УДК 621.43.019.25

Л.Н. Бортников, А.Д. Дерячев, П.В. Ивашин, А.Я. Твердохлебов

Анализ тепловыделения в поршневом ДВС с принудительным воспламенением при работе на бензоводородовоздушной смеси

Тольяттинский государственный университет

Применение в поршневых ДВС альтернативных топлив связано с проведением специальных исследований, в частности, эффективности их сгорания в цилиндре двигателя. С этой целью применяются различные методы и подходы, в том числе анализ индикаторной диаграммы и построение на её основе характеристик тепловыделения, позволяющих оценить процесс сгорания как термодинамический процесс и определить пути его совершенствования. В данной статье приведены результаты индицирования 2-х типов поршневых ДВС при работе их на бензине и бензоводородовоздушных смесях и их анализ. Показано, что при работе двигателя на смесях бензина и водорода, в том числе при малых долях добавочного водорода, эффекты его влияния на горение топливной смеси качественно полностью отражаются непосредственно индикаторной диаграммой и количественно могут определяться по результатам стендовых испытаний.

Ключевые слова: поршневой двигатель, водород, бензовоздушная смесь, бензоводородовздушная смесь, характеристики тепловыделения.

Analysis of the heat release in spark ignited ICE with gasoline-hydrogen mixture utilization

L.N. Bortnikov, A.D. Deriachev, P.V. Ivashin, A.J. Tverdochlebov

Togliatti State University

Using of alternative fuels in ICE requires specific researches especially analysis of efficiency of combustion process. Those researches include in-cylinder pressure analysis due to heat release simulation. This allows to analyze

combustion process thermodynamically and to find out the ways of its enhancement. The results of such analysis of 2 types of ICE using both fuels gasoline and gasoline-hydrogen mixture presented in this article. The effects of hydrogen additions to the air-fuel mixture including small portions of hydrogen can be qualitatively analyzed directly due to in-cylinder pressure trace. The quantity analysis may be done due to stand tests.

Keywords: ICE, hydrogen, air-fuel mixture, gasoline-hydrogen mixture, heat release.

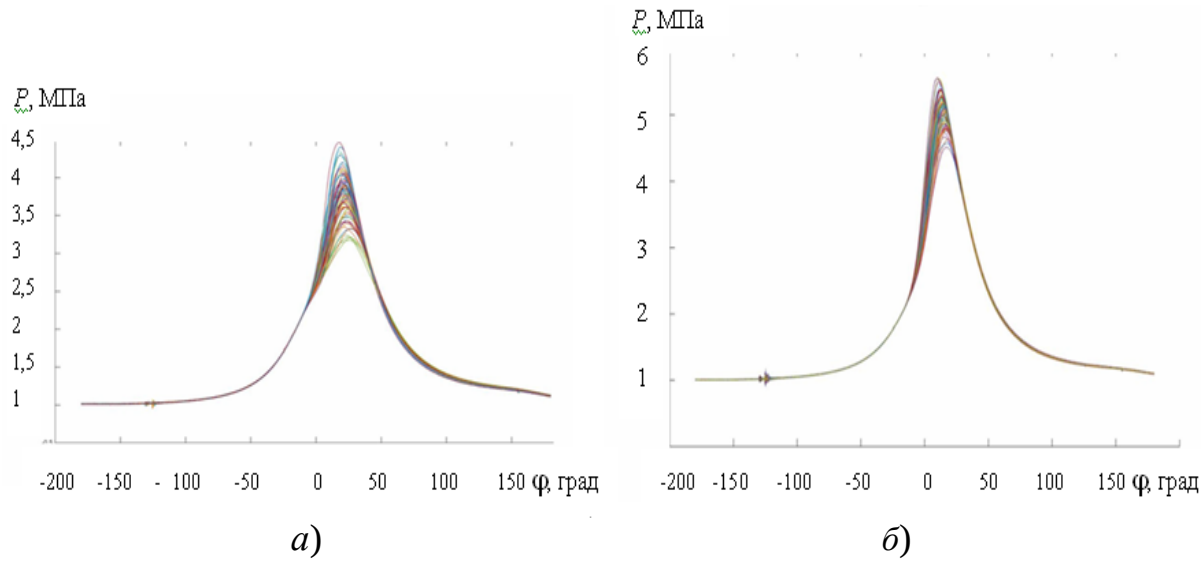
Применение водорода в качестве альтернативного углеводородам топлива являются весьма актуальной задачей, т.к. связывается с возможностью решения двух важнейших проблем: энергонезависимости и выбросов вредных веществ. Рассмотрению данного вопроса в течение последних лет уделяется достаточно большое внимание. Например, работа [1] содержит около 300 ссылок на исследования, выполненные в данном направлении, в основном, за рубежом, только в течение 1980-2009 годов.

Однако до настоящего времени остается малоисследованным целый ряд вопросов, например, особенностей сгорании водорода в смеси с углеводородными топливами в цилиндре поршневого ДВС, которые могут рассматриваться важными в связи с возможным переходом к широкому применению водорода через постепенно возрастающее использование его в качестве добавок к углеводородным топливам [2-6].

Одним из известных способов оценки эффективности ДВС, в том числе при применении различных топлив, каковыми могут рассматриваться смеси бензина и дополнительного водорода, является анализ характеристик тепловыделения, которые позволяют исследовать связи между выделением теплоты в процессе сгорания и показателями двигателя [7, С.43-44; 8, 9]. Рассмотрение особенностей и целесообразности практического при-

менения данного метода при использовании в качестве топлива бензоводородовоздушных смесей (БВВС) составило цель данной работы.

На рис. 1 приведены индикаторные диаграммы, снятые на двигателе ВАЗ-21114 (4Ч 7,6/8,2) при коэффициенте избытка воздуха равном $\alpha = 1$, постоянном положении дросселя и угле опережения зажигания $\theta_з = 26$ град.п.к.в. с использованием измерительной системы Kistler на основе пьезоэлектрического датчика, вмонтированного в свечу зажигания при работе на бензине и на смеси с добавочным водородом, вводимым во впускную трубу (перед дроссельной заслонкой), доля которого определялась как $\psi = \frac{H}{G+H}$, где H – расход добавляемого водорода, G – бензина.



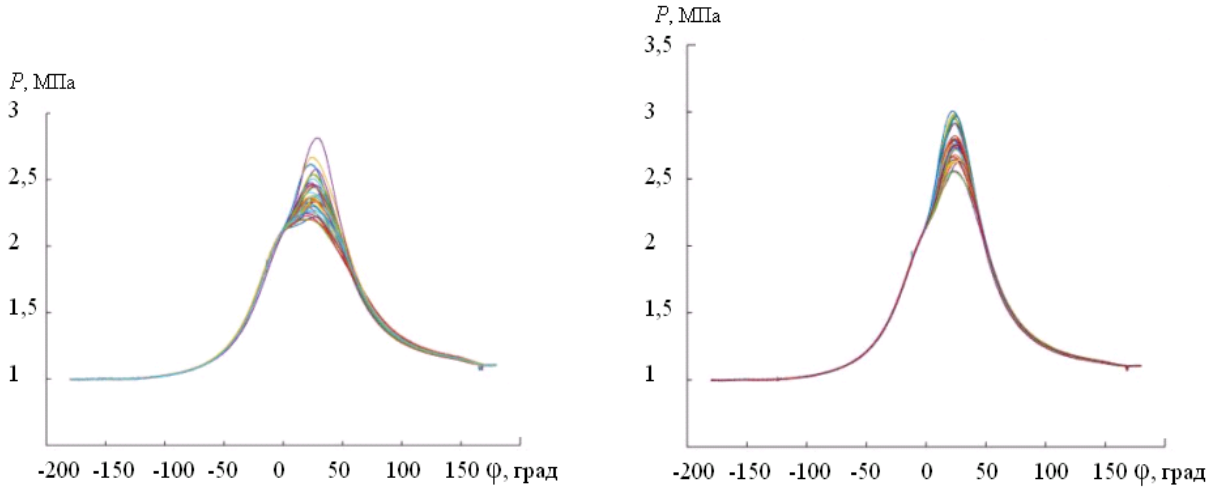
а) *б*)

Рис. 1. Индикаторные диаграммы (частота вращения вала n = 2000 мин$^{-1}$; нагрузка P_e = 0,2 и 0,21 МПа; число циклов – 100; 0 – верхняя мертвая точка; φ – угол поворота коленчатого вала): *а*) работа на бензине; *б*) работа на БВВС смеси с долей добавочного водорода ψ = 0,22

Можно видеть, что водород, добавляемый в условиях данного эксперимента, оказывает существенное влияние на межцикловую неидентичность (при количественной оценке по среднеквадратичному рассеянию

максимального давления она снижается, примерно, в 2 раза) и величину максимального давления цикла, среднее значение которого возросло примерно на 30%. При этом эффективный КПД (с учетом снижения расхода бензина) сохранился на прежнем уровне, порядка, $\eta_e = 20\%$ при увеличении эффективной мощности N_e на 3,7%, что связано с более высокой теплотворностью смесевого топлива бензин+водород H_{uT} вследствие большей доли водорода. Уменьшение или увеличение доли водорода в топливной смеси указанных тенденций не изменяет [1, 10,11].

На рис. 2 приведены индикаторные диаграммы, снятые на данном двигателе при работе на режиме холостого хода и минимальной частоты вращения вала, имеющем существенное значение при испытаниях автомобилей на соответствие нормам вредных выбросов, при $\alpha = 1$ и заводских калибровках системы управления. Можно видеть явно выраженные изме-

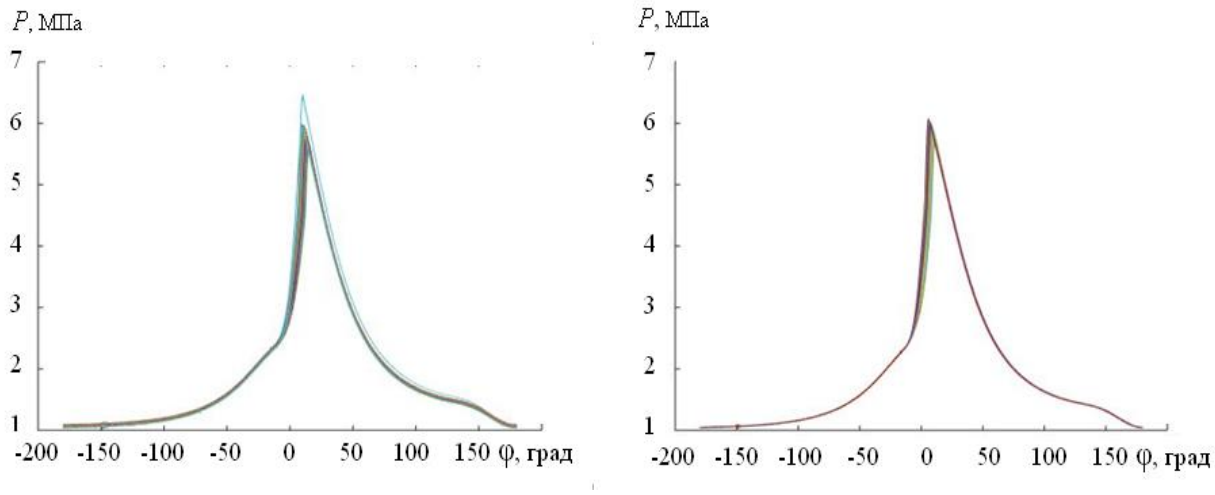


а) *б*)

Рис. 2. Индикаторные диаграммы (частота вращения вала $n = 840$ мин$^{-1}$; нагрузка $P_e = 0$; число циклов – 100; 0 – верхняя мертвая точка: *а*) работа на бензине; *б*) работа на бензоводородовоздушной смеси с долей водорода $\psi = 0{,}05$)

нения: возрастание максимального давления при работе двигателя на БВВС при практически сохранившемся уровне межцикловой неидентич-

ности и площади диаграммы, что определяется постоянством механических потерь. Однако в отличие от данных, полученных при работе на нагрузочном режиме и приведенных на рис.1 существенно, примерно на 12%, вследствие значительного снижения расхода бензина, возрастает индикаторный КПД (относительно его значения при работе на бензине). Данный факт свидетельствует о том, что при снижении расхода бензина добавляемый в смесь водород активирует горение, которое происходит уже не по аддитивному механизму, а синергетическому, когда малые изменения состава топлива путем присадки определенного вещества, в данном случае водорода, приводят к достаточно существенному эффекту – промотированию горения [12, 13].



а) *б*)

Рис. 3. Индикаторные диаграммы (частота вращения вала n = 600 мин$^{-1}$; число циклов – 100; 0 – верхняя мертвая точка; УОЗ = 14 град.п.к.в.: *а*) работа на бензине; *б*) работа на бензоводородовоздушной смеси с долей водорода ψ = 0,05

На рис. 3 приведены индикаторные диаграммы, полученные при работе на рассматриваемых топливных смесях и α =1 на поршневой моторной установке УИТ-85, представляющей собой одноцилиндровую конструкцию с искровым зажиганием, фиксированной частотой вращения вала и неизменной системой впуска, работающей по алгоритму автоматиче-

ского поддержания постоянной частоты вращения вала регулированием нагрузки.

Можно видеть, что полученные диаграммы практически идентичны как по длительности сгорания, так и по величине максимального давления и межцикловой неравномерности, (отмечается 1 резко выделяющийся цикл), а, следовательно, и по совершаемой газами работе. Данный факт можно объяснить тем, что количество введенной с разными топливами (бензин и бензин+водород) теплоты остается одинаковым, а влияние дополнительного водорода сводится к простому замещению бензина пропорционально его теплотворной способности, т.е. к действию, как и в случае ДВС (рис.1) аддитивного механизма горения смеси двух топлив.

Отличие данных результатов от полученных на двигателе ВАЗ - 21114 и представленных на рис. 1, связанное с видимым повышением при работе двигателя на БВВС максимального давления, определяется тем, что вследствие относительно большого количества добавляемого водорода (ψ = 0,22) в соответствии с известной зависимостью для мощности ДВС:

$$N_e = k \cdot \frac{H_u}{l_0} \cdot \frac{\eta_e}{\alpha} \cdot G_V ,$$

где k – безразмерный коэффициент, H_u – низшая теплотворная способность применяемого топлива, l_0 – стехиометрическое соотношение топлива при горении с воздухом, G_V – расход воздуха, увеличивается отношение H_u/l_0 смесевого топлива бензин+водород при равенстве остальных составляющих формулы (положении дроссельной заслонки и n).

Из рассмотрения диаграмм рис. 3 можно отметить также весьма высокую стабильность процесса горения в двигателе установки УИТ–85, о чем свидетельствует низкий уровень рассеяния максимального давления. В таких условиях добавочный водород не вызывает химической активации горения, как это свойственно, в частности, для автомобильных двигателей при их работе на режимах глубокого дросселирования [10, 14].

Известно, что индикаторная диаграмма двигателя применяется не только для определения параметров рабочего процесса, но и для анализа как средства исследования использования тепловой энергии в цилиндре двигателя, что практически реализуется построением и анализом характеристик тепловыделения [7, С.23; 15].

С целью выявления особенностей горения БВВС на основании данных рис. 1-3 были построены характеристики тепловыделения, которые, как известно, «позволяют получить качественные представления о влиянии различных факторов» [7, С.43].

Характеристики определялись по осредненной индикаторной диаграмме с применением первого закона термодинамики, уравнения состояния и однозонной модели сгорания в соответствии с рекомендациями [16], особенностями которых является формализация начала и длительности процесса горения. Результаты представлены в виде относительных характеристик выделившегося тепла $x_{выд}$ и скорости тепловыделения $dx_{выд}/d\varphi$ по углу поворота вала двигателя φ на рис. 4-6.

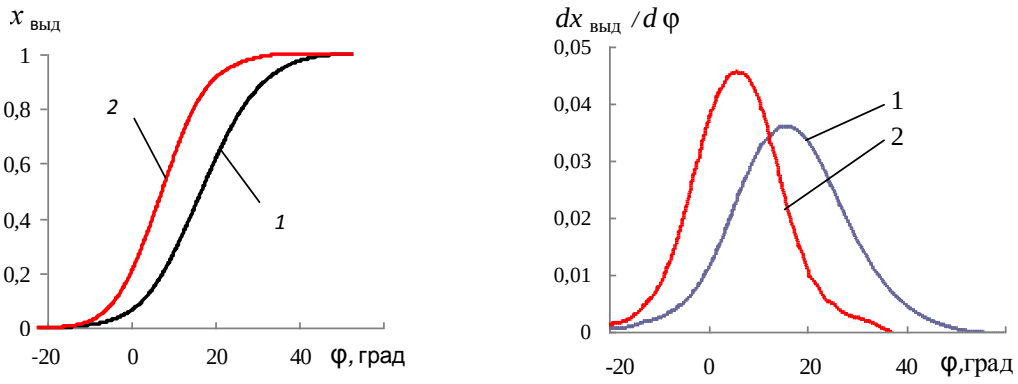


Рис. 4. Относительная характеристика тепловыделения и относительная скорость выделения теплоты, построенные по данным рисунка 1 (1 – бензин, 2 – БВВС)

Можно видеть, что влияние водорода всегда приводит к смещению линии $x_{выд}$ в сторону меньших углов сгорания и увеличению скорости теп-

ловыделения возрастающим, как очевидно, с увеличением доли добавочного водорода. При применении относительно малых количеств вводимого в бензовоздушную смесь водорода данные эффекты уменьшаются и их выявление и интерпретация, в частности, в связи с имеющими место особенностями действия водорода на режимах глубокого дросселирования (промотирования горения) и погрешностями измерений представляют определенную сложность, особенно, для количественной оценки [7, 9, 17].

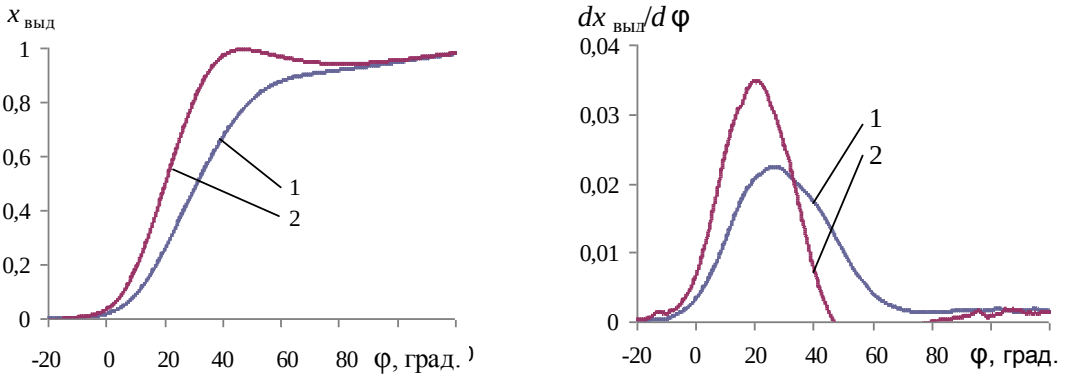


Рис. 5. Относительная характеристика тепловыделения и относительная скорость выделения теплоты, построенные по данным рисунка 2 (1 – бензин, 2 – БВВС, $\psi = 0{,}05$)

Так рассмотрение данных, приведенных на рис. 5 и полученных на основе индикаторных диаграмм рис. 2, позволяет заключить об относительно бóльшем влиянии водорода в данном случае на процесс горения, что выражается в относительно более крутом возрастании линии тепловыделения и большей его скорости. Данные тенденции связаны с проявлением активации горения бензовоздушной смеси водородом, что явно следует из визуального рассмотрения собственно диаграмм рис. 2 и количественно определяется величиной индикаторного КПД, применяемого для оценок при проектировочных расчетах.

На рис. 6 приведены результаты обработки индикаторных диаграмм, приведенных на рис. 3. Можно видеть, что полученные характеристики тепловыделения указывают на существенные отличия в протекании про-

цесса сгорания, однако индикаторные диаграммы, а, следовательно, и показатели двигателя (мощность, КПД) практически не изменяются. Данный факт объясняется погрешностями расчетов связанных с дифференцированием

графика практически мгновенного возрастания давления.

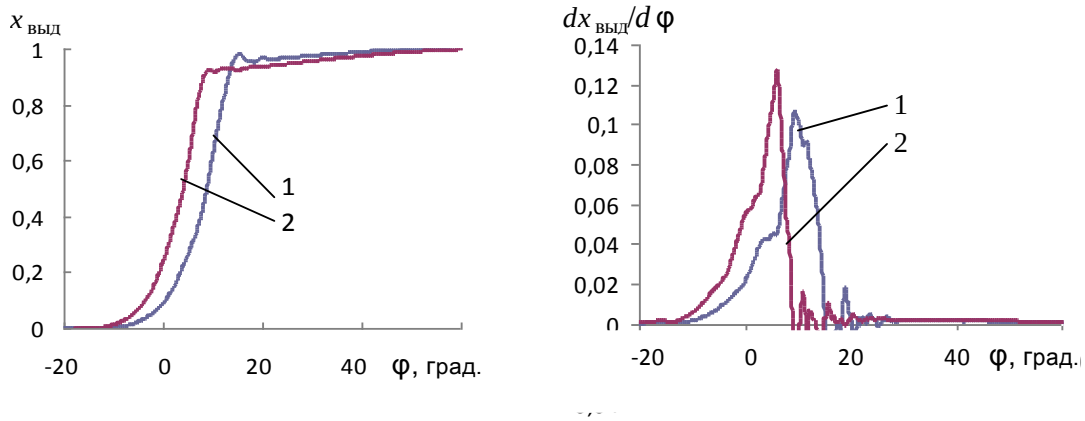


Рис. 6. Относительная характеристика тепловыделения и относительная скорость выделения теплоты, построенные по данным рисунка 3 (1 – бензин, 2 – БВВС)

Таким образом, опыт обработки индикаторных диаграмм при работе ДВС на БВВС позволяет заключить о качественном соответствии получаемых результатов с выводами, непосредственно следующими из визуального рассмотрения полученных диаграмм, количественное представление которых необходимое для разработки конструкторских расчетных методик, связанных с решением проектировочных задач, может определяться по результатам типовых стендовых испытаний.

Список литературы

[1] Verhelst S., Wallner T. *Hydrogen Fueled Internal Combastion Engines*. Amsterdam (Niderlandi), 2009, 133 p.- Preprint Elsevier Science Publishing Company, Inc. August 19, 2009. 133 p.

[2] Mohammadi A., Shioji M., Nakai Y., Ishikura W., Tabo E. *Performance and combustion characteristics of a direct injection SI hydrogen engine*. International Journal of Hydrogen Energy, 2007, №32(2),p. 296-304.

[3] Konnov A.A. *Refnement of the kinetic mechanism of hydrogen combustion.*/ Химическая физика. 2004.Т.23, №8. С.5-18.

[4] Концепция развития горения и взрыва как области научно-технического прогресса. Черноголовка: Территория, 2001, 171 с.

[5] Коротеев А.С, В.А. Смоляров. *Водородный транспорт – основа развития водородной энергетики*. Тр. Междунар. конф. Альтернативные источники энергии для транспорта и энергетики больших городов. Москва, Прима-Пресс-М, 2005, С. 20-21.

[6] Труды II международного симпозиума по водородной энергетике. Москва, 1-2 ноября 2007 г. Москва, Издательский дом МЭИ, 2007, 156 с.

[7] Стечкин Б.С., Генкин К.И., Золоторевский В.С. И.В. Скородинский. *Индикаторная диаграмма, динамика тепловыделения и рабочий цикл быстроходного поршневого двигателя*. Москва, Изд-во АН СССР, 1960, С.43-44.

[8] Кавтарадзе Р.З. *Теплофизические процессы в дизелях, конвертированных на природный газ и водород*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011, 238 с.

[9] Лазарев Е.А., Лазарев В.Е. *Определение параметров процесса сгорания топлива по результатам анализа индикаторной диаграммы давления газов в цилиндре двигателя*. Труды Междунар. научно-техн. конф. Актуальные проблемы теории и практики современного двигателестроения, Челябинск, 26-28 апреля 2006г. Челябинск, ЮУрГУ, 2006. с. 146-150.

[10] Гамбург Д.Ю, Дубовкин Н.Ф, Семенов В.П. *Водород. Свойства, получение, хранение, транспортирование, применение : справ. изд*. Москва, Химия, 1986.- 672 с.

[11] Г.Н. Злотин, В.З. Гибадуллин. *Если водород подать в конце такта сжатия. Автомобильная промышленность*. 1995, №11. С. 19-22.

[12] Басевич В.Я., Когарко С.М. *Промотирование горения*. Физика горения и взрыва. 1969, Т.5, №1, С.99-105.

[13] Бортников Л.Н. *Современные аспекты применения водорода в автомобильных двигателях*. Самара, Изд-во СамНЦ РАН, 2015, 158 с.

[14] Мищенко А.И. *Применение водорода для автомобильных двигателей*. Киев, Наукова думка, 1984, 143 с.

[15] Шароглазов Б.А., Шишков В.В. *Поршневые двигатели: теория, моделирование и расчет процессов: учебник по курсу «Теория рабочих процессов и моделирование процессов в ДВС*. Челябинск, Издательский центр ЮУрГУ, 2011, С. 36-37.

[16] Gunter P. Merker, Christian Schwarz, Gunnar Stiesch, Frank Otto. Simulating Combustion. Simulation of combustion and pollutant formation for engine-development. Springer, 2005, 401 c.

[17] Ставров А.П. *Влияние точности определения параметров характерных точек индикаторной диаграммы на показатель характера сгорания*. Сб. научных трудов №103, ЧПИ. Челябинск, 1972, С.183-187.