УДК 621.43:004.032.26

ОЦЕНКА ФАЗЫ СГОРАНИЯ И ПОЛОЖЕНИЯ ПИКА ДАВЛЕНИЯ В ДВС ПО КВАНТИЛЯМ ИНТЕГРАЛЬНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ИОННОГО ТОКА С ПРИВЯЗКОЙ К МУЛЬТИМОДАЛЬНОМУ ЭТАЛОННОМУ ПРИЗНАКОВОМУ ПОЛЮ

© 2026 А.Ю. Будко[1], П.В. Ивашин[2]

[1] Южный федеральный университет, г. Таганрог, Россия
[2] Тольяттинский государственный университет, г. Тольятти, Россия

Статья поступила в редакцию 05.10.2026

Угол выгорания половины массовой доли топлива CA50 и угол максимума давления θpmax являются важными характеристиками процесса сгорания топлива, однако их прямое измерение в камере сгорания затруднено. Ионный ток, измеряемый через свечу зажигания, позволяет косвенно оценивать эти параметры. Известны способы, описывающие форму ионного тока гауссовыми составляющими или локальными параболами, связывающие ток с давлением физической моделью ионизации, а также анализа ионного тока многослойным перцептроном. Первые три способа опираются на различимый пик термической ионизации, который при ряде режимов пропадает или сливается с другими фазами ионного тока. Целью работы является разработка метода анализа ионного тока, снимающего ограничения известных методов и повышающего точность оценки показателей процесса сгорания. Для этого предложен метод объединяющий нейросетевую привязку ионного тока к эталонному признаковому полю давления и регрессию градиентным бустингом по квантилям интегральной характеристики ионного тока (ИХИТ). Выполнено сравнение с известными методами на стендовых данных двигателя ВАЗ-11183. Параметры, не заданные в первоисточниках, выбраны по калибровочной выборке, не включающей проверочных циклов. Значимость разностей среднеквадратических ошибок (СКО) проверена бутстрепом скользящих блоков по записям сигналов. При работе на тестовом наборе предложенная оценка дает СКО CA50 2,86° и θpmax 3,27° против 3,74° и 5,85° у перцептрона и 4,67° и 4,16° у регрессии по переменным блока управления. Способы по форме ионного тока после калибровки по той же выборке дают СКО θpmax 5,83°–6,39°. Внутри записей СКО CA50 предложенного метода равна 2,17° против 2,61° у перцептрона, а СКО θpmax 4,20° меньше, чем у способов по форме тока и физической модели. При переносе на тестовый набор данных преимущество значимо по θpmax во всех группах циклов, а по CA50 – по всем проверочным циклам и на переходном режиме работы.
Ключевые слова: ионный ток, фаза сгорания, угол максимума давления, переходные режимы, гауссова модель, алгоритм SQUAD, нейросетевой оценщик, интегральная характеристика ионного тока, эталонное признаковое поле, блочный бутстреп.

DOI: 10.37313/1990-5378-2026-28-5-62-71
EDN: ORTGLD

ВВЕДЕНИЕ

Регулирование угла опережения зажигания (УОЗ) двигателя с искровым зажиганием может опираться на динамику выгорания топлива по углу поворота коленчатого вала (ПКВ). Важными характеристиками являются угол CA50, при котором выгорает половина топлива, и угол θpmax максимума давления в цилиндре. При опережении, дающем наибольший крутящий момент, CA50 находится около 10°, а θpmax – около 16° после верхней мертвой точки (ВМТ) [1]. Обе величины надежно определяются по давлению в цилиндре, однако датчики давления для серийных двигателей дороги. Поэтому для бортовой оценки сгорания рассматривается ионный ток (ИТ), измеряемый через свечу зажигания [2].

Известные способы оценки по ионному току можно разделить на четыре группы. В работе [3] ток описан суммой двух гауссовых составляющих, соответствующих фронту пламени и послепламенной фазе, и угол максимума давления оценивается центром второй составляющей. В [4, 5] предложен алгоритм SQUAD, который ищет послепламенный максимум локальными параболами. В [6] ток связан с давлением параметрической моделью, учитывающей температуру продуктов сгорания и образование оксида азота. Методы на основе искусственных нейронных сетей (ИНС) оценивают θpmax и CA50 по главным компонентам нормированного ИТ [7], CA50 [8], угол и величину максимума давления по спектрограмме ИТ [9], давление в цилиндре [10] и параметры сгорания газового двигателя [11]. Ионный ток применяется также для регулирования фазы сгорания в замкнутом кон-

Будко Артём Юрьевич, кандидат технических наук, старший научный сотрудник НИИ РиПУ ЮФУ, доцент ИРТСУ ЮФУ. E-mail: abudko@sfedu.ru
Ивашин Павел Валентинович, кандидат технических наук, старший научный сотрудник. E-mail: p.ivashin@tltsu.ru

туре [12], по интегралу ИТ на интервале около десяти циклов оценивается фаза сгорания [13], а по параметрам формы ИТ – доля выгоревшего топлива [14].

Известны работы использующие для оценки сгорания интеграл ИТ. В [15] угол центра масс интеграла ИТ сопоставляется с положением максимума давления, в [16] угол, делящий площадь под кривой ИТ пополам, по карте режимов переводится в центр сгорания. Для двигателя с воспламенением от сжатия однородной смеси в [17] угол, при котором нормированный интеграл ИТ достигает заданного уровня, сопоставлен с углом выгорания той же доли топлива. Авторами ранее предложен анализ интегральной характеристики ионного тока (ИХИТ) [18].

Ограничения способов первых трех групп отмечены их авторами. Модель [3] проверена при частоте вращения 2000–4500 мин$^{-1}$ и крутящем моменте 50–150 Н·м, а ток с двумя пиками во фронте пламени одной гауссовой составляющей не описывается. По [19] гауссова аппроксимация смещена при нагрузке ниже 40 % наибольшей, а ее точность резко ухудшается по мере уменьшения послепламенного пика, так как фазы ионизации накладываются. Алгоритм SQUAD при высокой нагрузке принимает более высокий послепламенный пик за фронт пламени, что дает завышение угла максимума давления [5]. В [6] отмечено, что окно подгонки, отсчитываемое от угла зажигания, не всегда выделяет термическую часть ИТ. По [20] второй максимум ИТ может исчезнуть при температуре ниже порога повторной ионизации, например на холостом ходу и на бедной смеси. По данным около 9000 циклов на 90 режимах угол послепламенного пика и угол максимума давления в среднем значимо различаются, и анализ Бланда – Альтмана не подтвердил их согласованности [21].

Авторам не известны работы, в которых способы всех этих групп, воспроизведенные по первоисточникам, сравнивались бы на одних данных отдельно на установившихся участках и на переходном режиме работы. В работе рассматривается оценка, которая не требует выделения пиков ИТ. Она объединяет привязку ионного ИТ к эталонному признаковому полю, построенному по давлению стендовых циклов, и регрессию по квантилям нормированной ИХИТ. Ток и давление переводятся в векторы общего пространства признаков по аналогии с межмодальным сопоставлением [22], а оценка цикла вычисляется по ближайшим к нему элементам поля. Цель работы – сравнить эту оценку CA50 и θpmax со способами всех четырех групп на установившихся и переходных режимах работы двигателя.

Научная новизна работы состоит в следующем. Во-первых, показано, что способы по форме ИТ и физическая модель ионизации, воспроизведенные по первоисточникам, даже после линейной калибровки оценивают θpmax хуже градиентного бустинга на деревьях решений по переменным электронного блока управления двигателем (ЭБУ). Нейросетевой оценщик при переносе на режимы, отсутствующие в калибровочной выборке, также теряет точность по θpmax. Во-вторых, показано, что привязка к эталонному признаковому полю давления, усредненная с регрессией по квантилям ИХИТ, дает значимо меньшую СКО оценки CA50, чем все сравниваемые способы, при переносе и внутри записей, а оценки θpmax – при переносе. Сравнение и проверка значимости реализованы блочным бутстрепом по группам циклов.

1. МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

1.1. Экспериментальные данные. Данные получены на моторном стенде с четырехцилиндровым восьмиклапанным двигателем ВАЗ-11183 с распределенным впрыском топлива, нагруженным гидродинамическим тормозом Schenck U1-16 h. Угол опережения и подачу топлива задавал серийный ЭБУ. В цилиндре 1 давление регистрировалось датчиком Kistler, встроенным в свечу зажигания, а ионный ток – в цепи центрального электрода той же свечи, на который подавалось напряжение 300 В. ИТ приводится в единицах выходного напряжения измерительной цепи, мВ.

Угол ПКВ определялся по оптическому энкодеру с 1024 импульсами на оборот, крутящий момент – по тензодатчику на валу тормоза. ИТ и сигнал энкодера регистрировались аналого-цифровым преобразователем с частотой 250 кГц, давление – с частотой 111,1 кГц. Набор содержит 16 записей с 10 812 циклов. Это три записи переходных режимов (холостой ход и работа без нагрузки idle1, переменная нагрузка loaad7_var, режимы движения agressive), восемь точек внешней скоростной характеристики (ВСХ) при частоте вращения n = 1200–4500 мин$^{-1}$ и пять точек нагрузочной характеристики при 2600 мин$^{-1}$. Запись agressive длительностью 91 с охватывает частоты вращения от 792 до 6141 мин$^{-1}$ и содержит резкие изменения положения дросселя.

Истинные значения вычисляются по давлению. Доля выгоревшего топлива x_b находится методом Рассвейлера – Уитроу [23] с показателем политропы $n_{пол}$ = 1,32 по отсчетам от искры до 100° после ВМТ. Объем цилиндра V вычисляется по кинематике кривошипно-шатунного механизма [1] при отношении радиуса кривошипа к длине шатуна λ = 0,29 и степени сжатия ε = 9. CA50 – угол, при котором x_b = 0,5. Угол θpmax находится по давлению, сглаженному полиномом второй степени на скользящем окне 2,25°, с параболическим уточнением положения максимума. Давление нужно только для вычисления истинных значений и построения эталонного поля, бортовой оценке оно не требуется.

Ионный ток и давление приведены к сетке с шагом 0,5° в диапазоне −60°…140° ПКВ от ВМТ. Пригодным считается участок ИТ от окончания гашения пробоя искрового промежутка до границы, отстоящей на 5° от помехи включения катушки следующего цилиндра, но не далее 100° после искры. При частоте вращения выше примерно 3000 мин$^{-1}$ эта помеха попадает в окно 100° после искры, поэтому пригодный участок укорочен в 47 % годных циклов. Все способы используют ток только в пределах пригодного участка.

1.2. Отбор циклов и разбиения данных. При позднем сгорании давление от сгорания не превышает давления сжатия, и максимум давления цикла лежит у ВМТ. Угол θpmax такого цикла характеризует сжатие, а не сгорание. Давление сжатия в ВМТ оценивается по политропе от давления при −60° по формуле (1). Максимум давления считается обусловленным сгоранием, если выполнены условия (2), где p_{max} – максимум давления в цикле, $\theta_{мин} = 3°$.

$$p_{сж}(0°) = p(-60°)\left(\frac{V(-60°)}{V(0°)}\right)^{n_{пол}}, \tag{1}$$

$$\theta_{pmax} \geq \theta_{мин}, \qquad p_{max} \geq 1{,}05\, p_{сж}(0°). \tag{2}$$

Условия (2) исключают 9 % годных циклов, в сравнении остаются 9794 цикла, их осциллограммы приведены на рис. 1. Отбор нужен только для сравнения способов, бортовой оценке он не требуется.

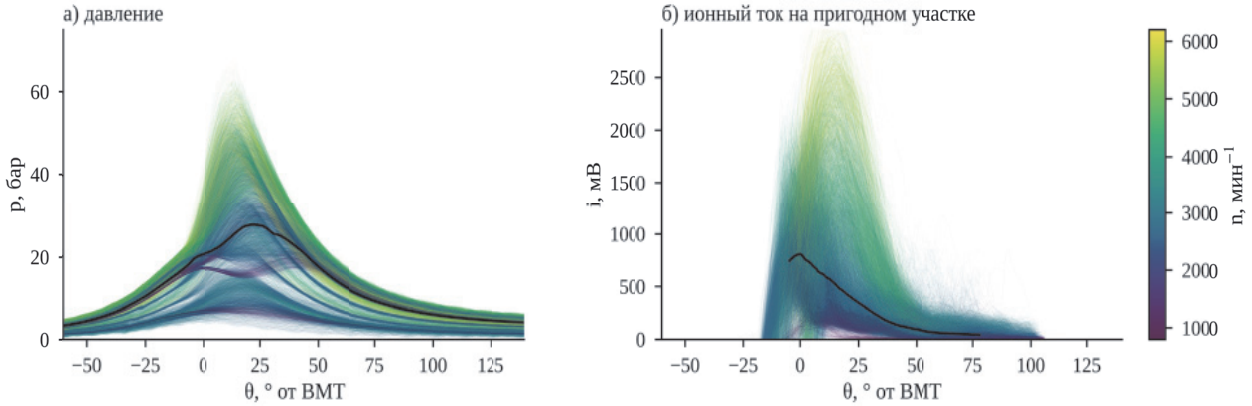

Рис. 1. Осциллограммы давления (а) и ионного ИТ (б) всех 9794 циклов сравнения. Цвет линии соответствует частоте вращения, черная линия – медиана

Циклы сравнения делятся на калибровочную выборку и проверочные циклы. По калибровочной выборке строится эталонное поле, обучаются экстракторы и нейросетевой оценщик, подбираются коэффициенты регрессий и калибровок и параметры, не заданные в первоисточниках. Проверочные циклы в этом не участвуют и служат только для оценки ошибок. Сравнение выполнено при двух разбиениях данных. При переносе калибровочную выборку составляют все записи, кроме agressive (7353 цикла), а проверка ведется на записи agressive (2441 цикл). При проверке внутри записей каждая запись делится по времени на блоки по 5 с, каждый пятый блок относится к проверке (2063 цикла), остальные – к калибровочной выборке (7731 цикл). Первое разбиение проверяет перенос на режимы, отсутствующие в калибровочной выборке, второе – точность внутри режимов.

Ошибки сравниваются по всем проверочным циклам, по установившимся участкам и по переходному режиму работы. Установившимися считаются участки записей длиной не менее 30 циклов при скорости изменения положения дросселя не более 20 %/с. На таком участке частота вращения отличается от средней по участку не более чем на 150 мин$^{-1}$, а давление во впускном коллекторе – не более чем на 5 кПа. В записи agressive переходный режим составляет 65 % циклов, а средняя частота вращения равна 4368 мин$^{-1}$ против 2847 мин$^{-1}$ в калибровочной выборке. При проверке внутри записей 75 % проверочных циклов относятся к установившимся участкам.

1.3. Способы, воспроизведенные по первоисточникам. Способы оценки по форме ИТ и физическая модель воспроизведены по описаниям [3–6], нейросетевой оценщик – по [7]. Все способы обозначены М1–М7 в порядке их описания ниже, оценка по эталонному полю – П. Параметры, не заданные в первоисточниках, выбраны по калибровочной выборке. Способы М1–М4 применяются в двух вариантах, как в источнике и с линейной калибровкой оценки (3). Калибровка исключает систематическое смещение, вызванное отличием двигателя и измерительной цепи от условий источника.

$$\hat{y} = a_0 + a_1\zeta, \qquad \zeta = \min\left[\max\left(z, z^{(1)}\right), z^{(99)}\right], \tag{3}$$

Здесь z – оценка способа, a_0, a_1 – коэффициенты, найденные методом наименьших квадратов по калибровочной выборке, $z^{(1)}$ и $z^{(99)}$ – 1-й и 99-й процентили оценки по той же выборке. Ограничение процентилями исключает экстраполяцию калибровки.

Модель [3] описывает ИТ суммой двух гауссовых составляющих (4), где первая составляющая относится к фронту пламени, а вторая – к послепламенной фазе. Оценкой θpmax служит центр β_3 второй составляющей (способ М1).

$$I(\theta) = \alpha_1 \exp\left[-\frac{(\theta-\alpha_3)^2}{\alpha_2}\right] + \beta_1 \exp\left[-\frac{(\theta-\beta_3)^2}{\beta_2}\right]. \quad (4)$$

Начальные значения взяты по [24], α_3 – угол наибольшего ИТ, $\beta_3 = \alpha_3 + 17°$, $\alpha_2 = 100$ и $\beta_2 = 500$ град². Амплитуды находятся линейным методом наименьших квадратов при заданных центрах и ширинах, остальные параметры – итерационно. Правая граница окна подгонки в [3] не задана и выбрана по калибровочной выборке из значений 40°–80° после ВМТ и конца пригодного участка, до 40° без калибровки и до 50° с калибровкой. В способе М2 фронт пламени описывается двумя составляющими [3], оценкой служит центр третьей, а из 50 начальных приближений выбирается наилучшая подгонка [4]. Граница окна для М2 выбрана тем же способом, до 40° в обоих вариантах.

Алгоритм SQUAD [4, 5] (способ М3) приближает ИТ, взятый с шагом 1°, параболами (5) по пяти отсчетам окна. Окна с началом $\theta_1 = 1°…26°$ после ВМТ просматриваются от больших углов к меньшим до первого окна, в котором p_2 превышает порог T. Из этого окна и окон правее выбирается окно с наименьшим p_2, и оценкой служит вершина его параболы, ограниченная окном. Порог T в [4, 5] не задан и выбран по калибровочной выборке, $T = 7{,}2$ мВ/град².

$$f(\theta) = p_0 + p_1\theta + p_2\theta^2, \qquad \hat{\theta}_{\mathrm{pmax}} = \min\left[\max\left(\theta_1, -\frac{p_1}{2p_2}\right), \theta_5\right]. \quad (5)$$

Модель [6] (способ М4) строит давление (6) из политроп сжатия p_c и расширения p_e, связанных долей выгорания PR в форме Вибе, с постоянными $a = 20$ и $m = 4$. Температура продуктов сгорания T_b изменяется по адиабате от начального значения T_{b0}, концентрация оксида азота находится по расширенному механизму Зельдовича, а ИТ – по модели Сайцкова – Рейнмана через долю NO и T_b. Параметры T_{b0} и Δθ подбираются методом Левенберга – Марквардта по ИТ в окне от угла зажигания плюс 37° шириной 50°. Оценкой θpmax служит угол максимума давления (6).

$$p(\theta) = [1 - PR(\theta)]p_c(\theta) + PR(\theta)\,p_e(\theta), \qquad PR(\theta) = 1 - \exp\left[-a\left(\frac{\theta-\theta_z}{\Delta\theta}\right)^{m+1}\right]. \quad (6)$$

Постоянные модели давления взяты по [25], константы скоростей реакций и модели ИТ – по таблицам [6]. Равновесный состав продуктов сгорания вычисляется программой Cantera с механизмом GRI-Mech 3.0 вместо программы, использованной в [6], а измеренный ИТ переводится в амперы постоянным коэффициентом K. Коэффициент K и начало окна выбраны на 200 циклах калибровочной выборки по наименьшей медиане СКО моделируемого давления, при этом начало окна совпало с источником. Модели нужно давление во впускном коллекторе, которое в записи agressive не регистрировалось, поэтому М4 проверяется только внутри записей, на 79 % проверочных циклов.

Нейросетевой оценщик [7] (способ М5) берет ИТ в окне от 5° до ВМТ до 35° после ВМТ с шагом 1°, нормирует 41 отсчет к сумме 1 и переводит их в координаты z десяти главных компонент (7). Многослойный перцептрон имеет 13 входов (z, частота вращения, давление во впускном коллекторе p_{im} и УОЗ), 20 скрытых нейронов с гиперболическим тангенсом и обучается алгоритмом RPROP с ранней остановкой. Сети для θpmax и CA50 обучаются по калибровочной выборке раздельно.

$$\tilde{\mathbf{i}} = \frac{\mathbf{i}}{\mathbf{1}^T\mathbf{i}}, \qquad \mathbf{z} = E_{10}^T(\tilde{\mathbf{i}} - \bar{\mathbf{i}}), \qquad \hat{y} = \bar{y} + \mathbf{w}_2^T \tanh(W_1\mathbf{x} + \mathbf{b}_1) + b_2. \quad (7)$$

Здесь E_{10} – собственные векторы ковариационной матрицы, отвечающие десяти наибольшим собственным числам, x – стандартизованный вектор входов, $\bar{y}$ – среднее цели. Калибровочная выборка делится на обучающую и контрольную части в отношении 3 : 1, контрольная часть служит для ранней остановки. При переносе вместо p_{im} используется относительное наполнение цилиндра по данным ЭБУ, так как в записи agressive давление во впускном коллекторе не регистрировалось.

Все способы на одном цикле показаны на рис. 2. Для этого цикла с двумя выраженными максимумами ИТ М1 и М3 дают θpmax 17,2° и 17,8° при 20,3° по давлению, М4 – 24,1°.

1.4. Опорная регрессия и предложенная оценка. Для оценки вклада ИТ используется регрессия М6 по переменным ЭБУ, то есть по частоте вращения, наполнению цилиндра и УОЗ. Регрессия М7 по квантилям нормированной ИХИТ (8) использует углы θ_q, при которых нормированная ИХИТ достигает 0,1; 0,2; 0,5 и 0,8, угол, при котором ИТ впервые достигает 10 % наибольшего значения, угол наибольшего ИТ, частоту вращения и УОЗ. Здесь i^+ – неотрицательная часть ИТ, θ_0 – угол искры, $\theta_в$ – граница пригодного участка. Квантили определены для любого цикла с горением независимо от числа пиков, так как ИХИТ монотонна. Обе регрессии – градиентный бустинг на деревьях решений [26], обученный по калибровочной выборке.

$$I_н(\theta) = \frac{\int_{\theta_0}^{\theta} i^+\,d\vartheta}{\int_{\theta_0}^{\theta_в} i^+\,d\vartheta}, \qquad I_н(\theta_q) = q. \quad (8)$$

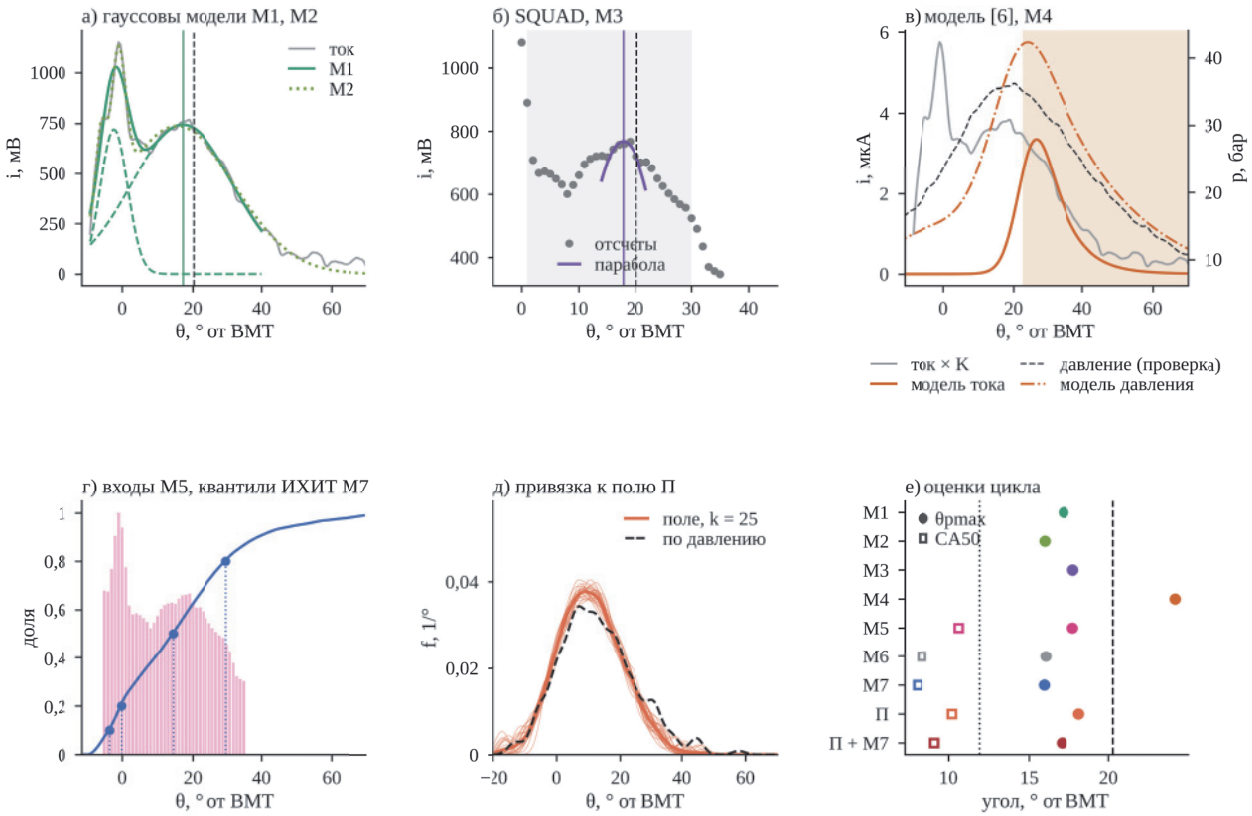

Рис. 2. Способы оценки на примере проверочного цикла записи loaad7_var на установившемся участке (n = 3180 мин$^{-1}$, CA50 = 11,9°, θpmax = 20,3°). а – ИТ и его подгонки M1 (составляющие штриховыми линиями) и M2, вертикальная линия – оценка M1; б – отсчеты ИТ через 1° и парабола окна, выбранного алгоритмом SQUAD (M3), серым – область окон; в – ИТ, умноженный на *K*, и ИТ модели M4 в окне подгонки (заливка), измеренное и моделируемое давление; г – 41 отсчет ИТ на входе M5 (столбцы), нормированная ИХИТ и углы ее уровней 0,1; 0,2; 0,5 и 0,8 (M7); д – скорости выгорания 25 найденных элементов поля (тонкие линии), их среднее и скорость выгорания по давлению; е – оценки θpmax (кружки) и CA50 (квадраты), штриховая и точечная линии – θpmax и CA50 по давлению. Штриховые вертикальные линии на а–в – θpmax по давлению

В оценке П цикл сопоставляется с циклами калибровочной выборки по ходу выгорания топлива. Скорость выгорания $f(\theta)$ – производная x_b по углу, сглаженная гауссовым окном со стандартным отклонением 2°, с единичной площадью. Сходство двух циклов i и j определяется площадью пересечения их скоростей выгорания (9), которая для кривых единичной площади равна коэффициенту Дайса [27].

$$D_{ij} = \int \min\left(f_i(\theta), f_j(\theta)\right) d\theta. \qquad (9)$$

Два сверточных экстрактора одинакового устройства с раздельными весами переводят сигналы ИТ и давления цикла в векторы e и e_p из 48 неотрицательных компонент с единичной суммой, соответствующих интервалам по 2,5° на участке −10°...110°. На вход экстрактора признаков подаются ИТ, деленный на его интеграл, нормированная ИХИТ, маска пригодного участка и угол. Экстракторы обучаются по калибровочной выборке с функцией потерь (10). Здесь K – матрица косинусов $2B$ единичных векторов ИТ и давления пакета из B циклов, Y – матрица мер (9) тех же векторов, H – оператор центрирования с общим для ИТ и давления центром [28]. Суммирование ведется по блокам r пар «ИТ – ИТ», «давление – давление» и «ИТ – давление» с весами пар w_{ij}, L_f – средняя мера непересечения векторов с дискретной скоростью выгорания цикла.

$$\mathcal{L} = \frac{1}{3}\sum_r \frac{\sum_{(i,j)\in r} w_{ij}\left((HKH)_{ij} - (HYH)_{ij}\right)^2}{\sum_{(i,j)\in r} w_{ij}} + \lambda \mathcal{L}_f, \qquad H = I - \frac{\mathbf{1}\mathbf{1}^T}{2B}. \qquad (10)$$

Элементами эталонного признакового поля служат векторы давления $e_{p,j}$ циклов калибровочной выборки вместе с f_j и $\theta_{pmax,j}$. Для проверочного цикла выбираются k = 25 элементов с наибольшими косинусами вектора ИТ m-го экстрактора с векторами поля, и оценки скорости выгорания и θpmax равны средним по выбранным элементам и по M экстракторам (11). Оценкой CA50 служит угол, где интеграл $f_П$ достигает 0,5. При переносе используется ансамбль из M = 3 экстракторов, различаю-

щихся начальной инициализацией весов, при проверке внутри записей $M = 1$. Предложенная оценка П + М7 равна среднему арифметическому оценок П и М7.

$$f_{\Pi}(\theta) = \frac{1}{kM}\sum_{m=1}^{M}\sum_{j\in J_k^{(m)}} f_j(\theta), \qquad \theta^{\Pi}_{\mathrm{pmax}} = \frac{1}{kM}\sum_{m=1}^{M}\sum_{j\in J_k^{(m)}} \theta_{\mathrm{pmax},j}. \tag{11}$$

1.5. Показатели точности и проверка значимости. Точность оценивается СКО σ_G по N_G проверочным циклам группы G (12). Разность Δ_G СКО оценки П + М7 и способа сравнения M_k находится по циклам, для которых определены обе оценки. Ее значимость проверяется бутстрепом скользящих блоков [29], сохраняющим связь соседних циклов.

$$\sigma_G = \sqrt{\frac{1}{N_G}\sum_{t\in G}(\hat{y}_t - y_t)^2}, \qquad \Delta_G = \sigma_G(\Pi + \mathrm{M7}) - \sigma_G(\mathrm{M}_k). \tag{12}$$

Проверочные циклы группы упорядочиваются по времени, и из них с возвращением выбираются блоки по 50 подряд идущих циклов. В группах меньше 1000 циклов длина блока равна целой части $N_G/20$, но не менее 10 циклов. По 2000 повторениям находятся 2,5- и 97,5-процентили разности. Разность считается значимой, если этот интервал не содержит нуля. Из способов М1–М3 в каждой группе для сравнения берется способ с наименьшей СКО.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

2.1. Точность оценки θpmax. СКО и смещения оценок по всем проверочным циклам приведены в табл. 1, по группам циклов – на рис. 3. Без калибровки способы М1–М3 дают при переносе СКО θpmax 15,20°, 10,30° и 8,38°, что больше стандартного отклонения θpmax проверочных циклов (5,5°). Оценки смещены на 8,2°, 6,6° и 3,4°, а ошибку более 10° имеют 31 %, 26 % и 26 % циклов. Внутри записей способ М4 без калибровки дает 11,24° при смещении 3,6°, ошибку более 10° – 27 % циклов.

Калибровка уменьшает СКО способов М1–М3 при переносе до 5,83°–6,39°, внутри записей – до 6,58°–7,65°, а М4 – до 6,76°. Однако и после калибровки эти способы уступают регрессии М6 по переменным ЭБУ (4,16° и 4,52°). Нейросетевой оценщик М5 дает внутри записей 4,53°, но при переносе его СКО возрастает до 5,85° (см. рис. 4в). Оценка П + М7 дает 3,27° при переносе и 4,20° внутри записей.

Оценки М5 при переносе по θpmax группируются в горизонтальную полосу около 20°–25° для циклов с θpmax 12°–20° по давлению (рис. 4,в). У П + М7 разброс меньше, но оценки наиболее поздних циклов занижены (рис. 4,г).

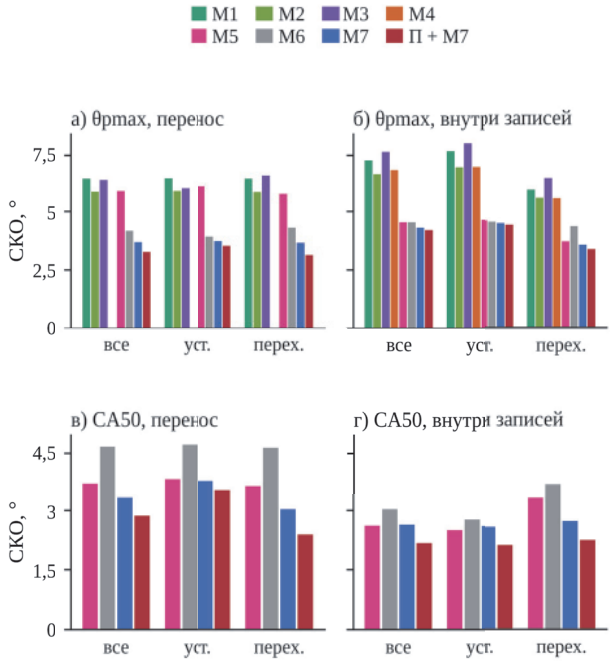

Рис. 3. СКО оценок θpmax (а, б) и CA50 (в, г) по группам проверочных циклов при переносе на запись agressive (а, в) и внутри записей (б, г). Способы М1–М4 – с калибровкой, М4 при переносе не определен

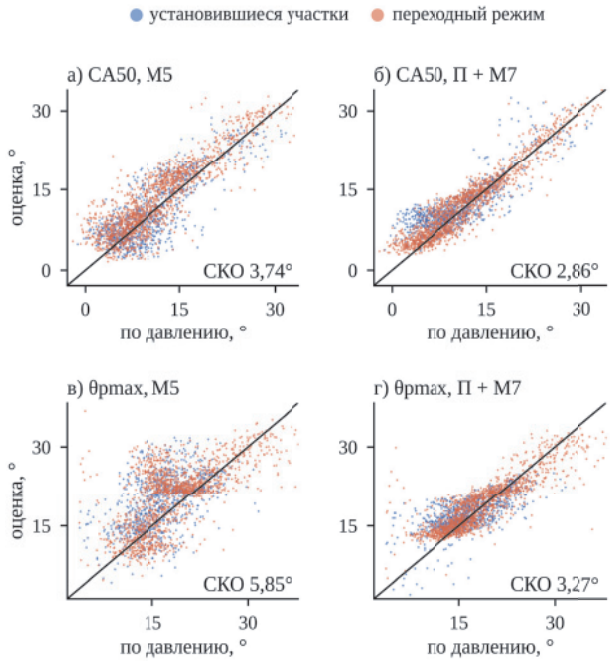

Рис. 4. Оценки CA50 (а, б) и θpmax (в, г) способом М5 (а, в) и П + М7 (б, г) в зависимости от значений по давлению при переносе на запись agressive. Цвет – группа циклов, линия – равенство оценки и значения по давлению

Таблица 1. СКО и смещение (в скобках) оценок по всем проверочным циклам, °

Способ	θpmax перенос	θpmax внутри записей	CA50 перенос	CA50 внутри записей
М1 [3], как в источнике	15,20 (8,24)	13,14 (3,18)	–	–
М1, с калибровкой	6,39 (3,60)	7,28 (−0,80)	–	–
М2 [3, 4], как в источнике	10,30 (6,61)	10,30 (4,20)	–	–
М2, с калибровкой	5,83 (3,11)	6,58 (−0,78)	–	–
М3 [4, 5], как в источнике	8,38 (3,45)	9,25 (2,52)	–	–
М3, с калибровкой	6,33 (3,35)	7,65 (−0,48)	–	–
М4 [6], как в источнике	–	11,24 (3,62)	–	–
М4, с калибровкой	–	6,76 (−0,13)	–	–
М5 [7], нейросетевой оценщик	5,85 (2,71)	4,53 (−0,43)	3,74 (1,27)	2,61 (0,41)
М6, переменные ЭБУ	4,16 (1,50)	4,52 (−0,21)	4,67 (3,12)	3,02 (0,10)
М7, квантили ИХИТ	3,68 (0,89)	4,29 (−0,25)	3,32 (1,06)	2,64 (0,17)
П, эталонное поле	3,29 (0,50)	4,78 (0,03)	3,27 (0,88)	2,16 (0,03)
П + М7	3,27 (0,69)	4,20 (−0,11)	2,86 (0,97)	2,17 (0,10)

Примечание. Прочерк – для способа не хватает данных (М4 при переносе) или метод не оценивает данный показатель (CA50).

Преимущество П + М7 по θpmax сохраняется в обеих группах циклов. При переносе на переходном режиме работы СКО П + М7 равна 3,13° против 4,29° у М6, 5,74° у М5 и 5,81° у лучшего из способов М1–М3. Внутри записей на переходном режиме работы П + М7 дает 3,39°, М5 – 3,73°.

2.2. Точность оценки CA50. По CA50 сравниваются нейросетевой оценщик М5, регрессии М6 и М7, оценка П и их среднее П + М7. При переносе М6 дает СКО 4,67° при смещении 3,1°. Способ М5 уменьшает СКО до 3,74°, М7 – до 3,32°, П – до 3,27°, а П + М7 – до 2,86°. Внутри записей СКО равна 3,02° у М6, 2,61° у М5, 2,64° у М7 и 2,17° у П + М7. Оценки CA50 способом М5 и П + М7 в зависимости от значений по давлению показаны на рис. 4,а и б.

2.3. Значимость различий. Разности СКО П + М7 и способов сравнения с 95 %-ными интервалами приведены в табл. 2. Отрицательная разность означает, что П + М7 точнее.

При переносе по θpmax П + М7 значимо точнее лучшего из способов М1–М3, М5 и М6 во всех группах циклов. По CA50 П + М7 значимо точнее М6 во всех группах циклов, а М5 – по всем проверочным циклам и на переходном режиме работы. Различие с М5 на установившихся участках незначимо (−0,28 [−1,25; 0,32]). Внутри записей по θpmax П + М7 значимо точнее лучшего из способов М1–М3 и М4 во всех группах циклов, а М5 и М6 – на переходном режиме работы. Различие с М5 и М6 по всем проверочным циклам и на установившихся участках незначимо (−0,14 [−0,32; 0,05] и −0,12 [−0,30; 0,10] для М5, −0,33 [−0,66; 0,02] и −0,14 [−0,51; 0,29] для М6). По CA50 П + М7 значимо точнее М5 и М6 во всех группах циклов.

2.4. Ограничения способов по форме ИТ. Способы М1–М4 уступают даже регрессии М6 по переменным ЭБУ, и это не только следствие отдельных выбросов. При переносе медиана абсолютной ошибки М1 с калибровкой равна 4,87°, а у М6 – 2,61°. Смещение оценок без калибровки согласуется с ограничениями, указанными авторами способов. Правая гауссова составляющая частично размещается во фронте пламени [19], а алгоритм SQUAD при высокой нагрузке принимает послепламенный пик за фронт пламени [5].

Эти способы опираются на различимый максимум термической ионизации. ИТ считается имеющим два выраженных максимума, если после сглаживания скользящим средним по 2,5° на пригодном участке найдено не менее двух локальных максимумов с выраженностью не менее 5 % наибольшего значения, разнесенных не менее чем на 4°. Таких циклов 70 % в калибровочной выборке и 35 % в записи agressive. На установившихся участках их доля равна 72 % при $n < 2000$ мин$^{-1}$ и 6 % при $n \geqslant 5000$ мин$^{-1}$. Кроме того, в первоисточниках эти способы используют только ИТ, без переменных режима, тогда как М6 опирается на частоту вращения, наполнение и УОЗ.

Нейросетевой оценщик М5 использует весь нормированный ИТ в окне −5°…35° и переменные режима, поэтому внутри записей он близок к П + М7. В источнике его СКО по нормированному ИТ составила для θpmax 1,9° на стендовых циклах тех же режимов и 2,3° на автомобиле, для CA50 – 2,2° и 2,9° [7]. Эти значения получены на другом двигателе при 1500–3300 мин$^{-1}$ и нагрузке 10–70 % наибольшей. При переносе на запись agressive с частотой вращения до 6141 мин$^{-1}$ перцептрон работает за пределами калибровочной выборки, и его СКО θpmax (5,85°) больше, чем у линейной регрессии по тем же входам (5,13°). Оценка П + М7 опирается на квантили ИХИТ, определенные при любом числе пиков, и на сопоставление всего сигнала с эталонными циклами, поэтому выделения пиков не требует.

Таблица 2. Разность СКО П + М7 и способов сравнения, ° (95 %-ный интервал)

Величина, разбиение	Группа	Лучший из М1–М3	М4	М5	М6
θpmax, перенос	все циклы	−2,56 [−2,87; −2,03]	–	−2,59 [−3,35; −1,91]	−0,89 [−1,17; −0,73]
	установившиеся	−2,35 [−2,81; −1,38]	–	−2,55 [−3,61; −1,81]	−0,40 [−0,82; −0,25]
	переходный режим	−2,69 [−3,18; −2,15]	–	−2,61 [−3,61; −1,79]	−1,16 [−1,41; −1,00]
θpmax, внутри записей	все циклы	−2,38 [−3,05; −1,80]	−2,37 [−3,11; −1,80]	−0,14 [−0,32; 0,05]	−0,33 [−0,66; 0,02]
	установившиеся	−2,44 [−3,26; −1,70]	−2,38 [−3,18; −1,77]	−0,12 [−0,30; 0,10]	−0,14 [−0,51; 0,29]
	переходный режим	−2,23 [−2,78; −1,68]	−2,28 [−2,99; −1,53]	−0,42 [−0,74; −0,17]	−0,99 [−1,47; −0,60]
CA50, перенос	все циклы	–	–	−0,88 [−1,39; −0,52]	−1,81 [−2,34; −1,46]
	установившиеся	–	–	−0,28 [−1,25; 0,32]	−1,15 [−2,24; −0,55]
	переходный режим	–	–	−1,29 [−1,71; −0,83]	−2,26 [−2,60; −1,88]
CA50, внутри записей	все циклы	–	–	−0,50 [−0,63; −0,38]	−0,86 [−1,07; −0,67]
	установившиеся	–	–	−0,46 [−0,55; −0,34]	−0,63 [−0,76; −0,47]
	переходный режим	–	–	−0,80 [−1,40; −0,30]	−1,42 [−1,92; −0,91]

Примечание. Лучший из М1–М3 – способ (с калибровкой или без) с наименьшей СКО в группе, М4 – с калибровкой, М5 – как в табл. 1. Прочерк – способ не определен или не оценивает CA50.

2.5. Участок резкого перехода. Поведение оценок на резком переходе показано на рис. 5 для 150 проверочных циклов записи agressive с наибольшим размахом положения дросселя. За 7,1 с дроссель закрывается, затем открывается до 88 %, частота вращения снижается от 5105 до 910 мин$^{-1}$ и вновь растет. На этом участке СКО CA50 равна 4,72° у М6, 3,53° у М5 и 2,24° у П + М7, СКО θpmax – 5,73°, 6,15° и 4,45°, у М2 с калибровкой – 6,91°.

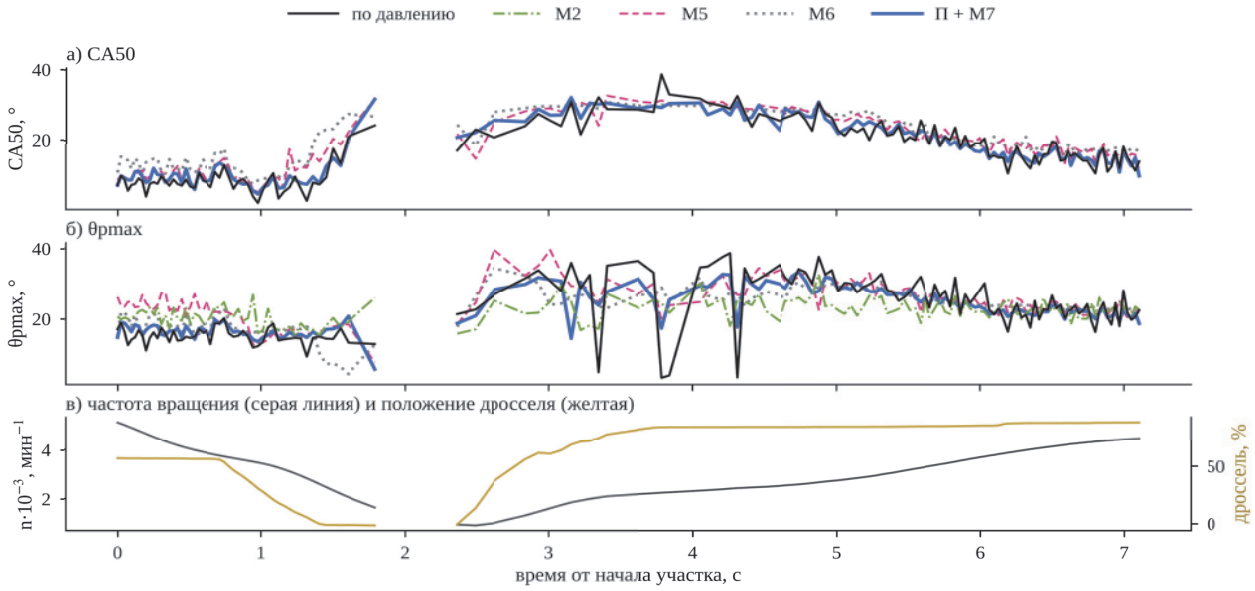

Рис. 5. Участок записи agressive из 150 проверочных циклов с наибольшим размахом положения дросселя: а – CA50, б – θpmax по давлению и оценки (М2 – с калибровкой); в – частота вращения и положение дросселя. Разрыв линий соответствует исключенным циклам

В первые 1,4 с участка дроссель закрывается, а CA50 по давлению составляет 2°–13°. В этом интервале оценки CA50 смещены вверх в среднем на 5,1° у М6, на 2,6° у М5 и на 1,3° у П + М7. После открытия дросселя оценки следуют за значениями по давлению, но П + М7 занижает наиболее поздние из них. На участке 3–4,5 с наибольшее значение θpmax по давлению равно 38,7°, оценки П + М7 – 32,7°.

2.6. Чувствительность. При коэффициенте $K = 8 \cdot 10^{-8}$ А/мВ и начале окна 27° после искры способ М4 дает внутри записей СКО θpmax 9,77° без калибровки и 5,69° с калибровкой, и П + М7 остается значимо точнее. При вычислении объема цилиндра по данным ВАЗ-11183 (ε = 9,8, λ = 0,312) СКО П + М7 составляет 2,74° и 2,07° по CA50, 2,89° и 2,96° по θpmax при переносе и внутри записей. Знаки разностей по всем проверочным циклам не меняются, разности с М5 и М6 по θpmax внутри записей становятся значимыми (−0,20 [−0,30; −0,12] и −0,40 [−0,59; −0,26]).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложен метод оценки доли выгоревшего топлива CA50 и углового положения максимума давления θpmax на основе квантилей нормированной интегральной характеристики ионного тока (ИХИТ) и привязки к мультимодальному эталонному признаковому полю давления. Метод отличается использованием двух новых независимых оценок. Первая получается на основе градиентного бустинга по углам квантилей нормированной ИХИТ, углам начала и максимума ИТ, а также частоте вращения коленчатого вала и УОЗ. Вторая оценка строится на основе косинусной близости скрытых признаков ИТ текущего цикла с межмодальным эталонным полем (карта режимов), построенным на основе сигналов датчика давления, записанных в рамках стендовых испытаний ДВС.

На базе двигателя ВАЗ-11183 проведено сравнение предложенного метода с известными ранее и воспроизведенными по первоисточникам методами, основанными на форме ИТ, физической модели ионизации и нейросетевом оценщике. При работе на тестовых данных, СКО предложенного метода составило 2,86° для CA50 и 3,27° для θpmax против 3,74° и 5,85° у нейросетевого оценщика и 4,67° и 4,16° у регрессии по переменным ЭБУ. Способы на основе анализа формы ИТ даже после калибровки дают СКО θpmax 5,83°–6,39°, так как опираются на пик термической ионизации, различимый лишь в 35 % проверочных циклов. Практическая значимость заключается в том, что метод снимает ограничения по форме сигнала и может быть использован для измерений в реальном времени, поскольку для построения эталонного поля нужны только стендовые записи с датчиком давления, а бортовой оценке достаточно сигнала ИТ и переменных ЭБУ. Дальнейшие исследования связаны с расширением эталонного признакового поля режимами с ранним сгоранием при высокой частоте вращения и режимами малой нагрузки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Heywood J.B.* Internal combustion engine fundamentals. 2nd ed. New York: McGraw-Hill Education, 2018. 1028 p.
2. Advances in ion current detection technology for engine applications / X. Miao, D. Zhu, J. Deng [et al.] // Progress in Energy and Combustion Science. 2026. Vol. 112. Art. 101253. DOI: 10.1016/j.pecs.2025.101253.
3. *Eriksson L., Nielsen L.* Ionization current interpretation for ignition control in internal combustion engines // Control Engineering Practice. 1997. Vol. 5. No. 8. P. 1107–1113. DOI: 10.1016/S0967-0661(97)00103-2.
4. *Hellring M., Holmberg U.* An ion current based peak-finding algorithm for pressure peak position estimation. SAE Technical Paper 2000-01-2829. 2000. DOI: 10.4271/2000-01-2829.
5. *Holmberg U., Hellring M.* A simple virtual sensor for combustion timing // Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control. 2003. Vol. 125. No. 3. P. 462–467. DOI: 10.1115/1.1589034.
6. *Andersson I., Eriksson L.* A parametric model for ionization current in a four stroke SI engine // Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control. 2009. Vol. 131. No. 2. Art. 021001. DOI: 10.1115/1.3023119.
7. Spark advance control using the ion current and neural soft sensors / M. Hellring, T. Munther, T. Rögnvaldsson, N. Wickström, C. Carlsson, M. Larsson, J. Nytomt. SAE Technical Paper 1999-01-1162. 1999. DOI: 10.4271/1999-01-1162.
8. Development and application of ion current/cylinder pressure cooperative combustion diagnosis and control system / D. Zhu, J. Deng, J. Wang [et al.] // Energies. 2020. Vol. 13. No. 21. Art. 5656. DOI: 10.3390/en13215656.
9. An image understanding based model with ion current signals for predicting combustion information / Y. Deng, Z. Gao, E. Tomita, Y. Wen // Fuel. 2019. Vol. 253. P. 1080–1089. DOI: 10.1016/j.fuel.2019.04.162.
10. Deep-learning based in-cylinder pressure modeling and resolution of ion current signals / Z. Gao, Y. Deng, Y. Wen, J. Lu, Z. Du, C. Tang, E. Tomita, Y. Tan // Fuel. 2020. Vol. 282. Art. 118722. DOI: 10.1016/j.fuel.2020.118722.
11. A virtual combustion sensor based on ion current for lean-burn natural gas engine / X. Wang, T. Zhou, Q. Dong [et al.] // Sensors. 2022. Vol. 22. No. 13. Art. 4660. DOI: 10.3390/s22134660.
12. Comparison between pressure- and ion-current-based closed-loop combustion control performance / N. Cavina, N. Rojo, A. Businaro, R. Cevolani // SAE International Journal of Engines. 2019. Vol. 12. No. 2. P. 219–230. DOI: 10.4271/03-12-02-0016.
13. Abnormal combustion diagnosis and combustion period based phase estimation with a modified form tandem ion current detection system on SI gasoline engines / Y. Chao, H. Lu, G. Dong [et al.] // Energy Procedia. 2019. Vol. 158. P. 2098–2105. DOI: 10.1016/j.egypro.2019.01.483.
14. Evaluation mass fraction burned obtained from the ion current signal fuelled with hydrogen/carbon dioxide and natural gas / Z. Song, X. Zhang, Y. Wang, Z. Hu // International Journal of Hydrogen Energy. 2019. Vol. 44. No. 46. P. 25257–25264. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2019.03.082.
15. Pat. US 5676113. Method for ignition timing control in combustion engines / Johansson H., Nytomt J.; Mecel AB. Publ. 14.10.1997.

16. Pat. US 6614230 B2. Method and device for evaluating an ion current sensor signal in an internal combustion engine / Raichle F., Berger J., Strohmaier R., Fischer W.; Robert Bosch GmbH. Publ. 02.09.2003.
17. Ion current measurement in a homogeneous charge compression ignition engine / T. Tanaka, K. Narahara, M. Tabata, S. Yoshiyama, E. Tomita // International Journal of Engine Research. 2005. Vol. 6. No. 5. P. 453–463. DOI: 10.1243/146808705X30413.
18. Monitoring Combustion Process Parameters in an Internal Combustion Engine Using an Ion Current Signal / A.Yu. Budko, M.Yu. Medvedev, R.Yu. Budko, P.V. Ivashin, A.Ya. Tverdokhlebov, D.N. Gerasimov, V.V. Rakhmanov // Mechatronics, Automation, Control. 2017. Vol. 18. No. 4. pp. 256–263. DOI: 10.17587/mau.18.256-263.
19. *Hellring M., Holmberg U.* A comparison of ion current based algorithms for peak pressure position control. SAE Technical Paper 2001-01-1920. 2001. DOI: 10.4271/2001-01-1920.
20. *Zhu G.G., Haskara I., Winkelman J.* Closed-loop ignition timing control for SI engines using ionization current feedback // IEEE Transactions on Control Systems Technology. 2007. Vol. 15. No. 3. P. 416–427. DOI: 10.1109/TCST.2007.894634.
21. Assessment of the reliability of ionization current measurement in estimating peak pressure angle in a spark ignition engine / V. Giglio, L. Della Ragione, A. di Gaeta, N. Rispoli // International Journal of Engine Research. 2022. Vol. 23. No. 11. P. 1921–1936. DOI: 10.1177/14680874211039978.
22. Learning transferable visual models from natural language supervision / A. Radford, J.W. Kim, C. Hallacy [et al.] // Proc. 38th International Conference on Machine Learning. PMLR, 2021. Vol. 139. P. 8748–8763.
23. *Rassweiler G.M., Withrow L.* Motion pictures of engine flames correlated with pressure cards. SAE Technical Paper 380139. 1938. DOI: 10.4271/380139.
24. *Eriksson L.* Methods for ionization current interpretation to be used in ignition control: Master's thesis LiTH-ISY-EX-1507. Linköping: Linköping University, 1995. 61 p.
25. *Eriksson L., Andersson I.* An analytic model for cylinder pressure in a four stroke SI engine. SAE Technical Paper 2002-01-0371. 2002. DOI: 10.4271/2002-01-0371.
26. *Friedman J.H.* Greedy function approximation: a gradient boosting machine // The Annals of Statistics. 2001. Vol. 29. No. 5. P. 1189–1232. DOI: 10.1214/aos/1013203451.
27. *Dice L.R.* Measures of the amount of ecologic association between species // Ecology. 1945. Vol. 26. No. 3. P. 297–302. DOI: 10.2307/1932409.
28. Similarity of neural network representations revisited / S. Kornblith, M. Norouzi, H. Lee, G. Hinton // Proc. 36th International Conference on Machine Learning. PMLR, 2019. Vol. 97. P. 3519–3529.
29. *Künsch H.R.* The jackknife and the bootstrap for general stationary observations // The Annals of Statistics. 1989. Vol. 17. No. 3. P. 1217–1241. DOI: 10.1214/aos/1176347265.

ESTIMATION OF COMBUSTION PHASING AND PEAK PRESSURE POSITION IN AN INTERNAL COMBUSTION ENGINE FROM QUANTILES OF THE INTEGRAL ION CURRENT CHARACTERISTIC WITH MATCHING TO A MULTIMODAL REFERENCE FEATURE FIELD

© 2026 A.Yu. Budko[1], P.V. Ivashin[2]

[1] Southern Federal University, Taganrog, Russia
[2] Togliatti State University, Togliatti, Russia

The crank angle at 50% fuel mass fraction burned (CA50) and the crank angle of peak cylinder pressure (θpmax) are key characteristics of the combustion process; however, measuring them directly via an in-cylinder pressure transducer is challenging. Alternatively, the ion current—measured using the spark plug—can be used to estimate these parameters. Existing methods for this include modeling the ion current waveform using Gaussian components or local parabolas, relating the current to pressure through a physical ionization model, or employing a multilayer perceptron to analyze the ion current. The first three approaches rely on a distinct thermal ionization peak, which, under certain operating conditions, may disappear or merge with other phases of the ion current signal. This study compares these established methods—reproduced based on their original sources—against a proposed estimation technique. The latter combines a neural network-based mapping of the ion current to a reference pressure-feature space with a gradient-boosting regression model, which utilizes quantiles derived from the integral characteristic of the ion current (ICIC). The comparison is based on test-bench data from a VAZ-11183 engine, comprising 9,794 combustion-driven pressure-peak cycles. The model's performance was evaluated both within the original calibration dataset and on a separate test set simulating aggressive driving conditions. Parameters not explicitly defined in the original sources were determined using a calibration subset that excluded the validation cycles. The statistical significance of the differences in root-mean-square errors (RMSE) was assessed using a moving-block bootstrap method. When applied to the test dataset, the proposed estimation method yields an RMS error of 2.86° for CA50 and 3.27° for θpmax, compared to 3.74° and 5.85° for the perceptron, and 4.67° and 4.16° for the regression based on control unit variables. Methods relying on the ion current waveform—following calibration on the same dataset—yield an RMS error for θpmax in the range of 5.83°–6.39°. Within individual recordings, the proposed method achieves an RMS error of 2.17° for CA50 (versus 2.61° for the perceptron), while its RMS error for θpmax (4.20°) is lower than that of the ion-current-based and physical-model-based approaches. When generalized to the test dataset, the proposed method demonstrates a significant advantage in terms of θpmax across all cycle groups, and in terms of CA50 across all validation cycles as well as during transient operating conditions.

Keywords: ion current, combustion phasing, peak pressure angle, transient operation, Gaussian model, SQUAD algorithm, neural soft sensor, integral ion current characteristic, reference feature field, block bootstrap.

DOI: 10.37313/1990-5378-2026-28-5-62-71
EDN: ORTGLD

Artem Budko, Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher at the Research Institute of Robotics and Control Processes of the Southern Federal University, Associate Professor at the Institute of Radioengineering Systems and Control of the Southern Federal University. E-mail: abudko@sfedu.ru
Pavel Ivashin, Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher. E-mail: p.ivashin@tltsu.ru