

УДК 544.45

ВЛИЯНИЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ ОГРАНИЧЕНИЙ НА НУЛЬМЕРНЫЕ РАСЧЕТЫ ПРОЦЕССА ВОСПЛАМЕНЕНИЯ СМЕСИ CH_4 /ВОЗДУХ В НАНОСЕКУНДНОМ ДИАПАЗОНЕ

M. Suzuki^{1,2}, Y. Morii¹, H. Nakamura¹, K. Maruta¹¹Институт механики сплошной среды, Университет Тохоку, 980-8577 Сендай, Япония
m.suzuki@edyn.ifs.tohoku.ac.jp, labs@edyn.ifs.tohoku.ac.jp²Высшая школа инженерии, Университет Тохоку, 980-8579 Сендай, Япония

Проведены нульмерные расчеты наносекундной динамики процесса воспламенения под действием наносекундного разряда в условиях двух типов вычислительных ограничений. Определено влияние этих ограничений на оценку начальных стадий экспериментально наблюдаемой динамики давления. Расчеты проведены в рамках следующих ограничений: постоянные внутренняя энергия и объем (U&V) и постоянные энтальпия и давление (H&P). Обнаружены различия в полученных решениях. Поскольку давление постоянно в условиях H&P, общая концентрация всех частиц уменьшается в процессе воспламенения. При этом радикалы O образуются и расходуются в малых количествах. В случае U&V развитие реакций и рост температуры происходят более динамично, чем в условиях H&P. Обнаружены существенные различия между результатами расчета в условиях U&V и H&P. Следовательно, значительные отклонения результатов расчета от экспериментальных данных могут быть вызваны некорректным учетом теплопотерь за счет падения давления.

Ключевые слова: наносекундный разряд, нетермическая плазма, неравновесная плазма, наносекундные импульсно-периодические разряды, плазменно-стимулированное горение, реагирующий сжимаемый поток.

DOI 10.15372/FGV20210405

ВВЕДЕНИЕ

Как показали исследования, технология сжигания бедных смесей, применяемая в поршневых двигателях с искровым зажиганием, позволяет достичь высокого теплового КПД, благодаря высокому показателю адиабаты и низкой температуре продуктов сгорания, что снижает тепловые потери в стенку цилиндра [1, 2]. Недостатком режима сжигания бедных смесей является более длительное время реакции из-за низких ламинарной и турбулентной скоростей горения, что снижает стабильность горения. Для решения этой проблемы необходимо увеличивать скорость турбулентного горения. Однако хорошо известно, что зажигание бедных смесей в условиях интенсивной турбулентности чрезвычайно трудно осуществить из-за высокой минимальной энергии, необходимой для

зажигания [3–5]. Таким образом, для создания надежных двигателей, работающих на обедненной смеси, необходима разработка новых технологий зажигания.

В последние годы применение неравновесной плазмы для улучшения характеристик зажигания привлекает всё большее внимание. Существует два вида плазмы: термическая (равновесная) и нетермическая (неравновесная). Термическая плазма характеризуется температурой электронов, вращательной и колебательной температурами частиц. При высоких температурах электроны и газ находятся в тепловом равновесии. В неравновесной плазме электронная, колебательная и вращательная температуры сильно различаются. При этом температура электронов выше температуры газа. При использовании для зажигания неравновесной плазмы в ней в результате столкновений с высокотемпературными электронами образуются активные химические соединения [6]. В ряде работ сообщается, что эти активные соединения могут вызывать следующие цепные реакции и способствовать

© Suzuki M.^{1,2}, Morii Y.¹, Nakamura H.¹, Maruta K.¹, 2021.

¹Institute of Fluid Science, Tohoku University, 2-1-1 Katahira, Aoba, Sendai, Miyagi 980-8577, Japan. ²Graduate School of Engineering, Tohoku University, 6-6 Aramaki Aza Aoba, Aoba, Sendai, Miyagi 980-8579, Japan.

воспламенению от источника с низкой энергией. В частности, в работе [7] была сделана попытка ввода неравновесной плазмы в реальную камеру сгорания. Как известно, наносекундные импульсно-периодические разряды (НИПР) способны эффективно создавать неравновесную плазму. Хотя экспериментально полученные результаты показывают, что НИПР значительно улучшают процесс воспламенения, детальные механизмы НИПР остаются неясными [8], поскольку реакции, происходящие под воздействием неравновесной плазмы, сложны, а тот факт, что их характерное время составляет наносекунды, затрудняет экспериментальную проверку гипотез. В этой связи численный анализ может сыграть важную роль в установлении механизма воспламенения с применением НИПР.

Авторы работы [9] численно анализировали процесс зажигания с помощью НИПР. Сравнение времен задержки воспламенения предварительно перемешанной смеси при фиксированной температуре в обычном режиме и под воздействием наносекундного разряда при различных значениях напряженности электрического поля показало, что при достаточно высокой напряженности время задержки воспламенения меньше, чем в обычном режиме самовоспламенения. Аналогичные результаты получены и в других работах [10, 11].

Обычно численный анализ воспламенения с НИПР проводят в условиях постоянного давления. В работе [12] выполнены эксперименты и численный анализ в предположении постоянного давления в системе с использованием плоских электродов. В уравнение энергии был включен член, отвечающий за потери тепла на электродах. Численные результаты показали хорошее согласие с экспериментами. В работах [13, 14] проведены эксперименты с плоскими электродами и анализ нульмерной модели с тепловыми потерями в условиях постоянного объема. Теплотери в модели учитывались аналогично тому, как это было предложено в [12]. Данные экспериментов хорошо согласуются с численными результатами, полученными для смеси метан/кислород/гелий. Очевидно, что учет теплотери в численной модели, включая потери на плоских электродах, имеет большое значение.

Недавно были начаты экспериментальные работы [15] по использованию НИПР между парой электродов в виде заостренных стерж-

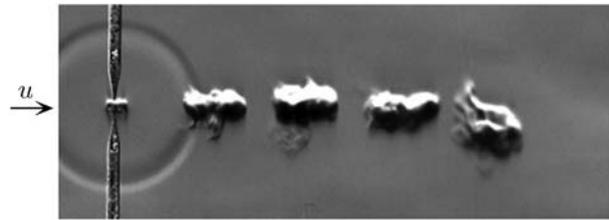


Рис. 1. Шлирен-изображение развития ядра зажигания через 4 мс после импульса разряда при коэффициенте избытка горючего 0.6, скорости 10 м/с, зазоре 2 мм и времени между импульсами 1 мс

ней для двигателей с искровым зажиганием. Для анализа процессов в таких системах необходимо построение нульмерной модели, которая позволит на первом этапе выяснить, как влияет давление на воспламенение, поскольку это влияние значительно сильнее оказываемого теплотериями на электродах. В процессе воспламенения на давление влияет сильное электрическое поле, которое вызывает реакции с характерными временами наносекундного диапазона. На рис. 1 представлено шлирен-изображение (из работы [16]) ядра воспламенения в потоке вскоре после начала пятого импульса разряда, что похоже на условие, использованное в более ранней работе [15]. На рисунке виден фронт ударной волны, вызванной пятым импульсом разряда. Повышенное давление в локальной области мгновенно падает до давления окружающего газа за счет волны разрежения, период которой равен нескольким миллисекундам. То есть состояние, когда давление равно давлению окружающего газа, продолжается значительно дольше, чем время разряда, составляющее порядка нескольких наносекунд. Таким образом, при нульмерном моделировании наносекундного разряда между заостренными стержневыми электродами целесообразно учитывать потери энергии, обусловленные падением давления. В качестве примера на рис. 2 схематично показано изменение давления во время разряда. Если принять скорость распространения волны разрежения после повышения температуры равной ≈ 1000 м/с, то при диаметре электрода 2 мм волна достигнет центральной оси электрода примерно за 1 мкс. Волна разрежения успеет распространиться приблизительно на 0.1 мм от стенки электрода за время одного импульса разряда (100 нс). Следовательно, можно сделать вывод, что пока не придет волна разрежения, систе-

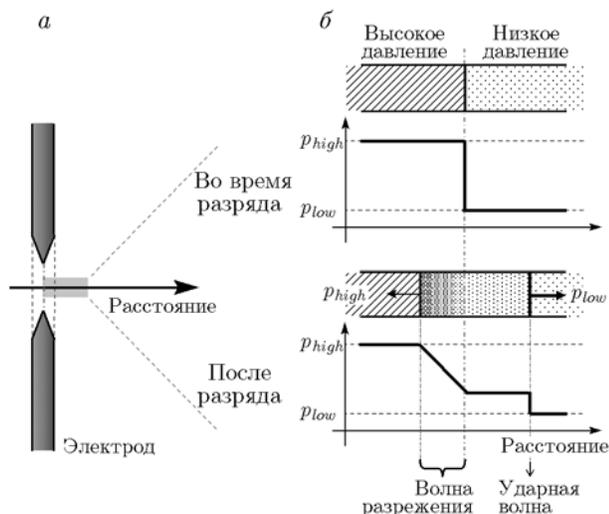


Рис. 2. Схематическое представление динамики давления во время и после разряда:

б — давление в области, показанной серым цветом между электродами на схеме а

му можно рассматривать как адиабатическую и имеющую постоянный объем. Таким образом, изучение влияния вычислительных ограничений при учете изменения давления в таких условиях имеет большое значение.

Цель настоящего исследования — анализ результатов, полученных при различных условиях вычислительных ограничений для описания процесса воспламенения под действием наносекундного разряда. Чтобы корректно изучить реальное изменение давления, вначале было проведено исследование влияния условий ограничения, используемых в нульмерной модели, на результаты расчета. Обычно рассматриваются ограничения двух видов: постоянные внутренняя энергия и объем (далее U&V), для которых ожидается, что давление достигнет теоретических максимальных значений; постоянные энтальпия и давление (далее H&P), т. е. давление не изменяется. Особое внимание было уделено различиям процессов зажигания при U&V и H&P.

1. МЕТОДИКА

Для исследования воспламенения смеси $\text{CH}_4/\text{воздух}$, инициированного наносекундным разрядом, использовались собственный код для моделирования процесса зажигания и программа нульмерного расчета кинетики плазмы (ZDPlasKin) [17]. Вычислительный метод основан на том же принципе, что описан в рабо-

тах [13, 14]. Основные уравнения имеют следующий вид:

$$\frac{dY_k}{dt} = \frac{\dot{\omega}_k W_k}{\rho}, \quad k = 1, \dots, K, \quad (1)$$

$$\dot{\omega} = \dot{\omega}_{\text{ZDPlasKin}} + \dot{\omega}_c, \quad (2)$$

$$\frac{dT}{dt} = -\frac{1}{\rho c} \sum_{k=1}^K \epsilon_k \dot{\omega}_k W_k. \quad (3)$$

Здесь $\dot{\omega}$ — скорость образования компонентов, моль/($\text{м}^3 \cdot \text{с}$), представляющая собой сумму скоростей плазмохимических ($\dot{\omega}_{\text{ZDPlasKin}}$) и химических ($\dot{\omega}_c$) реакций; Y_k — массовая доля k -го компонента, моль/ м^3 ; W_k — молекулярная масса k -го компонента, кг/моль; T — температура, К; ρ — плотность, кг/ м^3 ; c — удельная теплоемкость при постоянном объеме (c_v) или постоянном давлении (c_p), Дж/(кг·К); ϵ_k — внутренняя энергия u или энтальпия h k -го компонента, Дж/кг. Удельная теплоемкость c_v и энергия u использовались для случая U&V, тогда как c_p и h — для H&P.

Интегрирование по времени химических и плазмохимических реакций выполнено с использованием быстрого и надежного метода без вычисления якобиана — метода MACKS, разработанного в [18]. Функция распределения электронов по энергиям (EEDF) и константы скоростей реакций с электронами найдены с помощью решателя уравнения Больцмана (BOLSIG+) [19], включенного в ZDPlasKin.

Исследовалась стехиометрическая смесь $\text{CH}_4/\text{воздух}$. В качестве начальных условий задавались температура 300 К и давление 0.1 МПа. Напряженность приведенного электрического поля E/N [Тд] вычислялась следующим образом:

$$\frac{E}{N} = T_d \sin\left(\pi \frac{t}{t_p}\right), \quad (4)$$

где E — напряженность электрического поля, Н/Кл; N — число нейтральных частиц в единице объема, м^{-3} ; T_d — максимальное значение электрического поля, Тд; t_p — время разряда, с. В этой работе значения $T_d = 160$ Тд, $t_p = 100$ нс выбраны в соответствии с экспериментальными условиями [15]. Принимая во внимание, что зажигание происходит в сильно турбулентном потоке, предполагалось, что

T достигает высоких значений и пламя распространяется в условиях U&V. Кроме того, значение E/N во время разряда рассчитывалось согласно (4), в остальное время принималось равным нулю. Следует отметить, что расчеты для одиночного разряда использовались здесь как первая попытка оценки влияния давления на процессы зажигания наносекундного порядка.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В этом параграфе сначала обсуждается разное повышение температуры в случаях U&V и H&P, а затем приводятся некоторые причины, вызывающие наблюдаемые различия. Особое внимание уделено химическим и плазмохимическим реакциям, стимулирующим воспламенение. Отдельно исследуются изменения концентраций всех соединений, вызванные изменением давления. Определяется критерий учета потерь энергии из-за понижения давления на основе различия процессов зажигания в условиях U&V и H&P.

2.1. Зависимости температуры и давления от времени при U&V и H&P

На рис. 3 представлены зависимости температуры и давления от времени при U&V и H&P. Приведенная напряженность электрического поля E/N в выражении (4) задана в интервале $0 \div 100$ нс. При этом максимальное значение (160 Тд) достигается в момент времени 50 нс.

В режиме U&V температура быстро увеличивается во время разряда (<100 нс) и становится почти постоянной (3800 К). При H&P температура увеличивается постепенно после первоначального быстрого подъема до ≈ 1000 К. Зажигание в условиях U&V будем называть «быстрым», а в условиях H&P — «медленным». Действительно, для успешного зажигания с помощью НИПР в двигателях с искровым зажиганием необходимо «быстрое» зажигание для поддержания реакций до следующего разряда в сильно турбулентных полях. Напротив, при H&P наблюдается «медленное» зажигание и остается неясным, произойдет ли воспламенение до следующего разряда.

Обнаружены большие различия в характере повышения температуры в случаях U&V и H&P, несмотря на одинаковые заданные значе-

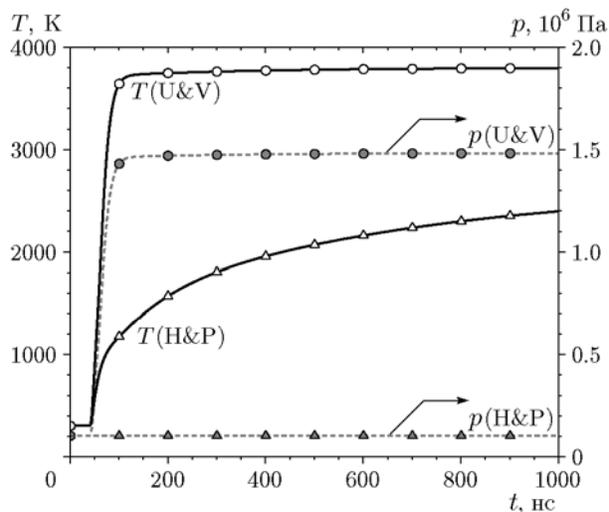


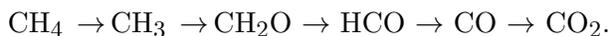
Рис. 3. Зависимости температуры и давления от времени в условиях U&V и H&P:

символами показана каждая тысячная точка

ния приведенной напряженности электрического поля и времени разряда. Для исследования этих различий ниже проанализированы молярные доли электронов и некоторых соединений, участвующих в типичных для метана реакциях.

2.2. Молярные доли электронов и химических соединений в реакциях, типичных для метана

На рис. 4 представлены молярные доли основных химических соединений, участвующих в типичных для метана реакциях (обозначим их условно C1), а также концентрация электронов в условиях U&V и H&P. Временной интервал составляет $0 \div 1$ мкс. Известно, что основной путь окисления метана



Основные соединения имеют максимальную молярную долю в одной и той же последовательности как при U&V, так и при H&P. В условиях U&V концентрация электронов быстро увеличивается во время разряда. Остальные реакции, в которых задействованы C1-соединения, следуют после реакций с участием электронов. Наконец, молярная доля конечного продукта CO_2 становится почти постоянной. Таким образом, в режиме U&V реакции C1 можно считать завершенными в течение примерно 150 нс после окончания разряда.

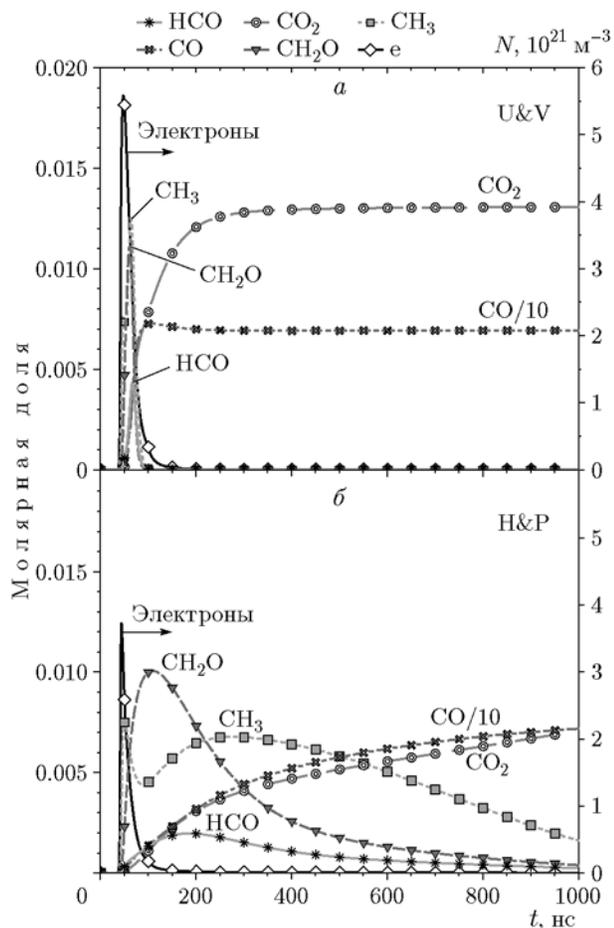


Рис. 4. Молярные доли соединений, участвующих в реакциях, типичных для метана, и концентрация электронов в условиях U&V (а) и H&P (б):

символами показана каждая пятисотая точка

При H&P концентрация электронов и молярные доли других веществ (кроме CO) намного меньше, чем при U&V. Более того, молярные доли всех химических соединений продолжают изменяться после окончания разряда. Следовательно, при H&P химические реакции C1 все еще продолжают в момент времени 1 мкс.

Из зависимостей, приведенных на рис. 3 и 4, видны существенные различия в характере протекания реакций во времени в условиях H&P и U&V: при U&V наблюдалось «быстрое» воспламенение, вызванное быстрыми реакциями C1, при H&P — «медленное», при этом реакции C1 продолжались.

Был проведен анализ скорости образования радикалов O, поскольку среди всех нейтральных частиц они образуются в наиболь-

шем количестве в плазмохимических реакциях после разряда. Ранее [20, 21] было показано, что образованию радикалов O способствуют возбужденные частицы, которые возникают в результате плазмохимических реакций. Известно также, что радикалы O имеют высокую реакционную способность и способствуют распространению фронта горения [22–24]. Будем различать образование радикалов O в плазмохимических и в химических реакциях, чтобы понять происходящие явления.

2.3. Скорость образования радикалов O в плазмохимических и химических реакциях

В отличие от других нейтральных частиц, радикалы O присутствуют в большом количестве, поскольку образуются в результате термического разложения O₂ и плазмохимических реакций с участием возбужденных частиц. Роль возбужденного O₂ и активных радикалов O в процессах зажигания обсуждалась не только в работах, где использовался НИПР [6, 9, 13, 22–24], но и в исследованиях лазерного излучения [20] и электрического разряда [21]. В этом параграфе представлено исследование скорости образования радикалов O. На рис. 5 показана динамика давления и скорости образования радикалов O в период примерно от 35 нс (когда начинается рост температуры) до 100 нс (когда заканчивается разряд) в условиях U&V и H&P. Скорости образования радикалов O, рассчитанные с использованием ZDPlasKin, относятся к плазмохимическим реакциям (линии 1), а рассчитанные с использованием кода для моделирования зажигания — к химическим реакциям (линии 2).

Сначала рассмотрим результаты исследования в условиях U&V (рис. 5, а). Скорость образования радикалов O как в плазмохимических реакциях, так и в химических начинает увеличиваться примерно в момент времени 40 нс вместе с давлением. В плазмохимических реакциях она увеличивается быстро. В химических реакциях скорость образования достигает максимального значения примерно при 45 нс и становится отрицательной при достижении E/N максимума в момент времени 50 нс (см. рис. 3). Результаты показывают, что зажигание может произойти по той причине, что радикалы O, образующиеся в плазмохимических реакциях, немедленно расходуются в химических реакциях: происходит переход от реакций, вызванных плазмой, к реакциям горения.

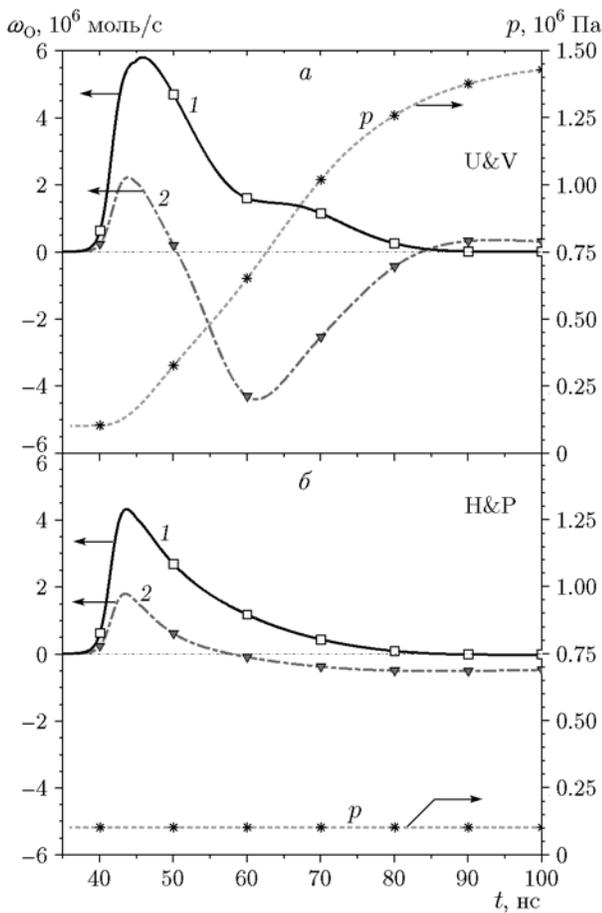


Рис. 5. Скорость образования радикалов O и давления в условиях U&V (a) и H&P (б): 1 — плазмохимические реакции, 2 — химические реакции, символами показана каждая сотая точка

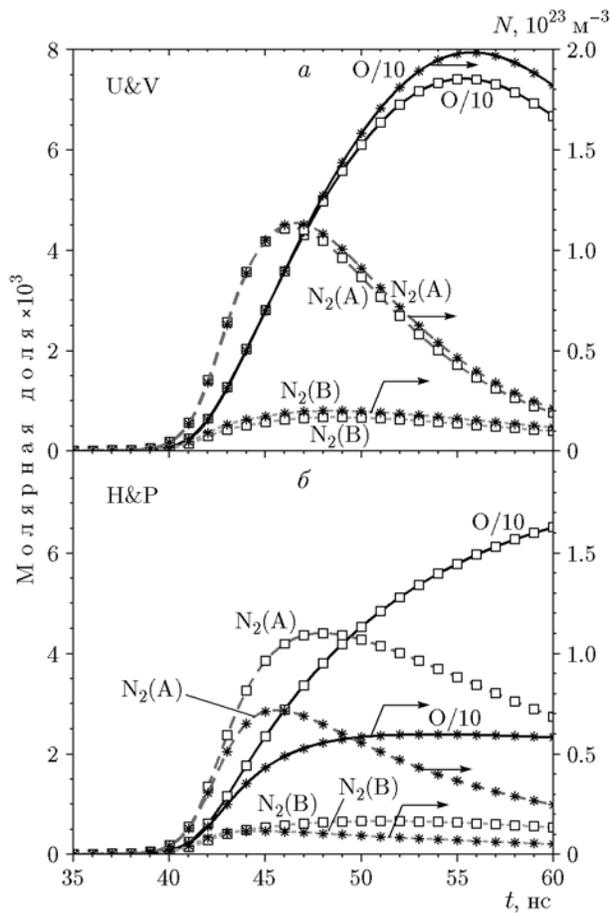


Рис. 6. Молярные доли (квадраты) и концентрации (звездочки) радикалов O и электронно-возбужденных частиц в условиях U&V (a) и H&P (б): символами показана каждая десятая точка

В результате реализуется «быстрое» зажигание при U&V.

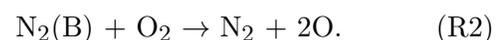
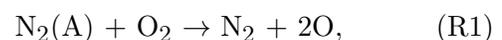
В условиях H&P (рис. 5,б) скорость образования радикалов O в плазмохимических и химических реакциях увеличивается, как и при U&V, но в химических реакциях скорость образования не снижается, как в случае U&V.

Скорость образования радикалов O в плазмохимических и химических реакциях демонстрирует различное поведение при увеличении давления в условиях U&V. Ниже обсуждаются результаты расчета образования электронно-возбужденных частиц двух видов — N₂(A) и N₂(B), которые способствуют образованию радикалов O [9]. Особое внимание уделено интервалу времени 35 ÷ 60 нс, в котором плазмохимические реакции преобладают в условиях U&V.

2.4. Молярные доли и концентрации радикалов O и электронно-возбужденных частиц

На рис. 6 представлены молярные доли и концентрации радикалов O и электронно-возбужденных частиц N₂(A) и N₂(B) в условиях U&V и H&P.

Сначала рассмотрим результаты при U&V (рис. 6,а). Ранее было показано, что электронно-возбужденные частицы N₂(A) и N₂(B) способствуют образованию радикалов O [9]:



Концентрация N₂(A) сильно уменьшается после 45 нс при U&V. Поэтому можно считать,

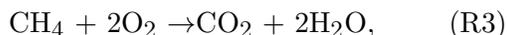
что образованию радикалов О способствует реакция кислорода и $N_2(A, V)$. Фактически количество радикалов О начинает уменьшаться через 55 нс, когда температура газа достигает 1300 К, поскольку радикалы О расходуются в реакциях горения. Как уже говорилось выше, радикалы О обладают высокой реакционной способностью и промотируют распространение фронта горения. В силу того, что реакции горения значительно интенсифицировались, в условиях U&V наблюдалось «быстрое» зажигание. В случае, когда радикалы О расходуются в реакциях горения, можно считать, что химические реакции доминируют над неравновесными плазмохимическими реакциями.

Теперь рассмотрим результаты для H&P (рис. 6, б). Молярные доли и концентрации быстро увеличиваются и достигают максимальных значений. Хотя максимальные молярные доли аналогичны молярным долям при U&V, максимальные концентрации ниже, чем в случае U&V. Различие концентраций становится большим после 50 нс. В частности, имеется значительная разница между максимальной концентрацией и молярной долей радикалов О. При H&P радикалы О не расходуются, как в случае U&V, следовательно, реакции не развиваются.

Если при U&V поведение концентраций аналогично поведению молярных долей (см. рис. 6, а), то при H&P (см. рис. 6, б), напротив, наблюдаются разные тенденции. Молярные доли рассчитываются исходя из концентрации каждого соединения и общей концентрации всех соединений. Поэтому внимание было уделено изучению суммарной концентрации всех соединений и давления при U&V и H&P.

2.5. Влияние полной концентрации и давления

На рис. 7 представлены временные зависимости полной концентрации всех соединений и давления при U&V и H&P. Предполагая следующую брутто-реакцию для метана:



можно ожидать, что при U&V концентрация заметно не изменится из-за образования промежуточных соединений и возможного сближения, потому что равные количества веществ должны присутствовать в левой и правой частях уравнения реакции. Как видно на рис. 7,

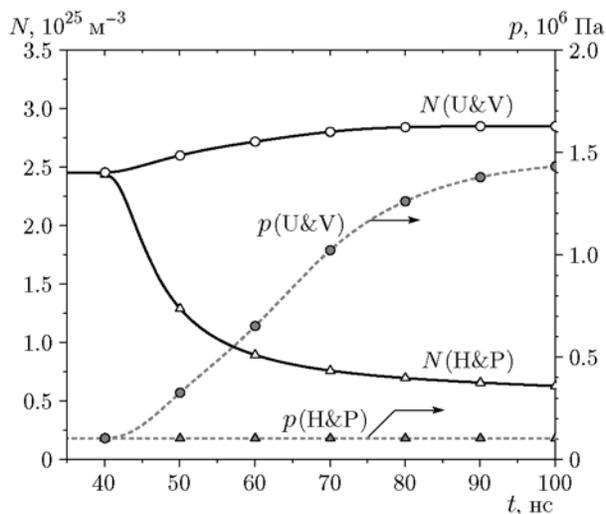


Рис. 7. Зависимости полной концентрации всех соединений и давления от времени в условиях U&V и H&P:

символами показана каждая десятая точка

общая концентрация немного увеличивается за счет радикалов, образующихся в реакции разложения метана. Это небольшое увеличение можно считать разумным в условиях U&V. Однако при H&P, чтобы поддерживать постоянное давление, общую концентрацию необходимо значительно уменьшить. По мере уменьшения концентрации количество актов реакций сокращается из-за уменьшения частоты столкновения молекул. Это может привести к большим расхождениям между результатами расчетов для H&P и фактическими наблюдениями.

Кроме того, при H&P уменьшение концентрации на рис. 5 может быть связано с тем, что радикалы О не образуются или не расходуются в значительной степени, как в случае U&V. Поскольку полная концентрация уменьшается в условиях постоянного давления, концентрация электронно-возбужденных частиц, которые вносят вклад в образование радикалов О, также снижается. Соответственно образование и расходование радикалов О не стимулируются, что также может быть причиной, по которой реакция горения не ускоряется при H&P, как видно из рис. 3 (повышение температуры) и рис. 4 (типичные соединения при окислении метана). Поскольку скорости реакций не увеличиваются, в условиях H&P наблюдается «медленное» зажигание.

Таким образом, при проведении расчетов

процесса зажигания под влиянием неравновесной плазмы в предположении Н&Р выявлены следующие проблемы. Как и приведенная напряженность электрического поля E/N в (4), электрическое поле E обратно пропорционально концентрации нейтральных молекул. Однако при расчетах в условиях Н&Р концентрация значительно ниже. Результаты, полученные в этом исследовании в предположении условий Н&Р, не соответствуют реальным явлениям. Поэтому следует тщательно подходить к выбору ограничений для расчетов «быстрого» воспламенения под действием НИПР. В дальнейшем планируется выполнение расчета процесса зажигания с учетом пространственных измерений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведены нульмерные расчеты процессов воспламенения смеси CH_4 /воздух в наносекундном диапазоне с использованием НИПР при двух типах ограничений: постоянные внутренняя энергия и объем (U&V) и постоянные энтальпия и давление (Н&Р). Особое внимание уделено различиям процессов зажигания при U&V и Н&Р. Наблюдается значительное различие в характере роста температуры, несмотря на изначально равные значения приведенной напряженности электрического поля и длительности разряда. Учет изменения давления в случае U&V приводит к тому, что полная концентрация частиц немного увеличивается за счет образования радикалов в реакциях окисления CH_4 . В условиях U&V радикалы O эффективно образуются в плазмохимических реакциях и расходуются в реакциях горения. Это приводит к «быстрому» зажиганию при U&V. Однако в условиях Н&Р, поскольку давление поддерживается постоянным, общая концентрация частиц значительно снижается. Поэтому при Н&Р радикалы O практически не образуются и не расходуются, как это происходит при U&V, что не согласуется с экспериментальными наблюдениями. Таким образом, можно сделать вывод, что выбор условий проведения расчетов в значительной степени влияет на результаты вычислений воспламенения наносекундного порядка с применением НИПР. В дальнейшем планируется проведение одномерных расчетов для изучения процесса воспламенения.

Авторы искренне благодарят доктора Xingqian Mao из Пекинского университета

Цзяотун за предоставление механизмов химических и неравновесных плазмохимических реакций. Работа частично поддержана Исследовательской ассоциацией автомобильных двигателей внутреннего сгорания (AICE).

ЛИТЕРАТУРА

1. **Strategic Innovation Promotion Program**, Innovative Combustion. — Japan Science and Technology Agency. — Available at <http://www.jst.go.jp/sip/k01.html>.
2. **Nakata K., Nogawa S., Takahashi D., Yoshihara Y., Kumagai A., Suzuki T.** Engine technologies for achieving 45 % thermal efficiency of S. I. engine // *SAE Int. J. Engines*. — 2016. — V. 9, N 1. — P. 179–192. — DOI: <https://doi.org/10.4271/2015-01-1896>.
3. **Huang C. C., Shy S. S., Liu C. C., Yan Y. Y.** A transition on minimum ignition energy for lean turbulent methane combustion in flamelet and distributed regimes // *Proc. Combust. Inst.* — 2007. — V. 31, N 1. — P. 1401–1409. — DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proci.2006.08.024>.
4. **Maruta K., Nakamura H.** Super lean-burn in SI engine and fundamental combustion studies // *J. Combust. Soc. Jpn.* — 2016. — V. 58, N 183. — P. 9–19. — DOI: <https://doi.org/10.20619/jcombsj.58.183.9>.
5. **Jiang L. J., Shy S. Q. (Steven), Nguyen M. T., Huang S. Y., Yu D. W.** Spark ignition probability and minimum ignition energy transition of the lean iso-octane/air mixture in premixed turbulent combustion // *Combust. Flame*. — 2018. — V. 187. — P. 87–95. — DOI: <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2017.09.006>.
6. **Kosarev I. N., Aleksandrov N. L., Kindysheva S. V., Starikovskaia S. M., Starikovskii A. Yu.** Kinetics of ignition of saturated hydrocarbons by nonequilibrium plasma: C_2H_6 - to C_5H_{12} -containing mixtures // *Combust. Flame*. — 2009. — V. 156, N 1. — P. 221–233. — DOI: <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2008.07.013>.
7. **Ju Y., Sun W.** Plasma assisted combustion: Dynamics and chemistry // *Prog. Energy Combust. Sci.* — 2015. — V. 48. — P. 21–83. — DOI: <https://doi.org/10.1016/j.peccs.2014.12.002>.
8. **Starikovskii A. Yu.** Plasma supported combustion // *Proc. Combust. Inst.* — 2005. — V. 30, N 2. — P. 2405–2417. — DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proci.2004.08.272>.
9. **Mao X., Chen Q.** Effects of vibrational excitation on nanosecond discharge enhanced methane — air ignition // *AIAA J.* — 2018. — V. 56, N 11. — P. 4312–4320. — DOI: <https://doi.org/10.2514/1.j057304>.
10. **Bozhenkov S. A., Starikovskaia S. M., Starikovskii A. Yu.** Nanosecond gas discharge ignition of H_2 and CH_4 containing

- mixtures // *Combust. Flame.* — 2003. — V. 133, N 1-2. — P. 133–146. — DOI: [https://doi.org/10.1016/S0010-2180\(02\)00564-3](https://doi.org/10.1016/S0010-2180(02)00564-3).
11. **Starikovskaia S. M.** Plasma assisted ignition and combustion // *J. Phys. D: Appl. Phys.* — 2006. — V. 39, N 16. — P. R265–R299. — DOI: <https://doi.org/10.1088/0022-3727/39/16/R01>.
 12. **Adamovich I. V., Nishihara M., Choi I., Uddi M., Lempert W. R.** Energy coupling to the plasma in repetitive nanosecond pulse discharges // *Phys. Plasmas.* — 2009. — V. 16, iss. 11. — 113505(1–13). — DOI: <https://doi.org/10.1063/1.3264740>.
 13. **Lefkowitz J. K., Guo P., Rousso A., Ju Y.** Species and temperature measurements of methane oxidation in a nanosecond repetitively pulsed discharge // *Phil. Trans. Roy. Soc. A. Math. Phys. Eng. Sci.* — 2015. — V. 373, N 2048. — P. 1–21. — DOI: <https://doi.org/10.1098/rsta.2014.0333>.
 14. **Lefkowitz J. K., Guo P., Rousso A., Ju Y.** Low temperature oxidation of methane in a nanosecond pulsed plasma discharge // 53rd AIAA Aerospace Sciences Meeting. — 2015. — P. 1–12. — DOI: <https://doi.org/10.2514/6.2015-0665>.
 15. **Uesugi K., Morii Y., Mukoyama T., Tezuka T., Hasegawa S., Nakamura H., Takana H., Maruta K., Yokomori T., Iida N.** Ignition experiments by nanosecond repetitively pulsed discharges in intense turbulence for super lean burn at engine condition // 2019 JSAE/SAE Powertrains, Fuels Lubricants International Meeting, Kyoto, Japan, 2019. — JSAE20199308/SAE2019-01-2160. — DOI: <https://doi.org/10.4271/2019-01-2160>.
 16. **Lefkowitz J. K., Ombrello T.** An exploration of inter-pulse coupling in nanosecond pulsed high frequency discharge ignition // *Combust. Flame.* — 2017. — V. 180. — P. 136–147. — DOI: <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2017.02.032>.
 17. **Pancheshnyi S., Eismann B., Hagelaar G. J. M., Pitchford L. C.** Computer Code ZDPlasKin, Ver. 2.0, Univ. of Toulouse, LAPLACE, CNRS-UPS-INP. — Toulouse, France, 2008. — Available at <http://www.zdplaskin.laplace.univ-tlse.fr>.
 18. **Morii Y., Shima E.** Optimization of One-Parameter Family of Integration Formulae for Solving Stiff Chemical-Kinetic ODEs // *Sci. Rep.* — 2020. — V. 10. — 21330. — DOI: [10.1038/s41598-020-78301-6](https://doi.org/10.1038/s41598-020-78301-6).
 19. **Hagelaar G. J. M., Pitchford L. C.** Solving the Boltzmann equation to obtain electron transport coefficients and rate coefficients for fluid models // *Plasma Sources Sci. Technol.* — 2005. — V. 14, N 4. — P. 722–733. — DOI: <https://doi.org/10.1088/0963-0252/14/4/011>.
 20. **Старик А. М., Титова Н. С.** О возможности инициирования горения смесей $\text{CH}_4\text{—O}_2$ (воздух) при возбуждении молекул O_2 лазерным излучением // *Физика горения и взрыва.* — 2004. — Т. 40, № 5. — С. 3–15.
 21. **Старик А. М., Луховицкий Б. И., Титова Н. С.** Об инициировании горения смеси $\text{CH}_4\text{—O}_2$ в сверхзвуковом потоке при возбуждении молекул O_2 электрическим разрядом // *Физика горения и взрыва.* — 2008. — Т. 44, № 3. — С. 3–16.
 22. **Starikovskaia S., Anikin N., Kosarev I., Popov N., Starikovskii A.** Analysis of ignition by nonequilibrium sources. Ignition of homological series of hydrocarbons by volume nanosecond discharge // 44th AIAA Aerospace Sciences Meeting Exhibit, Nevada, USA, 2006. — P. 1–14. — DOI: <https://doi.org/10.2514/6.2006-616>.
 23. **Sun W.** Non-equilibrium plasma-assisted combustion: PhD Thesis / Department of Mechanical and Aerospace Engineering, Princeton Univ. — New Jersey, USA, 2013. — Available at <http://arks.princeton.edu/ark:/88435/dsp01pn89d663g>.
 24. **Mao X., Rousso A., Chen Q., Ju Y.** Numerical modeling of ignition enhancement of $\text{CH}_4/\text{O}_2/\text{He}$ mixtures using a hybrid repetitive nanosecond and DC discharge // *Proc. Combust. Inst.* — 2019. — V. 37, N 4. — P. 5545–5552. — DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proci.2018.05.106>.
- Поступила в редакцию 10.06.2020.
После доработки 11.09.2020.
Принята к публикации 28.10.2020.*
-