

УДК 621.43.052

А.Н. Кабанов

Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет

МЕТОДИКА РАСЧЁТА ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЕПЛОТЫДЕЛЕНИЯ В ГАЗОВЫХ ДВИГАТЕЛЯХ С ИСКРОВОМ ЗАЖИГАНИЕМ

Предложены зависимости для расчёта переменного показателя сгорания проф. И.И. Вибе и продолжительности сгорания в газовых двигателях с искровым зажиганием. Выполнена экспериментальная проверка полученных зависимостей.

Ключевые слова: методика Вибе, процесс сгорания, характеристика теплотыделения, газовый двигатель.

Введение

На сегодняшний день внедрение природного газа в качестве моторного топлива на автомобильный транспорт является одним из самых эффективных способов улучшения экологической ситуации в местах массовой эксплуатации автомобилей. Вследствие этого возникает потребность в создании эффективной методики расчёта процесса сгорания двигателей, работающих на природном газе.

В настоящее время методика расчёта характеристики теплотыделения, предложенная проф. И.И. Вибе, является одной из самых востребованных в мире. Несмотря на бурное развитие CFD-моделирования, данная методика не потеряла своей актуальности, прежде всего благодаря удачному сочетанию простоты и надёжности. Несмотря на то, что в публикациях постоянно появляются рекомендации для расчёта показателя сгорания проф. И.И. Вибе и продолжительности сгорания для отдельных двигателей, в научной литературе не встречаются попытки систематизировать подобного рода информацию для газовых двигателей с искровым зажиганием. Следовательно, создание методики, позволяющей выполнять расчёт характеристики теплотыделения для газовых двигателей с искровым зажиганием, на данный момент является актуальной задачей.

Анализ публикаций по теме исследования

Работы по анализу изменения показателя сгорания И.И. Вибе m в процессе сгорания и продолжительности сгорания φ_z проводились неоднократно.

В [1] предлагается уравнение, где изменение показателя m в процессе сгорания определяется с использованием следующей зависимости

$$m = 10 \cdot \bar{\varphi}_m \cdot (1 - \bar{\varphi}^{\bar{\varphi}_m}), \quad (1)$$

где $\bar{\varphi}_m$ – относительный момент максимальной скорости теплотыделения; $\bar{\varphi}$ – относительный угол поворота коленчатого вала.

Исследование, проведенное в [1], показывает, что результаты расчётов по этому уравнению хорошо согласуются с экспериментальными данными. Зависимость (1) может быть использована для расчета процесса сгорания в дизелях, однако не может быть применена к двигателям с искровым зажиганием из-за большого различия в формах характеристик теплотыделения дизелей и двигателей с искровым зажиганием.

Известно несколько попыток определить изменение показателя сгорания двигателя с искровым зажиганием, работающего на газовом топливе [2, 3 и др.].

В [2] для двигателя, работающего на водороде, предложено уравнение для расчёта изменения показателя сгорания И.И. Вибе в диапазоне от $m_1 = 1,5$ до $m_2 = 4$

$$m = (m_2 - m_1) \cdot \bar{\varphi} + m_1, \quad (2)$$

где m_1 , m_2 – значения показателя сгорания в начале и в конце сгорания соответственно; $\bar{\varphi}$ – относительный угол поворота коленчатого вала двигателя.

Кроме того, в [2] предложена зависимость продолжительности сгорания от коэффициента избытка воздуха α .

В [3] предложены зависимости для величин m и φ_z для газового двигателя с искровым зажиганием, конвертированного из дизеля большой мощности Д240

$$m(\Delta p_k) = 0.872 + 0.0761 \cdot \Delta p_k - 0.0006 \cdot \Delta p_k^2; \quad (3)$$

$$\varphi_z(\Delta p_k) = 60.972 - 0.4277 \cdot \Delta p_k + 0.006 \cdot \Delta p_k^2 - 4 \cdot 10^{-5} \cdot \Delta p_k^3, \quad (4)$$

где Δp_k – разрежение во впускном коллекторе.

Данные зависимости показали хорошее соответствие расчётных данных результатам эксперимента и прекрасно соответствуют задачам, поставленным в соответствующих исследованиях, однако все они являются частными случаями, пригодными для использования на двигателях только определённого типа.

Цель исследования

Исходя из вышесказанного, целью данного исследования стала разработка зависимостей для переменного показателя сгорания проф. И.И. Вибе m_{var} и продолжительности сгорания φ_z для газовых двигателей с искровым зажиганием.

Описание методики

Основные факторы, влияющие на процесс сгорания в газовом двигателе с искровым зажиганием, можно условно разделить на две группы:

1. Обязательные параметры: частота вращения коленчатого вала двигателя n , мин⁻¹; угол опережения зажигания θ , град. пкв до ВМТ; коэффициент избытка воздуха α ; коэффициент наполнения η_v ; степень сжатия ε .

2. Необязательные параметры: объёмная доля водорода в смесевом топливе ψ , %; степень повышения давления при наддуве π_k .

Необязательные параметры в газовом двигателе с искровым зажиганием могут отсутствовать.

Предварительные экспериментальные исследования с целью получения характеристик тепловыделения для их последующего анализа выполнялись при помощи двух газовых ДВС с искровым зажиганием: малолитражного 4ГЧ7,5/7,35, работающего на смеси природного газа и водорода, созданного на базе бензинового МеМЗ-307, и тяжёлого 6ГЧН13/14 с регулируемым наддувом, созданного на базе дизеля ЯМЗ-236. Оба газовых двигателя управляются при помощи технологии drive-by-wire, то есть управление всеми регулировочными параметрами осуществляется при помощи микропроцессорной системы управления. При помощи данной технологии было реализовано смешанное регулирование мощности двигателей.

В результате анализа полученных характеристик тепловыделения получены уравнения для расчёта переменного показателя сгорания проф. И.И. Вибе m_{var} .

В общем виде зависимость для m_{var} будет выглядеть следующим образом

$$m_{var_i} = 10,639 \cdot \bar{\varphi}_i \cdot A \cdot B \cdot C \cdot E \cdot F + J, \quad (5)$$

где

$$J = -28,025 \cdot \bar{\varphi}_i^2 + 98,045 \cdot \bar{\varphi}_i^3 - 156,86 \cdot \bar{\varphi}_i^4 + 86,88 \cdot \bar{\varphi}_i^5; \quad (6)$$

$$A = \frac{n+18}{40}, \quad (7)$$

$$B = \alpha + 0,00025, \quad (8)$$

$$C = \frac{e+1}{11}. \quad (9)$$

Для малолитражного газового двигателя

$$E = \frac{n+500}{5000}, \quad (10)$$

$$F = \frac{z_v - 0,25}{0,8}. \quad (11)$$

Для тяжёлого газового двигателя

$$E = \frac{n+1100}{3000}, \quad (12)$$

$$F = \frac{0,005 \cdot z_v + 0,005}{0,01}, \quad (13)$$

где $\bar{\varphi}_i$ – относительный угол сгорания, $\bar{\varphi}_i = 0 \dots 1$; n – частота вращения коленчатого вала двигателя, мин^{-1} ; α – коэффициент избытка воздуха; η_v – коэффициент наполнения; θ – угол опережения зажигания, град. пкв до ВМТ; ε – степень сжатия.

Влияние степени повышения давления при наддуве π_k и объёмной доли водорода в топливе ψ влияет на m_{var} следующим образом

$$m_{vari} = m_{var0i} \cdot \frac{\pi_k + 0,001}{0,95}, \quad (14)$$

$$m_{vari} = m_{var0i} - 2,3 \cdot \psi, \quad (15)$$

где m_{var0i} – значение m_{vari} , рассчитанное по формуле (5).

Сравнение расчётных и экспериментальных характеристик, описывающих изменение показателя сгорания И.И. Вибе в процессе сгорания в двигателе 4ГЧ7,5/7,35, приведено на рис. 1.

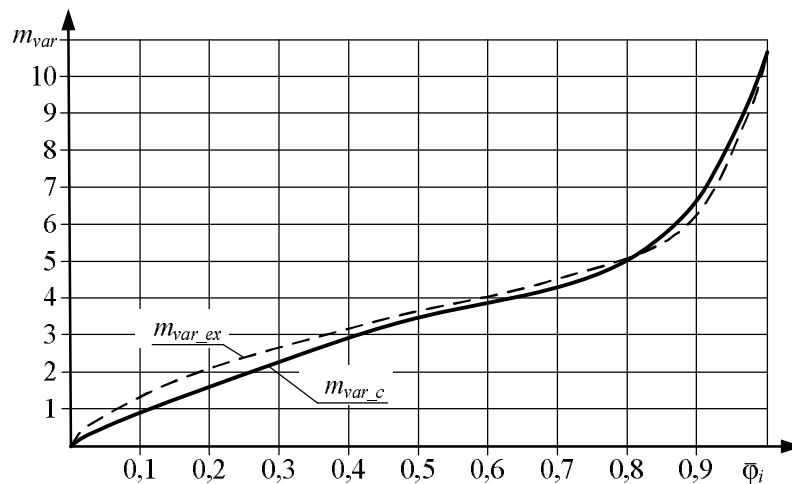


Рис. 1. Изменение переменного показателя сгорания И.И. Вибе в процессе сгорания:

m_{var_ex} – эксперимент; m_{var_c} – расчёт

Зависимость для продолжительности сгорания φ_z газового двигателя с искровым зажиганием будет выглядеть следующим образом

$$\varphi_z = D_{\varphi z} (0,8126 - A_{\varphi z} \cdot \psi + B_{\varphi z} \cdot n - 0,1258 \cdot z_v - (e - 8) \cdot E_{\varphi z} + C_{\varphi z}). \quad (16)$$

Для тяжёлого газового двигателя с искровым зажиганием $A_{\varphi z} = 0,051$; $B_{\varphi z} = 13,223 \cdot 10^{-4}$; $C_{\varphi z} = 0,512$; $D_{\varphi z} = 28,25$; $E_{\varphi z} = 0,031$. Для малолитражного газового двигателя с искровым зажиганием значения этих эмпирических коэффициентов составляют: $A_{\varphi z} = 0,045$; $B_{\varphi z} = 4,223 \cdot 10^{-4}$; $C_{\varphi z} = 1,28$; $D_{\varphi z} = 31$; $E_{\varphi z} = 1,28$.

Влияние давления наддува и объёмной доли водорода в топливе на продолжительность сгорания выражается следующим образом

$$\varphi_z = \varphi_{z0} - 16,272 \cdot (\pi_k - 1); \quad (17)$$

$$\varphi_z = \varphi_{z0} - 24,428 \cdot \psi, \quad (18)$$

где φ_{z0} – значение φ_z , рассчитанное по формуле (16).

Экспериментальная проверка методики

Экспериментальная проверка уравнений (5) и (16) выполнялась с использованием двигателей 4ГЧ7,5/7,35 и 6ГЧН13/14. Исследование выполнялось в диапазонах режимов работы двигателей, указанных в табл. 1 и 2.

Таблиця 1

Диапазон изменения показателей процесса сгорания газового двигателя 6ГЧН13/14, для которого осуществлялась проверка уравнений (5) и (16)

α	θ	n	π_k	η_v
–	град. пкв до ВМТ	хв^{-1}	–	–
1	5	800	1	0,24
1,5	40	2100	1,45	0,88

Таблиця 2

Диапазон изменения показателей процесса сгорания газового двигателя 4ГЧ7,5/7,35, для которого осуществлялась проверка уравнений (5) и (16)

α	θ	n	Ψ	η_v
–	град. пкв до ВМТ	хв^{-1}	–	–
1	5	800	0	0,21
4	70	5600	0,6	0,84

Экспериментальная проверка уравнений (5) и (16) для двигателя 6ГЧН13/14 в диапазоне, заданном в табл. 1, показала максимальную погрешность определения среднего индикаторного давления p_i в 5,4 %, в то время как использование табличных значений постоянного показателя сгорания m показало максимальную погрешность определения p_i в 9,3 % в этом же диапазоне.

Экспериментальная проверка уравнений (5) и (16) для двигателя 4ГЧ7,5/7,35 в диапазоне, заданном в табл. 2, показала максимальную погрешность определения p_i в 4,6 %, в то время как использование табличных значений постоянного показателя сгорания m показало максимальную погрешность определения p_i в 10,8 % в этом же диапазоне.

Выводы

1. Предложены уравнения, позволяющие выполнять расчёт переменного показателя сгорания проф. И.И. Вибе и продолжительности сгорания в газовых двигателях с искровым зажиганием.

2. Экспериментальная проверка предлагаемых уравнений для двигателя 6ГЧН13/14 показала максимальную погрешность определения среднего индикаторного давления p_i в 3,4 %, в то время как использование табличных значений постоянного показателя сгорания m показало максимальную погрешность определения p_i в 9,3 %.

3. Экспериментальная проверка предлагаемых уравнений для двигателя 4ГЧ7,5/7,35 показала максимальную погрешность определения p_i в 3,6 %, в то время как использование табличных значений постоянного показателя сгорания m показало максимальную погрешность определения p_i в 9,8 %.

1. Филиппковский А.И. Совершенствование рабочего процесса дизелей типа ЧН 32/32 на основе физического и математического моделирования: дис. канд. техн. наук: 05.04.02 / А.И. Филиппковский. Харьков, 1988. – 193 с.
2. Марченко А.П. Анализ и математическое моделирование и процесса сгорания водорода в четырехтактном одноцилиндровом двигателе с искровым воспламенением / А.П. Марченко, А.А. Осетров, И. Дубей, Р. Маамри // Двигатели внутреннего сгорания. – 2010. – № 1. – С. 24-28.
3. Козачук І.С. Покращення індикаторних, ефективних та екологічних показників газових двигунів, переобладнаних з дизелів: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: спец. 05.05.03 «Двигуни та енергетичні установки» / І.С. Козачук. – Київ, 2008. – 20 с.