

УДК 541.126

АДАПТАЦИЯ КИНЕТИЧЕСКОЙ СХЕМЫ К УСЛОВИЯМ ГОРЕНИЯ ЭТИЛЕНА ПРИ ТЕМПЕРАТУРАХ ВЫШЕ 1200 К

© 2023 г. Е. А. Филимонова^{1*}, А. С. Добровольская¹¹Объединенный институт высоких температур Российской академии наук, Москва, Россия

*E-mail: helpfil@mail.ru

Поступила в редакцию 27.09.2022;
после доработки 12.01.2023;
принята в печать 20.01.2023

В работе представлены оригинальные методы анализа кинетической схемы, констант скоростей реакций для проведения расчетов времени задержки воспламенения и ламинарной скорости волны горения в смесях $C_2H_4-O_2-Ar$ и $C_2H_4-воздух$ с целью дальнейшего использования схемы в задачах по стимулированию горения в сверхзвуковом потоке с помощью разряда. После внесения изменений в систему реакций получено хорошее согласие результатов расчета и экспериментальных данных.

Ключевые слова: химическая кинетика, время задержки воспламенения, этилен, горение.

DOI: 10.31857/S0207401X23120051, **EDN:** TWVUYR

1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время активно развиваются фундаментальные основы концепции плазменно-стимулированного горения газообразных углеводородных топлив в сверхзвуковом потоке, в том числе применительно к научно-технической проблеме создания прямоточного воздушно-реактивного двигателя (ПВРД) [1, 2], тогда как обычно проблемы воспламенения в ПВРД предполагается решать за счет использования детонационного горения топлива и его разновидности — непрерывно-детонационного горения [3]. Применение разряда дает возможность для управления потоком, включая подавление и стабилизацию возникающих неустойчивостей при горении, и смешения потока воздуха и поперечно-инжектируемого в него топлива. Электрический разряд является источником химически активных частиц и энерговыделения. В настоящей работе в качестве топлива рассматривался этилен, который может быть использован как самостоятельно, так и как вспомогательное топливо для воспламенения жидких углеводородов, и поэтому часто применяется как модельное топливо в подобных задачах [4–6].

Одна из задач состоит в поиске способа, который позволит снизить время задержки воспламенения τ_{ind} для случая плазменно-стимулированного горения этилена в воздухе. Проведенные ранее эксперименты в ОИВТ РАН показывают, что даже при использовании постоянно действующего электрического разряда с локальной максимальной температурой более 4000 К воспламенение, при некоторых условиях, не происходит. Важно пони-

мать, что задача воспламенения предварительно не перемешанных потоков этилена и воздуха сводится не только к воспламенению, но и к стабильному горению. Поэтому необходимо создать условия для протекания этих процессов. Для этого требуется обеспечить соответствующую температуру (ниже 4000 К), которая должна привести к конверсии топлива в перемешанном слое за время создания такого слоя, после чего возможно воспламенение смеси. Возможная деформация фронта пламени за счет перемешивания может привести к локальному тушению. Важно, чтобы было достаточно времени для повторного воспламенения топлива, иначе оно покинет зону реакции. Это приведет к неполному сгоранию и ухудшению мощностных характеристик. Предполагается, что будут определены зоны оптимального смешения для получения устойчивого горения. Для этого с помощью численного моделирования на основании решения уравнений Навье–Стокса, детального кинетического механизма горения этилена и активации воздуха разрядом будет выполнено параметрическое исследование с целью поиска электрических (может быть, и геометрических) параметров разряда для указанных выше целей.

Ранее уже проводилось численное моделирование горения пропана и водорода в дозвуковом и сверхзвуковом потоках активированного разрядом воздуха в предварительно не перемешанных смесях. Например, в работе [7] рассматривалась осесимметричная двумерная задача. Среди важных выводов работы [7] отметим следующие: 1) образовавшийся в горячей воздушной плазме

атом О играет роль высокоэнтальпийного компонента, который приводит к росту температуры в зоне смешения и горения благодаря рекомбинации и другим химическим реакциям; 2) атом О слабо влияет на время зажигания в предварительно не перемешанных смесях топлива и окислителя. В этом состоит принципиальное отличие от предварительно перемешанных смесей, где наличие первичных химически активных частиц заметно сокращает время задержки воспламенения.

Для проведения численного двумерного исследования плазменно-стимулированного горения этилена в сверхзвуковом потоке воздуха с целью поиска условий стабильного горения, а также для установления плазохимического кинетического механизма, определяющего τ_{ind} , необходимо было на основании тестирования и анализа внести изменения в уже имеющуюся кинетическую схему горения легких углеводородов в воздухе [8]. Этой проблеме посвящена данная работа.

2. МЕТОДЫ АНАЛИЗА И РЕЗУЛЬТАТЫ

2.1. Подход к анализу кинетической схемы

Конверсия этилена с концентрацией до 0.1 об.% в воздухе при температурах до 500 К, стимулированная наносекундным разрядом, ранее уже моделировалась одним из авторов [9, 10]. В этих работах проведен кинетический анализ с указанием важных реакций с участием этилена, атома О и радикала ОН и представлено сравнение с экспериментами по концентрациям различных компонентов. В задаче, которая решается в условиях плазменно-стимулированного горения, температура превышает 1000 К, давление ниже атмосферного и концентрация этилена изменяется в широком диапазоне значений. Поэтому некоторые реакции, важные для низкотемпературного диапазона, можно исключить либо изменить их константу скорости на ту, которая применима для высоких температур. Метод анализа кинетической схемы, в котором определяются ключевые реакции в эволюции различных компонентов в разных условиях, уже не раз описывался в статьях авторов (см., например, [9–12]). В данной статье основные положения метода приведены в п. 2.3.

Подход к проверке схемы химических реакций на способность описывать время задержки воспламенения представляет собой итерационный процесс и заключается в следующем. Проводится кинетический расчет с использованием схемы горения легких углеводородов [8] в воздухе, состоящей из 710 реакций для 103 компонентов, которая ранее была использована для других задач авторов [8, 13], и в процессе счета определяется время задержки воспламенения τ_{ind} для различных условий в зависимости от температуры, давления и состава смеси. Полученные результаты сравниваются

с экспериментальными данными, и в случае несоответствия эксперименту выполняется кинетический анализ, на основании которого определяются ключевые реакции в эволюции различных компонентов. Далее проверяются и при необходимости заменяются константы отдельных реакций (на основании базы данных NIST [14] и других источников; см., например, [15]), после чего процесс нахождения τ_{ind} повторяется. В случае достижения хорошего соответствия по времени задержки воспламенения выполняется еще одна проверка схемы, а именно рассчитывается скорость ламинарного пламени в зависимости от коэффициента избытка топлива ϕ , который определяется следующим образом:

$$\phi = \frac{([\text{топливо}]/[\text{воздух}])}{([\text{топливо}]/[\text{воздух}]_{\text{стех}})}$$

В ходе такого итерационного процесса удается получить схему, удовлетворительно описывающую экспериментальные данные по времени индукции и скорости ламинарного пламени при горении этилена в воздухе и аргоне с кислородом в диапазонах температур выше 1200 К и давлений 1–12 бар.

2.2. Определение времени задержки воспламенения

Для модификации и тестирования уже имеющейся кинетической схемы горения углеводородов в воздухе [8] в случае, когда C_2H_4 является топливом, были проведены расчеты, где сравнивалось время задержки воспламенения с результатами экспериментов [16–18], проведенных в ударных трубах. Кинетическая схема [8] ранее уже была протестирована по различным параметрам, когда в качестве топлива использовали метан, пропан, ацетальдегид [8, 13]. В предыдущих работах авторов по горению этилен был только промежуточным компонентом, доля которого не превышала величины 10^{-3} . Когда же C_2H_4 является основным компонентом топлива с концентрацией в несколько процентов, то его влияние на кинетику воспламенения становится определяющим, поэтому требуются проверка констант скоростей реакций с его участием и внесение изменений в схему при необходимости.

На рис. 1 представлено сравнение экспериментальных и расчетных данных для τ_{ind} в зависимости от обратной температуры смеси для модифицированной кинетической схемы; там же приведено сравнение с результатами моделирования для этих же условий по модели USC_Mech_II [19]. Время задержки воспламенения в экспериментах определяли за фронтом отраженной ударной волны. Расчеты выполнены в нульмерном приближении с использованием программного комплекса, разработанного в [20], для условий

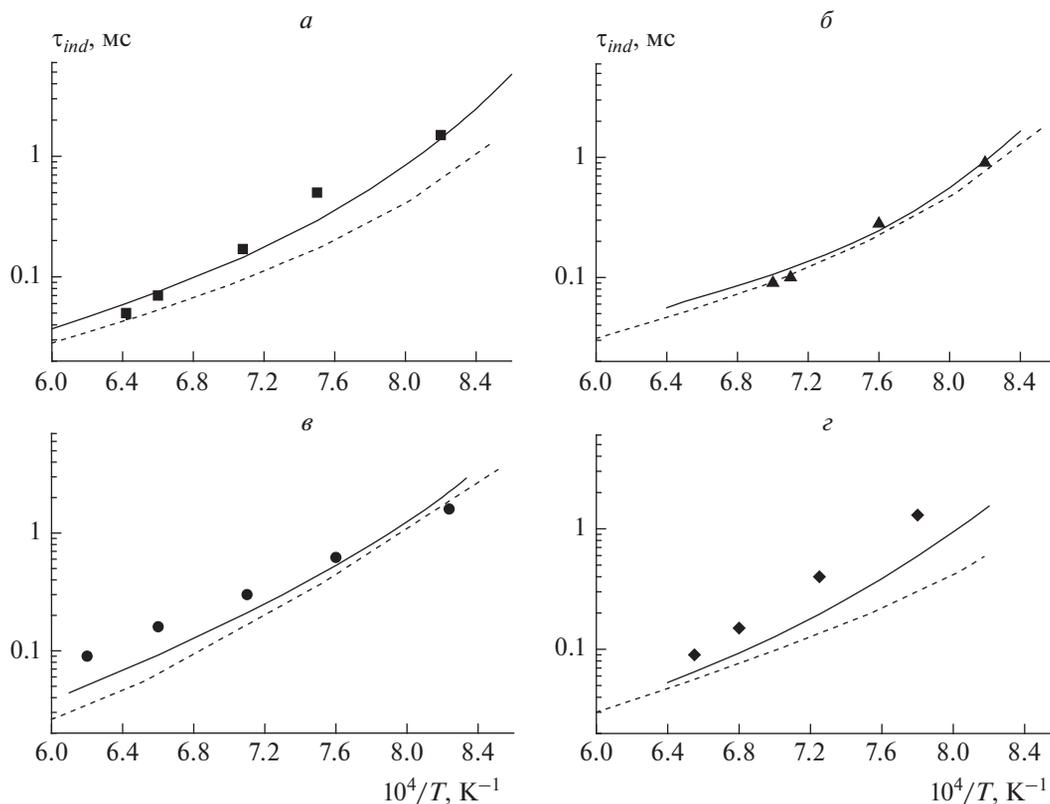


Рис. 1. Сравнение расчетного времени задержки воспламенения с результатами экспериментов [16] (символы) в диапазоне температур 1200–1620 К. Сплошная линия – расчет по модифицированной схеме, штриховая – по схеме [19]. Начальное давление за фронтом отраженной ударной волны $P = 3$ бар (а, б, в) и 12 бар (г). Составы: а – $1\% \text{C}_2\text{H}_4 + 3\% \text{O}_2 + 96\% \text{Ar}$, $\phi = 1$; б – $0.5\% \text{C}_2\text{H}_4 + 3\% \text{O}_2 + 96.5\% \text{Ar}$, $\phi = 0.5$; в – $2\% \text{C}_2\text{H}_4 + 3\% \text{O}_2 + 95\% \text{Ar}$, $\phi = 2$; г – $0.25\% \text{C}_2\text{H}_4 + 0.75\% \text{O}_2 + 99\% \text{Ar}$, $\phi = 1$.

постоянного объема. Следует сказать, что в эксперименте момент воспламенения не всегда можно было точно определить, так как метод определения τ_{ind} основан на фиксировании максимальной интенсивности светового излучения после прохождения ударной волны. В расчетах время индукции находилось по максимуму градиента давления, совпадающему с максимумом мольной доли радикала CH . Предполагается, что возбужденный радикал CH^* , который излучает, имеет такое же временное распределение. Результаты представлены для разных давлений, коэффициентов избытка топлива и концентрации топлива.

Из рис. 1 видно, что согласие с экспериментом во всем диапазоне значений исследуемых в [16] температур, коэффициента избытка топлива и концентраций – хорошее, тогда как использование схемы из [19] демонстрирует похожую тенденцию, но с несколько более выраженным отклонением от экспериментальных данных. Следует отметить, что экспериментальные данные [16] часто используются для проверки кинетического кода [18].

На рис. 2 приведено сравнение расчетных и экспериментальных данных [17] для разных значений коэффициентов избытка топлива, а также разных концентраций этилена. Индукционный период определяли как время, прошедшее между приходом отраженной ударной волны и началом быстрого увеличения инфракрасного излучения CO_2 , определяемое по пересечению касательной к кривой в точке ее перегиба с базовой линией до прихода ударной волны. В расчетах τ_{ind} определялось по пересечению касательной к кривой временной зависимости $[\text{CO}_2]$ в точке ее перегиба с временной осью. Видно, что хорошее согласие между расчетами и экспериментом наблюдается при больших концентрациях C_2H_4 . При очень малых значениях $[\text{C}_2\text{H}_4] = 0.1\%$, как показывают расчеты, температура смеси поднимается на 40–50 градусов (рис. 2а). При этом происходит только конверсия топлива. Возможно, эти особенности поведения смеси дали большее различие расчета и эксперимента.

На рис. 3 приведено сравнение времени задержки воспламенения с результатами работы [18], в которой величина τ_{ind} определялась по на-

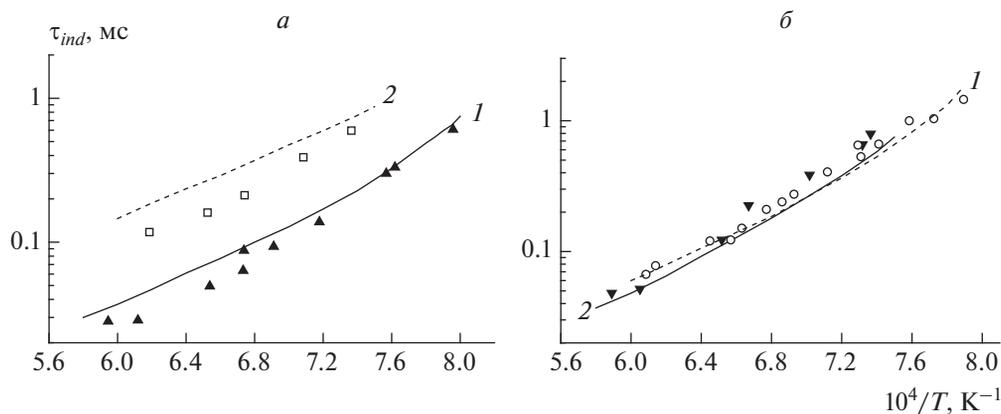


Рис. 2. Сравнение расчетного времени задержки воспламенения с результатами экспериментов [17] (символы) в диапазоне температур 1200–2100 К для модифицированной схемы; *a*: 1 – 0.5% C_2H_4 + 3% O_2 + 96.5% Ar , $\phi = 0.5$, $P = 1.7$ –2.4 бар; 2 – 0.1% C_2H_4 + 0.6% O_2 + 99.3% Ar , $\phi = 0.5$, $P = 1.7$ –2.2 бар; *б*: 1 – 0.5% C_2H_4 + 1.5% O_2 + 98% Ar , $\phi = 1$, $P = 1.5$ –2.3 бар; 2 – 1% C_2H_4 + 1.5% O_2 + 97.5% Ar , $\phi = 2$, $P = 1.7$ –2.4 бар. Указано начальное давление за фронтом отраженной ударной волны.

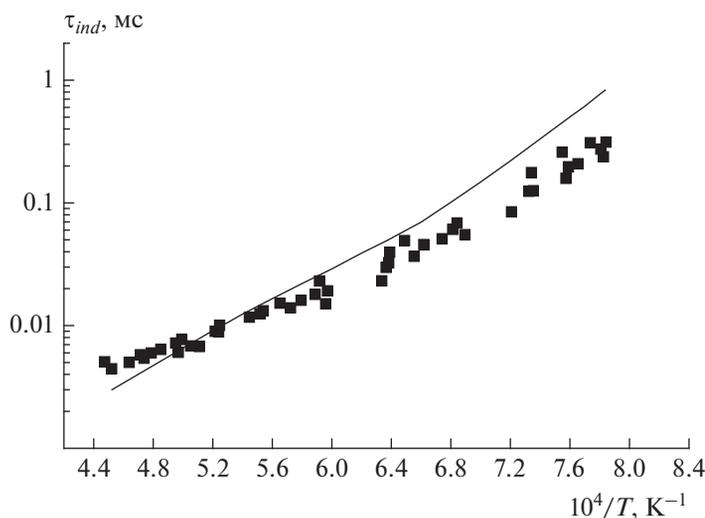


Рис. 3. Сравнение расчетного времени задержки воспламенения с результатами экспериментов [18] (символы) в диапазоне температур 1200–2210 К для модифицированной схемы. Состав: 1% C_2H_4 + 3% O_2 + 96% Ar ; $\phi = 1$, $P = 1.3$ –3 бар – начальное давление за фронтом отраженной ударной волны.

чалу излучения CH^* . Поскольку более точного определения не дано, то в расчетах этот момент соответствовал величине концентрации CH , составляющей 2% от максимального значения. Хорошее согласие наблюдается при высоких и средних начальных температурах. Более резкий рост времени индукции для $T < 1280$ К, возможно, связан с тем, что при этих температурах большую роль начинает играть развитие неустойчивости пограничного слоя, приводящее к многоочаговому воспламенению [21–23]. В этих, более горячих точках размером 1–2 мм температура выше, чем в окружающей смеси. В работе [18] отмечается, что

в смесях с меньшим разбавлением аргоном или азотом не наблюдалось квазистационарного режима за фронтом отраженной ударной волны, и более того, возникали интенсивная турбулентность из-за большого энерговыделения, быстрые волны горения и переход в детонацию. Поэтому низкие значения времени индукции при температурах ниже 1200 К могут объясняться не самовоспламенением, а воспламенением в результате прихода волны горения. Для учета газодинамических процессов в этих условиях требуются, по крайней мере, одномерные расчеты, а лучше – двумерные.

2.3. Кинетический анализ схемы

Кинетический анализ схемы реакций был проведен с использованием собственных программных средств. Для выявления основных реакций, которые влияют на воспламенение смеси этилен–кислород–аргон на разных временных интервалах во всех температурных диапазонах, был выполнен кинетический анализ, который позволил внести изменения в константы скоростей некоторых реакций. Для анализа использовалась методика, изложенная в работах [9–12], которая основана на получении информации об основных реакциях, определяющих изменение концентрации того или иного компонента в процессе счета, в виде диаграмм. В ходе кинетического анализа были построены диаграммы ведущих реакций для различных компонентов, важных с точки зрения кинетики разложения этилена, в частности для C_2H_4 , C_2H_3 , C_2H_2 . Для всех ведущих реакций были проверены значения констант скоростей и продукты этих реакций с использованием различных источников, в том числе базы данных NIST [14]. Таким образом, была модифицирована схема реакций, которая состояла из 710 реакций и включала 103 компонента.

На рис. 4–6 представлены диаграммы для анализа ведущих реакций в кинетике разложения выбранного компонента, в данном случае – C_2H_4 и C_2H_3 . Диаграмма строится в процессе счета. Она имеет разделительную линию, на которой показан знак временной производной для концентрации. Выше и ниже этой линии дан перечень ведущих реакций с их номерами в полном списке реакций, приводящих соответственно к наработке и убыли рассматриваемого компонента. Стрелка в записи реакции указывает направление процесса. Реакции расположены в порядке убывания их интегрального вклада относительно разделительной линии, интегральный вклад реакции на данном временном интервале указан в колонке справа (в $см^{-3}$). В конце разделительной линии справа указан суммарный интегральный вклад всех реакций в $см^{-3}$. Цифры в центральной части диаграммы соответствуют рейтингу реакции для каждого момента времени (от 1 до 9 и меньше (что отмечено *)). Черточка означает, что рейтинг тот же, что и в предыдущий момент времени, отсутствие любого знака соответствует нулевому рейтингу (вклад реакции мал). В нижней части дается временная шкала, а в верхней – концентрация компонента в соответствующий момент времени.

На рис. 4 приведена диаграмма ведущих реакций, которые определяют кинетику горения C_2H_4 в смеси $1\%C_2H_4 + 3\%O_2 + 96\%Ar$ при $P = 3$ бар и $T = 1220$ К с использованием модифицированной схемы. Разложение этилена начинается в реакциях 285, 186, 474, которые имеют рейтинг 1, 2 и 3 со-

ответственно. Со временем рейтинг этих реакций падает, и важную роль начинают играть другие реакции. Такие диаграммы дают информацию не только о том, какие реакции важны в кинетике разложения любого компонента с точки зрения их интегрального вклада убыли или наработки, но также и о том, в каком интервале времени те или иные реакции происходят.

Из диаграммы на рис. 6 видно, что винил, образованный в реакциях 186, 484, 86 и 359, далее разлагается (реакция 81) или вступает в реакцию с O_2 с образованием разных продуктов (реакции 420 и 90), что видно из рейтинга реакций. Также важным промежуточным продуктом для развития цепи реакций является ацетилен C_2H_2 (реакция 285, рис. 4).

Чтобы показать различие результатов для модифицированной и немодифицированной схем, на рис. 7 приведено время задержки воспламенения в зависимости от обратной температуры и на рис. 5 – диаграмма ведущих реакций для смеси $1\%C_2H_4 + 3\%O_2 + 96\%Ar$ при $P = 3$ бар и $T = 1220$ К. Из рис. 7 видно, что времена индукции для разных схем различаются значительно. Из диаграммы на рис. 5 видно, что концентрация C_2H_4 за 5 мс не изменяется при расчете с немодифицированной схемой по сравнению с модифицированной (рис. 4 – верхняя строка), когда $[C_2H_4]$ падает на 60%. Также можно видеть, что скорость убыли C_2H_4 в модифицированной схеме (величина $-1.6 \cdot 10^{17}$ справа на разделительной линии “Знак dn/dt ”) в 2.5 раза больше по сравнению с величиной убыли ($-6.4 \cdot 10^{16}$) в исходной схеме. Если сравнить рейтинги реакций на диаграммах рис. 4 и 5, то видно, что они различаются, а некоторые реакции отсутствуют, например реакция 451, приведенная на рис. 5, отсутствует на рис. 4. Реакции $OH + C_2H_4 \Rightarrow CH_3 + CH_2O$ с такими продуктами в базе данных NIST [14] нет, однако они приведены в работе [24] в качестве возможных. Если эту реакцию убрать, время индукции сократится на 12%. Также из рис. 4 видно, что в списке рейтинга появились другие реакции, которые играют важную роль в кинетике разложения этилена: например, реакции 283, 253, 186 и 474. Таким образом, были проанализированы все реакции, которые влияют на кинетику горения этилена с кислородом. Именно с использованием этой схемы были проведены расчеты времени индукции, представленные на рисунках 1–3, и ламинарной скорости волны горения – на рис. 8.

2.4. Расчет ламинарной скорости пламени

Другим критерием корректной работы кинетической схемы является величина ламинарной скорости волны горения, зависящая от коэффициента избытка топлива ϕ . Ламинарная скорость

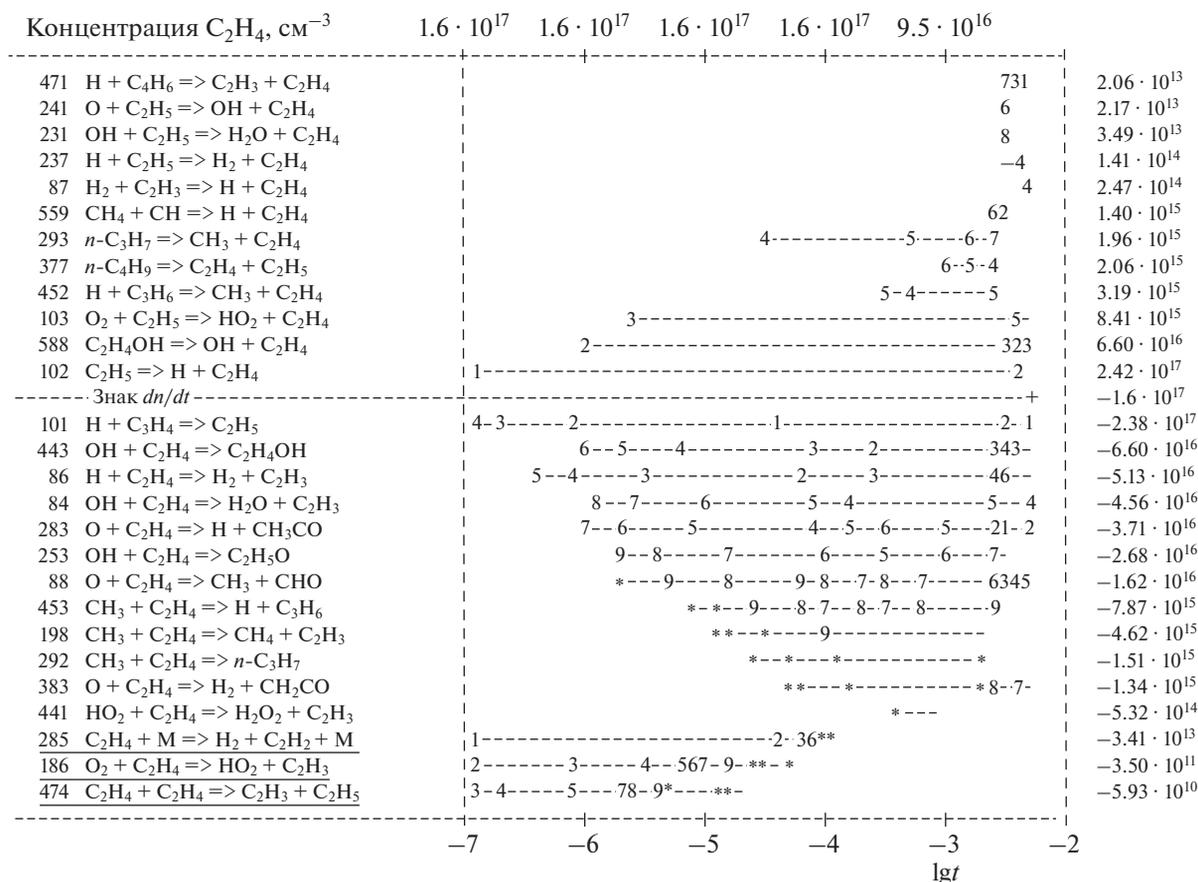


Рис. 4. Диаграмма ведущих реакций, определяющих кинетику окисления C_2H_4 при $T = 1220$ К и $P = 3$ бар для смеси 1% $C_2H_4 + 3\% O_2 + 96\% Ar$. Подчеркиванием отмечены реакции, с которых начинается процесс разложения этилена. Расчет сделан с использованием модифицированной схемы.

является уникальной характеристикой, т.е. присущей только данному составу смеси для конкретных значений давления и температуры. Стоит сказать, что скорости в разных экспериментах могут различаться в зависимости от метода организации эксперимента [25]. Скорость пламени определяют в трубах, в сферических бомбах, в мыльном пузыре, в бунзеновской горелке. На рис. 8 представлена зависимость скорости ламинарного пламени от ϕ для смеси этилен–воздух при $P_0 = 1$ бар и $T_0 = 300$ К. Экспериментально ламинарная скорость пламени определялась в противоточных струях перемешанных смесей топлива и окислителя в плоскости стагнации потоков. Расчет выполнен в одномерной постановке путем решения системы уравнений Навье–Стокса [20] с учетом детальной химической кинетики горения этилено-воздушной смеси с использованием описанной выше модифицированной кинетической схемы. Максимальное отличие расчетных значений от экспериментальных не превышает 10%. Также на рис. 8 представлены экспериментальные данные по

скорости горения из других статей [26–28] и расчет по схеме из [19].

Ламинарную скорость пламени можно рассчитывать разными методами [25]. Для расчета обычно берутся значения скорости газа и продуктов сгорания в положении фронта температуры (пламени) – u_f и V_b соответственно. Тогда можно рассчитать скорость изменения положения фронта температуры в лабораторной системе координат по формуле $V_f = V_b - u_f$. Для случаев постоянного давления положение фронта задается как положение средней температуры между температурой газа перед фронтом и максимальной температурой в сгоревшей области, T_b . По отношению к газу перед фронтом ламинарная скорость горения, V_L , получается для квазистационарного распространения фронта с использованием плотности газа за фронтом температуры (ρ_f) и перед ним (ρ_u): $V_L = \rho_f V_f / \rho_u$ [29]. Параметры газа перед фронтом берутся на большом расстоянии от него.

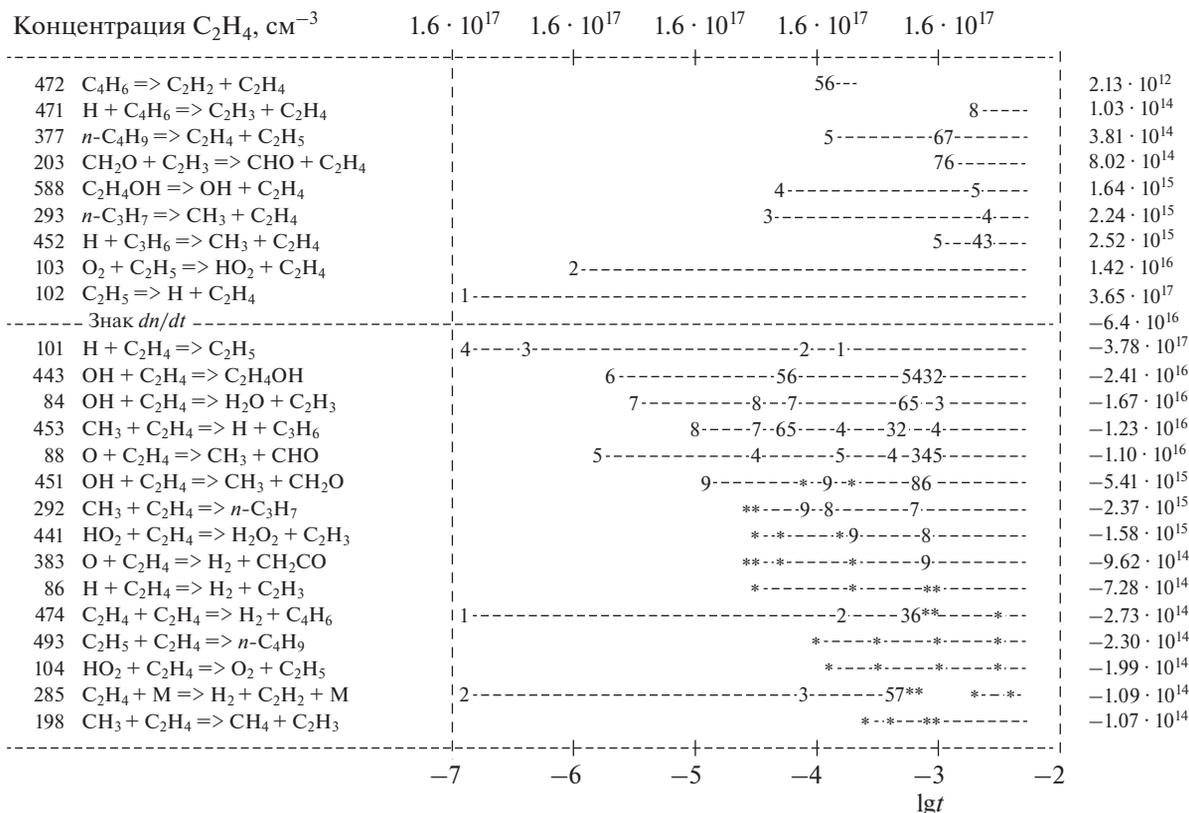


Рис. 5. Диаграмма ведущих реакций, определяющих кинетику окисления C₂H₄ при T = 1220 К и P = 3 бар для смеси 1% C₂H₄ + 3% O₂ + 96% Ar. Расчет сделан с использованием немодифицированной схемы.

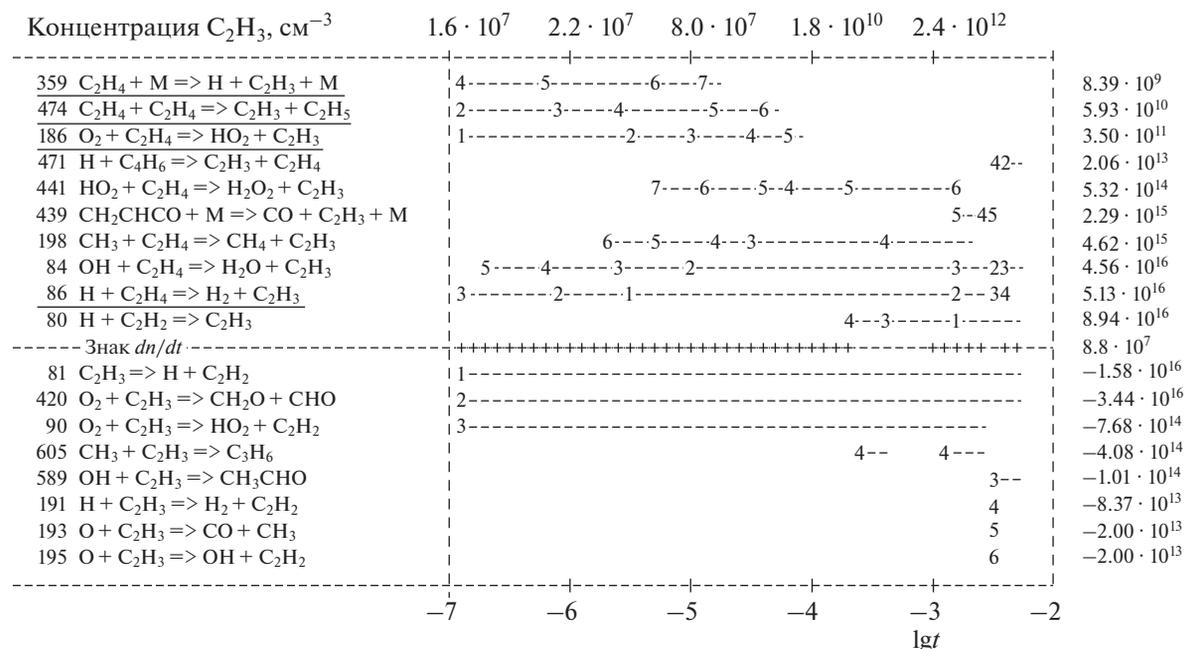


Рис. 6. Диаграмма ведущих реакций, определяющих кинетику окисления C₂H₃ при тех условиях, что в случае рис. 4. Подчеркиванием отмечены реакции, в которых начинается образование радикала C₂H₃. Расчет сделан с модифицированной схемой.

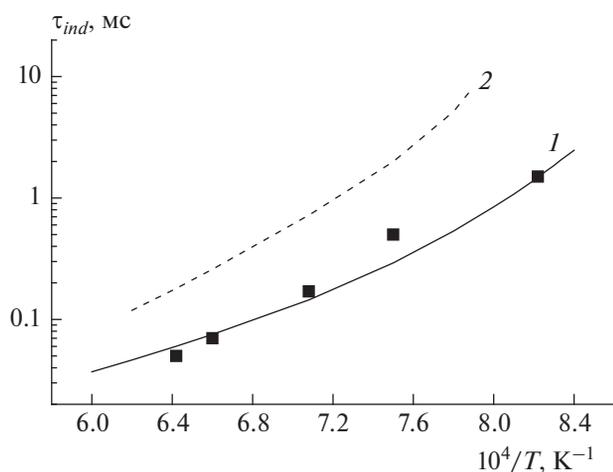


Рис. 7. Сравнение времени задержки воспламенения для модифицированной (1) и не модифицированной (2) схем. Символы – эксперимент [16]. Начальное давление за фронтом отраженной ударной волны $P = 3$ бар. Состав: $1\%C_2H_4 + 3\%O_2 + 96\%Ar$; $\phi = 1$.

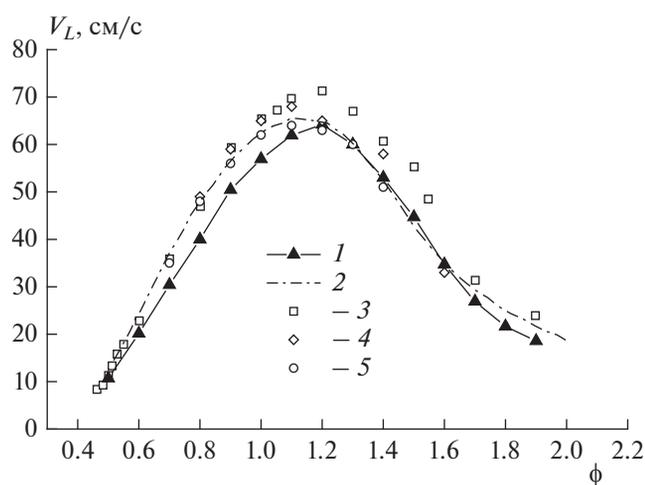


Рис. 8. Зависимость ламинарной скорости волны горения, V_L , от коэффициента избытка топлива при $P_0 = 1$ бар и $T_0 = 300$ К: 1 – расчет по модифицированной схеме, 2 – расчет из [19]; символы – экспериментальные данные: 3 – [26], 4 – [27], 5 – [28].

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Имевшаяся схема горения легких углеводородов, использованная авторами для решения различных задач [8, 13] и состоящая из 710 реакций для 103 компонентов, была адаптирована для дальнейшего применения в задачах плазменно-стимулированного горения этилена в потоке воздуха. Схема была модифицирована по методике, разработанной ранее [11]. Представленные в работе результаты расчетов с использованием модифицированной кинетической схемы показывают хорошее согласие с экспериментальными дан-

ными по времени задержки воспламенения в смеси $C_2H_4-O_2-Ar$ и ламинарной скорости волны горения в смеси этилен–воздух в диапазонах температур 1200–2210 К и давлений 1–12 бар. На основе модифицированной кинетической схемы можно сформировать укороченный список реакций горения этилено-воздушной смеси и входящих в них компонентов. Есть разные методы для редуцирования кинетической схемы. Например, в работе [30] в качестве параметра для сопоставления получаемых схем было выбрано время задержки воспламенения, а в качестве критерия сравнения – допустимое относительное отклонение от заданного времени индукции. В нашем случае отбор компонентов и реакций проводится программными средствами по критериям, описанным в работе [31]: во-первых, учитываются только те компоненты, концентрация за время счета была больше некоторой минимальной величины n_{min} , задаваемой до расчета; во-вторых, учитываются те реакции, интегральный вклад которых за время счета был больше некоторой, заранее заданной величины ϵ .

Полученные результаты дают возможность решить задачу инициирования волны горения осесимметричным разрядом в двумерной постановке с использованием полной схемы, включающей плазмохимию воздуха и схему горения этилена.

Работа выполнена при поддержке грантом Российского научного фонда № 21-79-10408.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Leonov S.B. // Energies. 2018. № 11(7). 1733; <https://doi.org/10.3390/en11071733>
2. Firsov A.A., Savelkin K.V., Yarantsev D.A., Leonov S.B. // Philos. Trans. R. Soc. London, Ser. A. 2015. V. 373. № 2048; <https://doi.org/10.1098/rsta.2014.0337>
3. Фролов С.М., Иванов В.С. // Хим. физика. 2021. Т. 40. № 4. С. 68; <https://doi.org/10.31857/S0207401X21040075>
4. Deak N., Bellemans A., Bisetti F. // Proc. Combust. Inst. 2021. V. 38. P. 6551; <https://doi.org/10.1016/j.proci.2020.06.126>
5. Kosarev I.N., Kindysheva S.V., Momot R.M. et al. // Combust. and Flame. 2016. V. 165. P. 259; <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2015.12.011>
6. Tsolas N., Yetter R.A. // Ibid. 2017. V. 176. P. 534; <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2016.10.022>
7. Bityurin V.A., Bocharov A.N., Filimonova E.A., Klimov A.I. // Proc. 15 Intern. Conf. on Gas Discharges and their Applications / Ed. Bordage et al. Toulouse: GD Local Organizing Committee, 2004. P. 973.
8. Filimonova E.A. // J. Phys. D: Appl. Phys. 2015. V. 48. 015201; <https://doi.org/10.1088/0022-3727/48/1/015201>
9. Филимонова Е.А., Амиров Р.Х. // Физика плазмы. 2001. Т. 27. № 8. С. 750.

10. *Filimonova E.A., Kim Y., Hong S.H., Song Y.H.* // J. Phys. D: Appl. Phys. 2002. V. 35. P. 2795.
11. *Железняк М.Б., Филимонова Е.А.* // Теплофизика высоких температур. 1998. Т. 36. № 4. С. 557.
12. *Филимонова Е.А., Амиров Р.Х., Ким Х.Т., Парк И.Х.* // Хим. физика. 2000. Т. 19. № 9. С. 75.
13. *Filimonova E., Vocharov A. Bityurin V.* // Fuel. 2018. V. 228. P. 309.
<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.04.124>
14. *Manion J.A., Huie R.E., Levin R.D. et al.* NIST Chemical Kinetics Database, NIST Standard Reference Database 17. Ver. 7.0 (Web Version). Release 1.6.8. Data version 2015.09. Gaithersburg, Maryland: National institute of standards and technology, 2018; <https://kinetics.nist.gov/kinetics/>
15. *Басевич В.Я., Веденев В.И., Фролов С.М., Романович Л.Б.* // Хим. физика. 2006. Т. 25. № 11. С. 87.
16. *Baker J.A., Skinner G.B.* // Combust. and Flame. 1972. V. 19. P. 347.
17. *Hidaka Y., Nishimori T., Sato K. et al.* // Ibid. 1999. V. 117. P. 755.
18. *Brown C.J., Thomas, G.O.* // Ibid. 1999. V. 117. P. 861.
19. *Wang H., Davis S.G., Laskin A., Egolfopoulos F., Law C.K.* USC Mech Ver. II. High-Temperature Combustion Reaction Model of H₂/CO/C₁–C₄ Compounds, 2007; https://ignis.usc.edu:80/Mechanisms/USC-Mech%20II/USC_Mech%20II.htm
20. *Битюрин В.А., Бочаров А.Н.* // Изв. РАН. МЖГ. 2006. № 5. С. 188.
21. *Kiverin A.D., Minaev K.O., Yakovenko I.S.* // Combust. and Flame. 2020. V. 221. P. 420;
<https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2020.08.013>
22. *Михалкин В.Н., Сумской С.И., Тереза А.М. и др.* // Хим. физика. 2022. Т. 41. № 8. С. 3;
<https://doi.org/10.31857/S0207401X2208009X>
23. *Киверин А.В., Минаев К.О., Яковенко О.С.* // Хим. физика. 2020. Т. 39. № 8. С. 16;
<https://doi.org/10.31857/S0207401X20080051>
24. *Westbrook C.K., Dryer F.L., Schug K.E.* // Proc. 19th Sympos. (Intern.) on Combust. Pittsburgh: The Combust. Inst., 1982. V. 19. № 1. P. 153.
25. *Konnov A.A., Mohammad A., Kishore V.R. et al.* // Prog. Energy Combust. Sci. 2018. V. 68. P. 197;
<https://doi.org/10.1016/j.peecs.2018.05.003>
26. *Egolfopoulos F.N., Zhu D.L., Law C.K.* // Proc. 23th Sympos. (Intern.) on Combust. Pittsburgh: The Combust. Inst., 1991. V. 23. № 1. P. 471;
[https://doi.org/10.1016/S0082-0784\(06\)80293-6](https://doi.org/10.1016/S0082-0784(06)80293-6)
27. *Hassan M.I., Aung K.T., Kwon K.C., Faeth G.M.* // J. Propul. Power. 1994. V. 14. P. 479.
28. *Jomaas G., Zheng X.L., Zhu D.L., Law C.K.* // Proc. Combust. Inst. 2006. V. 30. P. 193.
29. *Martz J.B., Lavoie G.A., Im H.G. et al.* // Combust. and Flame. 2012. V. 159. P. 2077;
<https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2012.01.011>
30. *Тереза А.М., Агафонов Г.Л., Бетев А.С., Медведев С.П.* // Хим. физика. 2020. Т. 39. № 12. С. 29;
<https://doi.org/10.31857/S0207401X20120158>
31. *Филимонова Е.А.* Кинетика процессов горения, конверсии оксидов азота и углеводородов, стимулированных наносекундными разрядами. Дис. ... д-ра физ.-мат. наук. М.: ОИВТ РАН, 2021;
https://jiht.ru/science/dissert-council/diss_texts/Filimonova.pdf