

Таким образом, только при соблюдении кратности отношения между параметрами режима вибронакатывания S и $2A$ параметр F_n будет однозначно описывать микрогеометрию созданного регулярного микрорельефа.

Литература:

1. Шнейдер Ю.Г. Эксплуатационные свойства деталей с регулярными микрорельефами. – Л.: Машиностроение, 1982.
2. ГОСТ 24773-81 Поверхности с регулярным микрорельефом. Классификация, параметры и характеристики.
3. Шнейдер Ю.Г. Технология финишной обработки давлением. Справочник – СПб.: Политехника, 1998.
4. Кабатов А.А. Анализ финишных методов обработки поверхностным пластическим деформированием // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии. – 2013. – №58. – С44-54.
5. Таламанов В.Н., Козенкова Г.Л., Катрюк И.С. Оптимизация режимов вибронакатывания регулярных микрорельефов. // Материалы II-ой национальной научно-практической конференции. – Новороссийск. РИО ФГБОУ ВО «ГМУ имени адмирала Ф.Ф. Ушакова», 2018.
6. Епихин А.И., Кондратьев С.И., Хекерт Е.В. Прогнозирование многомерных нестационарных временных рядов с использованием нейромоделирования // Морские интеллектуальные технологии. – 2020. – № 4-4 (50). – С. 23-27.
7. Кондратьев С.И. Максимизация надежности процессов в условиях межсистемных взаимодействий с не вполне определенными параметрами [Текст] / С.И. Кондратьев, А.П. Лицкевич В сборнике: Стратегия развития транспортно-логистической системы Азово-Черноморского бассейна. Проблемы безопасности морского судоходства, технической и коммерческой эксплуатации морского транспорта Материалы 1-й международной научно-технической и 6-й региональной научно-технической конференции. Ответственные за выпуск: академик РАТ, д.т.н., проф. В.В.Демьянов, академик РАТ, д.э.н., проф. В.Е.Держинский,

2007.– С. 204-207.

References

1. SHnejder YU.G. Ekspluatacionnye svojstva detalej s reguljarnymi mikrorel'efami. L.: Mashinostroenie, 1982.
2. GOST 24773-81 Poverhnosti s reguljarnym mikrorel'efom. Klassifikaciya, parametry i harakteristiki.
3. SHnejder YU.G. Tekhnologiya finishnoj obrabotki davleniem. Spravochnik – SPb.: Politehnika, 1998.
4. Kabatov A.A. Analiz finishnyh metodov obrabotki poverhnostnym plasticheskim deformirovaniem // Otkrytye informacionnye i komp'yuternye integrirovannye tekhnologii. 2013 №58-S44-54
5. Talamanov V.N., Kozenkova G.L., Katryuk I.S. Optimizaciya rezhimov vibronakatyvaniya reguljarnyh mikrorel'efov. Materialy II-oj nacional'noj nauchno-prakticheskoj konferencii. Novorossijsk. RIO FGBOU VO «GMU imeni admirala F.F. Ushakova», 2018 g.
6. Ephin A.I., Kondrat'ev S.I., Hekert E.V. Prognozirovaniye mnogomernyh nestacionarnyh vremennyh ryadov s ispol'zovaniem nejromodelirovaniya // Morskie intellektual'nye tekhnologii. 2020. № 4-4 (50). S. 23-27.
7. Kondrat'ev S.I. Maksimizaciya nadezhnosti processov v usloviyah mezhsistemnyh vzaimodejstvij s ne vpolne opredelennymi parametrami [Tekst] / S.I. Kondrat'ev, A.P. Lickevich V sbornike: Strategiya razvitiya transportno-logisticheskoj sistemy Azovo-CHernomorskogo bassejna. Problemy bezopasnosti morskogo sudohodstva, tekhnicheskoy i kommercheskoj ekspluatcii morskogo transporta Materialy 1-j mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoy i 6-j regional'noj nauchno-tekhnicheskoy konferencii. Otvetstvennye za vypusk: akademik RAT, d.t.n., prof. V.V.Dem'yanov, akademik RAT, d.e.n., prof. V.E.Deruzhinskij. 2007. S. 204-207.

УДК 629.5.015

DOI: 10.34046/aumsuomt99/18

ПРОЦЕСС СГОРАНИЯ ТОПЛИВА. ОСОБЕННОСТИ ГАЗООБРАЗНОГО ТОПЛИВА

В.А. Башкатов

А.В.Игнатенко,

С.А.Худяков, доктор технических наук, профессор

Появление на судах морского флота двигателей с двухтопливной (газ/жидкое топливо) привело к необходимости изучения и исследования процесса сгорания газообразного топлива в таких двигателях. Этот факт дает возможность создания тепловых расчетов подобных машин. Статья посвящена рассмотрению классических и современных теорий сгорания топлива. Рассмотрены цепные реакции горения, их виды на примере простейших реакций каждого вида. Оценено влияние температуры смеси на скорость сгорания топлива. Отдельно рассмотрены проблемы воспламенения и сгорания газообразного топлива

Ключевые слова: топливо, горение, цепные реакции, скорость сгорания, смесь, газообразное топливо, детонация

THE PROCESS OF FUEL COMBUSTION. FEATURES OF GASEOUS FUEL

V. A. Bashkatov, A.V. Ignatenko, S. A. Khudyakov

Appearing of dual-fuel engines on marine fleet vessels leads to necessity of researching of gas combustion process. This fact allows creation of thermal calculation in such engines. The article is focused on review of classical and modern theories of fuel combustion. Chain reactions were analyzed, based on examples of the simplest reactions of each type. Influence of fuel mixture temperature on combustion velocity was accessed. Problems of ignition and combustion of gas fuel were reviewed as well.

Keywords: fuel, combustion, chain reactions, combustion velocity, fuel mixture, gas fuel, detonation.

Рассмотрение задач воспламенения и сгорания смеси газа и воздуха в двигателе, а также экологических задач, невозможно без учета химических превращений вещества. При этом существуют два подхода. Первый связан с расчетом скорости химической реакции либо в макрокинетическом приближении (глобальной кинетики), либо в микрокинетическом приближении (детальной кинетики) [1]. А второй – с термодинамическим расчетом состояния химического равновесия на основе закона действующих масс, когда при изменении внешних условий (температуры или давления) равновесие смещается в соответствии с принципом Ле-Шателье-Брауна. Рассмотрение процесса на основе химического равновесия возможно только в квазистационарном приближении (когда достаточно времени для установления равновесия, то есть при достаточно высоких температурах). На современном этапе науки о горении все больше исследователей используют микрокинетический подход для описания химических превращений (несмотря на сложности, связанные с большим числом уравнений детальной кинетики и отсутствием сокращенных кинетических схем, а также на отсутствие в научной литературе численных значений некоторых кинетических констант).

Важной особенностью рассматриваемых процессов воспламенения и горения в ограниченных объемах и камерх сгорания ДВС является принципиальная многозонность, связанная с наличием градиентов концентрации, давления и температуры. Результаты исследования самовоспламенения смеси перед фронтом пламени в закрытом сосуде и модель процесса самовоспламенения смеси при адиабатическом сжатии положены в основу разработки современных математических моделей для расчета задержки воспламенения топлива в дизелях и газодизелях.

Согласно закону действующих масс и закону Аррениуса [2], [3] скорость химической реакции $a + b \leftrightarrow c + d$, где a, b, c и d – концентрации исходных и конечных продуктов $\frac{\text{моль}}{\text{см}^3}$, определяют из выражения

$$\frac{dc}{dt} = k \cdot a^a \cdot b^b \cdot e^{-\frac{E}{RT}} \quad (1)$$

где E – энергия активации, $\frac{\text{ккал}}{\text{г} \cdot \text{моль}}$;

τ – время, с;

R – газовая постоянная, равная $1,985 \frac{\text{ккал}}{\text{г} \cdot \text{моль} \cdot \text{К}}$;

T – температура, К

k – константа, определяемая свойствами реагентов, а также условиями, в которых протекает реакция, в частности давлением и температурой.

Закон Аррениуса указывает на весьма существенное влияние температуры на скорость реакции. Уравнение (1), как и законы, им отражаемые, основано на рассмотрении химической реакции как процесса взаимодействия (соударения) активированных (т. е. обладающих достаточно высокой энергией) молекул исходных веществ, в результате которого образуются молекулы конечных продуктов (окислов).

В основе же более современной теории цепных реакций [4], лежит утверждение, что превращение исходных веществ в конечные, в процессе реакции, проходит через ряд стадий, на протяжении которых образуются промежуточные химически активные вещества. В процессе цепной реакции возникают свободные атомы, радикалы и другие неустойчивые промежуточные соединения, обладающие повышенной химической активностью – активные центры. Промежуточными химически активными реагентами являются радикалы с одной (монорадикалы) или с двумя (бирадикалы) свободными валентностями. Реагируя с исходным веществом, активные центры образуют конечные продукты реакции и новые активные промежуточные центры.

Цепной характер реакции определяется тем, что при взаимодействии активной частицы с молекулой исходного вещества образуется одна (неразветвленная цепная реакция) или несколько (разветвленная цепная реакция) новых частиц. Огромную роль в процессе горения играет скорость протекания реакций. Для одного и того же состава горючей смеси и прочих условиях её под-

готовки, а также воспламенения, скорость протекания реакции зависит в первую очередь от температуры.

Итак, рассмотрим для начала механизм протекания реакции сгорания, а затем оценим влияние температуры на скорость протекания.

Начальный процесс образования активных центров из исходных веществ называется зарождением цепи. Этот процесс всегда идет с поглощением энергии, т.е. является эндотермическим. Разветвление цепи происходит в результате реагирования активного центра с исходным веществом, в результате чего образуется несколько активных центров. Под обрывом цепи понимают процесс, при котором активный продукт исчезает.

Если скорость разветвления больше скорости обрыва, то происходит развитие цепной реакции. Если скорость обрыва больше, чем скорость разветвления, то реакция не идет. Цепная реакция с разветвляющимися цепями характеризуется образованием нескольких активных центров (взамен израсходованного), что приводит к значительному ускорению реакции. К обрыву цепи может привести столкновение активных центров между собой, с молекулами инертного вещества, со стенкой цилиндра, топкой или теплообменника.

Наиболее простым является механизм реакции окисления (горения) водорода, а наиболее сложным – окисление углеводородов.

Сгорание водорода в смеси с кислородом $2H_2 + O_2 \rightarrow 2H_2O + Q$ относится к цепной реакции с разветвляющимися цепями и состоит из элементарных стадий, описанных ниже.

Начальной стадией этой реакции является термическая диссоциация молекулы H_2 на два активных атома H или взаимодействие двух достаточно энергетически активированных молекул H_2 и O_2 , в результате которого образуется два монорадикала OH . Далее следуют элементарные реакции с участием указанных монорадикалов H и OH , а также образующихся в ходе процесса бирадикалов \dot{O} . Общее описание основной цепи реакций следующее:

1. $H_2 + O_2 \rightarrow H + H_2O$ – зарождение цепи
2. $H + O_2 \rightarrow OH + \dot{O}$ – разветвление цепи
3. $\dot{O} + H_2 \rightarrow OH + H$ – продолжение цепи
4. $OH + H_2 \rightarrow H_2O + H$ – продолжение цепи
5. $H + \text{стенка} \rightarrow \frac{1}{2}H_2$ – обрыв цепи на стенке
6. $2H + O_2 \rightarrow H_2O + O$ – обрыв цепи в объеме

Примером слаборазветвленной цепи реакций может служить окисление метана $CH_4 + 2O_2 \rightarrow CO_2 + 2H_2O + Q$, схема которой

может быть представлена следующей цепью элементарных реакций:

1. $H + O_2 \rightarrow OH + O$
2. $CH_4 + OH \rightarrow CH_3 + H_2O$ – зарождение цепи
3. $CH_4 + O \rightarrow CH_2 + H_2O$ – зарождение цепи
4. $CH_3 + O_2 \rightarrow HCHO + OH$ – разветвление цепи
5. $CH_2 + O_2 \rightarrow HCHO + O$ – разветвление цепи
6. $HCHO + OH \rightarrow HCO + H_2O$ – продолжение цепи
7. $HCHO + O \rightarrow CO + H_2O$ – продолжение цепи
8. $HCO + O_2 \rightarrow CO + O + OH$ – продолжение цепи
9. $CO + O \rightarrow CO_2$ – обрыв цепи
10. $CO + OH \rightarrow CO_2 + H$ – обрыв цепи

Итог единичного цикла: $2CH_4 + 4O_2 \rightarrow 2CO_2 + 4H_2O + Q$

Начальная стадия этой реакции представляет собой соударение двух активированных молекул CH_4 и O_2 , в результате которого образуются два монорадикала CH_3 и CH_2 , дающие начало дальнейшим элементарным стадиям. В ходе этих стадий образуются и взаимодействуют радикалы OH и HCO , а также менее активные, но химически неустойчивые промежуточные продукты $HCHO$ (формальдегид) и H_2O_2 (перекись водорода).

На стадии 6 образуется молекула CO , которая окисляется в ходе следующей цепной реакции:

1. $CO + OH \rightarrow CO_2 + H$
2. $H + O_2 \rightarrow OH + \dot{O}$
3. $CO + \dot{O} \rightarrow CO_2$

Как показывает приведенная схема, окисление CO может происходить только в присутствии водяного пара или водорода. Это вызвано развитием цепей с участием свободных радикалов OH и H . Реакция окисления метана является весьма слабо разветвленной – лишь в одной из элементарных стадий (четвертой) образуются две активные частицы, во всех остальных воспроизводится одна активная частица.

Окисление других более тяжелых углеводородов осуществляется по значительно более сложной цепной реакции. Скорость такой реакции обуславливается взаимодействием размножения и гибели (рекомбинация активных частиц и обрыв цепей) активных центров.

Скорость цепных реакций очень чувствительна к посторонним примесям и к форме сосуда. Влияние температуры достаточно хорошо просматривается при рассмотрении горения горючей смеси в закрытом сосуде. В обычной постановке задачи о сгорании гомогенной газовой смеси в закрытом сосуде постоянного объема

предполагается, что скорость химической реакции в свежей смеси равна нулю при начальной температуре и в процессе горения. Однако, весьма высокие значения температур и давлений, достигаемые при горении, позволяют в определенных условиях допустить возможность протекания заметной химической реакции и развития теплового самовоспламенения смеси перед фронтом пламени. Таким образом, можно наблюдать ускоряющееся прогревание горючего вещества и соответствующее увеличение скорости протекания реакции. Согласно правилу Вант-Гоффа, при повышении температуры на каждые 10°C , скорость реакции возрастает в 2–4 раза.

Представления о цепном и тепловом (по Аррениусу) механизмах реакции не противоречат, а дополняют друг друга. Как было показано при рассмотрении цепной реакции, ее первичной стадией является взаимодействие активированных (по Аррениусу) молекул топлива и окислителя. Результатом этого столкновения являются не конечные продукты реакции, а промежуточные нестойкие соединения. Далее начнет действовать цепной механизм реакции.

Исследования показали, что сгорание углеводородов обычно носит комбинированный цепочно-тепловой характер. В начальной стадии, протекающей при сравнительно низкой температуре по цепному механизму, происходит накопление перекисей до определенной концентрации, при которой наступает их спонтанный распад. Продуктом распада перекисей являются альдегиды и в некоторой мере окись углерода. Распад перекисей сопровождается явлением холодного пламени, при котором наблюдается незначительное повышение давления и температуры (около 100°C). В холодном пламени выделяется лишь 5–10% теплоты сгорания топлива. Свечение холодного пламени вызвано хемилюминисценцией.

Вслед за холодным пламенем при соответствующих условиях возникает голубое пламя, которое по своей химической природе сходно с холодным пламенем, но отличается значительно большим выделением тепла. В голубом пламени выделяется около 40% теплоты полного сгорания топлива; повышение температуры и давления достигает значительной величины. Голубое пламя приводит к накоплению продуктов неполного сгорания и активных частиц. Разогрев смеси и высокая концентрация активных частиц создают условия для резкого теплового ускорения сгорания, в результате которого возникает горячее

пламя и выделяется основная доля теплоты сгорания топлива при его окислении до конечных продуктов сгорания.

Процесс многостадийного воспламенения начинается обычно при сравнительно низких температурах, поэтому он получил название низкотемпературного воспламенения. Однако А. С. Соколик [5] показал неточность такого термина, так как при некоторых условиях, например, больших давлениях, многостадийное воспламенение происходит при высокой температуре. Это уточнение является особенно важным применительно к воспламенению в двигателях, где возникают подобные условия. Существенно также замечание А. С. Соколика о том, что при высоких температурах и давлениях многостадийность процесса воспламенения наблюдается не столь четко, как при низких давлениях и температурах, так как периоды задержки в первом случае резко сокращаются.

Не все топлива воспламеняются по многостадийному механизму. Для CH_4 , H_2 и CO наблюдается лишь так называемое высокотемпературное одностадийное воспламенение, при котором отсутствует стадия холодного пламени. Однако и в этом случае имеет место голубое пламя, возникающее после предварительной химической подготовки смеси в результате саморазгоняющейся цепной реакции. Даже при воспламенении водорода можно выделить температурную «ступеньку», хотя температура голубого пламени всего лишь на 10°C ниже температуры горячего пламени. При высокотемпературном воспламенении практически невозможно провести границу между цепным и тепловым саморазгоном реакции, поэтому его принято называть одностадийным.

Отмечая решающее влияние теплового ускорения сгорания в его завершающей стадии, не следует недооценивать значение так называемой низкотемпературной стадии, в процессе которой реагирующая смесь горючего и окислителя проходит химическую активацию, имеющую важное значение для сгорания в двигателе. На рисунке 1 показаны результаты эксперимента, специально поставленного для выявления низкотемпературных процессов при сжатии газозвушной смеси в двигателе. Коленчатый вал двухтактного двигателя с высокой степенью сжатия ($\epsilon=14$) приводился во вращение без зажигания с подачей в начале сжатия азота или смеси метана, бутана и пропана. Линия сжатия газозвушной смеси лежит ниже, чем азотновоздушной, что является следствием меньшего значения показателя адиа-

баты для CH_4 и C_4H_{10} , чем для N_2 . Линия расширения газовой смеси лежит выше, чем азотно-воздушной, что свидетельствует о выделении некоторой энергии при сжатии газовой смеси, являющемся результатом низкотемпературных химических реакций.

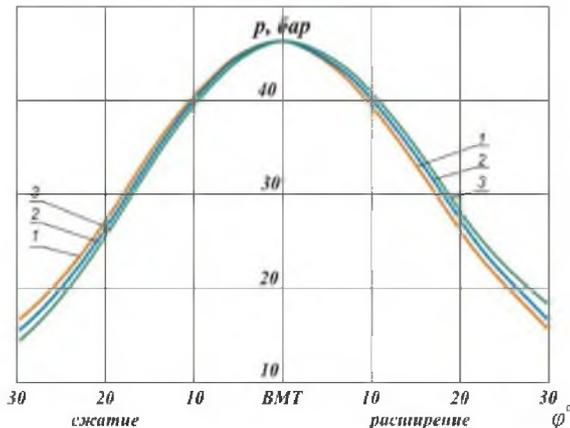


Рисунок 1 – Диаграмма сжатия-расширения различных газов в двигателе: 1 – азота; 2 – природного газа; 3 – бутано-пропановой смеси

Такие процессы интенсивно протекают в той части смеси, которая сгорает в последнюю очередь и подвергается дополнительному сжатию ранее сгоревшей смесью. Особо важную роль они играют при воспламенении жидкого топлива в газодизеле.

Скорость цепочно-тепловой реакции сгорания, как показали опыты, может быть выражена уравнением (1). При этом энергию активации E и последовательность реакций следует рассматривать как некоторые условные величины, характеризующие зависимость суммарной скорости реакции от температуры.

Часто сложную реакцию делят на несколько стадий, описывая их приближенными уравнениями, подобными (1). Так, на основе исследования окисления метана в изотермических условиях при температурах 750-1000°C было предложено общее описание этой реакции, разделенное на две макростадии.

Первая стадия – это окисление CH_4 до CO ; а вторая – окисление CO в CO_2 . По эмпирическим данным Г. И. Скачкова [6] скорость превращения на первой стадии

$$\left(\frac{dc}{d\tau}\right)_{CO} = 7 \cdot 10^8 \frac{(CH_4)^{-0.5} (O_2)^{1.5}}{T} e^{-\frac{60\,000}{RT}} \quad (2)$$

Это выражение (в скобках даны концентрации соответствующих веществ) свидетельствует о сильном влиянии концентрации O_2 на скорость образования CO . Отрицательный порядок реакции по CH_4 показывает, что CH_4 тормозит свое

собственное превращение в CO . Для второй макростадии окисления CH_4 Г. И. Козловым предложено эмпирическое выражение

$$\left(\frac{dc}{d\tau}\right)_{CO_2} = 1,04 \cdot 10^{12} \frac{(CO)(O_2)^{0.25} (H_2O)^{0.5}}{T^{2.5}} e^{-\frac{32\,000}{RT}} \quad (3)$$

Малый порядок этой реакции по O_2 показывает, что ее скорость практически не зависит от концентрации O_2 . Предложенное выражение действительно лишь при содержании кислорода в смеси, превышающем 5%.

Расчеты по формуле (3) показывают, что влияние температуры на скорость двух макростадий реакции имеет различный характер. При температурах до 1500°C скорость реакции на первой стадии меньше скорости реакции на второй стадии, а при температурах выше 1500°C скорость реакции на второй стадии становится больше, чем на первой стадии. Следовательно, имеется определенный температурный барьер (в данном случае при $t_{кр} \approx 1500^\circ C$), по одну сторону которого лимитирующей является скорость на одной стадии, а по другую сторону – на другой.

Следовательно, при $t > t_{кр}$, т. е. при скорости окисления CO , меньшей скорости его образования, условия протекания суммарной реакции сгорания CH_4 благоприятны. В зоне реакции происходит накопление CO , скорость окисления которого при этих температурах, хотя и лимитирует суммарную реакцию сгорания, но достаточно велика. При $t < t_{кр}$ реакция окисления CO становится более быстрой, чем превращение CH_4 в CO . Накопления CO в зоне реакции не будет и скорость суммарной реакции понизится.

Рассмотрение процесса протекания химической реакции горения в условиях камеры сгорания двигателя выявило, что природа протекания реакции, является комплексной и многостадийной. Каждой из стадий присущ свой принцип протекания, а именно первичной стадией является взаимодействие активированных молекул топлива и окислителя. Результатом этого столкновения являются не конечные продукты реакции, а промежуточные нестойкие соединения. Далее начнет действовать цепной механизм реакции.

Анализируя вышесказанное, можно установить некоторые особенности работы двухтопливных дизелей и объяснить необходимость использования запального топлива [7, 8, 9].

Нереальность реализации одностадийной модели горения газобразных углеводородов в камере сгорания с образованием конечных продуктов объясняется тем, что для протекания таких реакций требуется, одновременное и масштабное

изменение всех химических связей в трех сталкивающихся молекулах с преодолением больших энергетических барьеров с образованием новых связей. Кроме того, поскольку молекула O_2 имеет неспаренные электроны, то реакции ее участием, приводящие к образованию устойчивых конечных продуктов (вода и углекислый газ) значительно затруднены в результате нарушения суммарного спинового момента [10].

Столкновение двух молекул происходит на много порядков чаще столкновений трех молекул. Также и реакции в таких столкновениях между исходными молекулами намного быстрее, чем рассмотренные выше. Однако же, и эти реакции протекают с слишком малой скоростью, недостаточной для горения газов в силу очень больших энергий активации и, значит, крайне малых констант скорости, присущих таким реакциям. Например, энергии активации реакций водорода, простейших углеводородов, в том числе метана, этана, этилена непосредственно с O_2 больше $200 \frac{\text{кДж}}{\text{моль}}$ [11–13]. Предэкспоненциальные же множители констант скорости не превышают частоту двойных столкновений, равную $\approx 6,1013 \frac{\text{см}^3}{\text{моль} \cdot \text{с}}$ при единичной концентрации. При высоких давлениях характерных для камер сгорания ДВС времена протеканий таких реакций намного больше времени теплоотвода. Это, в свою очередь, указывает на невозможность заметного саморазогрева смеси. Что объясняется уравнением кинетики реакции второго кинетического порядка

$$\frac{1}{c} = \frac{1}{c_0} + kt \quad (4)$$

где c и c_0 – начальная и текущая концентрации;
 k – константа скорости;
 t – продолжительность реакции.

Данное уравнение (4) характерно для стехиометрической смеси. Например для указанной выше энергии активации при 900К соответствует константа скорости, равная $\approx 9,6 \frac{\text{см}^3}{\text{моль} \cdot \text{с}}$. При таких значениях для расходования 2% стехиометрической смеси метана (9,1% CH_4 в воздухе) при 900К и 1 бар по требуется около 5 минут. Это время в сотни раз больше, чем время теплоотвода из реакторов обычных экспериментов, как это показывает простой расчет по формуле Эйнштейна–Смолюховского [14,15]:

$$t_T = \frac{x^2}{2\chi} \quad (5)$$

где x – характерный линейный размер реактора;
 χ – коэффициент температуропроводности газовой смеси;

Значительное превышение времени реакции над соответствующим временем теплоотвода означает, что при такой реакции саморазогрев смеси практически отсутствует. На рисунке 2 показаны графики функций отношения констант скоростей в зависимости от энергии активации воспламенения. Из этого рисунка очевидно, что при больших энергиях активации и, значит, малых величинах констант скорости, очень слабой является также температурная зависимость их абсолютной величины.

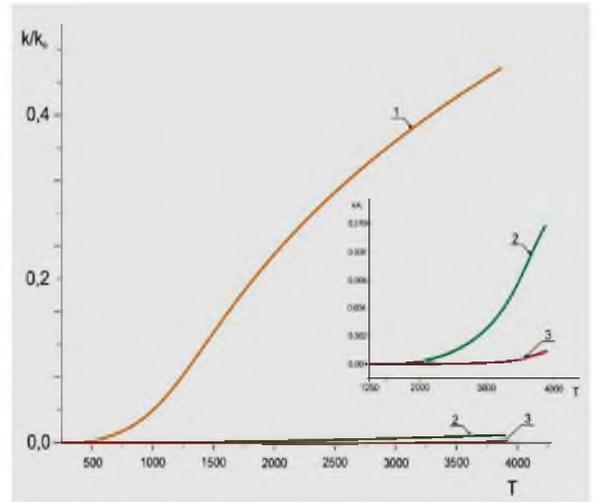


Рисунок 2 – Графики функции $\frac{k}{k_0} = e^{-\frac{E}{RT}}$ при значениях энергии активации, равных: (кДж/моль): 1 – 25; 2 – 150; 3 – 225

Поэтому очень слабым окажется также тепловое самоускорение реакции. Очевидно, что при молекулярном механизме реакции воспламенение не может происходить также при разогреве смеси внешним источником. Таким образом, очень малые величины констант скорости межмолекулярных реакций и малая абсолютная величина их роста с температурой исключают выполнение условия воспламенения газов (тепловыделение больше, чем теплоотвод). В работах Азатьяна В.В. [3,16] было четко установлено только в ходе цепной лавины, и как следствие увеличения саморазогрева системы возможны распространение пламени, взрыв и детонация газов. Таким образом в газах распространение пламени происходит путем послынного воспламенения при передаче тепла от из воспламенившейся зоны к еще не нагретой прилегающей зоне. Однако же условием такого распространения является наличие свободных атомов.

При межмолекулярных реакциях даже после сильного местного подвода источника тепла

(например зажигание запального топлива в камере сгорания), тепло быстро рассеивается и воспламенение прекращается

Из очень малых скоростей газозафазных межмолекулярных реакций следует, что схема теплового воспламенения может быть отнесена только к конденсированной реакционной системе, где концентрации в тысячи раз выше и, значит, частота бинарных столкновений на шесть порядков больше. В газовой же фазе условия воспламенения газов могут реализоваться только благодаря большим величинам констант скорости чередующихся реакций свободных атомов и радикалов в цепном процессе.

Таким образом можно подытожить, что горение жидких топлив и газовых различно на молекулярном уровне и привычные законы, работающие в конденсационных системах не применимы к газам. При выполнении задач воспламенения газов следует в первую очередь выполнить задачу по запуску цепной реакции воспламенения путем обеспечения необходимого давления, температуры и состава смеси в камере сгорания двигателя.

Литература

1. Леванов А.В. Макрокинетические задачи в общем курсе физической химии. – М., 2016. – 34 с
2. Бараков, А.В. Основы практической теории горения: учебное пособие/ А.В. Бараков, В.Ю. Дубанин, Д.А. Прутских. – Воронеж: ФГБОУ ВПО «Воронежский государственный технический университет», 2009. – 122 с.
3. Азатян В.В. Цепные реакции горения, взрыва и детонации в газах. Химические методы управления: монография.– М.: Объединенный институт высоких температур РАН, Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения РАН, 2020. – 360 с.
4. Расчет горения газообразного топлива. Методические указания к курсу «Теплотехника». – Алматы.– Минвуз Казахской ССР, 1983. – 32с.
5. Соколик А.С. Самовоспламенение, пламя и детонация в газах /А.С. Соколик. – М.: АН СССР, 1960. – 427с.
6. Скачков Г.И. Диссертация на тему «Кинетическое моделирование непротитированного и протитированного воспламенения горючих газов», Глава 5 /Г.И. Скачков. - М.:АН СССР, 1984. – 320 с.
7. Худяков С.А. Игнатенко А.В. Современные судовые малооборотные дизельные двигатели: состояние, перспективы и проблемы // Эксплуатация морского транспорта.- 2020.– № 1. – С. 143-154.
8. Худяков С.А., Башкатов В.А. Актуальность проблемы использования газа в качестве судового топлива //Материалы Междунар. НТК «Комплексные проблемы текущего состояния транспортного комплекса», 2020. – Новороссийск, ГМУ им.адм. Ф.Ф. Ушакова. – С. 178-181.
9. Худяков С.А., Башкатов В.А. Анализ конструкции газовой топливной системы двигателя 6S50ME-GI //Эксплуатация морского транспорта, 2020.– № 1 (94). – С. 121-126.
10. Кондратьев В.Н., Никитин Е.Е. Химические процессы в газах.– М.: Наука, 1981.– 262 с.
11. Michael J.V., Sutherland J.W., Harding L.B., Wagner A.F. // Proc. Comb. Inst. 2000. Vol. 28. P. 1471.
12. Baulch D.L., C.T. Bowman, Cobos C.J. at al. // Journal of Physical and Chemical Reference Data. 2005. Vol. 34. N 3. P. 757.
13. Harding L., Klipperstain S.J. // Comb. Flame. 2007. Vol. 149. N ½. P. 104.
14. Сивухин Д.В. Общий курс физики.– М.: Наука, 1979. Т. 2.– 551 с.
15. Ландау Л.Д., Ахеизер А.И., Лифшиц Е.М. Механика, Молекулярная физика. 2014. –М.; 379 с.
16. Азатян В.В. Цепные реакции в горении, взрыве и детонации газов. –М.; 2017. Изд. РАН. 448 с.

References

1. Levanov A.V. Makrokineticheskie zadachi v obshchem kurse fizicheskoy himii – Moskva, 2016. 34 s
2. 1. Barakov, A.V. Osnovy prakticheskoy teorii goreniya: uchebnoe posobie/ A.V. Barakov, V.YU. Dubanin, D.A. Prutskih. – Voronezh: FGBOU VPO «Voronezhskij gosudarstvennyj tekhnicheskij universitet», 2009. – 122 s.
3. Azatyan V.V. Cerpnye reakcii goreniya, vzryva i detonacii v gazah. Himicheskie metody upravleniya. Monografiya/ Moskva, Ob"edinennyj institut vysokih temperatur RAN, Institut strukturoj makrokinetiki i problem materialovedeniya RAN, – 2020 – 360 s.
4. Raschet goreniya gazoobraznogo topliva. Metodicheskie ukazaniya k kursu «Teplotekhnika». – Almaty.: Minvuz Kazahskoj SSR, 1983. – 32s.
5. Sokolik A.S. Samovosplamenenie, plama i detonacija v gazah /A.S. Sokolik. – M.:AN SSSR, 1960. – 427s.
6. Skachkov G.I. Dissertaciya na temu «Kineticheskoe modelirovanie nepromotirovannogo i promotirovannogo vosplameneniya goryuchih gazov», Glava 5 /G.I. Skachkov - M.:AN SSSR, 1984. – 320s.
7. Hudyakov S.A. Ignatenko A.V. Sovremennye sudovye malooborotnye dizel'nye dvigateli: sostoyanie, perspektivy i problemy / Ekspluataciya morskogo transporta, № 1 , 2020. – Novorossijsk, GMU im. adm. F.F. Ushakova. – S. 143-154.
8. Hudyakov S.A., Bashkatov V.A. Aktual'nost' problemy ispol'zovaniya gaza v kachestve sudovogo topliva Materialy Mezhdunar. NTK «Kompleksnye problemy tekushchego sostoyaniya transportnogo kompleksa», 2020. – Novorossijsk, GMU im.adm. F.F. Ushakova. – S. 178-181
9. Hudyakov S.A., Bashkatov V.A. Analiz konstrukcii gazovoj toplivnoj sistemy dvigatelya 6S50ME-GI

- Ekspluatatsiya morskogo transporta, № 1 (94), 2020.
– Novorossiysk, GMU im. adm. F.F. Ushakova. – S. 121-126.
10. 8. Kondrat'ev V.N., Nikitin E.E. Himicheskie processy v gazah. M.: Nauka, 1981. 262 s.
11. Michael J.V., Sutherland J.W., Harding L.B., Wagner A.F. // Proc. Comb. Inst. 2000. Vol. 28. P. 1471.
12. Baulch D.L., C.T. Bowman, Cobos C.J. et al. // Journal of Physical and Chemical Reference Data. 2005. Vol. 34. N 3. P. 757.
13. Harding L., Klipperstain S.J. // Comb. Flame. 2007. Vol. 149. N ½. P. 104.
14. Sivuhin D.V. Obshchij kurs fiziki. M.; 1979. T. 2. Nauka. 551 s.
15. Landau L.D., Aheizer A.I., Lifshic E.M. Mekhanika, Molekulyarnaya fizika. 2014. M.; 379 s.
16. Azatyan V.V. Sernye reakcii v gorenii, vzryve i detonacii gazov. M.; 2017. Izd. RAN. 448 s.