

12. **Belopukhov V. N., Borovik S. Yu., Kuteynikova M. M.** *Algoritmy funkcionirovaniya sistem izmereniya radial'nykh i osevykh smeshcheniy tortsov lopatok slozhnoy formy* (Operation algorithms of systems for measuring radial and axial displacements of complex-shaped blade tips), *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol'*, 2016, no. 4 (in Russian).
13. **Belopukhov V. N., Borovik S. Yu., Kuteynikova M. M., Podlipnov P. E.** *Predvaritel'naya obrabotka dannykh kodov v sisteme izmereniya radial'nykh i osevykh smeshcheniy tortsov lopatok slozhnoy formy na osnove adaptivnogo algoritma* (Preliminary data processing in the system for measuring of complex shaped blades tips' radial and axial displacements on the base of adaptive algorithm), *Proc. of XVII international conference (Samara, June, 22–25, 2015) "Problemy upravleniya i modelirovaniya v slozhnykh sistemakh"*, pp. 677–678 (in Russian).
14. **Belopukhov V. N., Borovik S. Yu., Kuteynikova M. M.** *Opreделение экстремума функции изменения кодов в системе измерения радиальных и осевых смещений торцов лопаток сложной формы* (Codes' function extremum calculation in the system for measuring of complex shaped blades tips' radial and axial displacements), *Proc. of XVII international conference (Samara, June, 22–25, 2015) "Problemy upravleniya i modelirovaniya v slozhnykh sistemakh"*, pp. 679–680 (in Russian).
15. **Kuteynikova M. M., Sekisov Yu. N.** *Algoritм вычисления радиальных и осевых смещений торцов лопаток* (The algorithm for calculation of blade tips radial clearances and axial displacements), *Proc. of XII international conference (Samara, June, 21–23, 2010) "Problemy upravleniya i modelirovaniya v slozhnykh sistemakh"*, pp. 323–327 (in Russian).
16. **Kuteynikova M. M.** *Vychislenie koordinat smeshcheniya tortsov lopatok v sisteme izmereniya radial'nykh zazorov* (Calculation of blade tips' displacements in system for radial clearances measurement), *Upravlenie bol'shimi sistemami: Materialy X Vserossiyskoy shkoly-konferentsii molodykh uchenykh*, vol. 3, Ufa, Publishing house of UGATU, 2013, pp. 157–161 (in Russian).
17. **Skobelev O. P.** ed. *Klasternye metody i sredstva izmereniya deformatsiy statora i koordinat smeshcheniy torcov lopatok i lopastej v gazoturbinykh dvigatelyakh* (Cluster methods and tools for measuring of stator deformations and coordinates of blade tips displacements in gas-turbine engines), Moscow, Mashinostroenie ("Mechanical engineering"), 2011, 298 p. (in Russian).
18. **RMG 29-2013 GSI.** *Metrologiya. Osnovnye terminy i opredeleniya* (Metrology. Basic terms and definitions), Moscow, Standartinform, 2014 (in Russian).
19. **Sekisov Yu. N., Skobelev O. P.** ed. *Metody i sredstva izmereniya mnogomernykh peremeshchenij elementov konstruktsii silovyykh ustanovok* (Methods and tools for measuring of multi-dimensional displacements of power-plant constructional elements), Samara, Samarskiy nauchnyy centr RAN (Samara scientific center of Russian academy of sciences), 2001, 188 p. (in Russian).
20. **Borovik S. Yu., Kuteynikova M. M., Sekisov Yu. N., Skobelev O. P.** *Pogreshnosti algoritma vychisleniya radial'nykh i osevykh smeshcheniy tortsov lopatok slozhnoy formy v sistemakh izmereniya radial'nykh zazorov v turbine* (Errors of calculation algorithm or radial and axial displacement of complex shaped blade tips in the systems for measurement radial clearances in turbine), *Vestnik SamGTU, Seriya "Tekhnicheskie nauki"*, 2016, no. 2 (in Russian).
21. **Borovik S. Yu., Kuteynikova M. M., Podlipnov P. E., Sekisov Yu. N., Skobelev O. P.** Modeling the process of measuring radial and axial displacements of complex-shaped blade tips, *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*, September 2015, vol. 51, iss. 5, pp. 512–522.
22. **Borovik S. Yu., Kuteynikova M. M., Sekisov Yu. N., Skobelev O. P.** *Pogreshnosti diskretizatsii v sistemakh izmereniya radial'nykh i osevykh smeshcheniy tortsov lopatok rabocheho koleasa turbiny* (Sampling errors in the systems for measuring radial and axial displacements of blades tips of turbine wheel), *Vestnik SamGTU, Seriya "Tekhnicheskie nauki"*, 2016, no. 3 (in Russian).

УДК 53.083.9

DOI: 10.17587/mau.18.256-263

А. Ю. Будко¹, Ph. D., руководитель обр. программы

"Мехатроника и робототехника" ЮФУ, aptem_budko@mail.ru,

М. Ю. Медведев¹, д-р техн. наук, проф., зав. каф, medvmihal@sfedu.ru,

Р. Ю. Будко¹, аспирант института приборостроения и нанoeлектроники ЮФУ, raisa-budko@yandex.ru,

П. В. Ивашин², Ph. D., начальник НИО-4 ТГУ, ivashinpv@rambler.ru,

А. Я. Твердохлебов², инженер НИО-4 ТГУ, andr.tverd@gmail.com,

Д. Н. Герасимов³, Ph. D., доц., gerasimovdn@mail.ru, **В. В. Рахманов**⁴, Ph. D., доц., rahmanov@inbox.ru,

¹Южный федеральный университет,

²Тольяттинский государственный университет,

³Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет

информационных технологий, механики и оптики,

⁴Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН

Контроль параметров процесса сгорания в двигателе внутреннего сгорания по сигналу ионного тока¹

Рассматриваются вопросы контроля параметров процесса сгорания в двигателе внутреннего сгорания и исследования сигнала электропроводности пламени. Предложен метод контроля параметров процесса сгорания на основе анализа интегральной характеристики сигнала ионного тока, отличающийся повышенной устойчивостью результатов расчета к возмущениям сигнала, происходящим в результате межцикловых вариаций и флуктуаций процесса сгорания. Приведены результаты экспериментального исследования по оценке возможностей предложенного метода в сравнении с пьезокерамическим датчиком давления сгорания. Показана возможность высокоточного контроля максимального давления сгорания, углового положения пика давления и коэффициента избытка воздуха на основе анализа интегральной характеристики сигнала ионного тока.

Ключевые слова: двигатель внутреннего сгорания, процесс сгорания, электропроводность пламени, ионный ток, интегральная характеристика сигнала ионного тока, контроль параметров, угловое положение пика давления

¹ Работа выполнена при частичной поддержке:

1) гранта РФФИ "Новые методы анализа ионных токов как инструмент исследования и оптимизации работы ДВС" (теоретические исследования);

2) гранта ЮФУ "Теория и методы энергосберегающего управления распределенными системами генерации, транспортировки и потребления электроэнергии" (экспериментальные исследования).

Введение

Контроль параметров процесса сгорания в двигателе внутреннего сгорания (ДВС) является актуальной задачей, поскольку позволяет проводить углубленные исследования физики и химии процессов в камере сгорания, совершенствовать системы управления посредством введения дополнительных обратных связей, выполнять бортовую диагностику и улучшать эксплуатационные показатели двигателей.

Процесс сгорания в ДВС имеет следующие предельные показатели: скорость нормального сгорания — 10...100 м/с; скорость детонационного сгорания — 1000...2200 м/с; изменение температуры за 1 рабочий такт — до 2500 °С; изменение давления за 1 рабочий такт — до 25 МПа; скорость изменения давления: 0,1...0,35 МПа/° угла поворота коленчатого вала (УПКВ); число рабочих тактов в секунду: 5...200 Гц. Такие экстремальные условия затрудняют прямой контроль параметров сгорания традиционными методами [1—5], поэтому наибольшее распространение на сегодняшний день получили косвенные методы измерения, не требующие прямого доступа в камеру сгорания. При этом расчет параметров процесса сгорания проводится по его косвенным показателям: скорости и ускорению вращения коленчатого вала, вибрациям агрегата, давлению двигателя на крепежные элементы [6—11]. Широко распространенным является метод оценки показателей по крутящему моменту на валу двигателя, например на основе тензометрических датчиков [12]. При своей простоте и доступности косвенные методы имеют высокую погрешность оценки параметров, обусловленную несовершенством математических моделей, описывающих взаимосвязь внешних характеристик ДВС и показателей процесса сгорания.

Отдельным классом бесконтактных методов контроля параметров сгорания в ДВС являются оптические методы исследования, к которым относятся: скоростная фотосъемка, теневой метод, метод Теплера, голография, метод лазер-доплеровского измерения скорости, УФ- и ИК-спектроскопия, методы лазерной спектроскопии и т.д. [13—16]. Несмотря на высокие показатели информативности и точности, такие методы могут применяться только на специальных стендовых двигателях с прозрачными частями, поскольку вывод излучения из камеры сгорания затруднен.

Наиболее точные результаты дают методы прямого контроля процесса сгорания [17—24]. Развитой технологией производства средств измерения давления сгорания является изготовление датчиков на основе пьезокерамики, благодаря чему такие датчики используются в качестве эталонных. В лучших серийных образцах погрешность измерения давления сгорания не превышает 1,5 % во всем динамическом диапазоне, однако такие датчики

инерционны, имеют малый ресурс и высокую стоимость [17—20].

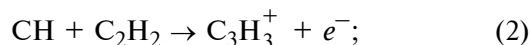
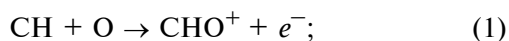
Перспективным направлением измерения давления сгорания является технология на основе оптоволоконных систем [20—24]. Принцип действия таких датчиков основан на законах преломления и отражения световых волн. При этом в конструкции чувствительного элемента используется механическая диафрагма, деформируемая под действием давления. Степень деформации измерительной мембраны отслеживается по изменению параметров светового пучка, отраженного от ее поверхности. Оптоволоконные датчики отличаются высокой стабильностью, помехоустойчивостью, высоким качеством сигнала, однако технология их изготовления на сегодняшний день отработана недостаточно.

Таким образом, существует реальная необходимость в инструменте измерения параметров процесса сгорания топливно-воздушной смеси, имеющего достаточную информативность и точность, высокую надежность и ресурс, а также низкую в сравнении с аналогами стоимость. Авторами статьи предлагается решение этой задачи на основе анализа сигнала электропроводности пламени.

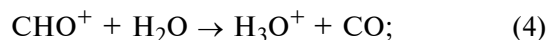
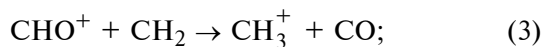
Электропроводность пламени и механизмы формирования ионного тока

Особенностью процесса сгорания углеводородных топлив является аномально высокая проводимость пламени. Главными механизмами образования заряженных частиц в пламени считаются химическая и термическая ионизация топливного заряда [2, 25—28]. Основные процессы, влияющие на ионизацию рабочего тела в камере сгорания ДВС, могут быть описаны следующими выражениями:

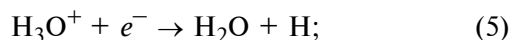
- химическая ионизация:



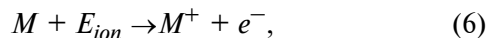
- перенос зарядов:



- рекомбинация ионов:



- термическая ионизация:



где M — главные группы оксидов азота NO.

Измерение ионного тока происходит посредством подачи высокого напряжения на измерительный зонд (например, центральный электрод свечи зажигания). Электродвижущая сила (ЭДС) приводит в движение заряженные частицы в районе электродов зонда, и в цепи начинает протекать ток. В качестве измерительного напряжения может

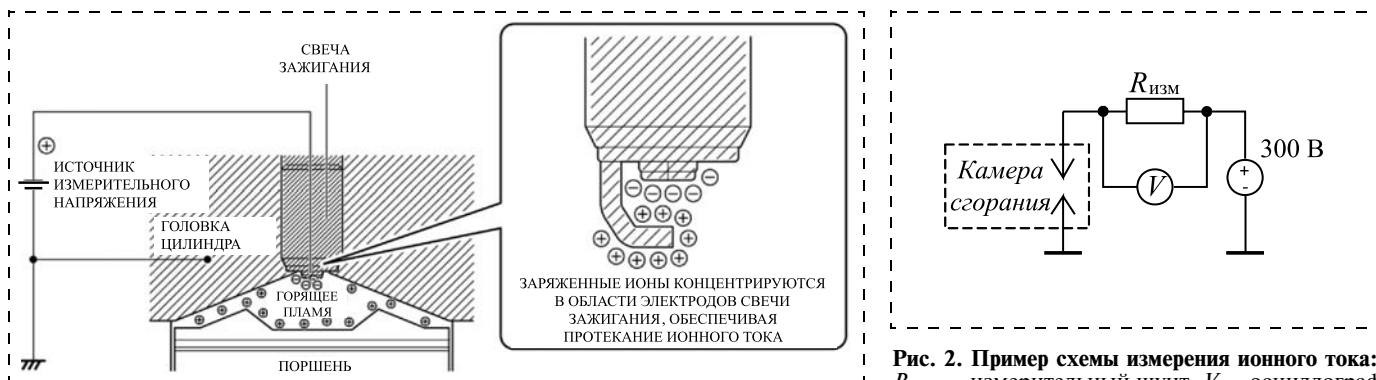


Рис. 1. Механизм образования ионного тока

Рис. 2. Пример схемы измерения ионного тока: $R_{\text{изм}}$ — измерительный шунт, V — осциллограф для регистрации сигнала

применяться как постоянное, так и переменное напряжение. Наиболее распространены схемы с использованием постоянного напряжения с приложением к измерительному зонду положительного или отрицательного полюса источника питания [29–30]. При этом в литературе встречается описание схем с использованием измерительного напряжения потенциалом от 100 до 600 В. Механизм образования ионного тока поясняет рис. 1.

На практике силу ионного тока определяют по падению напряжения на измерительном шунте $R_{\text{изм}}$, как это показано на рис. 2.

Наиболее передовые системы регистрации ионного тока выполняют запись сигнала на жесткий носитель для проведения его дальнейшего анализа и обработки.

Современное состояние методов контроля параметров сгорания по сигналу ионного тока

Исследования в области использования ионизационных датчиков для контроля процесса сгорания в цилиндре ДВС проводят ведущие мировые производители ДВС и управляющей аппаратуры, такие как BOSCH, DELPHI, MECEL Mitsubishi Electric Corp. и др. Интерес к такому подходу объясняется следующими преимуществами: простота и дешевизна аппаратной части, безынерционность, широкий динамический диапазон, возможность оценки различных параметров процесса сгорания по одному сигналу.

Обзор литературы показал, что большинство известных методов анализа сигнала ионного тока (СИТ) основаны на поиске в сигнале признаков, характерных для различных доминирующих механизмов ионизации и фаз сгорания топливного заряда [25–30]. Можно выделить параметрический и структурный подходы к анализу СИТ. Параметрический анализ подразумевает оценку таких параметров СИТ, как число пиков и пиковые значения сигнала, время или угол от момента искрообразования до достижения этих значений, длительность сигнала, а также различные комбинации этих параметров. Пример параметрического анализа СИТ приведен на рис. 3.

Структурный анализ подразумевает разбиение целостного СИТ на более простые фигуры, аппроксимирующие характерные участки сигнала. Примером структурного анализа является метод определения углового положения пика давления (УППД) по пику термической ионизации, предложенный Lars Eriksson в 1999 г. [31] и впоследствии получивший развитие в работах других исследователей, например Z. Gao и др. в 2014 г. [32]. Для определения положения второго пика ионного тока для СИТ проводится процедура подбора параметров $[a \ b \ c]$ аппроксимирующего выражения (7):

$$\delta_1(t) = a_1 e^{-\left(\frac{x-b_1}{c_1}\right)^2} + a_2 e^{-\left(\frac{x-b_2}{c_2}\right)^2}, \quad (7)$$

где параметр a определяет максимальную амплитуду, b — местоположение максимума, c — ширину кривой Гаусса.

Выражение (7) описывает две кривых Гаусса, соответствующие первому и второму пикам СИТ, как это показано на рис. 4.

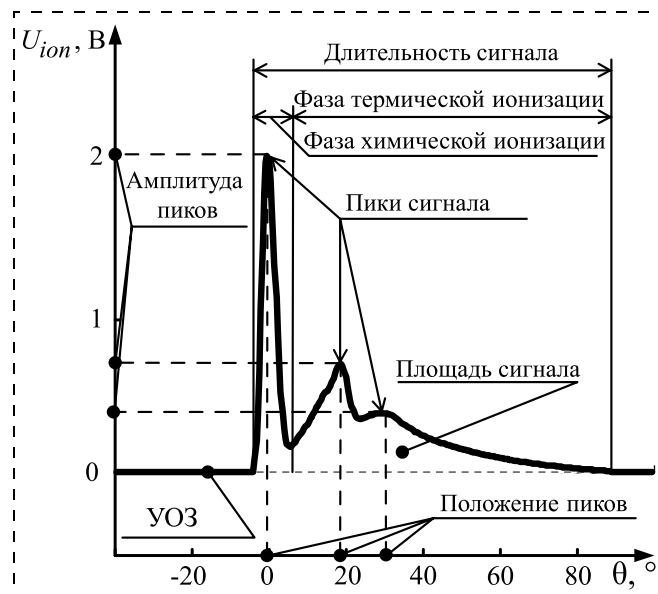


Рис. 3. Параметрический анализ сигнала ионного тока (УОЗ — угол опережения зажигания)

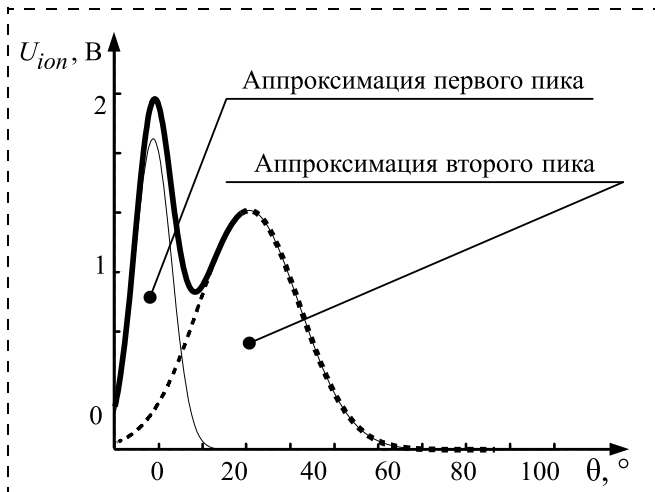


Рис. 4. Структурный анализ сигнала ионного тока

Методы параметрического и структурного анализа хорошо работают на установившихся режимах ДВС, когда имеется возможность усреднить сигнал по нескольким циклам однородной выборки. Однако при работе ДВС на переходных режимах возможность получения однородной выборки отсутствует, что приводит к значительному росту погрешностей расчета. Кроме того, сильная подверженность оцениваемых параметров СИТ межцикловым вариациям обуславливает наличие дополнительных недостатков, затрудняющих применение этих методов на практике [33]. Фазы СИТ могут накладываться друг на друга либо полностью отсутствовать в сигнале в явно выраженном виде, что приводит к невозможности выделения фаз сигнала по признакам доминирующего механизма ионизации. Другим недостатком структурного анализа является высокая ресурсоемкость.

Площадь под кривой СИТ является параметром, вычисление которого не накладывает на форму сигнала никаких ограничений. В литературе имеются сообщения о возможности использования этого параметра для оценки показателей работы и управления ДВС [34, 35]. При этом площадь рассчитывается как интеграл СИТ. Однако анализ самой кривой интегральной характеристики с учетом ее промежуточных расчетных значений, соответствующих различным моментам времени и фазам сгорания топливного заряда, ранее не проводили.

Разработка метода измерения параметров процесса сгорания на основе анализа интегральной характеристики сигнала ионного тока

Для минимизации ошибки измерения параметров сгорания во всем рабочем диапазоне работы ДВС авторами статьи был разработан метод на основе анализа интегральной характеристики сигнала ионного тока (ИХСИТ).

Интегральная характеристика сигнала ионного тока рассчитывается методом пошагового интегри-

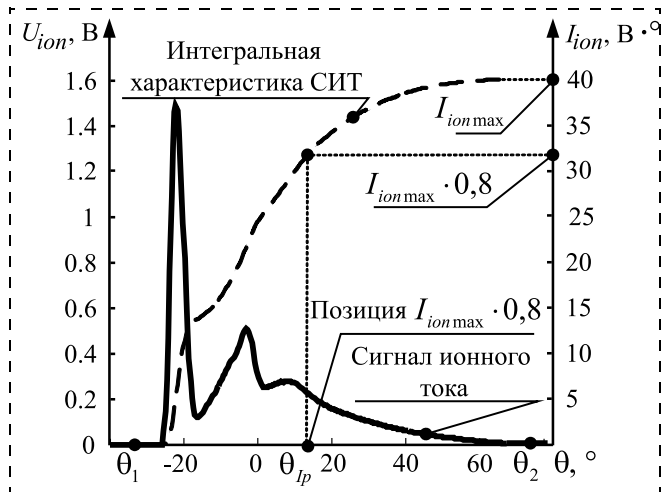


Рис. 5. К расчету интегральной характеристики сигнала ионного тока

рования СИТ по времени или УПКВ. Пределы интегрирования выбираются исходя из длительности существования сигнала после момента зажигания (см. θ_1 и θ_2 , рис. 5), что соответствует длительности процесса сгорания единичного рабочего такта двигателя:

$$I_{ion}(\theta) = \int_{\theta_1}^{\theta_2} U_{ion}(\theta) d\theta, \quad (8)$$

где $I_{ion}(\theta)$ — интегральная характеристика ионного тока [В·с]; θ — угол поворота коленчатого вала [°]; θ_1 и θ_2 — пределы интегрирования [°], $U_{ion}(\theta)$ — показания датчика ионизации [В].

Для вычисления интеграла могут быть использованы любые методы интегрирования. Примеры СИТ и его интегральной характеристики приведены на рис. 5.

На рис. 5 I_{ionmax} — максимальное значение интегральной характеристики, соответствующее площади под кривой СИТ. С этим параметром, характеризующим площадь под СИТ (или полный ток на зонд за единичный цикл сгорания топливного заряда в цилиндре ДВС), исследователи связывают понятие "интеграл ионного тока". Площадь под кривой СИТ является важным параметром, жестко связанным со многими показателями процесса сгорания, однако значительный интерес с точки зрения анализа рабочего процесса ДВС представляет также характер развития кривой ИХСИТ. Длительность $\theta_{ion} = \theta_2 - \theta_1$ СИТ соответствует длительности процесса сгорания, а I_{ionmax} характеризует энергетику процесса сгорания. Тогда комплексный анализ изменения промежуточных значений I_{ion} ИХСИТ в функции времени или УПКВ относительно I_{ionmax} позволяет определить характерные фазы развития процесса сгорания. Далее будет показано, что момент θ_{ip} достижения 80...90 % I_{ionmax} соответствует окончанию основной фазы сгорания и достижению максимального значения давления в цилиндре.

Экспериментальная оценка метода контроля параметров сгорания ДВС по интегральной характеристике ионного тока

Основным преимуществом использования ИХСИТ является отсутствие ограничений на форму и параметры анализируемого СИТ. Это обеспечивает снижение режимных ограничений при анализе СИТ. Другим важным преимуществом является устойчивость результатов расчета к изменениям геометрических параметров электродов зонда в процессе эксплуатации ДВС, что иллюстрирует рис. 6, на котором представлены результаты расчета ИХСИТ для данных, приведенных в статье [36]. Авторы регистрировали СИТ для зондов различной площади на стационарных режимах работы ДВС и прочих равных условиях.

Анализ данных показывает, что изменение геометрических параметров электродов сильно влияет на форму СИТ и полный ток на зонд I_{ionmax} . Однако значения момента θ_{Ip} окончания основной фазы сгорания, рассчитанные по ИХСИТ, не имеют значительных вариаций.

Для оценки возможностей методов, основанных на анализе ИХСИТ, проведен ряд экспериментов на исследовательской установке УИТ-85 в Тольяттинском государственном университете. Экспериментальная установка подробно описана в статье [37].

В процессе эксперимента проводили регистрацию сигналов СИТ, давления сгорания (посред-

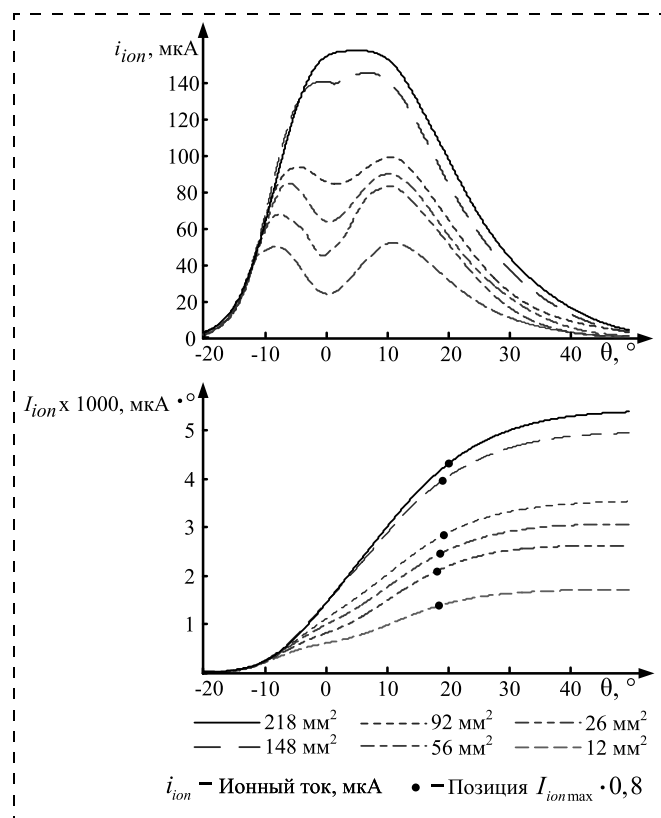


Рис. 6. Токи на зонд и результаты расчета окончания основной фазы сгорания по ИХСИТ при различных площадях электрода зонда

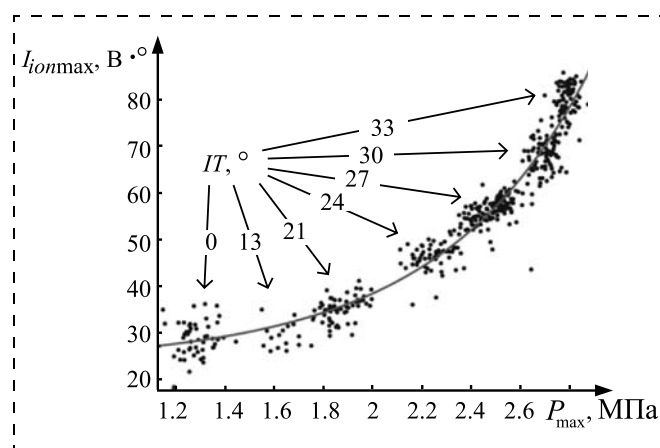


Рис. 8. Влияние УОЗ (ИТ) на максимальное давление цикла P_{max} и полный ток на зонд за цикл I_{ionmax}

ством пьезокерамического датчика), положения коленчатого вала и массового расхода воздуха на стационарных режимах работы. В первой серии опытов изменению подвергался угол опережения зажигания (УОЗ) при постоянстве других параметров, во второй варьируемым параметром являлся состав смеси. На рис. 7 (см. вторую сторону обложки) представлены усредненные осциллограммы СИТ и давления сгорания при различных УОЗ.

На основе полученных данных построена зависимость интеграла ионного тока и максимального давления цикла от УОЗ, приведенная на рис. 8.

Анализ зависимости, приведенной на рис. 8, указывает на возможность контроля максимального давления в цилиндре по ИХСИТ.

Характер изменения УППД, измеренного датчиком давления сгорания, и рассчитанного по ИХСИТ момента окончания основной фазы сгорания при изменении УОЗ можно оценить по данным, приведенным на рис. 9 (см. вторую сторону обложки).

Анализ данных рис. 9 показывает, что наименьший разброс расчетного УППД имеет место при больших УОЗ.

Зависимости среднего максимального давления цикла $P_{max}(\alpha)$ и интегрального значения СИТ $I_{max}(\alpha)$ от коэффициента избытка воздуха приведены на рис. 10.

Анализ зависимостей, приведенных на рис. 9, указывает на экстремальный характер с наличием максимума интегральной характеристики ионного тока в области $\alpha = 0,8...0,9$, что соответствует составу смеси, обеспечивающему максимальную энергетику процесса сгорания, а именно максимальное давление сгорания и наивысшую скорость распространения пламени. Это позволяет использовать I_{ionmax} в качестве критерия оценки и оптимизации управляющих воздействий по коррекции α в случае оптимизации ДВС по максимальной мощности.

Результат сравнения эффективности методов расчета УППД по ИХСИТ и по пику тепловой ионизации в сравнении с эталонным значением

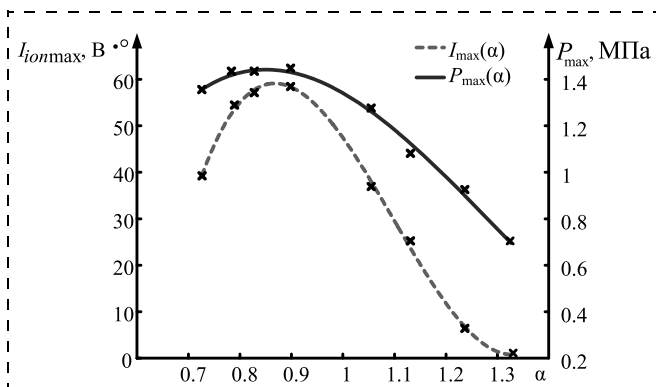


Рис. 10. Влияние коэффициента избытка воздуха на максимальное давление цикла и полный ток на зонд за цикл (значение I_{ionmax})

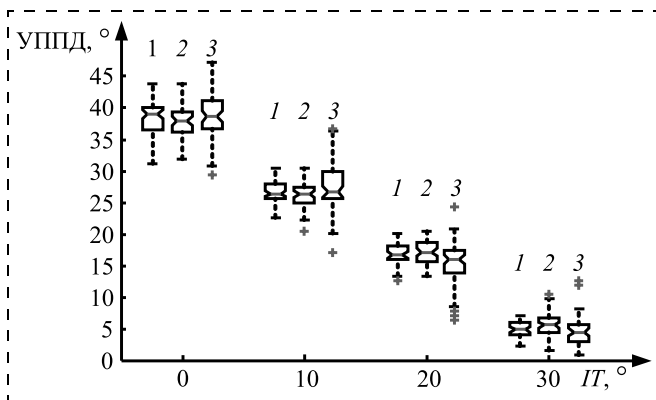


Рис. 11. Диаграммы размаха значений УППД для различных УОЗ:

1 — датчик давления; 2 — интегральная характеристика сигнала ионного тока; 3 — пик тепловой ионизации ионного тока

пьезокерамического датчика давления приведен на рис. 11.

Анализ диаграмм размаха, приведенных на рис. 11, указывает на несущественные различия в вариациях УППД, оцененного по датчику давления и ИХСИТ, а также на меньшую подверженность ИХСИТ воздействию межцикловых вариаций параметров процесса сгорания по сравнению с пиком тепловой ионизации.

Заключение

Представлен метод контроля параметров процесса сгорания посредством анализа интегральной характеристики сигнала ионного тока. Предложенный метод позволяет проводить комплексный контроль параметров сгорания по единому сигналу ионного тока. При этом контролироваться могут такие параметры сгорания, как максимальное давление цикла сгорания, угловое положение пика давления, коэффициент избытка воздуха в топливной смеси. Приведены результаты экспериментальной проверки предложенного метода. Анализ экспериментальных данных указывает на высокую эффективность разработанного метода, сравнимую по точности и информативности с методами, осно-

ванными на применении дорогостоящих пьезокерамических датчиков давления сгорания.

Приведенные в статье положения и экспериментальные данные могут быть востребованы при решении задач исследования процесса сгорания, управления и оптимизации ДВС, а также диагностики двигателей.

Список литературы

1. Вибье И. И. Новое о рабочем цикле двигателей // Скорость сгорания и рабочий цикл двигателя. Москва — Свердловск: Машгиз, 1962. 271 с.
2. Соколик А. С. Самовоспламенение, пламя и детонация в газах. М.: Изд-во АН СССР, 1960. 428 с.
3. Соколик А. С. Основы теории нормального сгорания в двигателях с искровым зажиганием // Сгорание в транспортных поршневых двигателях. М.: АН СССР, 1951. С. 37—56.
4. Брозе Л. Д. Сгорание в поршневых двигателях. М.: Машиностроение, 1969. 345 с.
5. Воинов А. Н. Сгорание в быстроходных поршневых двигателях. М.: Машиностроение, 1977. 277 с.
6. Технические средства диагностирования. Справочник. М.: Машиностроение, 1989. С. 330—378.
7. Галевко В. В., Гриб В. В., Шатров М. Г. Виброакустический контроль технического состояния ДВС и агрегатов автомобиля // Сб. трудов МАДИ (ГТУ). 2007. С. 287—289.
8. Кошкин В. Е., Луканин В. Н., Тольский В. Е. Методы измерения и экспериментального исследования шума и вибраций автомобильных двигателей. М.: НАМИ, 1961. 15 с.
9. Покусав М. Н., Сибряев К. О., Шевченко А. В. Экспериментальное определение степени неравномерности вращения вала машинно-двигательного комплекса судна пр. 1557 // Вестник АГТУ. 2008. № 2 (43). С. 140—144.
10. Патент РФ № 5064974/06, 27.01.1996. Прыгунов А. И. Способ оценки неравномерности работы цилиндров двигателя внутреннего сгорания // Патент России № 2053491. 1996.
11. Вибрация энергетических машин. Справ. пособ. / Под ред. д-ра техн. наук проф. Н. В. Григорьева. Л.: Машиностроение, 1974. 434 с.
12. Гуринов А. С., Дудник В. В., Гапонов В. Л., Калашников В. В. Измерение крутящего момента на вращающихся валах // Инженерный вестник Дона. 2016. № 4. URL: <http://ivdon.ru/magazine/archive/n2y2012/798/>.
13. Климин В. Ф., Папырин А. Н., Солоухин Р. И. Оптические методы регистрации быстропротекающих процессов. Новосибирск: Наука, 1980. 205 с.
14. Гиль В. В. Оптические методы исследования процессов горения. Минск: Наука и техника, 1984. 126 с.
15. Reuss G. L. Combust and Flame. 1983. V. 49. N. 1—3. P. 207—219.
16. Eckbreth A. C., Sirignano W. A. Laser diagnostics for combustion temperature and species // Combustion science and technology book series 1996. Vol. 3.
17. Frederic A. Matekunas. Engine combustion control with ignition timing by pressure ratio management // SAE paper No. 1622939. 1986. P. 54—67.
18. Hubbard M., Dobson P. D., Powell J. D. Closed loop control of spark advance using a cylinder pressure sensor. Journal of Dynamic Systems // Measurement and Control. 1976. P. 414—420.
19. Powell J. D. Engine Control Using Cylinder Pressure: Past, Present, and Future // ASME J. of Dynamic Systems, Measurement, and Control. 1993. Vol. 115. pp. 343—350.
20. Measuring Spark Plug with Integrated Cylinder Pressure Sensor. URL: www.kistler.com/mediaaccess/000-697e-08.11.pdf
21. Overview of Fiber Optic Sensors. URL: [www.bluer.com/papers/Overview of FOS2.pdf](http://www.bluer.com/papers/Overview%20of%20FOS2.pdf)
22. Соколов А. Н., Яцеев В. А. Волоконно-оптические датчики и системы: принципы построения, возможности и перспективы // IGHTWAVE Russian Edition. 2006. № 4. С. 42—44.
23. Pressure measuring spark plug and sensor. URL: [www.optrand.com/fliers/psi plug/20060201.pdf](http://www.optrand.com/fliers/psi%20plug/20060201.pdf).
24. Белоусов Е. В., Савчук В. П., Штанько А. Д. Опыт создания оптоволоконных датчиков для индицирования рабочего

процесса двигателей // Грузовик & Строительно-дорожные машины, автобус, троллейбус, трамвай. 2007. № 12. С. 87—91.

25. **Satzkoff A., Reinmann R., and Berglind T.** An ionization equilibrium analysis of the spark plug as an ionization sensor. SAE paper 960337, 1996.

26. **Calcote H. F.** Ion and electron profiles in ames // 9th Symposium (International) on Combustion, 1963

27. **Eriksson L., Nielson L.** Ionization current interpretation for ignition control in internal combustion engines // Cont. Eng. Prac. 1997. 5 (8). P. 1107—1113.

28. **Yoshiyama S., Tomita E., Mori M., Sato Y.** Ion current in a homogeneous charge compression ignition engine // SAE paper 2007-01-4052, 2007.

29. **Ивашин П. В., Рамазанов М. П., Твердохлебов А. Я., Шайкин А. П.** О возможности оценки работы цикла двигателя внутреннего сгорания ионизационным зондом // Вектор науки ТГУ. 2012. № 4 (22). С. 165—168.

30. **Будко А. Ю.** Методы исследования и оптимизации процессов горения топливно-воздушной смеси в двигателях внутреннего сгорания. Дисс. ... канд. техн. наук, ЮФУ, г. Таганрог-г. Ростов-на-Дону, 2016, 149 с.

31. **Lars Eriksson.** Spark Advance Modeling and Control // SE-581 83 Linköping, 1999.

32. **Gao Z.** et al. 2014. The correlation between the cylinder pressure and the ion current fitted with a Gaussian algo-rithm for a spark ignition engine fuelled with natural-gas—hydrogen blends // Proc. of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering.

33. **Axel Franke.** Characterization of an Electrical Sensor for Combustion Diagnostics // Doctoral Thesis / Lund Reports on Combustion Physics, LRCP-80, 2002.

34. **Kaiadi M.** et al. 2008. Closed-Loop Combustion Control Using Ion-Current Signals in a 6-Cylinder Port-Injected Natural-gas Engine. SAE 2008-01-2453.

35. **Zheng S.** et al. 2014. Study on cycle-by-cycle variations of ion current integral and pressure in spark ignition engine // International conference on electronic and mechanical en-gineering and information technology, Harbin, Heilongjiang, People's Republic of China, 12—14 August 2011, New York: IEEE. P. 3404—3407.

36. **Wu X.** et al. 2008. Experimental investigation of the effect of electrodes on the ionization current during combustion // Energy and Fuels. 2008. N. 22. P. 2941—2947.

37. **Ясников И. С., Ивашин П. В., Шайкин А. П.** К вопросу о турбулентном распространении пламени в замкнутом объеме // Журнал технической физики. 2013. Т. 83, Вып. 11. С. 39—43.

Control of the Combustion Process Parameters in ICE by the Ion Current Signals

A. Yu. Budko, aptem_budko@mail.ru✉, **M. Yu. Medvedev**, medvmihal@sfedu.ru,

R. Yu. Budko, raisa-budko@yandex.ru,

Southern Federal University, Rostov-on-Don, 344006, Russian Federation,

P. V. Ivashin, ivashinpv@rambler.ru, **A. Ya. Tverdokhlebov**, andr.tverd@gmail.com,

Togliatti State University, Togliatti, 445020, Russian Federation,

D. N. Gerasimov, gerasimovdn@mail.ru,

ITMO University, St. Petersburg, 190000, Russian Federation,

V. V. Rakhmanov, rahmanov@inbox.ru,

Institute of Thermophysics, SB RAS, Novosibirsk, 630090, Russian Federation

Corresponding author: **Budko Artem Yu.**, Ph. D., Head of the Mechatronics and Robotics Educational Program of the Southern Federal University, Rostov-on-Don, 344006, Russian Federation, e-mail: aptem_budko@mail.ru

Received on November, 02, 2016

Accepted on November, 21, 2016

This paper is devoted to control of the combustion processes in the internal combustion engines (ICE). It presents a method for estimation of the position of the peak pressure, the maximal pressure of the cycle and the air-fuel ratio based on the analysis of the integral characteristics of the ion current signals. The advantages of the proposed method are stability of the final result of the calculation to the influence from the cycle-to-cycle combustion parameter variations, stability to the changes in the parameters of the measuring probe during a long operation time and absence of restrictions on the wave form of the ion current. It also presents the results of the experimental testing of the developed method and its comparison with the conventional methods of analysis of the ion current and control of the combustion process parameters. The authors compared the efficiency and accuracy of the method using a combustion pressure sensor, based on the piezoelectric ceramics; the methods of the ion current analysis, based on detection of the thermal-ionization ion current peak; the method of the ion current analysis based on the integral characteristic of the ion current signal. The results of the experimental studies indicate a possibility of the use of the integral characteristic of the ion current signal for estimation of the combustion process parameters with the accuracy of the combustion pressure sensor based on the piezoelectric ceramics. The ion current measurement technology is cheaper than the piezoelectric ceramic sensors and can be widely applied in the serial engines.

Keywords: internal combustion engine, combustion process, electrical conductivity of the flame, ion current integral characteristic of an ion current signal, control parameters, angular position of the peak pressure

Acknowledgement: This work was partly supported by:

1) RFBR Grant "New methods of analysis of the ionic currents as a research tool, and optimization of operation of the internal combustion engines" (theoretical studies);

2) SFU grant "Theory and methods of the energy-saving control systems with the distributed generation, transmission and consumption of electricity" (experimental studies).

For citation:

Budko A. Yu., Medvedev M. Yu., Budko R. Yu., Ivashin P. V., Tverdokhlebov A. Ya., Gerasimov D. N., Rakhmanov V. V. Control of the Combustion Process Parameters in ICE by the Ion Current Signals, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2017, vol. 18, no. 4, pp. 256—263.

DOI: 10.17587/mau.18.256-263

References

1. **Vibe I. I.** *Novoe o rabochem cikle dvigatelej* [The new about on the engine cycle work], Moskva-Sverdlovsk, Mashgiz, 1962, 271 p. (in Russian).
2. **Sokolik A. C.** Samovosplamenenie, plamja i detonacija v gazah [Self-ignition flame and detonation in gases], Moscow, Publishing house of AS USSR, 1960, 428 p. (in Russian).
3. **Sokolik A. C.** *Osnovy teorii normal'nogo sgoranija v dvigateljah s iskrovym zazhiganiem* [The foundations of the theory of normal combustion engines with spark ignition], *Sgoranie v transportnyh porshnevnyh dvigateljah*, Moscow, Publishing house of AS USSR, 1951, pp. 37–56 (in Russian).
4. **Broze L. D.** *Sgoranie v porshnevnyh dvigateljah* [The combustion in piston engines], Moscow, Mashinostroenie, 1969, 345 p. (in Russian).
5. **Voinov A. N.** *Sgoranie v bystrohodnyh porshnevnyh dvigateljah* [The combustion in the high-speed piston engines], Moscow, Mashinostroenie, 1977, 277 p. (in Russian).
6. **Tekhnicheskie sredstva diagnostirovanija [hardware diagnostics], Moscow, Mashinostroenie, 1989, pp. 330–378 (in Russian).**
7. **Galevko V. V., Grib V. V., Shatrov M. G.** *Vibroakusticheskij kontrol' tekhnicheskogo sostojanija DVS i agregatov avtomobilja* [Vibroacoustic monitoring of the technical condition of the engine and vehicle units], *Works MADI (GTU)*, 2007, pp. 287–289 (in Russian).
8. **Koshkin V. E., Lukanin V. N., Tol'skij V. E.** *Metody izmerenija i jeksperimental'nogo issledovanija shuma i vibracij avtomobil'nyh dvigatelej* [Methods for measuring noise and experimental research and automotive engine vibration], Moscow, NAMI, 1961, 15 p. (in Russian).
9. **Pokusaev M. N., Sibirjaev K. O., Shevchenko A. V.** *Jeksperimental'noe opredelenie stepeni neravnomernosti vrashhenija vala mashino-dvizitel'nogo kompleksa sudna* [Experimental determination of the degree of non-uniformity of rotation of the machine complex ship], *Vestnik AGTU*, 2008, vol. 2 (43), pp. 140–144 (in Russian).
10. **Prygunov A. I.** *Sposob ocenki neravnomernosti raboty cilindrov dvigatelya vnutrennego sgoranija* [A method of evaluating nonuniformity of the internal combustion engine cylinders], Patent RF № 2053491, 1996 (in Russian).
11. **Grigor'ev N. V.** ed. *Vibracija jenergeticheskikh mashin* [Vibration energy machines], Leningrad, Mashinostroenie, 1974, 434 p. (in Russian).
12. **Gurinov A. S., Dudnik V. V., Gaponov V. L., Kalashnikov V. V.** *Izmerenie krutjashhego momenta na vrashhajushhihsja valah* [Torque measurement on rotating shafts], *Inzhenernyj Vestnik Dona*, 2016, vol. 4, available at: <http://ivdon.ru/magazine/archive/n2y2012/798/>.
13. **Klimkin V. F., Papyrin A. N., Solouhin R. I.** *Opticheskie metody registracii bystroprotekajushhih processov* [Optical methods for recording fast processes], Novosibirsk, Science, 1980, 205 p. (in Russian).
14. **Gil' V. V.** *Opticheskie metody issledovanija processov gorenija* [Optical methods for studying combustion processes], Minsk, Nauka i Tehnika, 1984, 126 p. (in Russian).
15. **Reuss G. L.** *Combust and Flame*, 1983, vol. 49, no. 1–3, pp. 207–219.
16. **Eckbreth A. C., Sirignano W. A.** *Laser diagnostics for combustion temperature and species*, *Combustion Science and Technology Book Series*, vol. 3, Gordon and Breach, 1996.
17. **Matekunas F. A.** *Engine combustion control with ignition timing by pressure ratio management*, SAE paper no. 1622939, 1986, pp. 54–67.
18. **Hubbard M., Dobson P. D., Powell J. D.** *Closed loop control of spark advance using a cylinder pressure sensor*, *Journal of Dynamic Systems. Measurement and Control*, 1976, pp. 414–420.
19. **Powell J. D.** *Engine Control Using Cylinder Pressure: Past, Present, and Future*, *ASME J. of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 1993, vol. 115, pp. 343–350.
20. **Measuring Spark Plug with Integrated Cylinder Pressure Sensor**, available at: www.kistler.com/mediaaccess/000-697e-08.11.pdf.
21. **Overview of Fiber Optic Sensors**, available at: www.bluerr.com/papers/Overview of FOS2.pdf.
22. **Sokolov A. N., Yatseev V. A.** *Volokonno-opticheskie datchiki i sistemy: printsipy postroeniya, vozmozhnosti i perspektivy* [Fiber Optic Sensors and Systems: principles of construction, opportunities and prospects], *IGHTWAVE Russian Edition*, 2006, vol. 4, pp. 42–44 (in Russian).
23. **Pressure measuring spark plug and sensor**, available at: www.optrand.com/fliers/psiplug/20060201.pdf.
24. **Belousov E. V., Savchuk V. P., Shtanko A. D.** *Experience of fiber optic sensors for indexing the workflow engine. Truck & Building and road machines, bus, trolley bus, tram*, 2007, vol. 12, pp. 87–91.
25. **Satzkoff A., Reinmann R., Berglind T.** *An ionization equilibrium analysis of the spark plug as an ionization sensor*, SAE paper 960337, 1996.
26. **Calcote H. F.** *Ion and electron profiles in ames*, *9th Symposium (International) on Combustion*, 1963.
27. **Eriksson L., Nielson L.** *Ionization current interpretation for ignition control in internal combustion engines*, *Cont. Eng. Prac.*, 1997, 5 (8), pp. 1107–1113.
28. **Yoshiyama S., Tomita E., Mori M., Sato Y.** *Ion current in a homogeneous charge compression ignition engine*, SAE paper 2007-01-4052, 2007.
29. **Ivashin P. V., Ramazanov M. P., Tverdokhlebov A. Ya., Shaykin A. P.** *O vozmozhnosti otsenki raboty tsikla dvigatelya vnutrennego sgoraniya ionizatsionnym zondom* [Possibility of evaluation of the internal combustion engine cycle ionization probe], *Vektor Nauki TGU*, 2012, vol. 4 (22), pp. 165–168 (in Russian).
30. **Budko A. Yu.** *Metody issledovaniya i optimizatsii protsessov gorenija toplivno-vozdushnoy smesi v dvigatelyakh vnutrennego sgoraniya* [Methods of research and optimization of combustion of the fuel-air mixture for internal combustion engines], Publishing house of SFEDU, Taganrog — Rostov-on-Donu, 2016, 149 p. (in Russian).
31. **Lars Eriksson.** *Spark Advance Modeling and Control*. SE-581 83 Linköping, 1999.
32. **Gao Z.** et al. *The correlation between the cylinder pressure and the ion current fitted with a Gaussian algorithm for a spark ignition engine fuelled with natural-gas—hydrogen blends*, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 2014.
33. **Axel Franke.** *Characterization of an Electrical Sensor for Combustion Diagnostics*. Doctoral Thesis. Lund Reports on Combustion Physics, LRCP-80, 2002.
34. **Kaiadi M.** et al. 2008. *Closed-Loop Combustion Control Using Ion-Current Signals in a 6-Cylinder Port-Injected Natural-gas Engine*. SAE 2008-01-2453.
35. **Zheng S.** et al. *Study on cycle-by-cycle variations of ion current integral and pressure in spark ignition engine*. International conference on electronic and mechanical engineering and information technology, Harbin, Heilongjiang, People's Republic of China, 12–14 August 2011, New York, IEEE, 2014, pp. 3404–3407.
36. **Wu X.** et al. 2008. *Experimental investigation of the effect of electrodes on the ionization current during combustion*. *Energy and Fuels*, 2008, vol. 22, pp. 2941–2947.
37. **Yasnikov I. S., Ivashin P. V., Shaykin A. P.** *K voprosu o turbulentnom rasprostraneni plameni v zamknutom ob"eme* [On the question of the turbulent flame propagation in a confined space], *Zhurnal Tekhnicheskoy Fiziki*, 2013, vol. 83, iss. 11, pp. 39–43 (in Russian).