

12) изучать влияние теплотехнических характеристик отопительных приборов в ЦТП, состояние теплоизоляции труб и здания в целом на величину теплопотерь в ЦТП;

13) выявлять оптимальные режимы работы ЦТП, направленные на снижение температуры и расхода теплоносителя от энергоисточника;

14) выполнять ряд расчетов познавательного характера.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Байрашевский, Б. А. Оценка теплопотерь и эффективности работы теплосетей / Б. А. Байрашевский // Вес. Нац. акад. наук Беларуси. Сер. ФТН. – 2004. – № 4.

2. Байрашевский, Б. А. Влияние теплопотерь в окружающую среду на температурный режим работы теплообменников // Б. А. Байрашевский, Н. П. Борушко // Вес. Нац. акад. наук Беларуси. Сер. ФТН. – 2000. – № 2.

3. Байрашевский, Б. А. Стабилизация теплового и гидравлического режимов работы теплосетей / Б. А. Байрашевский // Вес. Нац. акад. наук Беларуси. Сер. ФТН. – 2005. – № 4.

Поступила 14.02.2006

УДК 621.4:536.46

### **К ВОПРОСУ О РАСЧЕТЕ СКОРОСТИ ГОРЕНИЯ АЛЬТЕРНАТИВНЫХ МОТОРНЫХ ТОПЛИВ**

**Канд. техн. наук АССАД М. С.**

*Барановичский государственный университет*

Использование альтернативных моторных топлив в двигателях внутреннего сгорания требует всестороннего изучения их влияния на процесс сгорания, который характеризуется главным образом изменением скоростей химической реакции горения и распространения фронта пламени в камере сгорания в зависимости от режима работы двигателя. Для исследования физической картины распространения пламени при горении альтернативных моторных топлив была использована экспериментальная установка, представляющая собой закрытый сосуд в виде прозрачной камеры сгорания цилиндрической формы, постоянного объема, внутренним диаметром 80 мм и высотой 32 мм (рис. 1). Воспламенение топливовоздушной смеси производилось свечой зажигания, установленной в цилиндрической стенке модельной камеры.

Важнейшей характеристикой процесса горения топливовоздушных смесей является скорость распространения пламени. При ламинарном горении в модельной камере сгорания имеют место два вида скоростей: нормальная и линейная скорости, которые можно охарактеризовать следующим образом. Нормальной, или фундаментальной, скоростью пламени  $v_n$

называется скорость распространения горения посредством теплопроводности и диффузии, определяемая по отношению к несгоревшему газу в направлении, перпендикулярном фронту горения [1].

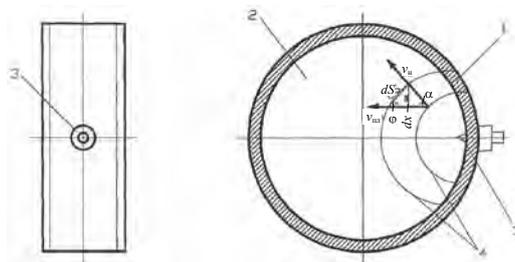


Рис. 1. Схема распространения пламени в модельной камере сгорания: 1 – цилиндрическая стенка камеры сгорания; 2 – прозрачная торцовая стенка камеры сгорания; 3 – свеча зажигания; 4 – две соседние ламины дуги пламени

Под линейной скоростью пламени  $v_{пл}$  будем понимать скорость перемещения фронта пламени относительно прозрачной торцовой стенки 2 модельной камеры сгорания (рис. 1). Линейная скорость может значительно отличаться от нормальной скорости в зависимости от условий горения.

По поводу физической сущности искрового зажигания существуют разные теории: теория ионной природы, тепловой механизм, а также совместное влияние теплового и ионизационного факторов.

Если рассматривать искру как обеспечивающий распространение пламени тепловой источник [2], то электрический разряд между электродами свечи приводит к воспламенению небольшой части горючей смеси, т. е. образуется начальный очаг горения (фаза задержки воспламенения – промежуток времени от начала реакции до того момента, когда реакция начинает резко ускоряться благодаря возрастанию температуры).

Согласно [3] при разогреве необходимого количества смеси до критической температуры произойдет дальнейшее распространение пламени, механизм которого сводится к ламинарному подогреву смеси перед фронтом пламени благодаря теплопроводности и диффузии. При этом все факторы, влияющие на нормальную скорость  $v_n$ , будут влиять на минимально необходимую (критическую) энергию зажигания  $Q_{кр}$ . Они связаны выражением

$$Q_{кр} \sim V_H^{(2...3)}.$$

Рассмотрим основную фазу процесса сгорания. Методом скоростного фотографирования установлено, что основная фаза сгорания представляет собой четко очерченную расширяющуюся дугу пламени 4 голубого цвета (рис. 1).

Поверхность голубой дуги представляет собой фронт пламени ламинарного горения, угол наклона которого к местному направлению линии потока свежей части смеси (по направлению пламени относительно прозрачной торцовой стенки 2 (рис. 1) камеры сгорания) в данной точке удовлетворяет соотношению:

$$\cos \alpha = \frac{dx}{dS} = \frac{v_{\text{пл}}}{v_{\text{н}}}, \quad (1)$$

или

$$\sin \varphi = \frac{dx}{dS} = \frac{v_{\text{пл}}}{v_{\text{н}}}, \quad (2)$$

где  $\alpha$  – угол между нормальной и линейной скоростями распространения пламени;  $\varphi$  – угол наклона элементарного сегмента поверхности фронта пламени  $dS$  к направлению линейной скорости  $v_{\text{пл}}$ ,  $\varphi = 90^\circ - \alpha$ .

Таким образом, фронт пламени устанавливается под таким углом  $\varphi$  к сечению  $dx$  элементарного цилиндрического объема свежей части смеси, что движущаяся вдоль этого элементарного объема свежая смесь успевает сгореть на элементе  $dS$  в процессе распространения пламени с нормальной скоростью  $v_{\text{н}}$ .

Следовательно:

$$v_{\text{пл}} = v_{\text{н}} \sin \varphi, \quad (3)$$

или

$$v_{\text{пл}} = v_{\text{н}} \cos \alpha. \quad (4)$$

Линейная скорость распространения пламени математически представляет собой приращение радиуса дуги пламени  $r$  относительно времени  $\tau$ , т. е.

$$v_{\text{пл}} = \frac{dr}{d\tau}.$$

Так как горение происходит в закрытом сосуде, в котором свеча зажигания находится у цилиндрической стенки, можно предположить, что движение газов при расширении направлено к противоположной стенке камеры от свечи зажигания. Тогда фронт пламени будет двигаться со скоростью, определяемой степенью расширения газов при сгорании (это объясняется тем, что каждая элементарная ламина свежей части смеси толщиной  $dr$  после сгорания займет объем  $\varepsilon_p dr$ ). Поэтому линейная скорость распространения пламени относительно прозрачной торцевой стенки модельной камеры сгорания составит

$$v_{\text{пл}} = \varepsilon_p v_{\text{н}}, \quad (5)$$

где  $\varepsilon_p$  – коэффициент расширения при сгорании,

$$\varepsilon_p = \frac{T_{\text{сг}} M_{\text{сг}}}{T_0 M_0}.$$

Здесь  $T_0$ ,  $T_{\text{сг}}$  – соответственно начальная температура и температура сгорания;  $M_0$ ,  $M_{\text{сг}}$  – соответственно начальная масса (доля) смеси и масса продуктов сгорания (сгоревшей части смеси).

Известно [3, 4] уравнение для расчета квадратного значения нормальной скорости распространения пламени при горении различных топливо-воздушных смесей

$$v_n^2 = \frac{2Q\lambda_r}{\rho_{св}^2 C_{p\text{cp}}^2 (T_B - T_n)^2} \int_{T_n}^{T_r} W dT, \quad (6)$$

где  $Q$  – количество выделяемой теплоты, Дж/г;  $\lambda_r$  – коэффициент теплопроводности продуктов горения при  $T = T_r$ ;  $\rho_{св}$  – плотность свежей части топливоздушной смеси;  $C_{p\text{cp}}$  – средняя теплоемкость между  $T_n$  и  $T_B$ ;  $T_B$  – температура воспламенения смеси;  $T_n$  – начальная температура смеси;  $T_r$  – температура продуктов горения;  $W$  – скорость реакции,

$$W = -\frac{dc_A}{dt} = 2,74 \cdot 10^{25} d_{cp}^2 P c_A c_B e^{-\frac{E}{RT}} \sqrt{\frac{T}{M_{np}}}, \quad (7)$$

где  $d_{cp} = \frac{d_A + d_B}{2}$  – средний эффективный диаметр сталкивающихся молекул исходных компонентов  $A$  и  $B$ , см;  $P$  – так называемый вероятностный, или стерический, коэффициент;  $c_A, c_B$  – концентрация исходных компонентов, участвующих в реакции;  $E$  – энергия активации, кДж/(г · моль);  $R$  – универсальная газовая постоянная,  $R = 8,3$  Дж/(моль<sup>-1</sup> · К<sup>-1</sup>);  $T$  – температура горения смеси, К;  $M_{np} = \frac{M_A M_B}{M_A + M_B}$  – приведенный молекулярный вес ( $M_A, M_B$  – молекулярные веса компонентов реакции).

Таким образом, при известных значениях температуры сгорания и давления в камере (эти показатели можно определить как экспериментально, так и теоретически, вычислив по формулам, приведенным в [4–6]), и используя справочную литературу для определения входящих в формулы (6) и (7) коэффициентов и постоянных, можно производить приближенный расчет скорости распространения пламени для альтернативных моторных топлив.

Иногда удается определить не  $v_n$  или  $W$ , а величину, обратно пропорциональную ей,  $\tau$  – время или продолжительность сгорания смеси:

$$v_n \sim \frac{1}{\tau}.$$

В качестве примера произведем расчет продолжительности сгорания водородно-воздушной смеси стехиометрического состава при различных значениях начального давления в камере сгорания (в диапазоне 0,03–2 МПа) и сопоставим результаты с экспериментально полученными данными о продолжительности сгорания в диапазоне начальных давлений от 0,03 до 1 МПа.

В отношении данной смеси известно, что эффективные диаметры молекул водорода и воздуха равны соответственно:  $d_A = 2,06 \cdot 10^{-8}$  см и  $d_B = 3,72 \cdot 10^{-8}$  см [7], эффективная энергия активации  $E = 238,26$  кДж/(г · моль) [4], молекулярные веса водорода и воздуха равны соответственно:  $M_A = 2,016$  и  $M_B = 28,96$  [7];  $c_A = 0,3$ ;  $c_B = 0,7$ , температура  $T$  рассчитана по программе Equil для данного состава смеси с учетом начальных условий  $T_0$

=

= 293,15 К и  $p_0 = 0,03\text{--}2$  МПа. Тогда:  $d_{\text{ср}} = 3,23 \cdot 10^{-8}$  см;  $M_{\text{пр}} = 1,88$ .

Подставив постоянные величины в (7), получим следующую рабочую формулу для расчета скорости реакции

$$W = kPe^{\frac{E}{RT}}\sqrt{T},$$

где  $k = \frac{2,74 \cdot 10^{25} d_{\text{ср}} c_A c_B}{\sqrt{M_{\text{пр}}}} = 4,38 \cdot 10^9$  – постоянный множитель.

Так как  $W \approx -\frac{\Delta C_A}{\Delta \tau}$ , то  $\Delta \tau = \frac{0,3}{W}$ .

Подставив известную из эксперимента величину  $\Delta \tau$ , можно подобрать такое значение вероятностного коэффициента  $P$ , которое будет наилучшим образом аппроксимировать экспериментальные данные. Расчеты показали, что для водородно-воздушной смеси  $P = 2 \cdot 10^{-5}$ .

На рис. 2 изображен график изменения расчетных и экспериментальных значений продолжительности сгорания водородно-воздушной смеси в зависимости от значения начального давления  $p_0$ . Обе зависимости имеют одинаковый характер протекания, при этом с увеличением начального давления в камере сгорания (что моделирует процесс сжатия в двигателе внутреннего сгорания) уменьшается продолжительность сгорания смеси, которая, как отмечалось выше, находится в обратной зависимости от величины скорости распространения пламени.

Из рис. 2 видно, что соответствие между расчетными и экспериментальными значениями продолжительности сгорания, а следовательно, и скорости распространения пламени, водородно-воздушной смеси получается вполне удовлетворительным. В диапазоне начальных давлений от 0,2 до 0,6 МПа наблюдается частичное совпадение расчетных значений с экспериментальными. Однако при начальном давлении  $p_0 < 0,2$  МПа экспериментальные данные продолжительности сгорания оказались меньше расчетных в среднем на 20 %. Обратная картина наблюдается при  $p_0 > 0,6$  МПа, причем экспериментальные значения превышают расчетные не более чем на 10 %.

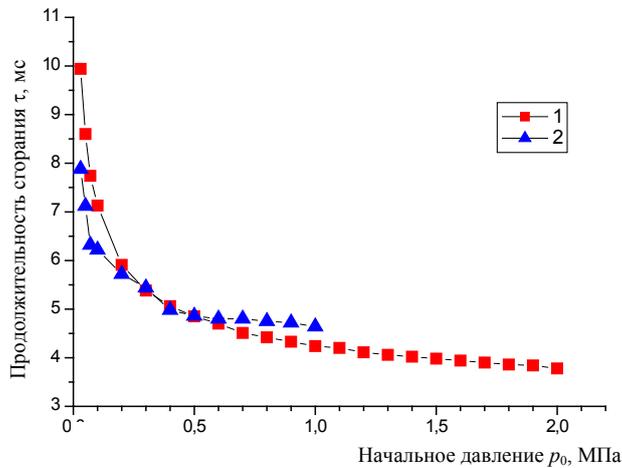


Рис. 2. Зависимость: 1 – расчетных и 2 – экспериментальных значений продолжительности сгорания водородно-воздушной смеси от начального давления  $p_0$  в камере сгорания

Несогласованность расчетных значений с экспериментальными данными во всем диапазоне использованных начальных давлений объясняется, видимо, сложностью механизма горения водорода в разных условиях.

### ВЫВОД

Несмотря на неполноту, описанный метод расчета скорости распространения пламени в модельной камере сгорания может оказаться полезным при выполнении аналогичного моделирования для исследования реальных процессов сгорания альтернативных моторных топлив в тепловых двигателях определенных типов. С помощью данного приближенного метода расчета скорости распространения пламени в камере сгорания можно получить при давлениях, соответствующих концу такта сжатия в двигателях внутреннего сгорания, результаты вполне удовлетворительные с погрешностью не более 10 %.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Щелкин, К. И. Газодинамика горения / К. И. Щелкин, Я. К. Трошин. – М.: Изд-во АН СССР, 1963. – С. 76.
2. Хитрин, Л. Н. Физика горения и взрыва / Л. Н. Хитрин. – М.: МГУ, 1957. – 442 с.
3. Зельдович, Я. Б. Химическая физика и гидродинамика / Я. Б. Зельдович. – М.: Наука, 1984. – 374 с.
4. Щетинков, Е. С. Физика горения газов / Е. С. Щетинков. – М.: Наука, 1965. – 739 с.
5. Семенов, Е. С. Исследование турбулентности в цилиндре поршневого двигателя / Е. С. Семенов, А. С. Соколик // Изв. АН СССР. – 1958. – № 8. – С. 130–140.
6. Соколик, А. С. Самовоспламенение, пламя и детонация в газах / А. С. Соколик. – М.: АН СССР, 1960. – 427 с.
7. Кей, Д. Справочник физика-экспериментатора / Д. Кей, Т. Лэби. – М., 1949.

Представлена кафедрой  
физико-математических  
дисциплин

Поступила 20.04.2006

УДК 621.382

## РАСЧЕТ ВОЛЬТ-АМПЕРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЛЕВЫХ ТРАНЗИСТОРОВ В ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМАХ АНАЛИТИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ

Канд. техн. наук, доц. БОНДАРЕВ В. А.

*Белорусский национальный технический университет*

Как показывает анализ, разработка эффективных физически обоснованных методов для расчета параметров транзисторов в интегральных схемах