

УДК 621.43.056

DOI: 10.46960/2782-5477_2022_4_42

М.В. Фролов, Д.И. Коныгин, В.В. Денисенко
К ВОПРОСУ ГОРЕНИЯ МЕТАНОВОЗДУШНЫХ СМЕСЕЙ
В ГАЗОВОМ ДВИГАТЕЛЕ

Акционерное общество «РУМО»

Представлены результаты анализа существующих положений теории зажигания, электрических явлений при горении углеводородных топлив, рассмотрены технические аспекты реализации рабочего процесса газового двигателя с форкамерно-факельным зажиганием, предложен метод измерения коэффициента избытка воздуха в цилиндре двигателя датчиком ионизации.

Ключевые слова: газовый двигатель, искровое зажигание, рабочий процесс газового двигателя, коэффициент избытка воздуха, ионизация, воспламенение, начальный очаг горения, время сгорания.

Введение

Для обеспечения экологических показателей в газовом двигателе необходимо обеспечить работу на обедненной газозвоздушной смеси с коэффициентом избытка воздуха (α) более 1,4. Известно, что проблемы использования бедных топливозвоздушных смесей в газовых двигателях во многом связаны с трудностями их воспламенения, определяемыми более высоким уровнем потребной для этого энергии [1]. Для воспламенения обедненной смеси в основной камере сгорания, в конструкции двигателя с диаметром цилиндра более 170 мм применяют форкамеру, в которой состав смеси, как правило, делается более богатым [2]. Такая схема организации рабочего процесса известна как форкамерно-факельное зажигание. Принцип форкамерно-факельного зажигания для автомобильных двигателей был разработан в 1936-1938 гг. Институтом химической физики АН СССР [3]. Помимо основной камеры сгорания, являющейся непосредственным продолжением внутрицилиндрового пространства, такой двигатель имеет дополнительную предварительную камеру (форкамеру), соединяющуюся с основной камерой. Объем форкамеры составляет 2-5 % объема основной камеры. В форкамере расположена свеча зажигания. Основная камера и форкамера имеют раздельные системы питания. Благодаря этому, а также подбору параметров форкамеры, в последней создается обогащенная смесь, наиболее благоприятная для воспламенения.

Выбрасываемый из форкамеры в основную камеру факел горящих газов является значительно более интенсивным и энергоемким, чем искра, источником зажигания. Это существенно изменяет характер рабочего процесса и создает новые возможности его организации в других условиях и с другими параметрами. При этом проводились исследования [4], которые показали, что скорость, с которой факел из форкамеры пронизывает основную камеру сгорания, составляет 200...400 м/с, тогда как скорость распространения пламени в камере сгорания – 25...40 м/с [5]. Также констатируется, что ускорение сгорания при форкамерно-факельном воспламенении приводит к заметному увеличению максимального давления сгорания в цилиндре двигателя [4].

Принципиальные особенности форкамерно-факельного процесса (или, точнее, способа организации процесса сгорания обедненной газозвоздушной смеси) заключаются в том, что можно создать различные (близкие к оптимальным) условия для каждого из трех этапов сгорания: образование начального очага; воспламенению основного заряда; сгорания основного заряда [4]. Это позволяет выделить форкамерно-факельный способ организации рабочего процесса в отдельную разновидность.

Ионизация пламени

В пламени, образующемся при горении углеводородных топлив, источником заряженных частиц являются химические реакции, разделенные в пространстве. Эти хемоионизационные реакции обуславливают основные особенности ионизационной структуры фронта пламени: разноименные заряды пространственно разделены; концентрация заряженных частиц на несколько порядков превышает термодинамически равновесное значение; термодинамическое электронно-ионное равновесие достигается на значительном по сравнению с поперечной протяженностью фронта пламени расстоянии. В процессах хемоионизации частицы претерпевают химическую перегруппировку, при которой освобождается количество энергии, достаточное для ионизации одного из продуктов реакции [6]. Известное свойство пламени – проводимость электрического тока в одном направлении – давно применяется в промышленности [7-9] благодаря надежности не только для обнаружения присутствия пламени, но и для определения характеристики его поведения [10]. Электронные системы управления двигателей мировых производителей обеспечивают высокие показатели работы путем измерения различными способами параметров, прямо или косвенно характеризующих протекание рабочего процесса. Указанные системы описаны, как правило, поверхностно, без уточняющих подробностей и методик настройки, представляющих интеллектуальную ответственность, и обеспечивают преимущества производителя ДВС на рынке двигателестроения.

Известно, в частности, что у газовых двигателей Caterpillar серии G3600 [11] в системе управления топливоподачей для каждого цилиндра предусмотрен датчик качества сгорания топливно-воздушной смеси. Датчик устанавливается своим чувствительным элементом (электродом) в камеру сгорания. Конструктивно датчик качества сгорания смеси аналогичен свече искрового зажигания без бокового замыкающего электрода. Описание принципа работы указанного способа управления рабочим процессом отсутствует, и только аналитическим способом возможно объяснить применение такого технического решения использованием эффекта ионизации при горении природного газа.

Особенности искрового зажигания для бедных смесей

Газовые двигатели характеризуются пониженной, по сравнению с бензиновыми и дизельными, скоростью сгорания топливовоздушной смеси в цилиндре. Такая скорость увеличивает длительность как основной фазы процесса сгорания, так и стадии формирования начального очага горения, возникающего в межэлектродном зазоре свечи зажигания вследствие искрового разряда, формируемого системой зажигания [12]. Существенную роль в процессе сгорания играет длительность формирования начального очага, охватывающего период от начала искрового разряда до момента, когда сформируется развитый фронт турбулентного пламени. По мере обеднения метановоздушной смеси длительность формирования начального очага горения значительно возрастает.

Д.Н. Вырубов указывал [13], что в двигателях с электрическим зажиганием образование очага сгорания в результате действия искры сопровождается насыщением его объема продуктами сгорания и образованием слоя – раздела между негорящей смесью и образовавшимися продуктами сгорания. В этот слой со стороны смеси в результате диффузии поступают молекулы топлива и окислителя, а со стороны очага сгорания – продукты сгорания и теплота. Образуется так называемый ламинарный фронт пламени толщиной в несколько десятых миллиметра и площадью в несколько квадратных миллиметров. Температура в этом слое резко растет, что способствует ускорению диффузионных процессов и образованию зоны прогрева и зоны химических реакций, в которой концентрации молекул топлива и кислорода постепенно уменьшаются. Пламя начинает перемещаться в сторону горючей смеси перпендикулярно к поверхности фронта с т.н. нормальной скоростью распространения пламени. Пределы распространения пламени для различных топлив приведены в табл. 1.

Таблица 1.
Пределы распространения пламени в воздушных смесях топлив [13]

Топливо	Верхний предел α	Нижний предел α	Максимальная скорость (м/с) распространения пламени (при $\alpha = 1$)
Водород			
Метан			
Бензин			

С другой стороны, в обедненных смесях пределы воспламенения могут быть в значительной степени расширены снижением критического барьера зажигания – минимальной энергией воспламенения, которая зависит от большого числа факторов. Среди них форма электрического искрового разряда. Исследования показывают [1], что минимальная энергия воспламенения есть функция характеристик иницирующего разряда и может быть снижена в определенной степени их варьированием и оптимизацией.

Искровой разряд, формируемый системой зажигания, начинается с пробоя межэлектродного зазора свечи зажигания, который происходит тогда, когда напряжение на свече зажигания возрастает до значения, называемого пробивным (УПР) и зависит от плотности газовой среды. Согласно закону Пашена [14]:

$$U_{пр} = f(\rho * \delta CB),$$

где ρ – плотность газовой среды в межэлектродном зазоре свечи зажигания; δCB – величина межэлектродного зазора свечи зажигания.

В свою очередь, в камере сгорания плотность газовой среды (метано-воздушной смеси или других углеводородов) изменяется пропорционально коэффициенту избытка воздуха (табл. 2).

Таблица 2.
Свойства газов [13]

Свойство	Водород	Метан	Пропан	Бутан	Этан
Минимальная энергия зажигания, мДж					
Пределы воспламенения	– 2,54	– 1,6	– 2,5	– 2,9	– 2,2
Теплота сгорания, МДж/кг					
Максимальная скорость сгорания, см/с					

Изменение коэффициента избытка воздуха для топливно-воздушной смеси оказывает влияние на скорость сгорания (рис. 1), что непосредственно сказывается на рабочем процессе двигателя. Скорость распространения пламени сильно при этом возрастает, если газовоздушная смесь находится в интенсивном турбулентном движении [16]. Более того, при повышенных температурах и давлениях концентрационные пределы горючести расширяются, а нормальные скорости распространения пламени повышаются; с увеличением остаточных газов в смеси концентрационные пределы сужаются, а скорости уменьшаются [13].

Согласно современной теории искрового воспламенения [17], в результате пробоя межэлектродного зазора у электродов свечи зажигания образуется микрообъем плазмы с температурой в ядре около 104 К. Химические реакции при таких условиях могут протекать лишь на поверхности плазменного объема, где температура существенно ниже. Через несколько десятков микросекунд температура плазмы снижается до температуры пламени, и наступает критический момент формирования начального очага [18].

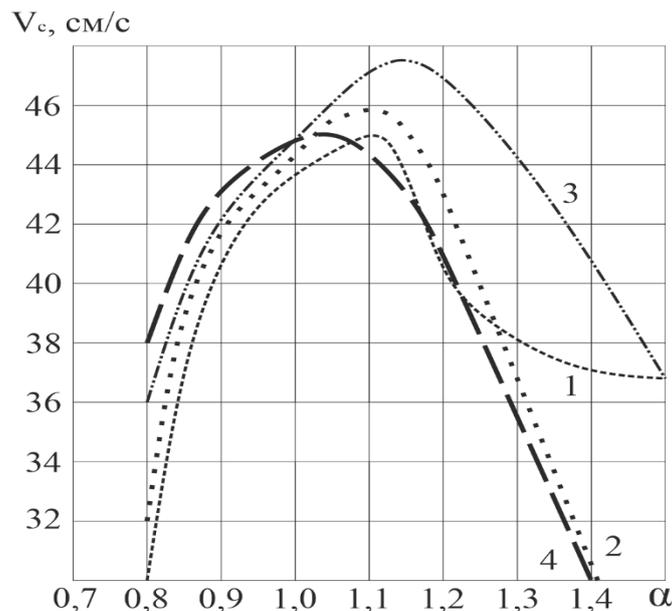


Рис. 1. Скорость сгорания в зависимости от коэффициента избытка воздуха [15]:

1 – метан, 2 – пропан, 3 – этан, 4 – бутан

После пробоя межэлектродного зазора следует короткая емкостная фаза искрового разряда. Величина энергии емкостной фазы разряда зависит от величин пробивного напряжения и емкости свечи зажигания. После емкостной фазы следует индуктивная фаза искрового разряда. В период ее протекания в межэлектродном зазоре свечи зажигания формируется плазменный столб, в котором выделяется тепловая энергия, накопленная заранее в магнитном поле катушки зажигания [19]. В современных двигателях внутреннего сгорания формирование инициирующего разряда осуществляется транзисторным, конденсаторным или комбинированным (конденсаторно-транзисторным или конденсаторно-тиристорным) оконечным каскадом электронной системы управления двигателем, цикл разряда которого состоит из двух основных этапов. Первый этап – заряд распределенных емкостей вторичной обмотки катушки зажигания и быстрый рост высокого напряжения, а на втором этапе происходит пробой межэлектродного зазора в свече зажигания и формирование инициирующего разряда, имеющего две составляющие: емкостную и индуктивную. В течение емкостной фазы разряда происходит практически мгновенное нагревание газовой смеси в искровом канале до температур, превышающих 104 К, а основная энергия выделяется в индуктивной фазе, что препятствует затуханию горения, так как количество тепловой энергии этой фазы значительно больше, чем емкостной [20].

В работе [21] обоснована необходимость в оптимизации характеристики выделения энергии в искровом разряде, и показано, что сочетание кратковременных сильноточных и длительных слаботочных индуктивных фаз искрового разряда позволяет форсировать во времени процесс сгорания топливно-воздушной смеси в ДВС. В исследованиях [22-24] отмечается, что длительность формирования начального очага горения в ДВС может быть сокращена за счет форсирования амплитуды тока и длительности искровых разрядов, а также увеличением межэлектродного зазора свечей зажигания.

Положительный же эффект снижения времени формирования начального очага горения при увеличении межэлектродного зазора наблюдается лишь до определенной его величины, после чего начальный очаг становится очень чувствительным к турбулентным пульсациям. С увеличением силы тока разряда свыше определенного значения, разряд переходит из

тлеющего в дуговой со снижением напряжения, а значит и общей энергии. Положительный эффект от увеличения продолжительности разряда также имеет предел. Это обусловлено тем, что подвод энергии в индуктивной фазе разряда большой длительностью нецелесообразен, поскольку эффективность передачи энергии разряда теплопроводностью в удаляющийся фронт пламени резко снижается по мере его удаления от канала пробоя [18].

Угол опережения зажигания

Угол опережения зажигания (УОЗ) оказывает большое влияние на рабочий процесс двигателя. Каждому режиму двигателя соответствует свой оптимальный угол опережения зажигания, при котором основная фаза процесса сгорания располагается максимально близко к в.м.т. и двигатель работает с наилучшей эффективностью, т. е. развивает наибольшую для данного режима мощность и имеет наименьший удельный расход топлива [25].

Принято считать, что УОЗ сложным образом зависит от конструкции двигателя, условий эксплуатации, состояния и свойства топливной, воздушной и сгоревшей газовой смеси [26]. И в литературе [27] уточняется, что оптимальные условия для работы двигателя наступают, когда максимальное давление в цилиндре достигается в такте расширения при положении поршня $10-15^\circ$ ПКВ после в.м.т. Отклонение же угла опережения зажигания от оптимального в любую сторону вызывает существенное изменение вида индикаторной диаграммы и уменьшение мощности и увеличение расхода топлива [12].

Как правило, при выборе регулировок рабочего процесса, стремятся выбрать угол опережения зажигания, соответствующий максимальной эффективности рабочего процесса. Однако это не всегда возможно. Необходимость уменьшения угла опережения зажигания относительно оптимальной регулировки, может быть вызвана требованиями ограничения токсичности выбросов, в частности необходимостью снижения выбросов CO и CH при работе двигателя или необходимостью увеличения температуры отработавших газов для раскрутки турбокомпрессора [28].

Задержка воспламенения и время горения смеси

Рабочие внутрицилиндровые процессы двигателя зависят от многих факторов: степени сжатия, организации воспламенения, циклового массового наполнения цилиндров свежим зарядом, химического состава топлива, качества смесеобразования, термодинамических характеристик рабочего тела, скорости теплоотдачи теплоты от рабочего тела в окружающую среду через стенки [29]. С точки зрения организации рабочего процесса в двигателе внутреннего сгорания, существенную роль играет величина скорости сгорания. От величины скорости сгорания зависит продолжительность процесса сгорания, температура и давление цикла и, соответственно, эффективные показатели двигателя [30].

На строгую зависимость продолжительности задержки воспламенения смеси (ЗВС) обращал внимание А.И. Толстов [31]. Сложность учета влияния различных факторов на ЗВС породила большое количество полуэмпирических формул для расчета. Наиболее полный и качественный анализ методик определения ЗВС приведен в литературе [20] (анализируется 19 полуэмпирических и экспериментальных зависимостей). При анализе этих зависимостей формируются следующие выводы:

- главными факторами, влияющими на время ЗВС в большинстве зависимостей, являются давление и температура;
- оценку степени влияния давления и температуры затрудняет значительный разброс в этих формулах множителя, учитывающего значения энергии активации рабочего тела, а также показателей степени;
- некоторые зависимости учитывают влияние дополнительных факторов: средней скорости поршня, частоты вращения, коэффициента избытка воздуха.

При математическом моделировании цикла поршневого двигателя важное значение имеет определение формул времени задержки воспламенения смеси (ЗВС), позволяющих с достаточной для практики точностью прогнозировать начало процесса сгорания [32]. Для природного газа в общем виде формула времени задержки воспламенения имеет вид [20]:

$$\tau = 1.76 \cdot p^{-0.866} \cdot \exp\left(\frac{2490}{T}\right),$$

где p – среднее индикаторное давление, T – среднее индикаторная температура цикла.

Изменение α влияет на скорость сгорания (рис. 1), следовательно, и на количество теплоты и скорость ее выделения. Обеднение смеси сопровождается увеличением термического КПД, но при $\alpha > 1,2$ увеличивается неравномерность последовательных циклов [25], соответственно от цикла к циклу наблюдается разброс значений давления сгорания и длительности фаз сгорания.

В [26] установлены три причины такого вида неравномерности:

- 1) изменения в движении топливно-воздушной смеси в цилиндре влияют на распространение горения;
- 2) изменения в соотношении топлива и воздуха приводят к тому, что количество энергии в цилиндре изменяется от одного цикла к другому;
- 3) пространственные изменения концентрации воздуха в различных циклах одного и того же цилиндра.

В [24] основной причиной нестабильности последовательных циклов указывается случайный характер сочетания условий развития начального очага горения (местные значения α , интенсивность и масштаб турбулентности в зоне свечи зажигания в форкамере, параметры искрового разряда).

Организация рабочего процесса газового двигателя

Газовый двигатель РУМО-502 предназначен для работы в составе электроагрегата на обедненной смеси с форкамерно-факельным зажиганием. На рис. 2 показана принципиальная схема организации рабочего процесса с форкамерно-факельным зажиганием. Основной топливный газ подается через впускной клапан во всасывающем тракте головки цилиндра. Клапан подачи основного газа (7) открывается после открытия впускного клапана во избежание потерь газа в период перекрытия клапанов. Система управления закрывает клапан (7) до закрытия впускного клапана, обеспечивая необходимую цикловую подачу и предотвращая попадание газа в воздушный ресивер. Для регулирования подачи форкамерного газа клапан (8) обеспечивает давление газа перед форкамерой выше давления наддува для обеспечения продувки форкамеры от остаточных газов и формирования смеси в форкамере (5), более богатой чем в основной камере сгорания (4).

Ведущие производители оборудования для газовых двигателей, таких как WOODWARD, HENZMANN, MAN B&W реализуют в своих блоках управления обратную связь по температуре за выпускным клапаном, вводя по ней корректировку цикловой подачи топлива. Можно предположить, что именно по причине тепловой инерционности термопреобразователей газовые двигатели не нагружаются ступенью более 20 % мощности, в противном случае двигатель останавливается по причине отсутствия вспышек в цилиндрах.

Предлагаемый метод измерения α

Существует мнение, что единственным достоверным методом определения коэффициента избытка воздуха смеси вне зависимости от успеха сгорания этой смеси в цилиндре является вычисление приготовленной смеси по расходам воздуха и газового топлива. В этом случае точность результата измерения α зависит от точности измерений расходов [33]. При этом расход газа и воздуха вычисляется как средняя величина, не учитывающая неравномерность последовательных циклов по цилиндрам.

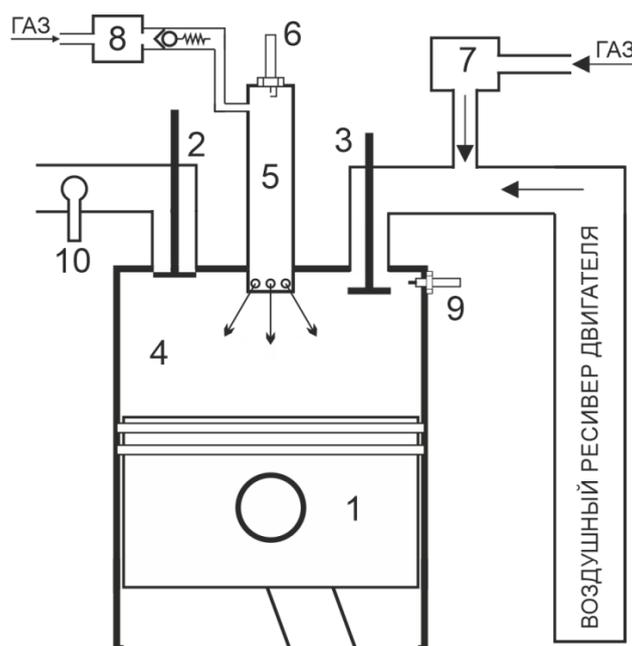


Рис. 2. Организация рабочего процесса двигателя с форкамерно-факельным зажиганием:

- поршень, 2 – выпускной клапан, 3 – впускной клапан, 4 – основная камера сгорания,
- форкамера, 6 – искровая свеча зажигания, 7 – клапан основного топливного газа,
- 8 – клапан форкамерного газа, 9 – датчик ионизации, 10 – термопреобразователь

Для повышения точности коэффициент избытка воздуха в цилиндрах двигателя предлагается измерять датчиками ионизации. Суть предлагаемого метода заключается в измерении временного интервала от момента подачи искры до воспламенения в цилиндре и определения α по заданным зависимостям. Датчик ионизации (9) должен устанавливаться своим электродом в камеру сгорания. Поскольку задержка времени воспламенения и скорости сгорания у смеси метана с воздухом имеет определенную, хотя и нелинейную зависимость от α (табл. 2 и рис. 1), измеренный интервал должен пропорционально коррелироваться с коэффициентом избытка воздуха.

Измеряя с достаточной точностью коэффициент избытка воздуха по цилиндрам двигателя методом ионизации, в каждом рабочем такте получаем возможность корректировать подачу газа для улучшения протекания рабочего процесса. Использование при этом корректировки угла опережения зажигания для каждого цилиндра будет способствовать выравниваю средне индикаторного давления, достижению оптимальных экологических параметров и повышению КПД двигателя.

Библиографический список

1. Карпов, В.П. Исследование критических условий воспламенения околопредельных метано-воздушных смесей комбинированным искровым разрядом с варьируемыми характеристиками ерин // Физика горения и взрыва. 1986. № 2. С. 3-9.
2. Швыдкий, Д.В. Современные системы зажигания для газовых двигателей [Текст] // Вестник ХНАДУ. 2014. № 64. С. 41-49.
3. Дубовицкий, Ф.И. Институт химической физики (очерки истории) [Текст] / Ф.И. Дубовицкий. – М.: Наука, 1996. – 983 с.
4. Генкин К.И., Газовые двигатели [Текст] / К.И. Генкин. – М.: Машиностроение, 1977. – 193 с.
5. Дьяченко, Н.Х. Теория двигателей внутреннего сгорания. [Текст] / Н.Х. Дьяченко, А.К. Костин, Б.П. Пугачев [и др.]. – Л.: Машиностроение, 1974. – 552 с.

6. Лаутон Дж. Электрические аспекты горения [Текст] / Дж. Длаутон, Ф Вайнберг. – М.: Энергия, – 296 с.
7. Möllberg, A. Investigation of the principle of flame rectification in order to improve detection of the propane flame in absorption refrigerators [Текст] / B.S. Thesis, IFM, Linköping university, Linköping, Sweden, 2005.
8. Payne, P.P.; Schmidt, S.E.; Goppel, K.P.; King, D.J.; Tobin, S.M.; Fowler, J.T. Constant current flame ionization circuit. U.S. Patent 6509838 B1, 21 January 2003.
10. A chemi-ionization processing approach for characterizing flame flickering behavior [Текст] / F. Li, L. Xu, Z. Cao, M. Du // Conference Record – IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference: The «Measurable» of Tomorrow: Providing a Better Perspective on Complex Systems, Pisa, 11-14 мая 2015 г. – Pisa, 2015. P. 325-329.
11. CATERPILLAR. Руководство по эксплуатации и техническому обслуживанию. Двигатели G3600. SRBU7563-07. Август 2006. Сентябрь 2006.
12. Францев, С.М. Влияние закона выделения энергии в индуктивной фазе искрового разряда на показатели газового двигателя [Текст] / С.М. Францев, А.Ю. Кавторев // Интернет-журнал Науковедение. 2014. № 4(23). С. 3.
13. Двигатели внутреннего сгорания: Теория поршневых и комбинированных двигателей [Текст] / Д.Н. Вырубов, Н.А. Иващенко, В.И. Ивин.– М.: Машиностроение, 1983. – 375 с.
14. Ховатсон, А.М. Введение в теорию газового разряда [Текст] / А.М. Ховатсон. – М. : Атомиздат, 1980. – 182 с.
15. Дубовкин, Н.Ф. Справочник по теплофизическим свойствам углеводородных топлив и их продуктов сгорания [Текст] / – М.–Л. : Госэнергоиздат, 1962. – 288 с.
16. Контроль параметров искрового разряда в двигателе внутреннего сгорания [Текст] / А.И. Нефедьев, В.Г. Гусев, Д.И. Нефедьев, В.Г. Шаронова // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2020. № 4(34). С. 51-57.
17. Топливная экономичность автомобилей с бензиновыми двигателями [Текст] / Т.У. Асмус, К. Боргнакке, С.К. Кларк и др. – М.: Машиностроение, 1988. – 504 с.
18. Гибадуллин, В.З. Форсирование процесса воспламенения топливовоздушных смесей в ДВС с искровым зажиганием [Текст] // Вестник Курганского государственного университета. Серия: Естественные науки. 2005. № 4. С. 108-110.
19. Францев, С.М. Исследование длительности и энергии искрового разряда транзисторной системы зажигания на нагрузочном режиме работы двигателя [Текст] / С.М. Францев, А.Ю. Кавторев // Инженерный вестник Дона. 2015. № 1-2(34). С. 45.
20. Кавтарадзе, Р.З. Теория поршневых двигателей. Специальные главы: учебник для вузов [Текст] / Р.З. Кавтарадзе. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. – 720 с.
21. Злотин, Г.Н. Начальный очаг горения при искровом зажигании гомогенных топливовоздушных объемах: монография [Текст] / Г.Н. Злотин, Е.А. Федянов. Волгоград: ВолгГТУ, 2008. – 152 с.
22. Малов, В.В. Исследование характеристик искровых разрядов некоторых типов систем зажигания и их влияния на работу карбюраторного двигателя [Текст] / дис... канд. техн. наук. / В.В. Малов. – Волгоград, 1974. – 230 с.
23. Семенов, Е.С. Характеристики сферических пламен в стадии формирования [Текст] / Е.С. Семенов, А.С. Соколик // Доклады АН СССР. 1962. № 2. С. 369–372.
24. Староверов, В.В. Исследование рабочего процесса быстроходного автомобильного двигателя при воспламенении разными типами систем зажигания [Текст]: дис... канд. техн. наук. / В.В. Староверов. – Волгоград, 1978. – 223 с.
25. Луканин В.Н. Двигатели внутреннего сгорания. Кн.1. Теория рабочих процессов: Учеб. [Текст] / В.Н. Луканин, К.А. Морозов, С.М. Хачиян. – М.: Высшая школа, 1995. – 368 с.
26. Eriksson, L. Modeling and Control of Engines and Drivelines (Automotive Series). [Текст] / L. Eriksson, L. Nielsen. – Wiley. 1st edition (February 27, 2014) 556 p.
27. Рыбальчик, В.С. Теория поршневых авиационных двигателей [Текст] / В.С. Рыбальчик, В.С. Поляков, В.Ф. Герасименко. – М.: Воениздат, 1955. – 349 с.
28. Гирявец, А.К. Теория управления автомобильным бензиновым двигателем [Текст] / А.К. Гирявец. – М.: Стройиздат, 1997. – 161 с.

29. Кориши, А. Влияние интенсивности подвода теплоты и циклового массового наполнения на термодинамические циклы дизельного двигателя [Текст] / А. Кориши, С.Н. Хрунков // Транспортные системы № 2 (24), 2022. С. 33-41. – DOI: 10.46960/62045_2022_2_33
30. Исследование сгорания водородо-воздушных смесей [Текст] / К.В. Приходьков, А.В. Бастраков, А.Н. Савкин [и др.] // Современные проблемы науки и образования. 2013. № 3. С. 18.
31. Толстов А.И. Индикаторный период запаздывания воспламенения и динамика цикла быстроходного двигателя с воспламенением от сжатия [Текст] // Труды НИЛД «Исследование рабочего процесса и подачи топлива в быстроходных дизелях». 1955. № 1. С. 5-55.
32. Гаврилов, А.А. Продолжительность задержки воспламенения топливно-воздушной смеси в поршневых двигателях / А. А. Гаврилов, А. Н. Гоц // Фундаментальные исследования. 2014. № 6-С. 703-708.
33. Shvydkyy, D. Development of a method for experimental investigation of combustion process in lean burn gas engines // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2018. Vol. 4. № 5(94). Pp. 61-79.