

УДК 621.431

ОБ ОЦЕНКЕ РАБОТЫ ЦИКЛА ДВС ИОНИЗАЦИОННЫМ ЗОНДОМ© 2013 П. В. Ивашин, М. П. Рамазанов, А. Я. Твердохлебов,
А. П. Шайкин, И. С. Ясников

Тольяттинский государственный университет

С помощью ионизационного зонда, установленного в камере сгорания двигателя внутреннего сгорания с искровым зажиганием, экспериментально выявлена взаимосвязь электропроводности пламени и работы цикла, т.е. показано, что в условиях ДВС имеет место взаимосвязь ионизации пламени и энергетических параметров процесса. Для анализа параметров процесса горения в ДВС может быть использован один ионизационный зонд.

Горение, ионизация пламени, энергия процесса, взаимосвязь, ДВС, работа цикла.

Направление развития всех энергетических установок – снижение удельного расхода топлива и токсичности продуктов сгорания. Основной проблемой при этом является интенсификация процесса горения при имеющихся ограничениях, связанных с формой и материалами стенок камеры сгорания (КС), газодинамическими характеристиками потока, свойствами топлива и необходимостью избегать аномальных режимов (например, детонационного горения). Эту проблему решают на стадиях проектирования, доводки и эксплуатации с помощью совершенствования систем контроля и управления рабочим процессом энергетических машин.

Анализ динамики тепловыделения в камерах сгорания производят с помощью различных экспериментальных и расчётных методов. Например, для анализа сгорания в условиях ДВС используется индикаторная диаграмма – регистрация давления в камере сгорания. Использование индикаторной диаграммы позволяет оценивать интегральные по всему объёму камеры сгорания параметры, однако тепловыделение не происходит одновременно во всем объёме КС. Поэтому для глубокого анализа процесса сгорания необходима информация о распространении фронта пламени в КС. Для исследования фронтов пламени в лабораторных условиях применяются различные оптические методы, требующие применения настраиваемых

лазеров и прозрачных стенок камеры сгорания [1]. Данные методы весьма сложны и дороги и не могут быть использованы в процессе доводки опытных образцов камер сгорания.

В то же время одним из перспективных инструментов исследования процесса сгорания для практических приложений является применение ионизационных зондов, позволяющих регистрировать и изучать зоны горения благодаря аномальной электропроводности пламени углеводородов [2]. Фундаментальные основы ионизации пламени углеводородов разрабатываются параллельно с исследованиями кинетики горения. Результаты ранних исследований этого вопроса приведены в [3, 4]. Более новые экспериментальные исследования ионизации пламени описаны в [5, 6]. Явление электропроводности пламени используется для исследования горения в поршневых [7-11] и газотурбинных [12] двигателях, топках металлургических печей [2]. Так, в [7, 8] с помощью ионизационных зондов оценено влияние на сгорание в ДВС конструктивных факторов, в [9] исследованы локальные стехиометрические соотношения в камере сгорания, в [10] – особенности детонационного сгорания в двигателе с искровым зажиганием, а в [11] – кинетика горения в двигателе с НСЦИ процессом. Кроме того, ионизационные зонды используются как первичные информационные преобразо-

ватели в системах управления ДВС [13, 14]. Таким образом, исследовательский метод, основанный на электропроводности пламени, отличается тем, что может нести значительный объём информации о горении и быть использован как в лабораторных условиях (причём не требуется прозрачных стенок КС), так и в бортовой диагностике процесса сгорания в транспортных и стационарных энергетических установках.

Анализ публикаций, посвящённых ионизации пламени углеводородов, а также работ, в которых показана взаимосвязь электропроводности и скорости пламени как в ламинарных условиях [15], так и в условиях турбулентного горения в ДВС [16, 17], позволил высказать гипотезу о том, что электропроводность пламени в одной или нескольких точках камеры сгорания отражает энергетические показатели процесса горения.

Известны работы по анализу взаимосвязи ионного тока и теплонапряжённости факела при сжигании газа в условиях открытого факела и металлургических печей. Так, в исследованиях, описанных в [2], показано, что ионный ток в факеле газовой горелки может отражать тепловую нагрузку факела при количественном регулировании мощности, т.е. при постоянном составе смеси и разных расходах. Однако неизвестно о достаточно обоснованных и универсальных методиках анализа энергетических показателей горелочных устройств с помощью измерения ионного тока. В связи с этим представляется целесообразным экспериментальная

проработка высказанной гипотезы в условиях, достаточно отличающихся от описанных в [2], но в то же время позволяющих провести адекватный анализ энергетических показателей. Видимо, для этой цели хорошо подходит ДВС, так как сгорание происходит в замкнутом объёме без массообмена с окружающей средой, что позволяет достаточно точно оценивать энергетические параметры процесса сгорания. В частности, для первичного анализа можно использовать работу газов, с высокой степенью точности определяемую с помощью индикаторной диаграммы. В данном случае работа газов рассматривается как механический эквивалент тепловой энергии, выделенной при горении в КС ДВС.

Таким образом, задача экспериментального исследования – выявление закономерностей, связывающих электропроводность пламени и работу газов при горении углеводородов в условиях ДВС.

Эксперимент проведён на одноцилиндровой исследовательской установке с искровым зажиганием УИТ-85. В наиболее удалённой от свечи зажигания зоне камеры сгорания установлен ионизационный зонд. Экспериментальная установка оснащена системой регистрации сигналов ионного тока и системами динамического измерения давления в камере сгорания, измерения расходов воздуха и топлива. Для регистрации давления в камере сгорания использовался датчик давления Kistler, совмещённый со свечей зажигания. Схема камеры сгорания приведена на рис. 1.

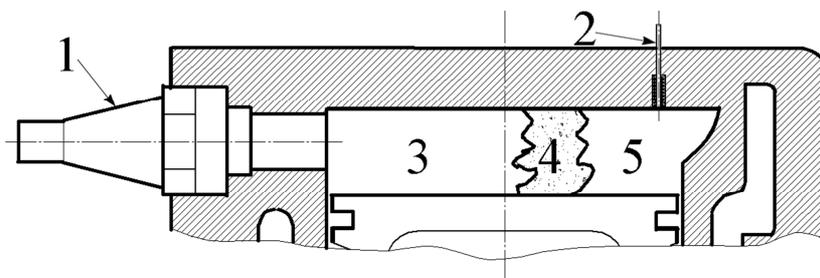


Рис. 1. Схема камеры сгорания экспериментальной установки:

1 – датчик давления, совмещённый со свечой зажигания; 2 – ионизационный зонд;
3 – продукты сгорания; 4 – фронт турбулентного горения; 5 – топливовоздушная смесь

Методика эксперимента заключалась в одновременной регистрации ионного тока на удалённом зонде и давления в камере сгорания экспериментальной установки. По давлению в каждый момент времени и кинематике кривошипно-шатунного механизма можно оценить работу цикла L как площадь внутри индикаторной диаграммы (рис. 2) по формуле [18]

$$L = \oint p dV,$$

где p – текущее давление; dV – элементарное изменение объёма камеры сгорания.

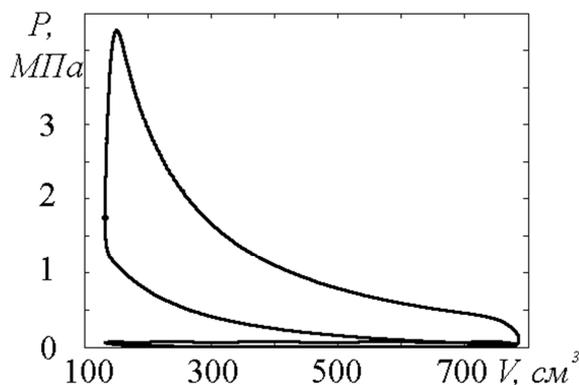


Рис. 2. Индикаторная диаграмма

Ионный ток регистрировался и усреднялся по 300 циклам сгорания для уменьшения погрешностей, связанных с межцикловым рассеянием сигналов, обусловленным неидентичностью процесса горения в каждом цикле на одном режиме. Методика анализа сигнала ионного тока описана в [16, 17]. В данной работе усреднённый сигнал ионного тока оценивался только по амплитуде, что даёт возможность найти максимальную проводимость пламени в зоне установки зонда на каждом режиме.

Варьируемым фактором, влияющим на электропроводность и работу цикла, являлся состав смеси, т.е. имело место качественное регулирование мощности двигателя, когда расход воздуха остаётся практически постоянным, но изменяется

энергосодержание горючей смеси. Эксперимент с варьированием состава смеси проведён на двух скоростных режимах ДВС: 600 и 900 мин⁻¹, т.е. при двух различных газодинамических характеристиках заряда в КС. Коэффициент избытка воздуха менялся от 0,9 до 1,3. Важная для данного эксперимента особенность установки заключается в том, что отсутствует дроссельная заслонка и коленчатый вал приводится в действие электродвигателем, что позволяет поддерживать обороты (т.е. газодинамический фактор) стабильными независимо от режима горения.

При такой постановке эксперимента может быть выявлена взаимосвязь работы цикла и максимального значения ионного тока. Адекватность методики эксперимента обусловлена следующими особенностями:

- при обработке сигналов проводится осреднение по ансамблю стохастических процессов при отбраковке аномальных циклов;

- процесс сгорания анализируется двумя независимыми методами;

- режимы поддерживаются достаточно точно, исключаются циклы с детонационным сгоранием;

- межцикловая нестабильность как фактор, влияющий на температурный режим камеры сгорания, контролируется и поддерживается в заданных пределах на всех режимах.

При этом основной варьируемый фактор (состав смеси) является значимым и изменяется при двух разных газодинамических режимах горения.

В результате проведения эксперимента получена зависимость работы цикла, определённой с помощью индикаторной диаграммы, от амплитудного значения тока в цепи ионизационного зонда (рис. 3). Зависимость может быть аппроксимирована логарифмической функцией

$$L = A \cdot \ln(I) + B,$$

где L – работа цикла; A и B – коэффициенты, зависящие от скоростного режима.

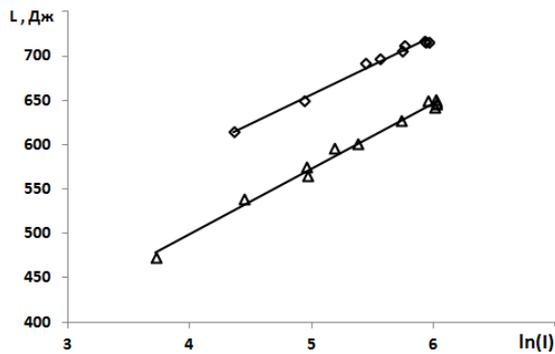


Рис. 3. Зависимость цикловой работы от ионного тока:

◇ - 600 мин⁻¹, △ - 900 мин⁻¹

График зависимости работы цикла от ионного тока перемещается практически параллельно самому себе при изменении скоростного режима (видно, что работа цикла на режиме 600 мин⁻¹ превышает работу цикла на 900 мин⁻¹). Это обусловлено конструктивными особенностями установки – ухудшением наполнения цилиндра свежим зарядом при изменении скоростного режима и сохранении угла опережения зажигания. Наблюдается влияние экстенсивного фактора – изменения наполнения камеры сгорания свежим зарядом, что соответствует количественному регулированию мощности как в эксперименте с газовой горелкой, описанном в [2].

Анализ экспериментальных данных показывает, что характер зависимости ионного тока от основного фактора – состава смеси, определяющего её энергосодержание, сохраняется и при изменении экстенсивного фактора.

Следует отметить, что в отличие от работ по анализу конфигурации пламени в камере сгорания ДВС [7, 8], был использован для анализа только один ионизационный зонд, установленный в удалённой от свечи зажигания зоне КС. Этим показано, что сигнал даже одного ионизационного зонда может содержать информацию обо всём процессе горения в камере сгорания.

Таким образом, при проведении первичного эксперимента подтверждается

гипотеза о том, что электропроводность пламени содержит информацию об энергетических параметрах горения в различных условиях сжигания углеводородных топлив. Причём в условиях ДВС электропроводность пламени может анализироваться в одной точке, что позволяет предполагать возможность подобия процессов горения в точке установки ионизационного зонда и в камере сгорания в целом. Полученные результаты позволяют сделать вывод о необходимости проведения экспериментов с другими видами углеводородных топлив в разных камерах сгорания и на различных режимах для выявления универсальности полученных закономерностей.

Это позволит использовать выявленные закономерности в процессе проектирования и доводки рабочего процесса энергетических машин, а также в эксплуатации и сервисе в системах диагностики, контроля и управления сгоранием, для выполнения перспективных требований по токсичности и экономичности.

Библиографический список

1. Investigation of extinction in unsteady flames in turbulent combustion by 2D-LIF of OH radicals and flamelet analysis / H. Becker, P.B. Monkhouse, J. Wolfrum [et al.] // 23rd Symp. (Intl.) Comb., The Combustion Institute, Pittsburgh. – 1991. – 817 p.
2. Степанов, Е.М. Ионизация в пламени и электрическое поле [Текст] / Е.М. Степанов, Б.Г. Дьячков. – М.: Металлургия, 1968. – 311 с.
3. Соколик, А.С. Самовоспламенение, пламя и детонация в газах [Текст]/А.С. Соколик – М.: АН СССР, 1960. – 427 с.
4. Калькот, Г. Процессы образования ионов в пламени [Текст] / Г. Калькот // Вопросы ракетной техники. – 1958. – №4. – С. 78-94.
5. Fundamental study on combustion diagnostics using a spark plug as ion probe / S. Yoshiyama, E. Tomita, Y. Naha-

moto. // SAE Technical Paper 2000-01-2828. –2000.

6. An Ionization Equilibrium Analysis of the Spark Plug as an Ionization Sensor / A. Saitzkoff, R. Reinmann, T. Berglind [et al.] // SAE Technical Paper 960337. – 1996.

7. Measurements of the Effect of In-Cylinder Motion on Flame Development and Cycle-to Cycle Variations Using an Ionization Probe Head Gasket / S. Russ, G. Peet, W. Stockhausen // SAE Technical Paper 970507. –1997.

8. Pfeffer T. Influence of Intake Tumble Ratio on General Combustion Performance, Flame speed and Propagation at a Formula One Type High-Speed Research Engine / T. Pfeffer, P. Buhler, D. Meier [et al.] // SAE Technical Paper 2002-01-0244. – 2002 –P. 103-116.

9. Reinmann R. Local Air-Fuel Ratio Measurements Using the Spark Plug as an Ionization Sensor / R. Reinmann, A. Saitzkoff, F. Mauss // SAE Technical Paper 970856. –1997 –P. 175-185.

10. Corcione F. E. Evaluation of Knocking Combustion by an Ion-current System and Optical Diagnostics of Radical Species / F. E. Corcione, B. M. Vaglieco, S. S. Merola // Proceeding on 6th COMODIA Symposium. – 2004. – №6. –P. 487-495.

11. Multiple Point Ion Current Diagnostics in an HCCI Engine / A. Vressner, P. Strundh, A. Hultqvist [et al.] // SAE Technical Paper 2004-01-0934. –2004.

12. Резник, В.Е. Электропроводность факела пламени неоднородной сме-

си при впрыске жидкого топлива в зону циркуляции за плохобтекаемым телом [Текст] / В. Е. Резник, В. В. Токарев, А. П. Шайкин // Изв. высш. учеб. заведений. Сер. Авиационная техника. – 1977. – №3. – С. 93-97.

13. Auzins J. Ion-Gap Sense in Misfire Detection, Knock and Engine Control / J. Auzins, H. Johansson, J. Nytomt // SAE Technical Paper 950004. –1995. –P. 21-28.

14. Real-Time Digital Signal Processing of Ionization Current for Engine Diagnostic and Control / G. W. Malaczynski, M. E. Baker // SAE Technical Paper 2003-01-1119. –2003.

15. Иноземцев, Н.Н. Ионизация в ламинарных пламенах [Текст] / Н.Н. Иноземцев // Изв. АН СССР, ОТН, Энергетика и автоматика. –1960. –№2. –С. 59-66.

16. Ивашин, П.В. Использование электропроводности пламени для анализа процесса сгорания в условиях ДВС с искровым зажиганием [Текст] / П. В. Ивашин // Вестн. СГАУ. –2011. –№3(27). – С. 88-94.

17. Ясников, И.С. К вопросу о турбулентном распространении пламени в замкнутом объеме [Текст] / И.С. Ясников, П.В. Ивашин, А.П. Шайкин // Журнал технической физики. –2013. – Т. 83. Вып. 11. – С. 39-43.

18. Индикаторная диаграмма, динамика тепловыделения и рабочий цикл быстроходного поршневого двигателя [Текст] / Б.С. Стечкин, К.И. Генкин, В.С. Золотаревский [и др.] – М.: АН СССР, 1960. – 198 с.

EVALUATION OF INTERNAL COMBUSTION ENGINE CYCLE WORK USING AN IONIC CURRENT SENSOR

© 2013 P.V. Ivashin, M. P. Ramazanov, A. Ya. Tverdokhlebov, A.P. Shaikin, I. S. Yasnikov

Togliatti State University

The interrelation between the electrical conductivity of flame and the internal combustion engine cycle work is found experimentally with the aid of an ionic current sensor installed in a spark ignition internal combustion engine combustion chamber. It is shown that only one ionization cycle is needed for the analysis of combustion process parameters in a spark ignition internal combustion engine.

Internal combustion engine, cycle work, combustion, flame, ionic current, interrelation.

Информация об авторах

Ивашин Павел Валентинович, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Тольяттинский государственный университет. E-mail: ivashinpv@rambler.ru. Область научных интересов: рабочие процессы ДВС, процессы горения в энергетических установках.

Рамазанов Михаил Петрович, инженер, кандидат физико-математических наук, инженер, Тольяттинский государственный университет. E-mail: mikeram@mail.ru. Область научных интересов: аэродинамика, газовая динамика процессов горения.

Твердохлебов Андрей Яковлевич, аспирант, Тольяттинский государственный университет. E-mail: sarc@bk.ru. Область научных интересов: системы интеллектуального управления энергетических машин, системы сбора данных для теплофизических экспериментов, математическая обработка сигналов.

Шайкин Александр Петрович, доктор технических наук, профессор кафедры «Энергетические машины и системы управления», Тольяттинский государственный университет. E-mail: td@tltsu.ru. Область научных интересов: рабочие процессы ДВС, процессы горения в энергетических установках.

Ясников Игорь Станиславович, доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, Тольяттинский государственный университет. E-mail: pol1971@mail.ru. Область научных интересов: кинетика неравновесных процессов в различных приложениях.

Ivashin Pavel Valentinovich, Candidate of Science (Engineering), Senior Researcher, Togliatti State University. E-mail: ivashinpv@rambler.ru. Area of research: work processes in internal combustion engines, combustion processes in power plants.

Ramazanov Mikhail Petrovich, engineer, Candidate of Physics and Mathematics, Togliatti State University. E-mail: mikeram@mail.ru. Area of research: aerodynamics, gas dynamics of combustion processes.

Tverdokhlebov Andrey Yakovlevich, postgraduate student, Togliatti State University. E-mail: sarc@bk.ru. Area of research: systems of smart control of energy machines, systems of collecting data for thermophysical experiments, mathematical processing of signals.

Shaikin Alexander Petrovich, Doctor of Science (Engineering), Professor, Department of Energy Machines and Control Systems, Togliatti State University. E-mail: td@tltsu.ru. Area of research: work processes in internal combustion engines, combustion processes in power plants.

Yasnikov Igor Stanislavovich, Doctor of Physics and Mathematics, Chief Researcher, Togliatti State University. E-mail: pol1971@mail.ru. Area of research: kinetics of non-equilibrium processes in various applications.