

Влияние состава газомоторных топлив на их детонационные характеристики

К.Я. Трошин*, А.А. Беляев, А.В. Арутюнов, В.С. Арутюнов

Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н.Н. Семенова РАН,
ул. Косыгина, 4, Москва, Россия

ARTICLE INFO

Получено
04.03.2026Получено в исправленном виде
01.06.2026Принято
04.06.2026**Ключевые слова:**природный газ; метан;
водород; метановодородные
смеси; задержка
воспламенения; октановое
число; метановое число

АННОТАЦИЯ

Состав газомоторных топлив является одним из ключевых факторов, определяющих их моторные характеристики. Топливовоздушные смеси в двигателях внутреннего сгорания воспламеняются в области температур ниже 1000 К, в которой механизмы окисления двух важнейших компонентов газовых топлив – метана и водорода сильно отличаются от механизмов их горения при более высоких температурах. Эти изменения связаны с изменением в них роли пероксидных соединений, что приводит к сложной зависимости детонационной стойкости газовых топлив от их состава. Несмотря на то, что эта зависимость хорошо описывается современными кинетическими механизмами и даже может быть рассчитана на их основе, практическое определение их детонационной стойкости вызывает серьезные проблемы. Широко используемая в настоящее время «метановая шкала» не имеет под собой теоретического обоснования и не учитывает существенные различия во влиянии водорода и углеводородов C_{2+} на воспламенение и горение метана – основного компонента газовых углеводородных топлив – и в силу этого неадекватна для оценки их детонационной стойкости. Необходимы более подходящие инструменты для оперативной оценки детонационной стойкости газовых топлив, отсутствие которых будет сдерживать их практическое применение.

1. Введение

Газообразное топливо уже длительное время широко используется на автомобильном транспорте. Наиболее широкое распространение получил природный газ, который применяют в качестве моторного топлива более чем в 80 странах мира. С 2000 года число транспортных средств на природном газе в мире выросло более чем в 20 раз и превысило 30 млн ед., что составляет 2% мирового автопарка. Большая часть этого автопарка приходится на страны Азиатско-Тихоокеанского региона – 20,5 млн ед. и Латинской Америки – 5,5 млн ед. В Европе лидером является Италия, где эксплуатируется 1,1 млн автомобилей на газовом топливе. Стремительное расширение масштабов использования природного газа во многих странах в качестве более дешевого и более экологически чистого автомобильного топлива связано с тем, что природный газ обеспечивает соответствие стандартам Евро-5/6

и в 5 раз снижает объем вредных выбросов, при этом в 1,5-2 раза повышается ресурс двигателя.

Россия также активно участвует в этом процессе. Создаются газомоторные коридоры, то есть сеть газовых заправок, преимущественно СПГ, вдоль ряда наиболее загруженных трасс, в частности, М-10 «Россия» и М-11 «Москва-Санкт-Петербург», а также М-4 «Дон», М-1 «Беларусь». Активно развивается сеть газовых заправок в Татарстане, на юге и в ряде других регионов страны [1].

В связи с глобальными экологическими проблемами в последнее время активно обсуждается возможность использования в качестве безуглеродного топлива водорода, причем не только для питания топливных элементов (ТЭ), требующих очень высокой степени очистки от оксида углерода СО, но и в качестве топлива для традиционных двигателей внутреннего сгорания (ДВС), которые при питании водородом лишь незначительно уступают по эффективности топливным элементам [2], являясь при этом с технологиче-

*Corresponding author: K.Ya. Troshin; E-mail address: troshin@chph.ras.ru

ской точки зрения более дешевым и надежным источником энергии. А благодаря постоянному прогрессу в их разработке ожидается, что к 2045 году их топливная эффективность почти достигнет эффективности ТЭ [3]. Поэтому в ближайшей перспективе ДВС, работающие на водороде и водородсодержащих смесях, могут стать естественным переходом между современными двигателями и будущим транспортом на ТЭ. В связи с известными проблемами транспортировки и хранения промышленных объемов водорода [4, 5] широко обсуждаются перспективы использования в качестве топлива метановодородных смесей различного состава [6].

Помимо использования в качестве моторного топлива для автотранспорта, природный газ применяется также в быстро расширяющемся секторе автономных энергоустановок и распределенных сетей энергоснабжения. Однако наряду с метаном он всегда содержит примеси более тяжелых гомологов, а в ряде случаев – синтез-газ, аммиак, водород и различные их смеси, что ставит вопрос о зависимости моторных характеристик этих смесей от их состава и методах их оценки. В работе представлены исследования влияния состава природного газа, метановодородных смесей и синтез-газа на их низкотемпературное ($T < 1000$ К) воспламенение и, соответственно, детонационную стойкость, показаны недостатки существующих методов определения данного параметра.

2. Существующие методы оценки детонационной стойкости газовых топлив

Важнейшей характеристикой детонационной стойкости традиционных углеводородных топлив для ДВС с искровым зажиганием является октановое число (ОЧ), которое определяют на стандартном одноцилиндровом двигателе. Исследовательское октановое число (ОЧИ) характеризует поведение топлива в режимах малых и средних нагрузок, а моторное октановое число (ОЧМ) – в режимах больших нагрузок. Обычно ОЧМ имеет более низкое значение, чем ОЧИ.

Однако углеводородные газы и, прежде всего, метан характеризуются очень высоким ОЧ, заметно превышающим его значение для изо-октана, которому соответствуют 100 пунктов октановой шкалы, что делает эту шкалу малоприменимой для оценки детонационной стойкости природного газа (ПГ). Кроме того, технически сложно сопоставлять детонационные характеристики топлив в разных агрегатных состояниях.

Поэтому для оценки детонационной стойкости газового топлива была предложена смесь водорода и метана – «метановая шкала» [7, 8], которая расширяет измеряемый диапазон за пределы диапазона ОЧ. Соответствующая этой шкале мера детонационной стойкости газовых топлив, метановое число (МЧ), определяется как объемное процентное содержание метана, которому соответствует МЧ в 100 пунктов, в смеси с водородом, которому приписывается МЧ = 0, соответствующее интенсивности детонации исследуемой газовой смеси при заданных условиях эксплуатации двигателя.

В 1999 году консорциум европейских лидеров газовой промышленности принял решение о предпочтительности использования МЧ для определения детонационной стойкости газомоторных топлив. Однако универсальный стандарт для определения данного параметра и общепринятый метод его расчета на основе состава газа разработаны не были. Практически каждый крупный производитель газопоршневых двигателей и энергоустановок использует собственный метод расчета МЧ и некоторые из разработанных ими калькуляторов для расчета МЧ газовой смеси по ее составу доступны в Интернете.

3. Влияние состава на воспламенение природного газа

Наиболее объективные показатели свойств топлива получают в результате моторных испытаний. Однако при экспериментальных исследованиях воспламенения газов наиболее часто определяемым и объективным показателем является время задержки его воспламенения (ВЗВ). В литературе имеется большой массив работ по высокотемпературному ($T > 1000$ К) воспламенению метана, водорода и легких алканов. Однако значительные отличия от механизма их воспламенения при более низких температурах ($T < 1000$ К), характерных для ДВС, делает эти исследования малоинформативными для понимания процесса воспламенения в двигателях, поэтому в данной работе они не рассматриваются.

Для температур $T < 1000$ К в работах [9, 10] впервые были экспериментально установлены интересные закономерности влияния состава природного газа (смесей метана с его более тяжелыми гомологами) на ВЗВ их воспламенения в области температур ниже 1000 К, в которой и происходит воспламенение рабочей топливовоздушной смеси в реальном ДВС. Несмотря на резкое отличие

задержки воспламенения самого метана, для его ближайших гомологов C_2 – C_6 характерны практически одинаковые значения задержки воспламенения. Практически идентичный вид имеет и зависимость задержки воспламенения в воздухе всех бинарных метаноалкановых смесей от концентрации в них любого из C_2 – C_6 алканов. Несмотря на существенные различия в длине углеродной цепи указанных углеводородов и соответствующие различия в их реакционной способности, при их одинаковой концентрации в метане значения задержки воспламенения таких бинарных метаноалкановых смесей оказываются практически одинаковыми. Добавка любого из алканов C_2 – C_6 на уровне 1% в 2–3 раза снижает задержку воспламенения метана, а добавка 10% делает ее практически неотличимой от задержки воспламенения самого добавляемого углеводорода, что демонстрируют представленные на рис. 1 результаты экспериментов в бомбе высокого давления [9].

Влияние многокомпонентной примеси алканов C_2 – C_5 на задержку воспламенения метаноалкановых смесей, имитирующих реальный природный газ, показало, что их ВЗВ не зависит от конкретного состава этой примеси, а определяется только суммарной концентрацией алканов C_{2+} . Таким образом, влияние длины углеродной цепи добавляемых углеводородов в первом приближении можно считать незначительным, что существенно облегчает оценку детонационной стойкости природного газа, так как она не зависит от конкретного состава примеси более тяжелых алканов в метане, а определяется только их суммарной концентрацией.

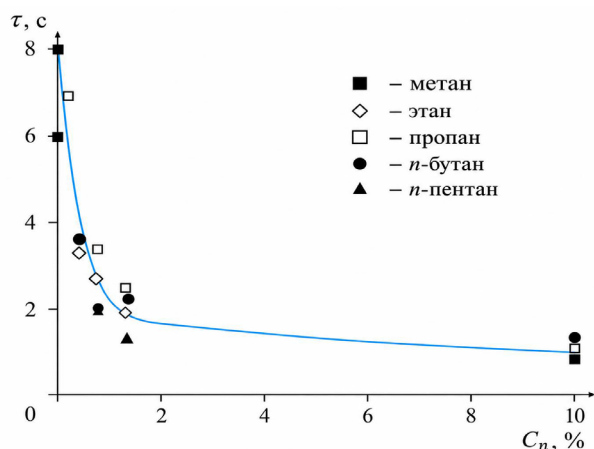


Рис. 1. Зависимость задержки воспламенения в воздухе бинарных метаноалкановых смесей от концентрации добавленного алкана. Температура – 900 К, давление – 1 атм, эквивалентное соотношение ϕ – 1. Воспроизведено из [9], опубликовано по лицензии CC BY 4.0.

Учитывая большое различие в реакционной способности алканов C_{2+} , их одинаковое влияние на ВЗВ метана, на первый взгляд, выглядит неожиданным. Однако исследования механизма окислительной конверсии алканов C_{2+} [11] показали, что в области температур ниже 1000 К их термический пиролиз, приводящий к образованию преимущественно этилена, протекает быстрее, чем их взаимодействие с кислородом. Поэтому еще до начала окислительной конверсии углеводородов в такой смеси термический пиролиз всех содержащихся в ней алканов C_{2+} приводит в основном к образованию этилена, последующее окисление которого и определяет их практически одинаковое влияние на ВЗВ данной метаноалкановой смеси. Этот теоретический [11] вывод был подтвержден и экспериментальной демонстрацией одинакового влияния примесей этана и этилена на ВЗВ метана [12].

Установленные закономерности влияния гомологов метана на задержку его воспламенения не только качественно, но практически количественно описываются современными кинетическими механизмами окисления легких алканов. То есть достигнут вполне адекватный уровень теоретического описания этих процессов, что позволяет использовать расчетные методы для анализа окисления легких алканов и обосновать использование аналитических зависимостей для оценки задержки воспламенения сложных углеводородных смесей [12].

Следует также отметить основанную на этих результатах возможность повышения детонационной стойкости природного и особенно попутного нефтяного газа (ПНГ) за счет селективного окислительного крекинга более тяжелых гомологов метана без их выделения из природного или попутного газа. Их окислительное превращение в достаточно мягких условиях непосредственно в газе в присутствии небольшой концентрации воздуха, преимущественно в метан, этилен и CO , значительно повышает метановое число ПНГ и снижает его низшую теплоту сгорания. Это позволяет привести ключевые параметры газового топлива в соответствие с требованиями производителей газопоршневых энергоустановок [13].

4. Воспламенение метановодородных смесей

Помимо перспектив практического использования метановодородных смесей (МВС) [6], важность изучения их детонационных свойств определяется тем, что они являются репером при определении детонационной стойкости газовых

топлив по метановой шкале. Однако проведенные исследования показывают, что правомерность выбора этой шкалы далеко не очевидна и вызывает много вопросов, связанных со сложным характером влияния состава метановодородных смесей на процессы их воспламенения и горения [12, 14, 15].

Проведенные авторами исследования показали, что в диапазоне 800–1000 К увеличение содержания водорода в МВС от 0 до 50% снижает задержку воспламенения, т.е. он промотирует воспламенение метана. Однако при более низкой температуре (850 К) промотирующий эффект выражен слабо, если он вообще наблюдается. Сложный характер влияния водорода на задержку воспламенения метана демонстрирует рис. 2. Энергия активации задержки воспламенения самого метана (рис. 2, кривая 1) почти постоянна (~30 ккал/моль) во всем рассматриваемом интервале температур. Однако в смесях с высокой концентрацией H_2 наблюдается ее максимум при $T \approx 900$ К (рис. 2, кривые 3–5), когда такой определяющий ход процесса параметр, как энергия активации задержки воспламенения, для водорода и смесей с его высоким содержанием возрастает более чем в 2 раза по сравнению с ее величиной при более низких и более высоких температурах.

Важнейшим фактором, вызывающим сомнение в целесообразности использования метановой шкалы в качестве репера для оценки детонационной стойкости углеводородных топлив, выступает характер влияния добавок водорода на скорость пламени метана [14]. Метановая шка-

ла фактически предполагает близкую к линейной зависимость моторных характеристик (скорости пламени, задержки воспламенения) МВС от концентрации обоих компонентов, т.е. аддитивный характер их зависимости от состава. Однако это не соответствует реальности. Если при концентрации H_2 до 40% он незначительно влияет на задержку воспламенения метана и слабо – на скорость пламени [12], то при более высоких концентрациях влияние водорода растет с его концентрацией экспоненциально, что демонстрирует рис. 3. Такая сильно нелинейная зависимость ставит под сомнение правомерность применения метановой шкалы [16].

Проблематичность применения метановой шкалы для оценки детонационных характеристик газового топлива вытекает из фундаментальных особенностей механизма окисления и воспламенения обоих ее реперных компонентов – метана и водорода – при $T < 1000$ К [12, 16, 17], в которой происходит воспламенение топлива в ДВС. Очень резкая зависимость задержки воспламенения метана от содержания в нем алканов C_{2+} , наблюдаемая лишь в очень узком диапазоне их концентраций (рис. 1), уже ставит под сомнение целесообразность оценки их детонационной стойкости на основе какой-либо шкалы со значительно менее резкой зависимостью от концентрации реперных компонентов. Сопоставление рис. 1 и 3 показывает, что влияние алканов C_2-C_5 и водорода на воспламенение метана, который является основным компонентом всех газообразных углеводородных топлив, очень сильно различается, что определяет принципиальный недостаток метановой шкалы.

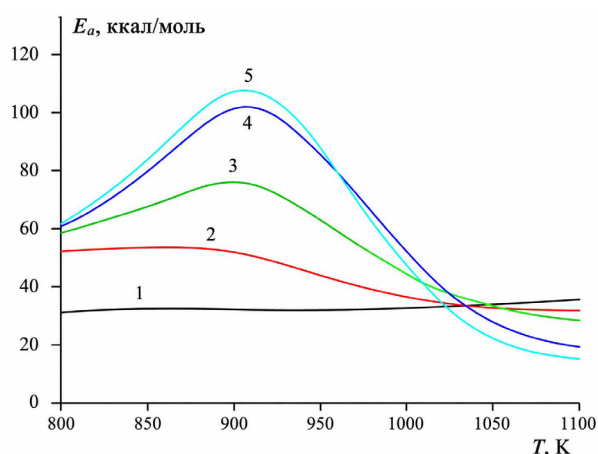


Рис. 2. Температурная зависимость эффективной энергии активации задержки воспламенения стехиометрических смесей $CH_4 - H_2 -$ воздух от температуры при концентрации H_2 : 1 – 0%; 2 – 40%; 3 – 70%; 4 – 90%; 5 – 100%. Давление – 1 атм. Воспроизведено из [14], опубликовано по лицензии CC BY 4.0.

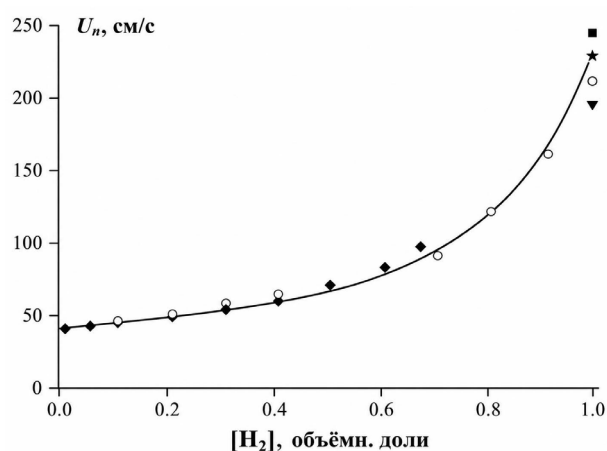


Рис. 3. Зависимость скорости пламени стехиометрических смесей «метан–водород–воздух» от концентрации H_2 при температуре 293 К. Линия – расчетные значения, символы – экспериментальные. Воспроизведено из [12], опубликовано по лицензии CC BY 4.0.

Несмотря на приписываемое ему нулевое значение МЧ, водород имеет достаточно высокое значение ОЧМ = 60 и практически рекордное значение ОЧИ – выше 130 [16] и вполне успешно используется в качестве моторного топлива в ДВС. Это свидетельствует о неадекватности метановой шкалы для характеристики детонационных свойств, по крайней мере, водорода и МВС. Если использование МЧ и допустимо, то исключительно для качественного сопоставления между собой смесей метана с его более тяжелыми гомологами. Если же смесь содержит водород или соединения других классов, то вряд ли можно рассчитывать на адекватную оценку ее характеристик на основе метановой шкалы.

Исследования механизма окисления водорода в области 900 К показали, что необычно высокое различие между ОЧИ и ОЧМ для водорода может быть объяснено изменением роли пероксидных соединений в этом процессе. В режиме малых и средних нагрузок, соответствующих определению ОЧИ, окисление H_2 протекает при относительно низких температурах, при которых распад образующегося пероксида водорода происходит медленно и определяет низкую скорость радикально-цепного процесса. Это объясняет высокую детонационную стойкость водорода в данном режиме (ОЧИ > 130). В режиме высоких нагрузок, соответствующих ОЧМ, окисление водорода протекает при более высоких температурах, при которых увеличиваются и скорость реакции разветвления радикалов в этом процессе, и скорость распада пероксида водорода. Процесс окисления протекает уже в значительно более быстром разветвленно-цепном режиме, которому соответствует значительно более низкое значение ОЧМ, равное 60.

Можно предположить, что нетипичная для традиционных топлив ситуация с метаном, имеющим более высокое ОЧМ (110), чем ОЧИ (107,5), также связана с изменениями в механизме его окисления. Однако в данном случае наблюдается противоположный эффект: в соответствии с особенностями низкотемпературного окисления метана повышение температуры в области 900 К приводит к снижению его реакционной способности и, следовательно, увеличению его детонационной стойкости.

5. Влияние состава на воспламенение синтез-газа

Синтез-газ является основным промежуточным продуктом конверсии не только природных газов, но и различных видов биотоплива, и широко используется в качестве водородосодержащего агента и топлива. Его основными горючими компонентами являются H_2 и CO , большое разнообразие соотношений между которыми в зависимости от источника синтез-газа и определяет его характеристики.

Все современные кинетические механизмы достаточно точно описывают экспериментальные результаты по воспламенению и горению смесей CO и H_2 различного состава для температур выше 1000 К независимо от давления. Но для более низких температур наблюдаются серьезные расхождения с экспериментами. Проведенные авторами исследования показали, что, как и ожидалось, наиболее значительное влияние на воспламенение синтез-газа оказывает концентрация в нем водорода. Влияние концентрации CO и возможных примесей (CO_2 , CH_4 и др.) значительно слабее. Кинетическое моделирование показывает резкое увеличение задержки воспламене-

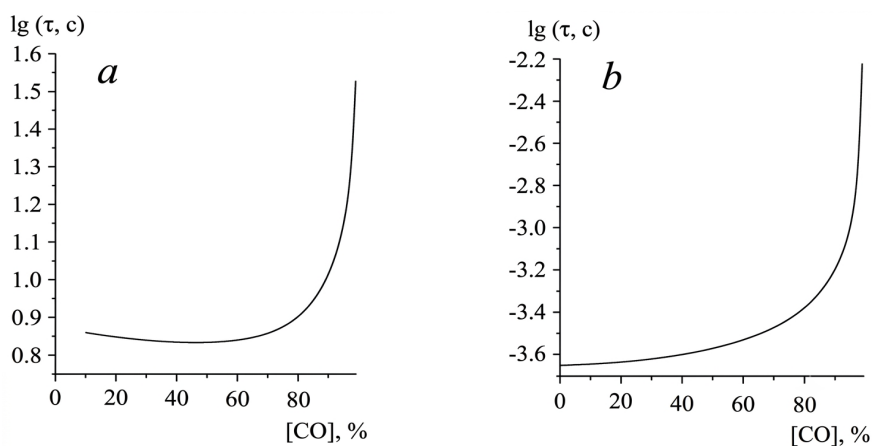


Рис. 4. Зависимость задержки воспламенения стехиометрической смеси синтез-газа с воздухом от его состава для условий бомбы постоянного объема при $P = 1$ атм. (а), $T_0 = 800$ К, (б) $T_0 = 1000$ К.

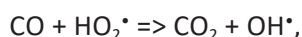
ния при снижении температуры в области ниже 1000 К, связанное с существенными изменениями в этой области механизма окисления водорода. На рис. 4 представлены расчетные зависимости задержки воспламенения синтез-газа в воздухе для условий бомбы постоянного объема ($P = 1$ атм) от его состава для областей более высокой (1000 К) и более низкой (800 К) температуры.

При концентрации СО в синтез-газе почти до 80% эта зависимость достаточно слабая, так как при воспламенении синтез-газа, безусловно, доминирует присутствующий в нем водород и СО оказывает существенное влияние только при условии его очень высокой концентрации. Но интересно то, что если при высокой температуре $T_0 = 1000$ К увеличение концентрации СО с самого начала ингибирует воспламенение (рис. 4b), то при низкой температуре $T_0 = 800$ К увеличение концентрации СО первоначально промотирует процесс воспламенения, сокращая время его задержки (рис. 4a). Это различие связано с изменениями в этой области температур в механизме окисления водорода.

Ингибирующее действие увеличения концентрации СО на воспламенение синтез-газа связано с повышением теплоемкости смеси и его участием в реакции обрыва цепей



В низкотемпературном диапазоне роль СО определяется незначительным промотированием ВЗВ синтез-газа за счет реакции



переводящей малоактивные радикалы $\text{HO}_2^{\bullet}$, фактически приводящие к обрыву цепей, в активные радикалы $\text{OH}^{\bullet}$, продолжающие цепи. Этот эффект

(рис. 4a) превосходит ингибирующее действие повышения теплоемкости смеси при добавке СО и более высокой эффективности СО по сравнению с H_2 как третьего тела в реакциях рекомбинации радикалов. При температуре вблизи 1000 К и выше роль радикалов $\text{HO}_2^{\bullet}$ и, соответственно, данной реакции становится менее значимой, и ингибирующее действие повышения концентрации СО в синтез-газе становится преобладающим (рис. 4b).

Возможные изменения в механизме окисления самого СО при варьировании концентрации водорода в синтез-газе можно исключить из рассмотрения, поскольку в синтез-газе практически любого состава водород присутствует в концентрациях, значительно превышающих необходимую для быстрого окисления СО.

Для этих же значений температуры, относящихся к областям с существенно различающимися механизмами окисления водорода, был проведен расчет влияния давления на задержку воспламенения синтез-газа в диапазоне $P = 1\text{--}40$ атм (рис. 5), представляющим наибольший практический интерес, в том числе для использования синтез-газа в газовых турбинах. Влияние давления рассчитывали для стехиометрической смеси синтез-газа с воздухом при концентрации водорода в синтез газе 60 мол.%.

И в этом случае для различных температурных диапазонов наблюдаются существенные различия. При $T_0 = 800$ К задержка воспламенения монотонно сокращается с ростом давления. Напротив, при $T_0 = 1000$ К и низком давлении наблюдается характерный для этих условий при окислении водорода рост задержки воспламенения с увеличением давления. Лишь при давлениях выше 10 атм его повышение сокращает задержку воспламенения.

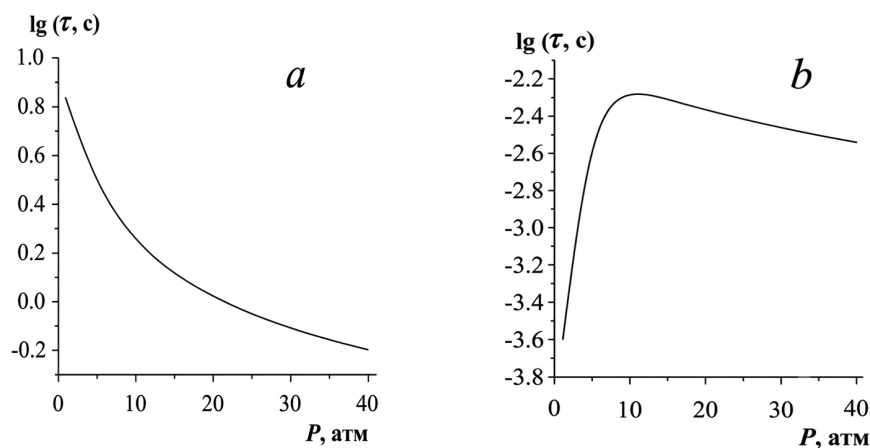


Рис. 5. Зависимость от давления задержки воспламенения синтез-газа состава 60 мол.% H_2 + 40 мол.% СО. Эквивалентное соотношение $\phi = 1.0$; $T_0 = 800$ К (a), $T_0 = 1000$ К (b).

5. Заключение

Состав реальных газомоторных топлив является важнейшим фактором, определяющим их моторные характеристики. Воспламенение топливовоздушных смесей в ДВС происходит в области температур ниже 1000 K, в которой наблюдаются существенные преобразования в механизмах окисления двух важнейших компонентов газовых топлив – метана и водорода, связанные с изменением в них роли пероксидных соединений. Это приводит к сложной зависимости детонационной стойкости газовых топлив от их состава. Несмотря на то, что эта сложная зависимость хорошо описывается современными детальными кинетическими механизмами, практическое определение их детонационной стойкости вызывает серьезные проблемы. Широко используемая в настоящее время для этой цели «метановая шкала» не учитывает существенное различие во влиянии водорода и углеводородов C_{2+} на воспламенение и горение метана – основного компонента газобразных углеводородных топлив – и в силу этого неадекватна для оценки их детонационной стойкости. Необходимы более подходящие инструменты для оперативной оценки детонационной стойкости газовых топлив, отсутствие которых будет сдерживать их практическое применение.

Author Contribution

Kirill Troshin: Investigation, Methodology, Formal Analysis. **Andrey Belyaev:** Software, Formal Analysis, Validation. **Artem Arutyunov:** Investigation, Software, Validation. **Vladimir Arutyunov:** Conceptualization, Formal Analysis, Writing – Original Draft, Writing – Review & Editing, Supervision.

Заявление о конфликте интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

References

- [1]. Natural Gas as a Motor Fuel. Trends and Prospects (2019). Available online: <https://www.autostat.ru/articles/37303/>.
- [2]. S. Verhelst, T. Wallner. Hydrogen-fueled internal combustion engines. *Progress in Energy and Combustion Science* 35 (2009) 490-527. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2009.08.001>.
- [3]. A. Delorme, A. Rousseau, P. Sharer, S. Pagerit, T. Wallner. Evolution of hydrogen-fueled vehicles compared to conventional vehicles from 2010 to 2045. SAE Paper 2009-01-1008 (2009). Available online: <https://saemobilus.sae.org/content/2009-01-1008/>.
- [4]. V.S. Arutyunov. Problems and Challenges of Hydrogen Energy, Combustion and Plasma Chemistry 19 (2021) 245-255. <https://doi.org/10.18321/cpc462>.
- [5]. V.S. Arutyunov. Hydrogen Energy: Importance, Sources, Problems, and Prospects (Review). *Petrochemistry* 62 (2022) 459-470. <https://doi.org/10.1134/S0965544122040065>.
- [6]. I.A. Makaryan, I.V. Sedov, E.A. Salgansky, A.V. Arutyunov, V.S. Arutyunov. A comprehensive review on the prospects of using hydrogen-methane blends: challenges and opportunities. *Energies* 15 (2022) 2265. <https://doi.org/10.3390/en15062265>.
- [7]. M. Leiker, K. Christoph, M. Rankl, W. Cantellieri, U. Pfeifer. Evaluation of anti-knocking property of gaseous fuels by means of methane number and its practical application to gas engines, ASME-72-DGP-4 (1972). Available online: https://jglobal.jst.go.jp/en/detail?JGLOBAL_ID=201602009196798751.
- [8]. G. Palmer. Methane number. *Journal of Natural Gas Engineering* 2 (2017) 134-142. <https://doi.org/10.7569/JNGE.2017.692506>.
- [9]. K.Ya. Troshin, A.V. Nikitin, A.A. Belyaev, A.V. Arutyunov, A.A. Kiryushin, et al. Experimental Determination of Self-Ignition Delay of Mixtures of Methane with Light Alkanes. *Combustion, Explosion, and Shock Waves* 55 (2019) 526-533. <https://doi.org/10.1134/S0010508219050022>.
- [10]. V.S. Arutyunov, K.Ya. Troshin, A.A. Belyaev, A.V. Arutyunov, A.V. Nikitin, et al. Effect of Gas Mixture Composition on the Delay of Their Autoignition and Normal Flame Speed. *Combustion and Plasma Chemistry* 18 (2020) 61-80.
- [11]. V.I. Savchenko, A.V. Ozersky, A.V. Nikitin, I.V. Sedov, V.S. Arutyunov. Regularities of Non-Catalytic Partial Oxidation of C_1 – C_4 Hydrocarbons at Temperatures of 1400-1800 K. *Combustion and Plasma Chemistry* 2 (2026).
- [12]. V.S. Arutyunov, A.V. Arutyunov, A.A. Belyaev, K.Ya. Troshin. Controlled ignition of low-carbon gas engine fuels based on natural gas and hydrogen: kinetics of the process. *Russian Chemical Reviews* 92 (2023) RCR5084. <https://doi.org/10.59761/RCR5084>.
- [13]. V. Arutyunov, K. Troshin, A. Nikitin, A. Belyaev,

- A. Arutyunov, et al. Selective oxycracking of associated petroleum gas into energy fuel in the light of new data on self-ignition delays of methane-alkane compositions, *Chemical Engineering Journal* 381 (2020) 122706. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.122706>.
- [14]. V. Arutyunov, A. Belyaev, A. Arutyunov, K. Troshin, A. Nikitin. Autoignition of methane-hydrogen mixtures below 1000 K. *Processes* 10 (2022) 2177. <https://doi.org/10.3390/pr10112177>.
- [15]. V. Arutyunov, A. Arutyunov, A. Belyaev, L. Strekova. Knock characteristics of gas fuels in the light of the kinetics of hydrogen and methane oxidation, *Eurasian Chemico-Technological Journal* 27 (2025) 21-34. <https://doi.org/10.18321/ectj1653>
- [16]. V.S. Arutyunov, A.V. Arutyunov. On antiknock rating of gas engine fuel, *Gas Industry* 12 (2023) 102-109.
- [17]. V.S. Arutyunov, A.V. Arutyunov, A.A. Belyaev, L.N. Strekova, K.Ya. Troshin. EFFECT OF TRANSITION FROM LOW-TEMPERATURE TO HIGH-TEMPERATURE MECHANISMS OF METHANE AND HYDROGEN OXIDATION ON IGNITION OF GAS MIXTURES CONTAINING THEM, *ГОРЕНИЕ И ВЗРЫВ (МОСКВА) – COMBUSTION AND EXPLOSION* 16 (2023) 3-13. <https://doi.org/10.30826/CE23160401>.
- [18]. V.N. Smirnov, G.A. Shubin, A.V. Arutyunov, P.A. Vlasov, A.A. Zakharov, et al. Low-Temperature Ignition of Concentrated Syngas Mixtures Behind Reflected Shock Waves. *Russian Journal of Physical Chemistry B* 16 (2022) 1092-1101. <https://doi.org/10.1134/S1990793122060112>.

About the authors

K.Ya. Troshin – Researcher, N.N. Semenov FRC CP RAS, Moscow, Russia
e-mail: troshin@chph.ras.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2205-5742>

A.A. Belyaev – Researcher, N.N. Semenov FRC CP RAS, Moscow, Russia
e-mail: belyaevIHF@yandex.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6715-1776>

A.V. Arutyunov – Researcher, N.N. Semenov FRC CP RAS, Moscow, Russia
e-mail: aarutyunovv@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2980-0186>

V.S. Arutyunov – Doctor of Chem.Sci., Prof., Chief Research Scientist, N.N. Semenov FRC CP RAS, Moscow, Russia
E-mail: v_arutyunov@mail.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0339-0297>

The Effect of the Composition of Gas-Engine Fuels on Their Knock Characteristics

K.Ya. Troshin*, A.A. Belyaev, A.V. Arutyunov, V.S. Arutyunov

N.N. Semenov Federal Research Center for Chemical Physics RAS, Kosygina Str., 4, Moscow, Russia

ABSTRACT

The composition of gas engine fuels is the most important factor determining their motor characteristics. Air-fuel mixtures in Internal Combustion Engines ignite at temperatures below 1000 K, in which the oxidation mechanisms of the two most important components of gas fuels, methane and hydrogen, are very different from the mechanisms of their combustion at higher temperatures. These changes are associated with a change in the role of peroxide compounds in them, which leads to a complex dependence of the knock resistance of gas fuels on their composition. Despite the fact that this dependence is well described by modern kinetic mechanisms and can even be calculated based on them, the practical determination of their knock resistance causes serious problems. The currently widely used Methane Number has no theoretical basis and does not take into account significant differences in the effect of hydrogen and C_{2+} hydrocarbons on the ignition and combustion of methane, the main component of gaseous hydrocarbon fuels, and is therefore inadequate for assessing their knock resistance. More appropriate tools are needed for the rapid assessment of the knock resistance of gas fuels, the absence of which will hinder their practical application.

Keywords: natural gas, methane, hydrogen, methane-hydrogen mixtures, ignition delay, octane number, methane number

Газ қозғалтқышы отындарының құрамының олардың детонациялық сипаттамаларына әсері

К.Я. Трошин*, А.А. Беляев, А.В. Арутюнов, В.С. Арутюнов

Н.Н. Семенов ат. РХА химиялық физикасының федералды ғылыми-зерттеу орталығы, Косыгина к., 4, Мәскеу, Ресей

АННОТАЦИЯ

Газ қозғалтқышы отындарының құрамы олардың қозғалтқыш сипаттамаларын анықтайтын ең маңызды фактор болып табылады. Іштен жанатын қозғалтқыштардағы ауа-отын қоспалары 1000 К-ден төмен температурада тұтанады, онда газ отындарының екі маңызды компонентінің – метан мен сутегінің тотығу механизмдері жоғары температурадағы жану механизмдерінен өте ерекшеленеді. Бұл өзгерістер олардағы асқын тотық қосылыстарының рөлінің өзгеруімен байланысты, бұл газ отындарының детонацияға төзімділігінің олардың құрамына күрделі тәуелділігіне әкеледі. Бұл тәуелділік қазіргі заманғы кинетикалық механизмдермен жақсы сипатталғанына және тіпті солардың негізінде есептелуі мүмкін екеніне қарамастан, олардың детонацияға төзімділігін практикалық анықтау күрделі мәселелер тудырады. Қазіргі уақытта кеңінен қолданылатын метан санының теориялық негізі жоқ және газ тәрізді көмірсутек отындарының негізгі компоненті – метанның тұтануы мен жануына сутегі мен C_{2+} көмірсутектерінің әсеріндегі айтарлықтай айырмашылықтарды ескермейді, сондықтан олардың детонацияға төзімділігін бағалау үшін жеткіліксіз. Газ отындарының детонацияға төзімділігін тез бағалау үшін тиісті құралдар қажет, олардың болмауы оларды практикалық қолдануға кедергі келтіреді.

Түйін сөздер: табиғи газ, метан, сутегі, метан-сутегі қоспалары, тұтанудың кідірісі, октан саны, метан саны