

УДК 621.43.016.4(031)

DOI 10.22213/2413-1172-2017-4-82-85

**В. А. Куликов**, доктор технических наук, профессор, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова**В. Н. Сяктерев**, кандидат технических наук, доцент, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова**В. В. Сяктерева**, кандидат технических наук, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова**И. Л. Охильков**, аспирант, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ГРАНИЧНЫХ УСЛОВИЙ ТЕПЛООБМЕНА В ДЕТАЛЯХ ДВИГАТЕЛЕЙ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ

**В**озможность расчетного определения теплового состояния деталей двигателей внутреннего сгорания (ДВС) представляет большой практический интерес при проектировании двигателей, прогнозировании их температурного состояния при различных условиях эксплуатации.

В общем случае уравнения, описывающие температурные поля деталей ДВС, являются нелинейными дифференциальными уравнениями в частных производных со сложными, переменными во времени граничными условиями [1].

Решение таких уравнений осуществляется в основном численными методами, в частности методом конечных элементов (МКЭ). Положительной стороной МКЭ является универсальность относительно задания краевых условий, то есть возможность создания программы для определения количества узловых точек с последующим произвольным выбором координат расчетных точек. Метод позволяет решать задачи теплопроводности для сложных областей с различными неоднородностями и находит в последнее время большое применение для расчета полей температур в деталях ДВС, так как дает возможность кроме задачи теплопроводности при одной и той же дискретно-элементной модели решать задачи теории упругости, пластичности и ползучести [2].

Однако, несмотря на большие возможности МКЭ и имеющиеся на его основе интегрированные пакеты, точность получаемых результатов зависит от точности задания граничных условий (ГУ) теплообмена деталей двигателя с рабочим телом и окружающей средой.

При оценке теплообмена для деталей двигателя, образующих камеру сгорания, со стороны рабочих газов каждый участок тепловоспринимающей поверхности характеризуется своим переменным по углу поворота коленчатого вала

коэффициентом теплоотдачи. Значение коэффициента теплоотдачи можно найти, решив уравнения пограничного слоя [3], используемые в теории конвективного теплообмена, или из критериальных зависимостей для соответствующего типа двигателей [4]. Первый способ возможен при соответствующих допущениях в постановке задачи, поэтому при расчете сложных конструкций часто выбирают второй способ. Однако оказывается, что из многообразия эмпирических и полуэмпирических зависимостей трудно и даже невозможно подобрать формулу для нахождения коэффициента теплоотдачи, учитывающую особенности рассматриваемого двигателя. В связи с этим разработка и совершенствование экспериментальных методов определения ГУ и средств для их реализации является актуальной задачей.

Как известно, рабочий процесс ДВС на установившемся режиме работы состоит из непрерывного повторения одинаковых циклов, в течение которых параметры рабочих процессов двигателя изменяются в широких пределах. Процесс нестационарной теплоотдачи от рабочего тела к стенкам деталей, образующих камеру сгорания двигателя, описывается дифференциальным уравнением теплообмена

$$\alpha(t)[T_{\Gamma}(t) - T(t)] = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x}(t), \quad (1)$$

где  $\alpha(t)$  – коэффициент теплоотдачи от газа к стенкам деталей камеры сгорания;  $T_{\Gamma}(t)$  – температура газа в камере сгорания;  $T(t)$  – температура поверхности деталей камеры сгорания;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности деталей;  $\frac{\partial T}{\partial x}(t)$  – температурный градиент по нормали к поверхности деталей в момент времени  $t$ .

Принимая допущения об одномерности процесса распространения тепла к деталям камеры сгорания двигателя [5], данное уравнение можно использовать в качестве основы для экспериментального определения ГУ теплообмена в ДВС.

Таким образом, по данному уравнению мгновенные значения коэффициента теплоотдачи могут быть определены, если экспериментальным путем измерены температура пламени в камере сгорания, мгновенная температура внутренней поверхности деталей, образующих камеру сгорания, и градиент температуры в сторону охлаждения деталей.

Основным методом экспериментального определения циклической температуры газа в камере сгорания ДВС является метод обработки индикаторных диаграмм, полученных на основе экспериментального измерения кривой давления в камере сгорания двигателя. Однако определенное таким образом значение температуры газа содержит погрешности методического характера и не отражает картину реального процесса сгорания топлива в цилиндре двигателя, так как в этом случае в процессе теплообмена не учитывается радиационная составляющая, вызванная свечением пламени, обусловленная наличием в нем продуктов разложения углеводородов. С другой стороны, данные о спектральном составе пламени, полученные при сжигании в топках газообразного и жидкого топлива, показывают [6], что его излучение слабоселективное и имеет сплошной спектр. Поэтому для измерения температуры пламени в камере сгорания ДВС перспективно исследование возможности применения методов оптической пирометрии.

Для измерения температуры пламени в камере сгорания ДВС разработан пирометр спектрального отношения, работающий в спектральном диапазоне 0,56...0,65 мкм. Принцип работы пирометра и его характеристики ранее описаны в [7], а устройство оптической системы разработанного пирометра для использования в ДВС приведено на рис. 1.

Устройство состоит из стального корпуса 1, вмонтированного в деталь камеры сгорания 5, с вклеенным в него кварцевым световодом 2 с симметрично срезанными выходными концами. Параллельно срезам выходного конца световода установлены интерференционные светофильтры 4 и кремниевые фотодиоды 3.

Для измерения внутренней циклической температуры поверхности камеры сгорания разработана пленочная термопара железо – никель,

конструкция которой и схема установки представлены на рис. 2. Чувствительным элементом термопары является тонкая (0,1 мкм) пленка никеля, нанесенная на поверхность методом термического испарения в вакууме.

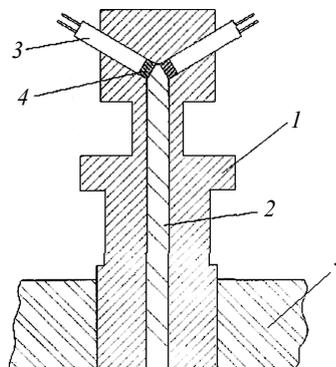


Рис. 1. Оптическая система пирометра спектрального отношения

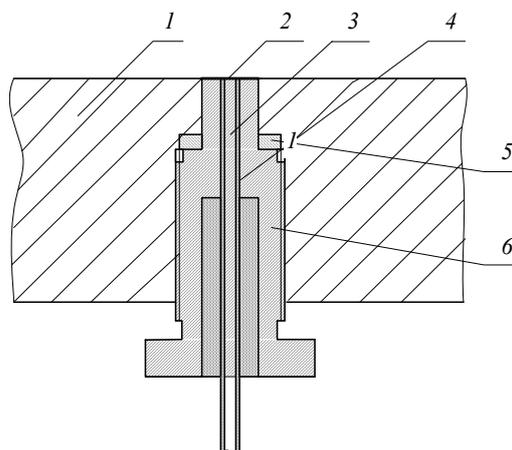


Рис. 2. Схема установки и конструкция пленочной термопары: 1 – деталь; 2 – никелевая пленка; 3 – никелевый электрод; 4 – оксидная изоляция; 5 – уплотнительная шайба; 6 – корпус датчика

На рис. 3 приведены рассчитанные на ЭВМ динамические характеристики изготовленной термопары, полученные из анализа совместного решения задачи нестационарной теплопроводности для температурного поля пластины и полуограниченного тела, находящихся в контакте [8].

Анализ результатов показывает, что разработанная пленочная термопара является практически безинерционным регистратором температуры внутренней поверхности деталей камеры сгорания двигателя с частотами исследуемого процесса вплоть до максимальной частоты 100 кГц.

Термоэлектродвижущая сила пленочной термопары усиливалась специально изготовлен-

ным усилителем, имеющим линейную амплитудно-частотную характеристику до 7000 Гц и регулируемый до 15000 единиц коэффициент усиления.

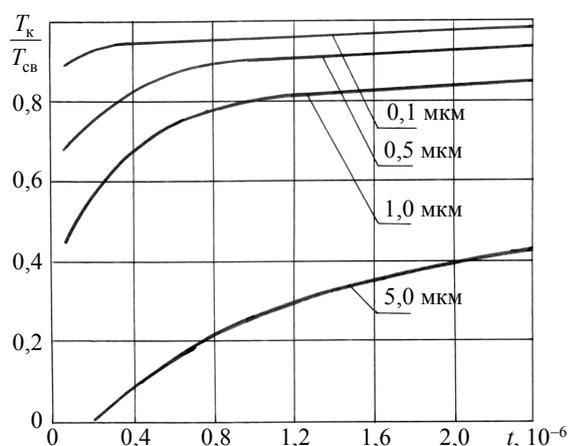


Рис. 3. Динамические характеристики пленочных термопар железо – никель при различной толщине пленки никеля:  $T_k$  – температура контакта неограниченной пластины и полуограниченного тела;  $T_{св}$  – температура свободной поверхности неограниченной пластины

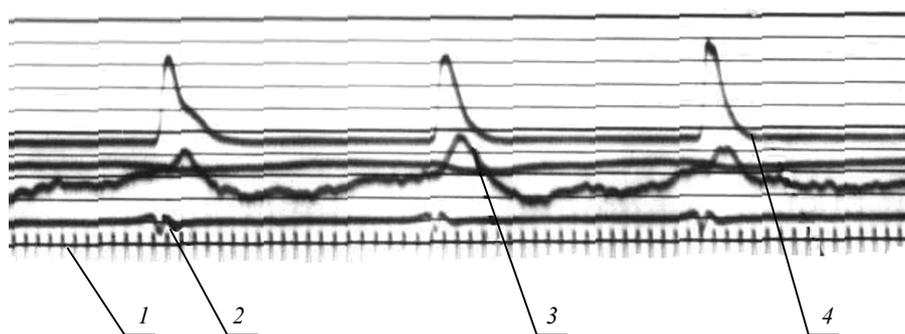


Рис. 4. Оциллограммы результатов измерений: 1 – метки времени; 2 – отметка ВМТ; 3 – температура внутренней поверхности головки цилиндра; 4 – температура пламени

Таким образом, экспериментальное измерение параметров теплообмена в камере сгорания ДВС, входящих в уравнение (1), с применением методов пирометрии спектрального отношения и пленочных термопар с использованием электронной аппаратуры на основе средств современной вычислительной техники является эффективным экспериментальным методом определения граничных условий теплообмена в деталях ДВС.

#### Библиографические ссылки

1. Костин А. К., Ларионов В. В., Михайлов Л. И. Теплонапряженность двигателей внутреннего сгорания : справочное пособие. Л. : Машиностроение, 1979. 222 с.
2. Задание граничных условий теплообмена в рабочих полостях головки цилиндра четырехтактного двигателя внутреннего сгорания / Ю. В. Гальшев,

Фрагменты осциллограмм, показывающие результаты измерений температуры пламени, внутренней поверхности камеры сгорания с отметками положения верхней мертвой точки поршня (ВМТ) и времени, представлены на рис. 4.

Как следует из обработки результатов измерений, проведенных на двухтактном малогабаритном двигателе с искровым зажиганием на бензиновом топливе А-76, температура пламени, имеющая максимальное значение для исследуемого режима работы при десяти градусах поворота коленчатого вала двигателя от положения ВМТ поршня, составляет 1950 °С. Соответствующая этому моменту времени мгновенная температура поверхности стенки детали камеры сгорания составляет 358 °С, а температура детали на глубине 2 мм от поверхности камеры сгорания – 239 °С. Рассчитанное по уравнению (1) значение мгновенного коэффициента теплоотдачи к стенкам камеры сгорания имеет значение  $780 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$ , что согласуется с данными, приводимыми в работе [9].

А. Ю. Шабанов, А. Б. Зайцев, М. Н. Немчиков // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. 2014. № 2(195). С. 58–64.

3. Петриченко Р. М. Физические основы внутрицилиндровых процессах в двигателях внутреннего сгорания. Л. : Изд-во Ленинградского университета, 1983. 244 с.

4. Костин А. К., Ларионов В. В., Михайлов Л. И. Указ. соч.

5. Розенблит Г. Б. Теплопередача в дизелях. М. : Машиностроение, 1977. 216 с.

6. Кадышев А. Е. Измерение температуры пламени. Физические основы и методы. М. : Металлургия, 1961. 218 с.

7. Ключников Г. М., Сяктерев В. Н. Комплекс для измерения температур в двигателях внутреннего сгорания // Мотовелопромшленность. 1982. № 6. С. 11–16.

8. Поляков Ю. А. Применение пленочных датчиков для изучения теплообмена в диссоциированном

потоке газа // Физическая газодинамика, теплообмен и термодинамика газов при высоких температурах : сб. науч. тр. М. : АН СССР, 1962. С. 251–260.

9. Корепанов Е. В., Сяктерев В. Н. Расчётно-экспериментальный метод исследования теплоотдачи поршней мотоциклетных двигателей внутреннего сгорания // Гидрогазодинамика течений с тепломассообменом : межвуз. сб. науч. тр. / Ижевский механический институт. Ижевск, 1989. С. 135–139.

### References

1. Kostin A. K., Larionov V. V., Mikhailov L. I. (1979). *Teplonapryazhennost' dvigatelei vnutrennego sgoraniya* [Thermal stress of internal combustion engines]. Leningrad: Mashinostroenie (in Russ.).

2. Galyshev Yu. V., Shabanov A. Yu., Zaitsev A. B., Nemchikov M. N. (2014). *Nauchno-tekhnicheskie vedomosti Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo politekhnicheskogo universiteta* [Scientific and Technical Bulletins of St. Petersburg State Polytechnic University], no. 2, pp. 58-64 (in Russ.).

3. Petrichenko R. M. (1983). *Fizicheskie osnovy vnutrisilindrovyykh protsessakh v dvigatelyakh vnutrennego sgoraniya* [Physical basis of intra-cylinder processes in internal combustion engines]. Leningrad: Leningradskii universitet (in Russ.).

4. Kostin A. K., Larionov V. V., Mikhailov L. I. (1979). *Op. cit.*

5. Rozenblit G. B. (1977). *Teploperedacha v dizelyakh* [Heat transfer in diesels]. Moscow: Mashinostroenie (in Russ.).

6. Kadyshovich A. E. (1961). *Izmerenie temperatury plameni. Fizicheskie osnovy i metody* [Measurement of flame temperature. Principal physics and methods]. Moscow: Metallurgiya (in Russ.).

7. Klyuchnikov G. M., Syakterev V. N. (1982). *Motovelopromyshlennost'* [Motor-cycle industry], no. 2, pp. 11-16 (in Russ.).

8. Polyakov Yu. A. (1962). *Primenenie plenochnykh datchikov dlya izucheniya teploobmena v dissotsirovanom potoke gaza* [Use of film gages for studying of heat exchange in the dissociated gas current]. *Fizicheskaya gazodinamika, teploobmen i termodinamika gazov pri vysokikh temperaturakh* [Physical gas dynamics, heat transfer and thermodynamics of gases at high temperatures]. Moscow: Akademiya nauk SSSR, pp. 251-260 (in Russ.).

9. Korepanov E. V., Syakterev V. N. (1989). *Raschetno-eksperimental'nyi metod issledovaniya teplootdachi porshnei mototsikletrykh dvigatelei vnutrennego sgoraniya* [The calculated and experimental research technique of a thermolysis of pistons of motorcycle internal combustion engine]. *Gidrogazodinamika techenii s teplomassoobmenom* [Hydrodynamics of flows with heat and mass transfer]. Izhevsk: Izhevskii mekhanicheskii institute, pp. 135-139 (in Russ.).

Получено 31.10.2017