

УДК 544.452, 53.097

ВЛИЯНИЕ МОМЕНТА ИНИЦИАЦИИ ВЫСОКОЧАСТОТНОГО КОРОННОГО РАЗРЯДА НА РАЗВИТИЕ ГОРЕНИЯ В ГИБРИДНОМ КОМПРЕССИОННОМ ДВИГАТЕЛЕ

© 2023 г. Е. А. Филимонова*, А. С. Добровольская

Объединенный институт высоких температур РАН, Москва, Россия

*E-mail: helpil@mail.ru

Поступила в редакцию 23.05.2022 г.

После доработки 04.07.2022 г.

Принята к публикации 13.10.2022 г.

В работе приведены зависимости момента воспламенения активированной разрядом зоны и момента возникновения самовоспламенения топливной смеси в области перед фронтом волны горения от двух параметров: угла поворота коленвала, при котором инициировался разряд, и удельного энерговклада в стримерный канал. Показано, что для более точного определения оптимальных пределов воспламенения активированной зоны и возникновения самовоспламенения необходимо учитывать изменение давления в цилиндре за счет движения поршня. При моделировании принималось во внимание неоднородное образование химически активных частиц, связанное со стримерным, многоимпульсным характером разряда.

DOI: 10.31857/S0040364423030080

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время создаются гибридные двигатели внутреннего сгорания, в которых в стабильных условиях воспламенение наступает от сжатия, а в нестабильных условиях инициатором горения является не обычный искровой разряд малой мощности [1–3], а например, импульсный коронный разряд мегагерцовой частоты [4–8], создающий неравновесную плазму. Такие разряды обеспечивают стабильные условия для работы компрессионного двигателя, работающего на обедненных смесях или при низких температурах топливно-воздушной смеси во входном тракте. Также такого типа разряды рассматриваются как альтернатива свече зажигания в двигателе внутреннего сгорания (ДВС) с искровым зажиганием. Стабильные условия работы предполагают, что в каждом рабочем цикле будет происходить воспламенение, и происходит оно примерно при одних и тех же углах поворота коленвала за верхней мертвой точкой (ВМТ). Это важно с точки зрения вырабатываемой мощности. Обычная свеча зажигания неэффективна для воспламенения бедных смесей, так как рассчитана на поджиг стехиометрических смесей.

При использовании углеводородных топлив за такое явление, как стук в двигателе, ответственна низкотемпературная стадия горения (холодные и голубые пламена), так как локальное увеличение температуры за счет частичного выделения химической энтальпии (нагрев) в некоторой зоне может привести к неконтролируемому воспламенению не во всем объеме цилиндра, а лишь в его ча-

сти. Это вызовет скачки давления за счет прохождения волн сжатия и разряжения. Численное исследование механизма возникновения интенсивных волн давления при спонтанном самовоспламенении горячих точек перед фронтом пламени [9] или при сжатии фронтом пламени несгоревшего газа [10] представлено в этих работах в зависимости от свойства смеси проявлять в большей или меньшей степени при окислении отрицательный температурный коэффициент (ОТК) — немонокотное изменение скорости окисления с ростом температуры. Показано, что наличие ОТК влияет на время возникновения, место возникновения и амплитуду колебаний давления, которые могут перевести дефлаграционное горение в детонационное. Однако и в водородно-воздушных смесях возможны резкие скачки давления и возникновение волн самовоспламенения [11] в зависимости от температуры смеси перед фронтом. Другой механизм возникновения интенсивных процессов в камере сгорания ДВС с водородно-воздушной смесью, связанный с термоакустической неустойчивостью на фронте волны горения, предложен в [12].

Моделирование физико-химических процессов в камере сгорания гибридного двигателя представляет собой сложную задачу. Помимо обычных процессов горения необходимо моделировать воздействие разряда на топливно-воздушную смесь. В работе [13] была продемонстрирована возможность управления воспламенением с помощью импульсного коронного разряда мегагерцовой частоты.

ты путем воздействия на низкотемпературную стадию горения в компрессионном двигателе с гомогенной смесью. Численное моделирование в [13] было проведено в нульмерном приближении, где разряд являлся внешним источником дополнительного нагрева обработанной разрядом небольшой массы газа, в которой нарабатывались химически активные частицы. Эта масса газа инжектировалась в цилиндр двигателя через специальный порт в течение короткого времени при определенном угле поворота коленвала.

Для решения задачи о воспламенении и формировании волны горения в 1D- или 2D-приближении необходимо выработать подходы к созданию активированной разрядом области. Разряд имеет филаментированную структуру, т.е. только часть области заполняется каналами-филаментами. Эта область благодаря наличию в ней химически активных частиц, созданных в результате диссоциации молекул кислорода и топлива электронным ударом, и дополнительного нагрева этой области, инициирует горение в камере сгорания двигателя. Для определения нагрева и состава активированной разрядом области был предложен метод, который учитывает многоимпульсный и многоканальный режим работы разряда [14].

Совместное газодинамическое моделирование воздействия импульсного разряда и более медленного развития горения требует большого времени счета из-за разницы характерных времен. По этой причине авторами был разработан подход, позволяющий сначала найти состав и нагрев активированной области в результате действия высокочастотного коронного разряда для разных значений удельных энерговкладов в стример, и затем эти данные использовать в качестве начальных условий в газодинамическом расчете горения в компрессионном двигателе [14]. Роль волн давления в нагреве области перед фронтом в компрессионном двигателе с гомогенной смесью, с инициацией неравновесным разрядом, исследована в работе [15]. Эти волны дают незначительный вклад в нагрев газа перед фронтом волны горения.

В данной работе представлены результаты численного параметрического исследования развития горения в гибридном компрессионном двигателе с гомогенной смесью (или HCCI-двигатель — Homogenous Charge Compression Ignition Engine) после обработки части смеси разрядом. В качестве варьируемых параметров выбраны некоторые характеристики разряда.

Целью работы являются определение зависимости времени воспламенения активированной зоны и самовоспламенения смеси в области перед фронтом пламени от удельного энерговклада в стримерный канал для разных моментов инициации разряда, который определялся углом поворота коленвала, и нахождение оптимального диапазона управляющих параметров.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ

В данной работе приведены результаты моделирования распространения волны горения, которая формируется вследствие воздействия филаментированным импульсно-периодическим наносекундным разрядом на смесь, которая без разряда в результате сжатия в двигателе с гомогенной смесью не воспламеняется [14]. Разряд типа высокочастотной короны [4] в течение короткого времени активировал небольшую область смеси на оси цилиндра при определенном угле поворота коленвала на стадии сжатия. Моделирование проведено для бедной пропано-воздушной смеси $N_2 : O_2 : C_3H_8 = 0.7671 : 0.2043 : 0.0286$ (коэффициент избытка топлива $\phi = 0.7$). В качестве объекта исследования был выбран компрессионный двигатель объемом 2.37 л, скорость вращения коленвала — 1500 об/мин, степень сжатия — 15, другие параметры и режим работы указаны в [13]. Были выбраны четыре момента инициации разряда относительно ВМТ (360° поворота коленвала (ПК)), которые отмечены на рис. 1 и в таблице.

Основные положения и уравнения модели распространения волны горения даны в работах [14, 16]. Процесс горения (формирование и распространение волны горения с или без возникновения самовоспламенения в области перед фронтом волны горения) моделируется с помощью уравнений Навье—Стокса [17] в одномерной осесимметричной постановке. В эти уравнения введены специальные члены, которые имитировали сжатие вдоль оси цилиндра, что являлось особенностью данного моделирования. Обычно в одномерной постановке расчеты проводятся при постоянном объеме, поэтому изменение давления за счет сжатия не учитывается. Волна горения распространялась вдоль радиуса цилиндра $R = 5$ см. Система включала уравнения, отражающие законы сохранения массы, импульса и полной энергии для всей газовой смеси со специальными источниками

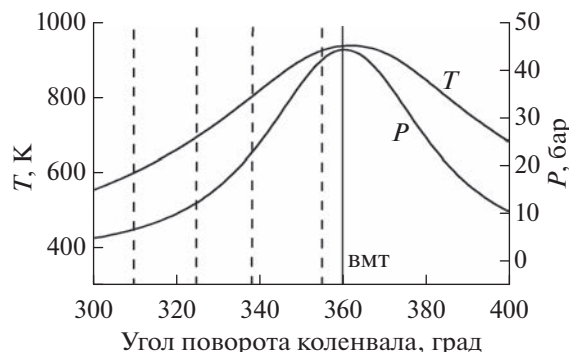


Рис. 1. Зависимости температуры и давления от угла поворота коленвала в случае отсутствия воспламенения смеси в результате сжатия без инициации разрядом; штриховыми линиями отмечены углы для четырех режимов, при которых инициировался разряд.

Условия инициации разряда

α_{dis} , град ПК	310	325	338	355
T_0 , К	600	700	801	925
P_0 , бар	6.8	12.4	22.6	42.2
T_{st} , К	769	867	959	1092
$[\text{O}]_{\text{st}}$	4.48×10^{-3}	4.38×10^{-3}	4.20×10^{-3}	4.54×10^{-3}
T_{aver} , К	658	760	869	972
$[\text{O}]_{\text{aver}}$	1.15×10^{-5}	3.05×10^{-7}	4.87×10^{-8}	1.2×10^{-7}
$[\text{C}_3\text{H}_7\text{OON}]_{\text{aver}}$	1.65×10^{-4}	2.07×10^{-4}	7.02×10^{-5}	1.03×10^{-7}
$[\text{H}_2\text{O}_2]_{\text{aver}}$	1.30×10^{-5}	1.91×10^{-5}	5.74×10^{-5}	5.08×10^{-4}
$[\text{CO}]_{\text{aver}}$	4.43×10^{-5}	6.48×10^{-5}	8.17×10^{-5}	1.38×10^{-4}
$[\text{CH}_2\text{O}]_{\text{aver}}$	8.89×10^{-5}	1.87×10^{-4}	3.42×10^{-4}	6.20×10^{-4}

Примечание. T_0 , P_0 – температура и давление для угла инициации разряда; температура T_{st} и мольная доля атомов О $[\text{O}]_{\text{st}}$ в стримере; осредненные по активированной разрядом зоне значения температуры T_{aver} и мольных долей компонентов; $Q_d = 0.047\text{--}0.051$ эВ/молекула, $\delta = 0.24$, $R_{\text{az}} = 0.75$ см.

ми в правой части уравнений, учитывающими изменение давления за счет сжатия. Давление в цилиндре являлось функцией объема $V(t)$. Точная функция $V(t)$ взята из расчетов рабочего цикла компрессионного двигателя [13]. Также учитывалось изменение массы каждого компонента за счет диффузии и химических превращений. Кинетическая схема для пропано-воздушной смеси опубликована в работе [18]. Она содержит 710 элементарных реакций между 103 компонентами и описывает окисление и горение для следующих видов топлива: CH_4 , C_2H_4 , C_2H_2 , C_2H_6 , C_3H_8 , CH_3CHO . Для этих углеводородов было проведено тестирование кинетической модели на соответствие экспериментальным результатам по времени задержки воспламенения, ламинарной скорости волны горения и концентрации некоторых конечных (например, NO) и промежуточных продуктов окисления (CO, H_2). Результаты тестирования можно найти в работах [13, 14, 16, 18, 19].

Для описания разрядной зоны была создана модель, которая подробно описана в [14, 16]. Разряд занимает цилиндрическую область объемом V_{az} на оси симметрии. В ней начальные концентрации компонентов и температура отличаются от значений в не активированной разрядом области. Для описания этой области вводятся следующие параметры: радиус активированной разрядом зоны R_{az} ; доля объема δ , занятая стримерами после обработки в течение $t_d = 555$ мкс (5° ПК); удельный энерговклад в стример за время обработки Q_d ; Q_{az} – удельный энерговклад в объем V_{az} . Эти параметры связаны законом сохранения энергии: $E_{\text{tot}} = Q_d V_{\text{st}} = Q_{\text{az}} V_{\text{az}}$, где E_{tot} – полная энергия, введенная за время действия разряда; V_{st} – объем, занятый стримерами; $\delta = V_{\text{st}}/V_{\text{az}}$. Общее количество импульсов в течение времени t_d при частоте повторения импульсов 5 МГц составляет $N_p = 2750$.

В каждом импульсе создается несколько стримерных каналов с удельным энерговкладом Q_d^0 . В модели радиус активированной зоны обратно пропорционален корню из доли объема, занятой стримерами. В цилиндрической активированной разрядом зоне стримеры распространяются от оси к периферии, вблизи оси область почти полностью занята перекрывающимися стримерами, а на периферии у границы активированной зоны они расходятся. Чем больше радиус активированной зоны, тем дальше каналы отстоят друг от друга и величина δ будет меньше.

Рассматриваются два варианта изменения параметров: первый вариант – изменение E_{tot} при фиксированных значениях R_{az} и δ (поскольку эти величины связаны друг с другом), однако Q_d в стримерный канал – также переменный параметр; второй вариант – изменение R_{az} и δ при фиксированных E_{tot} и Q_d . Принцип описания активированной зоны аналогичен тому, что был использован в задачах по удалению токсичных примесей с помощью наносекундного импульсного разряда [20, 21].

Эффективность наработки (G -факторы) химически активных частиц, образующихся при распространении одиночного стримера, на 100 эВ вложенной энергии, концентрации этих частиц и величина Q_d^0 находились из расчета динамики распространения положительного стримера с использованием двумерной осесимметричной модели [14, 22]. Оценки показывают, чтобы достичь энергии Q_d , необходимой для воспламенения, нужно пропустить несколько стримеров n_{st} (число стримеров) через один и тот же канал, тогда $Q_d = n_{\text{st}} Q_d^0$. На стадии распространения стримера бралась упрощенная кинетическая схема для пропано-воздушной смеси, описывающая образова-

ние первичных активных частиц электронным ударом (О, Н, C_3H_7). В расчете концентрации первичных активных частиц и нагрев газа в стримерном канале находились с учетом изменения состава и температуры смеси от импульса к импульсу [14, 16]. В каждом импульсе учитывалось увеличение концентрации атомов О и Н, радикалов C_3H_7 и температуры газа из-за разрядного воздействия. Мольная доля атомов кислорода $[O]_{st}$, как основного радикала для инициации воспламенения, и температура в стримерном канале T_{st} после обработки смеси представлены в таблице для $\delta = 0.24$, $R_{az} = 0.75$ см и $\alpha_{dis} = 325^\circ$ ПК. Для $\delta = 0.55$, $R_{az} = 0.55$ см, $\alpha_{dis} = 325^\circ$ и 355° ПК значения $[O]_{st}$ даны в работах [14, 16]. За время обработки разрядом активированной области в каждом стримерном канале происходили реакции, которые приводили к наработке долгоживущих пероксидов, в том числе пропилгидропероксида C_3H_7OOH . Состав и температура в активированной зоне осреднялись с учетом доли объема δ , занятой стримерными каналами, в которых температура и концентрации отличались от значений в зоне, свободной от стримеров. Средняя температура T_{aver} в активированной зоне после перемешивания была оценена по закону сохранения энтальпии. В качестве примера в таблице приведены значения T_{aver} (значительно меньше, чем нужно для воспламенения), а также средние значения мольных долей атомов О и некоторых промежуточных долгоживущих компонентов. Эти компоненты участвуют в реакциях с выделением тепла и наработки радикалов для инициации и продолжения горения. Компоненты C_3H_7OOH и CH_3OOH являются основными на низкотемпературной стадии выделения тепла, или стадии холодного пламени; H_2O_2 — на стадии выделения тепла при промежуточных температурах, или на стадии голубого пламени; CO — на стадии высокотемпературного выделения тепла, или на стадии горячего пламени [13, 14, 16]. Видно, что средняя концентрация $[O]_{aver}$ уменьшилась на порядки по сравнению с $[O]_{st}$, однако значительно увеличилась концентрация промежуточных компонентов. Основные реакции на каждой стадии с указанными выше компонентами представлены в [14, 16].

Полученные состав и температура в активированной зоне были начальными условиями для моделирования распространения волны горения вдоль радиуса цилиндра. Время окончания действия разряда соответствовало началу отсчета времени задержки воспламенения и формирования волны горения. Расчеты проводились при варьировании удельного энерговклада в стримерный канал Q_d , доли объема активированной зоны, обработанной разрядом, δ , с соответствующим радиусом R_{az} и момента инициации разряда α_{dis} . Время расчета варьировалось от двух суток до семи дней

на персональном компьютере и зависело от угла инициации разряда (для меньших углов время больше), на 1 мс физического времени приходилось от 6 до 15 ч вычислительного времени в зависимости от температуры газа. Анализ полученных результатов был проведен с точки зрения влияния перечисленных параметров на время задержки воспламенения и режим распространения волны горения. Обсуждаются причины развития сильных осцилляций давления, которые могут быть опасны для двигателя и приводят к нежелательному аудишуму, и также условия резкого роста давления, которое сопровождается значительным тепловыделением и формированием волн самовоспламенения.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Воспламенение активированной разрядом зоны.

На рис. 1 приведена зависимость температуры и давления от угла поворота коленвала в процессе движения поршня без инициации разрядом: температура в ВМТ — 940 К, давление — 44 бара. Видно, что только от сжатия смесь не воспламеняется. При инициации разрядом смесь сначала воспламеняется в активированной зоне, возникает волна горения, которая, распространяясь, поджигает газ перед фронтом.

На рис. 2 для $Q_d = 0.025$ эВ/молекула показана зависимость температуры и давления от времени в активированной разрядом зоне ($r = 0-0.75$ см) и в точках $r = 3.5$ и 4.5 см вдоль радиуса. Резкий рост осцилляций соответствует самовоспламенению оставшегося газа перед фронтом волны горения. Как видно на рис. 2, воспламенение в точках $r = 3.5$ и 4.5 см происходит одновременно в момент времени $t = 4.12$ мс, а активированная разрядом область между $r = 0$ и 0.75 см воспламеняется в момент $t = 3.38$ мс. Момент самовоспламенения соответствует резкому росту амплитуды осцилляций как температуры, так и давления. Однако амплитуда осцилляций давления в активированной зоне (на оси цилиндра) заметно больше, в отличие от осцилляций давления вблизи стенки или на некотором расстоянии от нее.

Полная энергия, вложенная в активированную зону, зависит не только от энерговклада в стример, но и от структуры разрядной зоны, т.е. от доли объема δ активированной зоны радиуса R_{az} , обработанной разрядом. На рис. 3 для фиксированного энерговклада $Q_d = 0.05$ эВ/молекула и $\alpha_{dis} = 325^\circ$ ПК представлена зависимость момента воспламенения от структурных характеристик δ и R_{az} .

На рис. 3 видно, что чем больше величина δ и меньше R_{az} , тем быстрее воспламеняется смесь. Однако чем раньше воспламеняется активированная зона, тем раньше происходит самовоспламенение, тем больше амплитуда осцилляций, а значит, и аудишум. Это видно для случая $\delta = 0.832$, $R_{az} = 0.4$ см, т.е. чем меньше область и больше заполняемость стримерными каналами, тем боль-

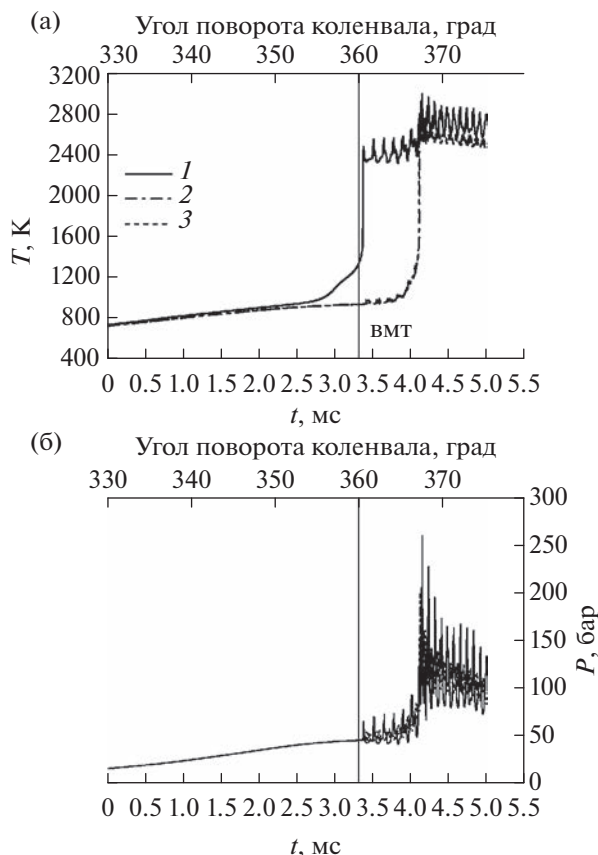


Рис. 2. Зависимости температуры (а) и давления (б) от времени и угла поворота коленвала в разных точках вдоль радиуса цилиндра (0.75 см – активированная зона), $\alpha_{\text{dis}} = 325^\circ$ ПК, $\delta = 0.24$, $R_{\text{az}} = 0.75$ см, $Q_d = 0.025$ эВ/молекула: 1 – $r = 0.75$ см, 2 – 3.5, 3 – 4.5.

ше амплитуда осцилляций давления, до 650 бар. Тогда как для случая $\delta = 0.133$, $R_{\text{az}} = 1$ см амплитуда колебаний в два раза меньше. По скорости распространения волн давления, радиусу цилиндра и положению фронта волны горения были сделаны оценки частоты колебаний, которые дают величину ~ 10 кГц, что является характерной величиной резонансной частоты для реального двигателя [23]. Большие колебания давления по объему приводят к горению со стуком, так как вызывают локальный рост давления в несгоревшем газе, подъем температуры и самовоспламенение, что дает еще больший локальный рост давления. Сильный аудишум при работе двигателя следует избегать. Поэтому либо энерговыход должен быть меньше, либо активированная область должна иметь больший радиус и меньшую долю объема, занятую стримерами.

Если сравнить температуру в активированной зоне на оси цилиндра для разных энерговыходов в стримерный канал: $Q_d = 0.025$ эВ/молекула (рис. 2а) и $Q_d = 0.05$ эВ/молекула (рис. 3), но при одинаковых значениях $\delta = 0.24$ и $R_{\text{az}} = 0.75$ см, то видно, что чем больше энерговыход, тем раньше происходит воспламенение (в данном случае разница

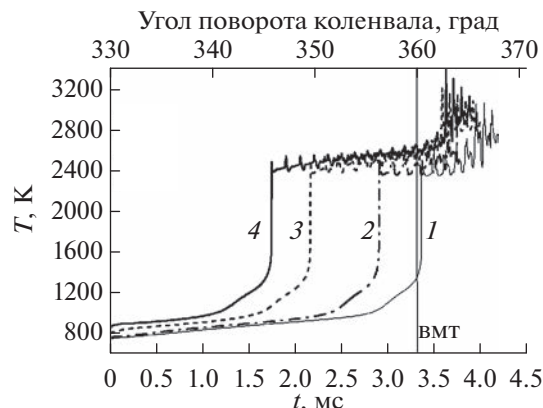


Рис. 3. Зависимости температуры от времени и угла поворота коленвала для разных значений доли объема δ и радиуса активированной зоны R_{az} внутри активированной области, $\alpha_{\text{dis}} = 325^\circ$ ПК, $Q_d = 0.05$ эВ/молекула: 1 – $\delta = 0.133$, $R_{\text{az}} = 1$ см; 2 – 0.24, 0.75; 3 – 0.55, 0.5; 4 – 0.832, 0.4.

$\Delta\alpha = 4.2^\circ$ ПК, или 0.47 мс). Таким образом, нельзя рассматривать влияние энерговыклада отдельно от структуры активированной зоны, созданной стримерными каналами.

Сравнение различных режимов воспламенения активированной разрядной зоны для четырех моментов инициации разряда, указанных в таблице, приводится на рис. 4. Обобщающий график для всех исследуемых значений энерговыкладов Q_d приведен для $\delta = 0.24$, $R_{\text{az}} = 0.75$ см. Штрихами отмечена область, где с точки зрения тепловых (КПД) и мощностных характеристик двигателя, желательно, чтобы происходило воспламенение как до ВМТ, так и после ВМТ, но не дальше 5° ПК [2, 4]. На рис. 5 в качестве примера представлены зависимости температуры и давления от угла поворота коленвала для разных углов инициации разряда при фиксированных значениях $\delta = 0.24$, $R_{\text{az}} = 0.75$ см и $Q_d = 0.05$ эВ/молекула. Во всех случаях происходит самовоспламенение, что обеспечивает полное сгорание топлива. Большая задержка воспламенения относительно ВМТ (как для $\alpha_{\text{dis}} = 355^\circ$ ПК на рис. 4) приводит к большим термодинамическим потерям (уменьшению КПД) и неиспользованию тепловой энергии на стадии расширения при нисходящем движении поршня. На рис. 4, 5 видно, что ранняя инициация высококачественного коронного разряда, задолго до ВМТ, более благоприятна, чем вблизи ВМТ. Этот вывод был сделан также при решении задачи о влиянии стримерного наносекундного разряда на воспламенение в двигателе НСЦИ в нульмерном приближении [13] и из экспериментов [4]. Кроме того, зажечь разряд при низких давлениях на стадии сжатия легче, чем вблизи ВМТ. Такая зависимость от угла инициации связана с химической кинетикой стадии холодного пламени, которая обсуждается в работах [13, 14, 16].

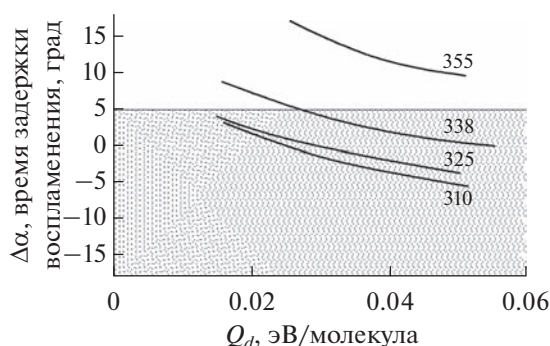


Рис. 4. Зависимость времени задержки воспламенения относительно ВМТ (0°) активированной зоны от энерговклада в стримерный канал для разных углов ПК инициации разряда α_{dis} (числа рядом с кривыми); $\delta = 0.24$, $R_{az} = 0.75$ см.

Распространение волны горения, инициируемой разрядом. Как уже отмечалось при анализе эволюции температуры и давления при воспламенении для разных условий, по характеру осцилляций можно судить, возникло или нет самовоспламенение. Однако развивается ли этот режим горения непосредственно перед фронтом волны горения или

около стенки цилиндра, сказать нельзя. Хотя горение в компрессионном двигателе с гомогенной смесью идеализируется как событие равномерно-самовоспламенения сразу всей топливной смеси в цилиндре, в действительности же воспламенение происходит последовательно в течение короткого времени в разных пространственных точках по всей смеси [2]. Эти последовательные события воспламенения вызваны изменением условий перед фронтом волны горения, идущим от активированной разрядом зоны, за время распространения фронта. В моделировании рассматривалось три режима распространения волны горения: 1) дефлаграционное распространение пламени, 2) последовательное распространение волн самовоспламенения в несгоревшем газе непосредственно перед фронтом, 3) распространение волны самовоспламенения в несгоревшем газе, идущей от стенки в направлении основной волны горения.

В качестве примера на рис. 6 приведены профили температуры и давления для условий рис. 2. В случае инициации разрядом при угле $\alpha_{dis} = 325^\circ$ ПК и радиусе активированной зоны $R_{az} = 0.75$ см смесь сначала воспламеняется в активированной зоне сразу за ВМТ ($\Delta\alpha = 0.45^\circ$ ПК, рис. 2), возникает дефлаграционная волна горения, которая, распространяясь, поджигает газ перед фронтом

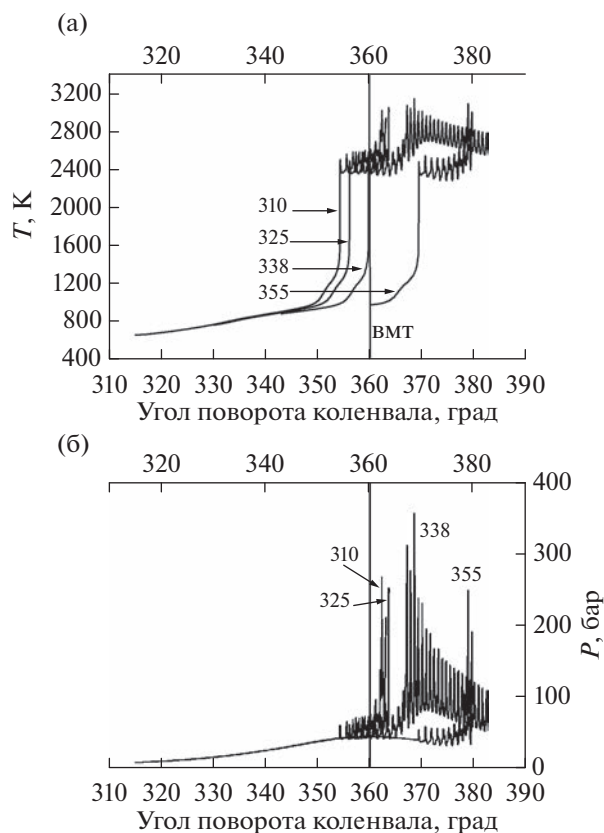


Рис. 5. Зависимости температуры (а) и давления (б) в активированной разрядом зоне ($r = 0.75$ см) от угла поворота коленвала для разных значений углов α_{dis} , при которых инициировался разряд; $\delta = 0.24$, $R_{az} = 0.75$ см, $Q_d \sim 0.05$ эВ/молекула.

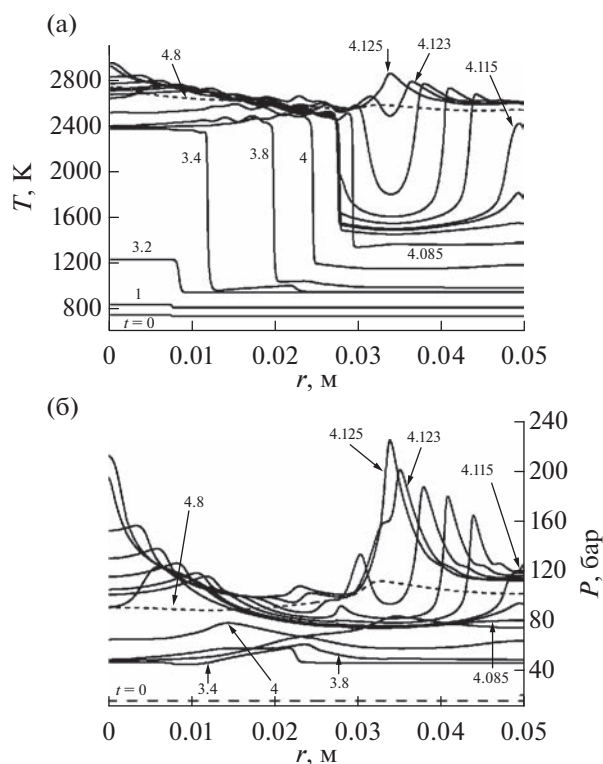


Рис. 6. Зависимости температуры (а) и давления (б) от расстояния вдоль радиуса цилиндра двигателя, $\alpha_{dis} = 325^\circ$ ПК, $\delta = 0.24$, $R_{az} = 0.75$ см, $Q_d = 0.025$ эВ/молекула: числа рядом с кривыми — момент времени в мс.

(рис. 6а). На рис. 2 видно, что сначала давление поднимается до 44 бар и до момента 3.3 мс температура в активированной зоне растет. Как только происходит воспламенение активированной зоны, давление в объеме цилиндра меняется, но в целом растет, хотя поршень движется вниз. Видимая скорость волны горения меняется со временем от 18 м/с при $t = 3.4$ мс до 24 м/с при $t = 4$ мс за счет роста температуры газа перед фронтом из-за химических реакций (рис. 2, точки 3.5 и 4.5 см). Потом фронт волны горения замедляется на расстоянии около 2.5 см от оси цилиндра (рис. 6а), сжимая газ перед фронтом.

Давление (80 бар, рис. 6б) в момент остановки фронта становится почти одинаковым справа и слева от него. Однако за счет колебания давления в объеме в некоторых точках давление и температура растут, особенно у стенки цилиндра, за счет химических реакций, происходящих на стадиях голубого и горячего пламени. Как только температура у стенки достигает 1600 К, смесь воспламеняется и от стенки начинает двигаться волна самовоспламенения со скоростью 1650 м/с навстречу дефлаграционной волне горения, которая тоже движется со средней скоростью 44 м/с. Между двумя волнами образуется щель, пока эти две волны не провзаимодействуют в момент $t = 4.125$ мс, что приводит к росту давления до 220 бар. К моменту $t = 4.8$ мс температура и давление по радиусу цилиндра выравниваются, принимая значения ~ 2600 К и 100 бар.

Сравнение различных режимов распространения волны горения для четырех моментов инициации разряда, указанных в таблице, дано на рис. 7. Обобщающие графики для всех исследуемых значений энерговкладов Q_d приведены для $\delta = 0.24$, $R_{az} = 0.75$ см и $\delta = 0.55$, $R_{az} = 0.5$ см. Заштрихована область, где с точки зрения термодинамических (КПД) и мощностных характеристик двигателя желательнее, чтобы произошло основное выделение тепла [2, 4], т.е. в диапазоне углов не более $\Delta\alpha = 10^\circ$ ПК после ВМТ. Самовоспламенение до ВМТ приводит к отрицательной работе поршня. Чем дальше за ВМТ происходит самовоспламенение, тем меньше осцилляции давления. Однако одним из недостатков позднего времени сгорания ($\alpha_{dis} = 338^\circ$ и 355° ПК) является то, что это приводит к термодинамическим потерям, поскольку имеется меньший объем расширения, доступный для использования рабочего потенциала отходящих газов. В данном исследовании наблюдается воспламенение всего объема, что обеспечивает полное сгорание топлива. Из рис. 7 следует, что самовоспламенение в оптимальном диапазоне углов происходит при инициации разряда задолго до ВМТ ($\alpha_{dis} = 310^\circ$ и 325° ПК) для всех энерговкладов в стримерный канал, которые рассматриваются в данной работе, т.е. $Q_d = 0.01$ – 0.05 эВ/молекула, для $\alpha_{dis} = 338^\circ$ ПК — при $Q_d > 0.025$

эВ/молекула. Самовоспламенение отсутствует при $\alpha_{dis} = 355^\circ$ ПК и $Q_d < 0.038$ эВ/молекула. Таким образом, время задержки самовоспламенения несгоревшего газа перед фронтом волны горения зависит от энерговклада в канал стримера, угла, при котором инициируется разряд, и параметров активированной зоны: ее радиуса и доли объема, обработанного разрядом.

Анализ режимов горения всего объема в диапазоне углов поворота коленвала от 300° до 400° ПК показывает, что характер распространения волны горения зависит от давления, которое определяется сжатием (расширением) при движении поршня, волнами давления, возникшими после воспламенения активированной разрядом зоны, и сжатием несгоревшего газа фронтом пламени. Локальное повышение давления приводит к ускорению химических реакций на стадии голубого пламени (выделения тепла при промежуточных температурах), и, как следствие, к росту температуры [15]. Из-за роста давления перед фронтом волна горения замедляется, из-за роста температуры перед фронтом — ускоряется. От соотношения давления и температуры зависит место формирования волны самовоспламенения: от стенки или от фронта. В данных расчетах за время задержки воспламенения активированной зоны, перед температурным фронтом, а затем и перед фронтом пламени, создается есте-

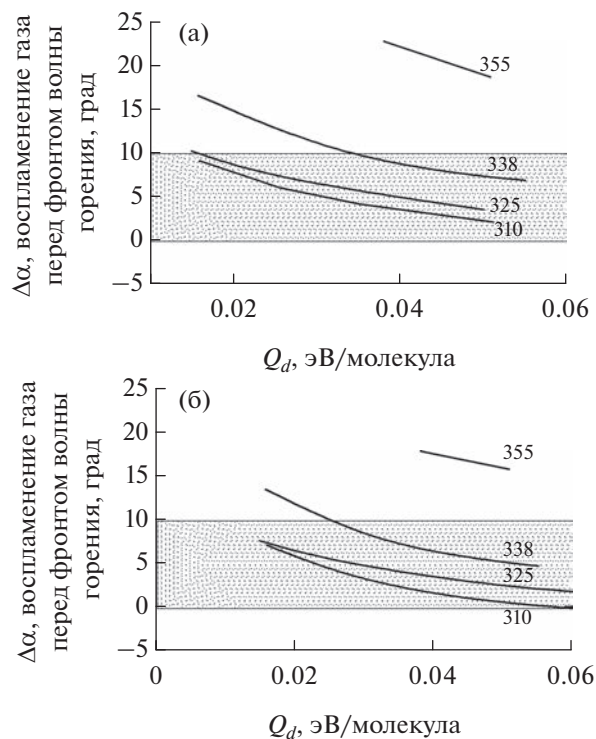


Рис. 7. Зависимость времени самовоспламенения газа перед фронтом волны горения относительно ВМТ (0°) от энерговклада в стримерный канал для разных углов инициации разряда и параметров: (а) — $\delta = 0.24$, $R_{az} = 0.75$ см; (б) — 0.55 , 0.5 .

ственное тепловое и концентрационное распределение, что способствует последовательному, более быстрому воспламенению газа перед фронтом.

Поскольку около ВМТ давление от сжатия максимально, а производная $dP/d\alpha$ — минимальна (α — угол поворота коленвала), то времени, в течение которого у стенки давление остается высоким, достаточно для возникновения волны самовоспламенения. Как только начинается быстрое расширение газа за счет движения поршня вниз, давление за счет сжатия поршнем падает, а величина $dP/d\alpha$ становится значительно больше, давление у стенки меняется быстро и времени на развитие самовоспламенения недостаточно. Быстрое расширение газа за счет движения поршня при этих более поздних углах поворота коленчатого вала теперь сильнее противодействует повышению давления, связанному со сгоранием. Перед фронтом волны горения рост температуры происходит не только за счет химических реакций, ускоренных локальным ростом давления, но и за счет теплопроводности. Уменьшение градиента температуры на фронте пламени (температурное сглаживание) приводит к росту скорости распространения пламени, которая зависит от степени повышения температуры в несгоревшей смеси по мере протекания в ней предшествующих химических реакций. И до определенной величины $dP/d\alpha$ около фронта может возникнуть волна самовоспламенения. При дальнейшем расширении газа при нисходящем движении поршня уже не складываются подходящие условия для развития самовоспламенения около фронта, и волна движется в дефлаграционном режиме.

В рассматриваемых условиях для $\phi = 0.7$ $dP/d\alpha = 0.32$ бар/градус на первых 5° за ВМТ и $dP/d\alpha = 0.922$ бар/градус на следующих 5° . Стоит отметить, что для более бедной смеси самовоспламенение у стенки может возникнуть для меньших углов после ВМТ, так как в бедной смеси время задержки воспламенения больше и для ее воспламенения давление должно меняться медленно. Для более богатой смеси самовоспламенение у стенки может возникнуть на больших углах, чем в рассматриваемых условиях, так как смесь успеет воспламениться при более быстром изменяющемся давлении в результате расширения. Это еще раз подчеркивает важную роль переменного давления от сжатия при решении задачи горения в компрессионном двигателе с гомогенной смесью. В работе [24] также связаны осцилляции давления и возникновение самовоспламенения перед фронтом, но в смеси водород–воздух. Однако расчет сделан для закрытого объема постоянной величины, что существенно меняет сценарий развития распространения волны горения, который может привести к детонации.

Следует отметить, что результаты моделирования, приведенные в этой работе, получены на основе расчетов с адиабатической стенкой. Если учитывать охлаждение стенок, то в зависимости

от условий самовоспламенения у стенки может и не возникнуть или возникнет на стадии холодного пламени, т.е. при низких температурах.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе приведены результаты моделирования возникновения и распространения волны горения при активации небольшой части пропановоздушной смеси высокочастотным коронным разрядом в цилиндре компрессионного двигателя с гомогенной смесью в одномерном приближении. Эффективность активации разрядом связана с ускорением начала стадии холодного пламени (низкотемпературная стадия выделения тепла) и стадии голубого пламени (выделение тепла при промежуточных температурах) и их более быстрым протеканием. Разряд приводит к незначительному нагреву активированной зоны ($\Delta T \sim 25\text{--}180^\circ\text{C}$) и образованию химически активных компонентов, в основном атомов О. Атомы О, которые образуют промежуточные долгоживущие компоненты — органические гидропероксиды, способствующие воспламенению, играют решающую роль в иницировании горения по сравнению с нагревом газа.

Рассмотрены причины возникновения различных сценариев горения: 1) дефлаграционное распространение пламени, 2) переход дефлаграционного горения в последовательное распространение волн самовоспламенения в несгоревшем газе перед фронтом, 3) режим распространения волны самовоспламенения в несгоревшем газе, идущей от стенки в направлении основной волны горения. Наличие у топливной смеси стадии голубого пламени и стадии горячего пламени (высокотемпературное выделение тепла) ускоряет развитие самовоспламенения при локальном повышении давления. Важным моментом для организации горения в гибридном двигателе является то, что при инициации разрядом часть смеси поджигается волной горения, а часть — за счет самовоспламенения, контролируемого стадией выделения тепла при промежуточных температурах. При этом основная часть выделения тепла должна приходиться на времена, соответствующие 10° ПК за ВМТ. Это позволит снизить скорость роста давления в компрессионном двигателе по сравнению с тем, как если бы вся смесь в цилиндре самовоспламенилась одновременно по всему объему.

Приведены зависимости времени задержки воспламенения активированной разрядом зоны и времени самовоспламенения всего объема камеры сгорания от удельного энерговклада в стримерный канал для разных значений связанных друг с другом параметров: радиуса и доли объема активированной зоны, обработанной высокочастотным коронным разрядом. Показано, что воспламенение активированной разрядом зоны и самовоспламенение происходят в оптимальном диапазоне углов поворота коленвала, если разряд

инициируется задолго до ВМТ ($\alpha_{\text{dis}} = 310^\circ, 325^\circ, 338^\circ$ ПК) для энергокладов в стримерный канал, которые рассматриваются в данной задаче, т.е. $Q_d = 0.01\text{--}0.05$ эВ/молекула. И чем ближе к ВМТ возникает самовоспламенение, тем больше амплитуда колебания давления. Моделирование показывает, что нельзя рассматривать влияние энергоклада отдельно от структуры активированной зоны (радиуса и доли объема активированной зоны), созданной стримерными каналами.

Решая уравнения Навье—Стокса с внешним давлением (имитация движения поршня), можно более точно определить оптимальные пределы воспламенения активированной зоны и возникновения самовоспламенения, так как более быстрое расширение горючей смеси при более позднем времени сгорания вызывает более высокие темпы снижения давления, противодействуя значительному повышению давления из-за самовоспламенения. При постоянном объеме в задаче горения в ДВС получаются менее достоверные характеристики, такие как пределы оптимального сгорания.

Работа поддержана Министерством науки и образования РФ (госзадание № 075-00460-21-00).

Авторы благодарят д.ф.-м.н. В.А. Битюрину, д.ф.-м.н. А.Н. Бочарова и д.т.н. В.Е. Мессерле за интерес к работе и полезные обсуждения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Dahms R., Felsch C., Rohl O., Peters N. Detailed Chemistry Flamelet Modeling of Mixed Mode Combustion in Spark-Assisted HCCI Engines // Proc. Combust. Inst. 2011. V. 33. P. 3023.
2. Saxena S., Bedoya I.D. Fundamental Phenomena Affecting Low Temperature Combustion and HCCI Engines, High Load Limits and Strategies for Extending These Limits // Prog. Energy Combust. Sci. 2013. V. 39. P. 457.
3. Persson H., Johansson B., Remón A. The Effect of Swirl on Spark Assisted Compression Ignition (SACI) // JSAE. 2007. 20077167 (SAE 2007-01-1856).
4. Schenk A., Rixecker G., Bohne S. Results from Gasoline and CNG Engine Tests with the Corona Ignition System EcoFlash // 3rd Laser Ignition Conf. Proc. Argonne, US, 2015. W4A.4.
5. Auzas F., Tardiveau P., Puech P., Makarov M., Agneray A. Heating Effects of a Non-Equilibrium RF Corona Discharge in Atmospheric Air // J. Phys. D: Appl. Phys. 2010. V. 43. 495204.
6. Mariani A., Foucher F. Radio Frequency Spark Plug: An Ignition System for Modern Internal Combustion Engines // Appl. Energy. 2014. V. 122. P. 151.
7. Discepoli G., Cruccolini V., Ricci F., Giuseppe A.D., Papi S., Grimaldi C.N. Experimental Characterisation of the Thermal Energy Released by a Radio Frequency Corona Igniter in Nitrogen and Air // Appl. Energy. 2020. V. 263. 114617.
8. Yu X., Wang L., Yu S., Wang M., Zheng M. Flame Kernel Development with Radio Frequency Oscillating Plasma Ignition // PSST. 2022. V. 31. 055004.
9. Wei H., Chen C., Shu G., Liang X., Zhou L. Pressure Wave Evolution During Two Hotspots Autoignition within End-gas Region under Internal Combustion Engine-Relevant Conditions // Combust. Flame. 2018. V. 189. P. 142.
10. Terashima H., Koshi M. Mechanisms of Strong Pressure Wave Generation in End-gas Autoignition During Knocking Combustion // Combust. Flame. 2015. V. 162. P. 1944.
11. Pan J., Shu G., Zhao P., Wei H., Chen Z. Interactions of Flame Propagation, Auto-ignition and Pressure Wave During Knocking Combustion // Combust. Flame. 2016. V. 164. P. 319.
12. Киверин А.Д., Смыгалина А.Е. Механизмы развития интенсивных динамических процессов при сжигании водорода в камерах сгорания ДВС // ТВТ. 2022. Т. 60. № 1. С. 103.
13. Filimonova E., Bocharov A., Bityurin V. Influence of a Non-equilibrium Discharge Impact on the Low Temperature Combustion Stage in the HCCI Engine // Fuel. 2018. V. 228. P. 309.
14. Filimonova E.A., Dobrovolskaya A.S., Bocharov A.N., Bityurin V.A., Naidis G.V. Formation of Combustion Wave in Lean Propane-Air Mixture with a Non-Uniform Chemical Reactivity Initiated by Nanosecond Streamer Discharges in the HCCI Engine // Combust. Flame. 2020. V. 215. P. 401.
15. Dobrovolskaya A.S., Filimonova E.A., Bityurin V.A., Bocharov A.N. Role of Pressure Waves in the Heating of the End-Gas in HCCI Engine with Activation by Pulsed Corona Discharge // J. Phys.: Conf. Ser. 2021. V. 2100(1). 012016.
16. Филимонова Е.А. Кинетика процессов горения, конверсии оксидов азота и углеводородов, стимулированных наносекундными разрядами. Дис. ... докт. физ.-мат. наук. М.: ОИВТ РАН, 2021. 337 с.
17. Битюрин В.А., Бочаров А.Н. Магнитогидродинамическое взаимодействие при обтекании затупленного тела гиперзвуковым воздушным потоком // МЖГ. 2006. № 5. С. 188.
18. Filimonova E.A. Discharge Effect on the Negative Temperature Coefficient Behaviour and Multistage Ignition in C_3H_8 -Air Mixture // J. Phys. D: Appl. Phys. 2015. V. 48. 015201.
19. Dobrovolskaya A., Filimonova E., Bityurin V., Bocharov A., Klyuchnikov N. Different Numerical Approaches for Simulation of Combustion Wave Initiation by Electrical Discharge // AIP Conf. Proc. 2018. V. 1978(1). 470074.
20. Железняк М.Б., Филимонова Е.А. Моделирование газозафазного химического реактора на основе импульсного стримерного разряда для удаления токсичных примесей. Ч. I // ТВТ. 1998. Т. 36. № 3. С. 374.
21. Железняк М.Б., Филимонова Е.А. Моделирование газозафазного химического реактора на основе импульсного стримерного разряда для удаления токсичных примесей // ТВТ. 1998. Т. 36. № 4. С. 557.
22. Babaeva N.Yu., Naidis G.V. Two-Dimensional Modeling of Positive Streamer Dynamics in Non-Uniform Electric Fields in Air // J. Phys. D: Appl. Phys. 1996. V. 29. P. 2423.
23. Pan J., Shu G., Wei H. Interaction of Flame Propagation and Pressure Waves During Knocking Combustion in Spark-ignition Engines // Combust. Sci. Technol. 2014. V. 186 (2). P. 192.
24. Yu H., Chen Zh. End-gas Autoignition and Detonation Development in a Closed Chamber // Combust. Flame. 2015. V. 162. P. 4102.