

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАДЕРЖКИ ВОСПЛАМЕНЕНИЯ В ДИЗЕЛЯХ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ПЕРСПЕКТИВНЫХ И ТРАДИЦИОННЫХ ТОПЛИВ

Кавтарадзе Р. З., Цайлингер К.¹, Цитцлер Г.¹

МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва,

¹Мюнхенский технический университет, г. Мюнхен

Введение. В обеспечении требуемых эффективных и экологических показателей дизеля поршневого двигателя задержка воспламенения играет существенную роль. До настоящего времени в литературе отсутствовали данные по задержке воспламенения для целого ряда перспективных топлив. Приведены результаты экспериментальных исследований, проведенных на специальной установке с одноцилиндровым дизелем MAN, и получены формулы для расчета задержки воспламенения при работе двигателя на различных топливах. Работа была выполнена в институте двигателей внутреннего сгорания Мюнхенского технического университета.

Краткое описание экспериментального метода. Задержка воспламенения оказывает решающее влияние на эффективные и экологические показатели дизеля. Известные до настоящего времени формулы для расчета времени задержки воспламенения относятся только к традиционным топливам. Экспериментальные исследования проводились непосредственно на двигателе MAN 24/30, в котором кроме традиционного дизельного использовались различные газообразные топлива, такие, как природный газ (~ 98 % CH₄), водород, синтезгазы - (30 % CH₄ + 70 % N₂) и (60 % H₂ + 20 % CH₄ + 20 % N₂). При этом на природном газе и на синтезгазах двигатель работает как газодизель, т.е. газоздушная смесь подается в цилиндр в процессе впуска, затем сжимается и в конце сжатия системой Common Rail (CR) впрыскивается запальная доза дизельного топлива. Кроме того, двигатель работает чисто в дизельном цикле с подачей водорода (в газовом состоянии) непосредственно в цилиндр. Значение цикловой запальной дозы топлива при продолжительности $\Delta\varphi_{впр} = 4^\circ$ и давлении впрыскивания $p_{впр} = 800$ бар удалось уменьшить до 34,2 мм³. Опытный двигатель оснащен также штатной системой подачи топлива, с помощью которой двигатель запускается в обычном дизельном режиме на дизельном топливе, а уже потом он переключается на газообразное топливо.

Момент воспламенения топлива определялся по скорости тепловыделения $\frac{dQ_x}{d\varphi} = f(\varphi)$, полученной в результате обработки экспериментальной индикаторной диаграммы $p = p(\varphi)$.

Согласно теории акад. Н.Н. Семенова, для длинных цепных реакций, которые сопровождаются быстрым возрастанием скорости реакции, приводящим к тепловому взрыву, справедливо

$$\tau_i = const \cdot p^{-n} e^{\frac{E}{RT}}. \quad (1)$$

Экспериментальные данные, полученные на опытной установке, хорошо согласуются с соотношением (1).

Задержка воспламенения газообразных топлив. В первой серии экспериментов определялась задержка воспламенения при работе двигателя на синтезгазе (60% H₂ + 20% CH₄ + 20% N₂), при этом с помощью теплообменника менялась температура воздуха при впуске t_к от 30 °С до 55 °С, при условии, что p_к ≈ const. Это позволило поддерживать почти постоянное давление в цилиндре в момент впрыскивания топлива p = (19,74 – 20,65) · бар ≈ const. Была получена формула для расчета задержки воспламенения при работе дизеля на синтезгазе (60% H₂ + 20% CH₄ + 20% N₂) с применением запальной дозы дизельного топлива

$$\tau_i = 0,188 \cdot p^{-0,357} e^{\frac{3076}{T}}. \quad (2)$$

Условная энергия активации для реакции горения данного синтезгаза с запальной дозой дизельного топлива E = 3076 · 8,314 = 25 774 Дж/моль.

Полученная аналогичным образом формула для времени задержки воспламенения при работе двигателя на синтезгазе 30% CH₄+70% N₂ имеет вид

$$\tau_i = 18,165 \cdot p^{-1,196} e^{\frac{1640}{T}}, \quad (3)$$

а условная энергия активации E=13 635 Дж/моль.

Формула для задержка воспламенения при работе двигателя на природном газе (~ 98% CH₄) имеет вид

$$\tau_i = 1,76 \cdot p^{-0,866} e^{\frac{2490}{T}}, \quad (4)$$

а условная энергия активации E=20 700 Дж/моль.

Практическая значимость полученных формул обусловлена тем, что они не имеют аналогов в научно-технической литературе, и поэтому даже в обстоятельных работах [2], в которых рассматривается задержка воспламенения альтернативных топлив, ограничиваются обзором формул типа Wolfer [3] или Hardenberg и Hase [4], полученных для обычного дизельного топлива. Кроме того, при расчете рабочего процесса в газодизелях [5] применяются формулы, полученные для чисто дизельного процесса, например формула А.И. Толстова [6], и, конечно, они не могут обеспечить достоверные результаты.

Задержка воспламенения дизельного топлива. Эксперименты, проведенные при непосредственном впрыскивании дизельного топлива, дают формулу

$$\tau_i = 0,55 \cdot p^{-1,3} e^{\frac{4400}{T}} \quad (5)$$

В случае применения рециркуляции отработавших газов в последней формуле вводится дополнительный эмпирический коэффициент K , значение которого определяется в зависимости от доли рециркуляции. Долю рециркуляции z определяют как отношение объемного количества рециркулируемых газов к количеству свежего заряда. Тогда (5) принимает вид

$$\tau_i = 0,55 \cdot K \cdot p^{-1,3} e^{\frac{4400}{T}}, \quad (6)$$

где $K = 0,9 \cdot z^{0,09}$, а доля рециркуляции z задается в процентах. Формула (6) справедлива при $z = 5 \div 40$ %. В качестве p и T в этой формуле, как и в предыдущих формулах, используются значения давления и температуры в цилиндре в момент впрыскивания топлива, однако в этой формуле они определяются для цикла без рециркуляции.

Очевидно, что работе двигателя без рециркуляции отработавших газов соответствует $K = 1$. Такая структура формулы (6) позволяет оценить величину периода задержки воспламенения при работе двигателя, как без рециркуляции отработавших газов, так и в случае различных ее долей.

На рис. 1 и 2 ниже приводится сопоставление расчетных значений по формулам (5) и (6) с экспериментальными данными, полученными для широких диапазонов изменений степени сжатия [7] и доли рециркулируемых газов [8]. Предложенная выше формула (5) хорошо согласуется с опытами [7] во всем диапазоне изменения степени сжатия. Результаты, полученные по формуле А.И. Толстова [6], относительно слабо зависят от изменения ε , а другие формулы [9, 10, 11] дают существенные отклонения от экспериментальных данных.

Заключение. Впервые получены формулы для расчета времени задержки воспламенения перспективных газообразных топлив, а также традиционного дизельного топлива с учетом рециркуляции отработавших газов. Сопоставление с результатами опытов, проведенных в широком диапазоне изменения параметров двигателя, а также сравнение полученных результатов с опытными данными других авторов, показывают высокую точность полученных формул. Это позволяет успешно использовать их при моделировании рабочего процесса и прогнозирования эффективных и экологических показателей дизеля [12, 13].

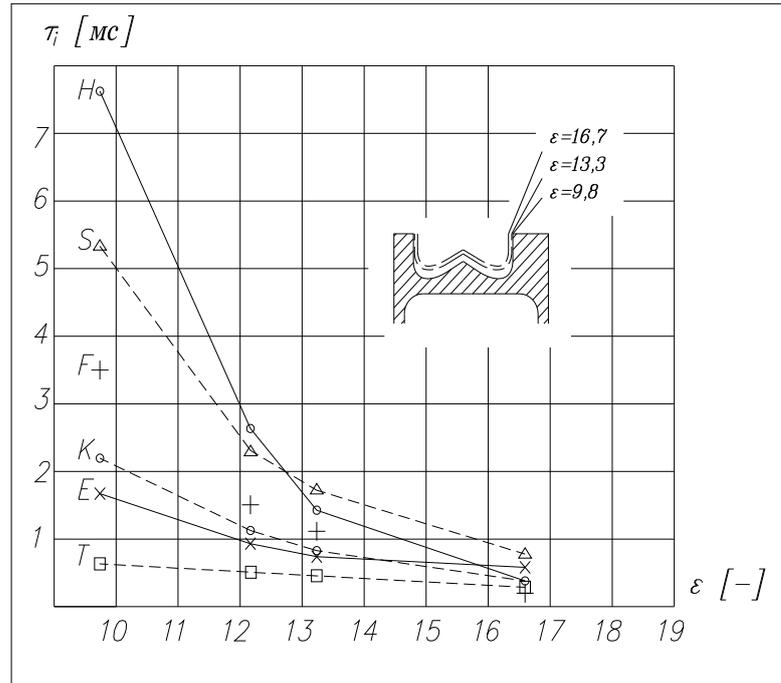


Рис.1.Изменение задержки воспламенения в зависимости от степени сжатия опытного двигателя AVL-520 ($p_e=15$ бар, $n=3000$ мин⁻¹, $S/D=12/12$ мм/мм, $p_k=1,5$ бар, Режим работы $p_e=7,41$ бар), рассчитанные по различным формулам: Н-Нироyasу и др. [9], S-Stringer и др. [11], F-Fujimoto и др. [10], Т-Толстов [6], К- Формула (5). Е- Эксперимент W.A. Sprogis [7]

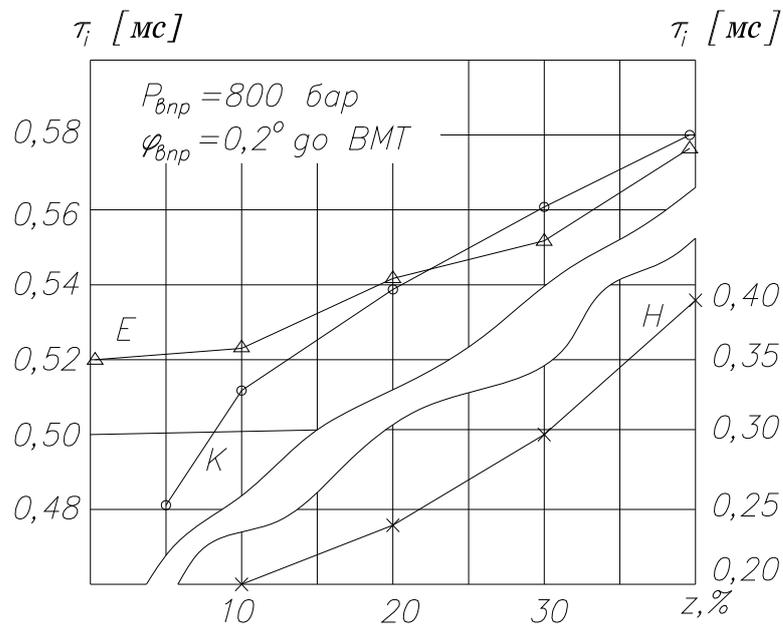


Рис.2 Изменение задержки воспламенения в дизеле Volkswagen ($S/D = 8,64/7,95$ см/см, $N_e= 46$ кВт, $n=4000$ мин⁻¹, $\epsilon = 19,5$) в зависимости от доли z рециркулируемых газов, рассчитанные по формулам: Н-Нироyasу и др. [9], К- Формула (6). Е- Эксперимент Schneider и др. [8].

ЛИТЕРАТУРА

1. Семенов Н.Н. Цепные реакции. Госхимтехиздат. Л.: 1934.-555 с.
2. Лютко В., Луканин В.Н., Хачиян А.С. Применение альтернативных топлив в двигателях внутреннего сгорания. М.: Изд-во МАДИ (ТУ), 2000.-311 с.
3. Wolfer H. Der Zündverzug im Dieselmotor. VDI-Forschungsheft N392,1938.S. 15- 24.
4. Hardenberg H.O., Hase F.W. An Empirical Formular for Computing the Pressure Rise Delay of a Fuel from its Cetane Number and From the Relevant Parameter of Direct- Injection Diesel Engine. SAE- Paper 7900493, 1973.
5. Кудряш А.П., Пашков В.В., Маринин В.С., Москаленко Д.А. Природный газ в двигателях. Киев, Наукова думка, 1990. 200 с.
6. Толстов А.И. Индикаторный период запаздывания воспламенения и динамика цикла быстроходного двигателя с воспламенением от сжатия// Труды НИЛД « Исследование рабочего процесса и подачи топлива в быстроходных дизелях», №1, М., Машгиз, 1955. С.5-55.
7. Sprogis W.A. Abgasverhalten von Dieselmotoren mit niedrigem Verdichtungsverhältnis. MTZ. N7/8, 1983. S.251-257.
8. Schneider W., Stöckli M., Lutz T., Eberle M. Hochdruckeinspritzung und Abgasrezirkulation im kleinen, schnellaufenden Dieselmotor mit direkter Einspritzung. MTZ. N 11, 1993. S.588-599.
9. Hiroyasu H., Kadota T., Arai M. Supplementary Comments: Fuel Spray Characterisation in Diesel Engines, in Mattavi J.N. and Amann (eds). Combustion Modeling in Reciprocating Engines. Plenum Press. 1980. pp.369-408.
10. Fujimoto H. et.al. Illumination Delay in Diesel Spray. JASE Paper. N 800-13., 1980. 149 p.
11. Fujimoto H. et.al. Illumination Delay in Diesel Spray. JASE Paper. N 800-13., 1980. 149 p.
12. Stringer F.W., Clarke A.E., Clarke J.S. The Spontaneous Ignition of Hydrocarbon Fuels in a Flowing System. Proc. I. Mech. E. 184, 1969-70. 212 p.
13. Zitzler G. Analyse und Vorausberechnung der Brennverläufe von Gasmotoren bei Einsatz verschiedener Gasarten.Dissertation, TU München, 2003. 182 S.
14. Скрипник А.А., Фролов С.М., Кавтарадзе Р.З., Эфрос В.В. Моделирование воспламенения в струе жидкого топлива. РАН. Химическая физика. № 1, том 23. «004. С. 54-61.