$d_C, \text{мм}$	$m_C, \text{мм}$						
1	2,5	2,8	1,5	4,7	21,8	2,2	0,67	20	387	73,6	0,204	203	239
2			2,5	6,2	19,3	2,0	0,51					162	193
3			3,5	8,3	16,2	1,8	0,38					132	159
4			4,5	9,2	14,3	1,6	0,32					115	137
5			6,5	11,5	10,0	1,4	0,17					95	114

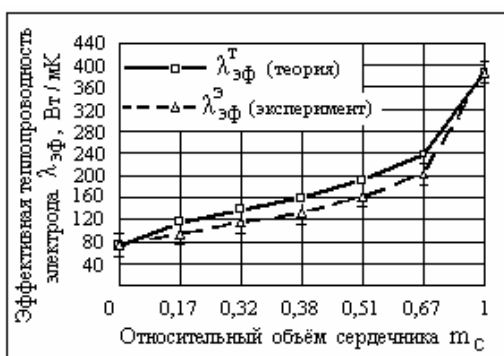


Рис. 4. Влияние относительного объема сердечника  $m_C$  биметаллического электрода на величину его эффективной теплопроводности  $\lambda_{эф}$

**Заключение**

1. Получена аналитическая зависимость (модель изменения теплопроводности биметаллического электрода), позволяющая приближённо определить эффективную теплопроводность биметаллического электрода в условиях осевого теплового потока. В общем виде зависимость может быть представлена следующим образом:

$$\lambda_{эф} = \lambda_{эф}(\lambda_C, \lambda_S, d, d_C, L_1, L_2, L_3) \quad (17)$$

2. Расчёты, выполненные с применением этой модели, показывают, что эффективная теплопроводность биметаллического электрода может изменяться более чем в два раза за счёт изменения размеров сердечника электрода.

3. Для практического использования модели требуется её дальнейшее усовершенствование, связанное с необходимостью учёта радиального теплового потока.

4. Расхождение экспериментальных ( $\lambda^э_{эф}$ ) и теоретических ( $\lambda^T_{эф}$ ) значений коэффициентов эффективной теплопроводности, достигающее 18...20%, можно объяснить, в первую очередь, наличием в зоне контакта поверхностей оболочки и сердечника термического сопротивления, которое в аналитической зависимости (14) не учитывается.

**Список литературы:**

1. Басс Б.А. Свечи зажигания. Краткий справочник / Б.А. Басс. – М.: ЗАО КЖИ «За рулём», 2002. – 120 с. 2. Дульнев Г.Н., Заричняк Ю.Л. Теплопроводность смесей и композиционных материалов / Г.Н. Дульнев, Ю.Л. Заричняк. – Л.: Энергия, 1974. – 264 с. 3. Яхутль Д.Р. Расчётный и экспериментальный метод определения температурного поля и кашальных чисел свечей зажигания бензиновых двигателей: автореф. ...дисс. канд. техн. наук: 05.04.02 / Д.Р. Яхутль. – М.: НИИАЭ, 1991. – 23 с. 4. Цирельман Н.М. Теория и прикладные задачи тепломассопереноса. Часть 1: учеб. пособие / Н.М. Цирельман. – Уфа: Уфимский государственный авиационный технический университет, 2002. – 108 с. 5. Теплотехника. Учеб. для вузов / В.Н. Луканин, М.Г. Шатров, Г.М. Камфер; под ред. В.Н. Луканина. – 4-е изд., испр. – М.: Высш. шк., 2003. – 671 с. 6. Перлин И.Л., Райтбарг Л.Х. Теория прессования металлов / И.Л. Перлин, Л.Х. Райтбарг. – М.: Металлургия, 1975. – 448 с.

УДК 621.577

Н.И. Радченко, д-р техн. наук, А.А. Андреев, асп.

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЕПЛОТЫ УХОДЯЩИХ ГАЗОВ ДЛЯ ОХЛАЖДЕНИЯ НАДУВОВОЧНОГО ВОЗДУХА СУДОВЫХ МАЛООБОРОТНЫХ ДИЗЕЛЕЙ**

**Анализ проблемы и постановка цели исследования**

Одним из основных направлений улучшения

показателей ДВС является совершенствование систем турбонадува. Главным элементом этих систем является турбокомпрессор (ТК), в состав которого