

# Особенности моделирования рабочего процесса двигателей работающих на альтернативном топливе в структуре измерительного комплекса

Д. А. Павлов  
Тольяттинский государственный университет  
Тольятти, Россия  
Pavlov-DA@yandex.ru

В. В. Королев  
Санкт-Петербургский государственный  
электротехнический университет  
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)  
Санкт-Петербург, Россия  
vvkorolev@etu.ru

**Аннотация.** Для проектирования и доводки промышленных двигателей, работающих на альтернативных источниках топлива, применяются измерительные комплексы. Они позволяют не только хранить информацию получаемую в ходе испытаний с различного рода датчиков и измерительных систем, но и обрабатывать ее по заложенным алгоритмам. Таким образом, моделирование рабочих процессов, проходящих в двигателях, необходимо не только для проектирования и доработки, но и для анализа и применения в таких комплексах. В докладе рассмотрен комплекс экспериментальных работ и на их основе предложен подход позволяющий учитывать особенности рабочего процесса двигателя при его работе на альтернативном топливе. Предложенный подход может быть использован при расчетах и моделировании, в том числе в рамках измерительного комплекса.

**Ключевые слова:** двигатель; смесеобразование; альтернативное топливо; моделирование

## I. ВВЕДЕНИЕ

Важнейшей прикладной задачей совершенствования двигателей внутреннего сгорания в настоящее время является повышение экономичности и уменьшение токсичных выбросов с отработавшими газами.

Одним из известных способов улучшения экологических и экономических показателей двигателей внутреннего сгорания (ДВС) является применение альтернативных топлив и/или добавок, активизирующих процесс сгорания, к традиционному топливу [1, 2, 3]. Наиболее перспективным направлением специалисты рассматривают применение водорода в двигателях. В подтверждение этого утверждения можно констатировать тот факт, что многие передовые экономически развитые страны, такие как США, Германия, Япония, проводят активные технические разработки в области водородных технологий.

В отличие от транспортных ДВС эксплуатация промышленных двигателей имеет ряд особенностей, к которым относятся:

- постоянная частота вращения коленчатого вала двигателя;
- длительная работа на режимах постоянной частоты вращения коленчатого вала;
- значительный назначенный ресурс двигателя (более 10 000 моточасов) и др.

В указанных условиях даже незначительное улучшение экономичности силового агрегата приведет к существенной экономии топлива.

## II. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И МОДЕЛИРОВАНИЕ

В Тольяттинском государственном университете был проведен комплекс экспериментальных работ по определению возможности повышения экологических и экономических характеристик ДВС. При этом рассматривались двигатели, работающие как с гетерогенным способом формирования топливно-воздушной смеси (двигатели с воспламенением от сжатия), так и с гомогенным способом (двигатели с принудительным воспламенением). Объектами исследований являлись отечественные двигатели производства ПАО «АвтоВАЗ», ПАО «ЗМЗ», ПАО «КАМАЗ», АО «УМЗ». При этом использовались различные методики испытаний, в частности ГОСТ 31967-2012, ГОСТ ISO 8178-4-2013 и др. В качестве топлива использовались:

- традиционные топлива;
- сжиженный газ (СУГ);
- компримированный природный газ (КПГ);
- композитные топлива, смеси перечисленных топлив с различной добавкой водорода;
- синтез газа, полученные методом каталитической конверсии углеводородных топлив [4, 5, 6].

На рис. 1–2 для иллюстрации приведены фотографии некоторых двигателей установленных на моторных стендах.

Результаты экспериментальных работ позволили установить ряд особенностей протекания рабочего процесса ДВС при использовании различных, в том числе и альтернативных, топлив.

Известно, что количество подведенного тепла к двигателю можно представить

$$Q_m = G_m \cdot H_u$$

где  $Q_m$  – количество подведенной теплоты, МДж/ч.;  $G_m$  – расход топлива, кг/ч;  $H_u$  – теплотворная способность топлива, МДж/кг.

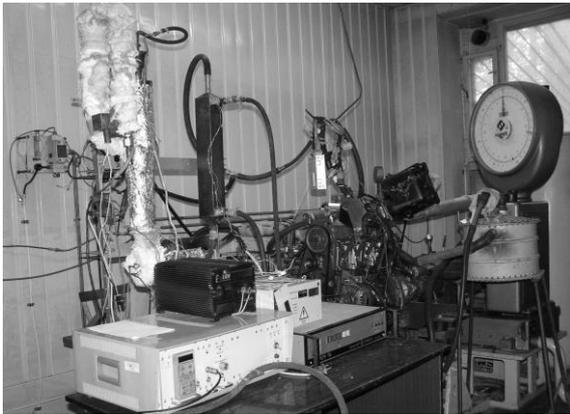


Рис. 1. Двигатель VAZ-2111 работающий на КПГ и синтез газе

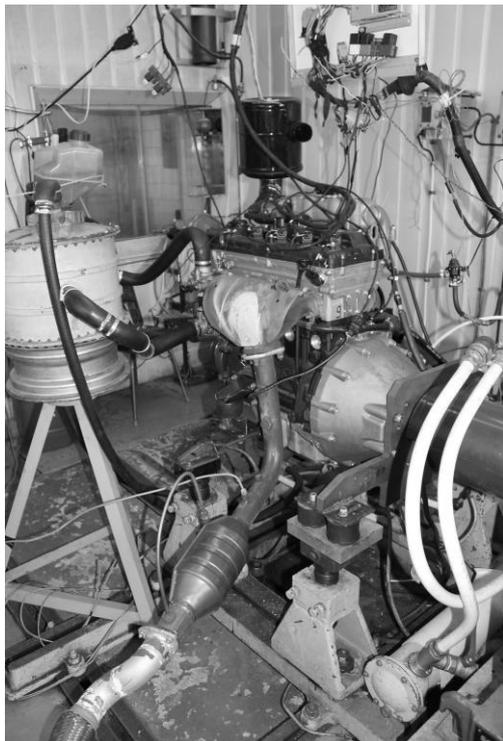


Рис. 2. Двигатель ЗМЗ-409 работающий на КПГ, СУГ

Полученная величина является важной составляющей, так как она участвует при определении КПД. В случае применения композитного (составного) топлива указанная зависимость может быть представлена:

$$Q_{\text{ТК}} = \sum_{i=1}^n (G_{\text{T}i} \cdot H_{u_i})$$

Теоретически, при правильно выбранных, с учетом характеристик топлив, регулировочных параметров двигателя независимо от типа топлива отношение  $Q_{\text{ТК}}/Q_m$  должно сохраняться [7]. Однако, как показали результаты проведенных экспериментальных работ, в некоторых случаях данное соотношение не выполняется. В частности, на частичных режимах работы ДВС с использованием активизирующих процесс горения добавок [8]. Для иллюстрации на рис. 3 и 4 представлено сравнение подведенного тепла к двигателю VAZ 2112 при различных добавках водорода в топливоздушную смесь на различных режимах его работы.

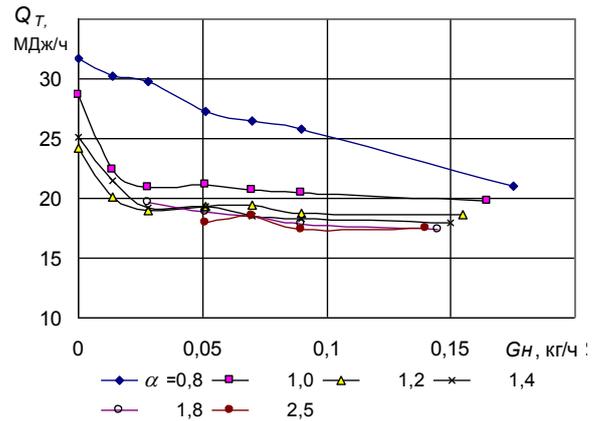


Рис. 3. Изменение подведенной с топливом теплоты ( $n=850 \text{ мин}^{-1}$ ;  $P_c = 0$ ; УОЗ=опт.)

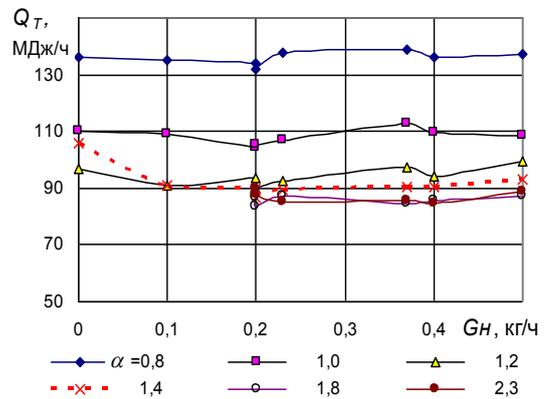


Рис. 4. Изменение подведенной с топливом теплоты ( $n=2185 \text{ мин}^{-1}$ ;  $P_c=0,2 \text{ МПа}$ ; УОЗ=опт.)

Аналогичная картина наблюдается на всех исследованных двигателях с гомогенным

смесеобразованием и отсутствует при гетерогенном смесеобразовании.

Данное результат позволяет предположить наличие эффекта более полного использования подведенной теплоты, что в свою очередь позволяет говорить о наличии процессов активации горения, или эффекта промотирования.

Для обозначения этого эффекта был введен коэффициент:

$$k = Q_{mk} / Q_m$$

Результаты расчетов различных силовых агрегатов при их работе на различных видах топлива позволил установить, что коэффициент  $k$  имеет сложную функциональную зависимость и изменяется в диапазоне от 0,8 до 1.

Для двигателей с гетерогенным смесеобразованием (дизельные двигатели)  $k = 1$ .

Для двигателей с гомогенным смесеобразованием (работающие на бензине или газовом топливе двигатели)  $k = 0,8 \dots 0,97$

Следует отметить, что аналогичные работы по исследованию процессов сгорания гомогенных смесей с добавками водорода проводились в камере сгорания постоянного объема. Принципиальная схема камеры сгорания постоянного объема представлена на рис. 5.

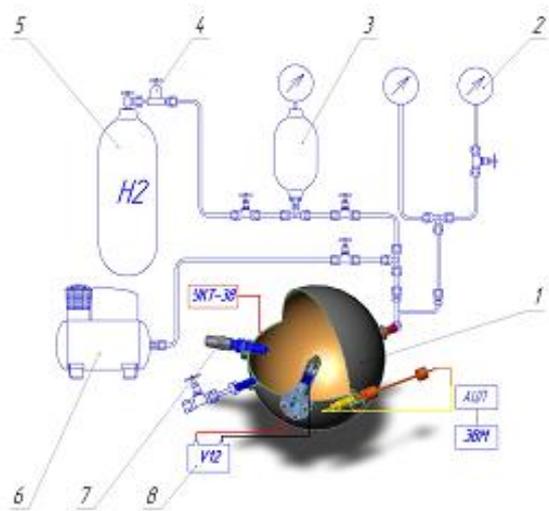


Рис. 5. Схема экспериментальной установки [9]

На рисунке 5 приняты следующие обозначения: 1– камера сгорания, 2– манометры, 3– мерная ёмкость водорода, 4–

игольчатые вентили, 5–баллон водорода, 6–компрессор, 7–датчики давления, 8–источник питания (аккумулятор 12 В), 9–державка источника зажигания). Особенностью процесса горения в условия камеры сгорания постоянного объема является ламинарное горение. Проведенные работы показали, что для условий рассмотренной камеры коэффициент  $k=1$  для всех исследованных режимов [9].

Таким образом, можно сделать предположение о том, что в основе описанных выше процессов лежат физические, а не химические факторы определяющие характеристики горения.

### III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты проведенных работ позволяют внести в традиционные методы моделирования рабочего процесса двигателя дополнений коэффициент, учитывающий особенности горения альтернативного топлива. Предложенный коэффициент позволяет учитывать способ формирования топливно-воздушной смеси и эффективность применения композитного топлива или активизирующих добавок. Установлено, что коэффициент  $k$  имеет сложную функциональную зависимость и изменяется в диапазоне от 0,8 до 1.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Verhelst S. Hydrogen Fueled Internal Combustion Engines / S. Verhelst, T. Wallner. Amsterdam (Niderlandi), 2009. 133 p. Preprint Elsevier Science Publishing Company, Inc. August 19, 2009. 133 p.
- [2] Mohammadi A. Performance and combustion characteristics of a direct injection SI hydrogen engine / A. Mohammadi, M. Shioji, Y. Nakai, W. Ishikura, E. Tabo // International Journal of Hydrogen Energy. 2007. №32(2). p. 296-304.
- [3] Использование добавок водорода и водородосодержащих газов в ДВС / Афанасьев А.Н., Бортников Л.Н., Павлов Д.А., Русаков М.М. // II Международный симпозиум по водородной энергетике, МЭИ, Москва, 1-2 ноября 2007.
- [4] Andreatta D., Dibble R.W. An experimental study of air-reformed natural gas in spark-ignited engines // SAE Technical Paper Series. 1996. No. 960852.
- [5] Sogaard C, Schramm J., Jensen T.K. Reduction of UHC-emissions from natural gas fired Si-engine — production and application of steam reforming natural gas // SAE Technical Paper Series. 2000. 2000-01-2823.
- [6] Kirwan J.E., Quader A.A., Grieve M.J. Advanced engine management using on-board gasoline partial oxidation reforming for meeting super-ULEV (SULEV) emissions standards // SAE Technical Paper. 1999. Series No 1999-01-2927.
- [7] Стечкин Б. С. Избранные труды: Теория тепловых двигателей. М.: Физматлит, 2001. 432 с. ISBN 5-9221-0101-3.
- [8] Бортников Л.Н. Особенности горения бензоводородовоздушной смеси в цилиндре поршневого двигателя внутреннего сгорания и определение оптимального соотношения бензин-водород // Физика горения и взрыва, 2007. Т.43. №4. С.8-14.
- [9] Bortnikov L.N., Pavlov D.A., Rusakov M.M., Shaikin A.P. The combustion of combustion products formed from gasoline-hydrogen-air mixtures in a constant – volume spherical chamber // Russian Journal of Physical Chemistry B. 2011. T. 5. № 1. С. 75-83.