

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ И ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПЛАМЕН ПРЕДВАРИТЕЛЬНО ПЕРЕМЕШАНЫХ СМЕСЕЙ $\text{CH}_4/\text{CH}_3\text{Cl}/\text{O}_2/\text{N}_2$ С ВЫСОКИМ СОДЕРЖАНИЕМ КИСЛОРОДА

С. С. Шин, Е. В. Вега, К. Й. Ли

Национальный университет Андонга, 760-746 Андонг, Республика Корея, kylee@andong.ac.kr

Проведено всестороннее экспериментальное и численное исследование влияния добавки хлористого метила CH_3Cl на пламена предварительно перемешанных смесей $\text{CH}_4/\text{O}_2/\text{N}_2$ с большим избытком кислорода. Измерена нормальная скорость распространения ламинарных пламен $\text{CH}_4/\text{O}_2/\text{N}_2$ с помощью горелки Бунзена при комнатной температуре и атмосферном давлении в зависимости от концентрации добавки CH_3Cl , коэффициента избытка горючего в исходной смеси и концентрации кислорода. Измерены также концентрации основных компонентов и NO в конечных продуктах горения. Для моделирования структуры пламени использовался кинетический механизм, включающий 89 компонентов и 1 017 элементарных реакций с их участием. Предсказанные с помощью данной модели значения скорости распространения пламени хорошо согласуются с результатами эксперимента. Атомы хлора, образующиеся при горении хлористого метила, ингибируют пламена с повышенным содержанием кислорода, что приводит к снижению скорости пламени. Этот эффект сильнее проявляется в богатых пламенах, чем в бедных. Результаты моделирования показали, что увеличение мольной доли CH_3Cl в метановом пламени не приводит к заметному изменению его конечной температуры. Однако, как показали измерения, при мольной доле кислорода 0.3 и тех же количествах метилхлорида и метана в смеси концентрация NO в пламени снижается приблизительно на 35 %. Это происходит благодаря уменьшению концентрации свободных радикалов в пламени, связанных с образованием NO . По данным моделирования в пламенах, обогащенных кислородом, при увеличении концентрации добавки CH_3Cl сильно уменьшается выделение тепла. Скорость реакции $\text{OH} + \text{H}_2 \rightarrow \text{H} + \text{H}_2\text{O}$, по-видимому, уменьшается за счет снижения концентрации OH . Тем не менее эффективность CH_3Cl как ингибитора углеводородных пламен падает с увеличением коэффициента избытка кислорода от 0.21 до 0.5.

Ключевые слова: структура пламени, пламена с высоким содержанием кислорода, ингибирование, численное моделирование, хлорзамещенные углеводороды.

ВВЕДЕНИЕ

Знание кинетики процессов горения хлорсодержащих углеводородов имеет важное практическое применение (сжигание отходов, ингибирование пламен). Накопление больших количеств вредных промышленных отходов, включая хлоруглеводороды, вызвало повышенный интерес к их высокотемпературному сжиганию как к наиболее приемлемому методу уничтожения. Это активизировало проведение кинетического моделирования горения хлоруглеводородов [1].

Sung Su Shin, Eugene V. Vega, Ki Yong Lee.
Department of Mechanical Engineering Andong National University, Andong, Kyoungbuk 760-749, Republic of Korea.

Изучению влияния метилхлорида на пламена посвящено большое количество экспериментальных исследований и работ по моделированию. В большинстве из них изучались пламена, содержащие метан, хлористый метил, воздух и небольшую добавку ингибитора. В работе [2] методом горелки Бунзена определяли скорость распространения пламени метан — хлоруглеводород — воздух непосредственно по изменению формы пламени. Установлено, что добавка хлоруглеводорода приводит к уменьшению скорости распространения пламени $\text{CH}_4/\text{воздух}$ на величину, зависящую от количества атомов хлора в исходной смеси. В работе [3] с использованием механизма элементарных химических реакций выполнено

численное моделирование структуры пламени $\text{CH}_4/\text{CH}_3\text{Cl}/\text{воздух}$ с различным содержанием добавки CH_3Cl и дан анализ чувствительности. Был проанализирован также механизм на основе элементарных стадий, и предложен его сокращенный вариант, также предсказывающий концентрации компонентов пламени.

Однако последние разработки привели к усовершенствованию традиционного процесса горения топливовоздушной смеси путем применения окислителей с содержанием кислорода выше, чем его концентрация в воздухе, — так называемое горение кислорода, усиленное добавкой. Степень обогащения кислородом может быть низкой, умеренной или высокой, в зависимости от концентрации O_2 в окислителе. В ряде отраслей промышленности, где необходим нагрев до высоких температур, таких как термообработка и плавка металлов, стекловарение, обжиг, сжигание отходов, технологии улучшены за счет горения, усиленного добавкой кислорода. Благодаря использованию такого типа горения могут быть усовершенствованы и другие процессы с низким тепловыделением, сопровождающиеся образованием больших количеств NO_x в топочных газах.

Обогащение кислородом первоначально влияет на характеристики пламени, увеличивая температуру и скорость его распространения, уменьшая ширину зоны горения, увеличивая возможность проскока пламени, расширяя предел воспламенения и облегчая зажигание. Все это приводит к повышению эффективности использования энергии, что делает еще более важным практическое применение горения, усиленного добавкой кислорода. Однако следует отметить и недостаток такого горения — увеличение выбросов оксидов азота в результате повышения температуры, образование которых идет по тепловому механизму [4].

В большинстве ранее выполненных работ исследовались пламена $\text{CH}_4/\text{CH}_3\text{Cl}/\text{воздух}$ с небольшой добавкой ингибитора. В настоящей работе изучалось горение смеси метилхлорид — метан, усиленное добавкой кислорода, с более высокой концентрацией ингибитора.

С целью проверки используемого кинетического механизма реакций проведено сравнение экспериментально измеренных и рассчитанных скоростей распространения пламен. Там, где это возможно, проведено также сравнение результатов расчета концентраций радикалов, максимальной температуры, тепловыде-

ления и индекса эмиссии NO с данными экспериментов.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Бунзеновская горелка

В настоящей работе экспериментально изучались ламинарные пламена предварительно перемешанных смесей $\text{CH}_4/\text{CH}_3\text{Cl}/\text{O}_2/\text{N}_2$, стабилизированные на горелке Бунзена при давлении 1 атм. Профиль сужения сопла горелки выбран таким же, как в работе [5]. Диаметр выходного сечения сопла горелки составлял 12 мм при общей длине горелки 720 мм. Сопло горелки охлаждалось водой, и предварительно перемешанная горючая смесь поступала в горелку из ресивера, расположенного под горелкой.

Система подачи газов

В работе использовались газы высокой чистоты: 99.95 % для CH_4 , 99.995 % — O_2 , 99.999 % — N_2 и 99.9 % — CH_3Cl . Их расход задавался и регулировался цифровыми регуляторами массового расхода (Tytan FC280FA), управляемыми компьютером (программное обеспечение DasyLabsoftware). Калибровка расхода газов выполнялась портативным калибратором Drycal DC-Lite с точностью по объемному расходу 1 %.

Шлирен-система

Скорость распространения пламени определялась шлирен-методом. Этот широко используемый качественный оптический метод основан на преломлении лучей света при изменяющихся градиентах плотности среды перпендикулярно к линии распространения лучей. Источником света в эксперименте служила ксеноновая лампа. Применялись ахроматические линзы диаметром 76 мм с фокусным расстоянием 500 мм. Запись изображений выполнялась цифровой камерой (Roper Scientific, Photometrics Coolsnap-Fx). Скорость распространения пламени определялась путем обработки полученных видеоизображений.

Измерение концентраций компонентов

Для отбора пробы из пламени применялся вертикально перемещающийся пробоотборник.

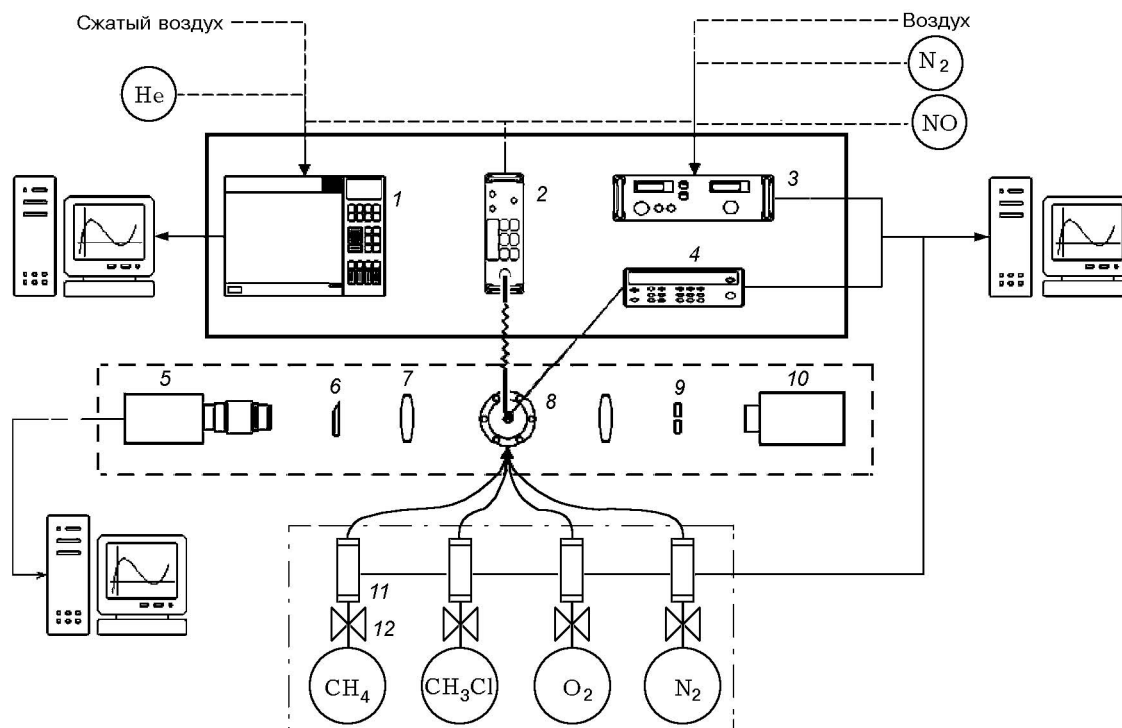


Рис. 1. Схема экспериментальной установки:

1 — газовый хроматограф, 2 — осушитель воздуха, 3 — анализатор оксидов азота, 4 — система сбора данных, 5 — светочувствительная матрица, 6 — опорная призма, 7 — линза, 8 — горелка Бунзена, 9 — точечное отверстие, 10 — источник света, 11 — регулятор расхода газа, 12 — клапан

Точка отбора пробы находилась на оси горелки на расстоянии 48 мм от ее выходного отверстия. Для обеспечения высокого пространственного разрешения при зондировании пламени в качестве пробоотборника использовалась кварцевая трубка (диаметром 4 мм) с конусом на конце. Конструкция зонда обеспечивала быстрое расширение и охлаждение отобранных газов, что приводило к замедлению реакций в пробе. Верхняя часть зонда прогревалась электрической спиралью до 120 °С для предотвращения конденсации воды.

Состав газа в зоне продуктов пламени определяли при помощи газового хроматографа (Agilent 6890 Series, Agilent Technologies), управляемого компьютером с программным обеспечением AutoChroWin. В хроматографе использовалась колонка с наполнителем CTR-1 (Alltech) для разделения основных компонентов пламени CH_4 , CO_2 , CO , O_2 , N_2 , а также измерения времен задержки воспламенения и определения состава. Концентрации компонентов определялись калибровкой стандартными калибровочными смесями.

Измерение концентрации NO

Для измерения концентрации NO в пламени применялся хемилюминесцентный анализатор (California Analytical Instruments, 300D) с диапазоном $10 \div 30\,000$ ppm и разрешением 0.01 ppm по NO/NO_x; программное обеспечение DasyLab. Отобранную зондом пробу перед вводом в анализатор высушивали, чтобы избежать потерь NO при его реагировании с водой. Анализатор NO_x калибровали каждые 2 ч, определяя калибровочную линию путем нанесения на график значений концентраций N₂ и NO и соответствующих выходных напряжений. Схема экспериментальной установки приведена на рис. 1.

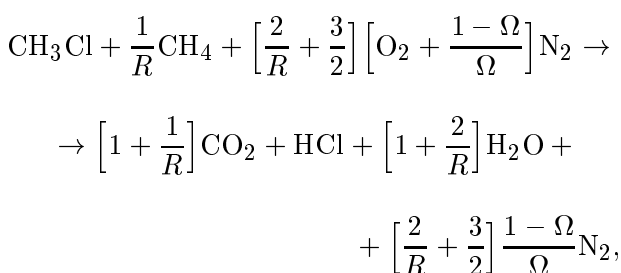
ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Численное моделирование свободно распространяющихся пламен предварительно перемешанных смесей проводилось с помощью программы, разработанной в [6, 7]. Данная программа позволяет моделировать ламинарные пламена, используя транспортные свойства

и механизм элементарных реакций [8–10]. Кинетическая модель состоит из 1 017 прямых реакций с участием 89 соединений, в том числе аргона как инертной добавки, и включает механизм GRI-3.0 [8] для горения углеводородов и механизм Миллера [11] для горения метилхлорида. Горение как метана, так и метилхлорида протекает через образование метильного радикала, влияющего на образование C_2 -углеводородов. Оба реакционных пути влияют на образование продуктов CO , CO_2 , H_2O и HCl . Более подробная информация о механизме реакций имеется в работе [12] или на сайте <http://mech.andong.ac.kr/~combustion/research-mech.htm>. Расчет включает $180 \div 240$ координатных точек в области расчета, благодаря чему достигается высокое разрешение по градиентам концентраций компонентов пламени и температуры. Моделирование проводилось для пламен при атмосферном давлении и начальной температуре горючей смеси 300 К.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

При использовании метана в качестве дополнительного горючего общую стехиометрию реакции смеси метана с метилхлоридом можно выразить следующим образом:



где R — отношение мольных долей метилхлорида к метану, Ω — мольная доля кислорода в его смеси с азотом, $\Omega = 0.21$ или 1, если окислителем является воздух или кислород соответственно. Коэффициент избытка топлива определяется как частное от деления фактического отношения концентраций горючее/окислитель к такому же отношению для стехиометрической смеси:

$$\phi = \frac{[2/R + 3/2]}{[O_2]},$$

где $[O_2]$ — концентрация кислорода, участвующего в реакции.

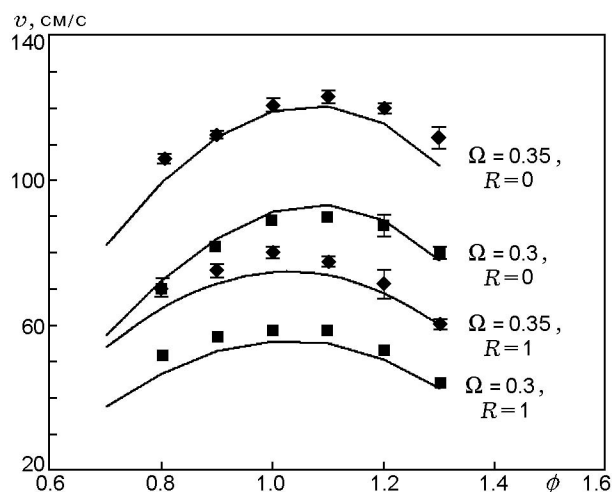


Рис. 2. Сравнение измеренных (точки) и рассчитанных (линии) скоростей распространения пламени в предварительно перемешанных смесях с повышенным содержанием кислорода

Скорость распространения пламен

Скорость распространения пламен с мольной долей кислорода $\Omega = 0.3$ и 0.35 рассчитывалась и измерялась методом горелки Бунзена. Коэффициент избытка горючего свежей смеси варьировался в диапазоне $\phi = 0.7 \div 1.3$, а мольное отношение добавки R изменялось от 0 до 1. Результаты расчета находятся в относительно хорошем согласии с данными эксперимента, что видно из рис. 2.

Для пламен, усиленных действием добавки кислорода, при $R = 1$ максимальная скорость распространения находится в области с небольшим избытком горючего. Как и ожидалось, введение добавки метилхлорида снижает скорость бедных, стехиометрических и богатых пламен. Хотя в ингибированных пламенах зависимость скорости их распространения от коэффициента ϕ качественно такая же, как в неингибированных, эффект уменьшения скорости пламени сильнее в богатых пламенах. Это происходит благодаря тенденции хлорных соединений увеличивать концентрацию веществ, содержащих C_2 , таких как C_2H_2 [9].

На рис. 3 показаны скорости распространения пламен, содержащих смесь метана и метилхлорида в мольном соотношении от 0 до 1 и с коэффициентом избытка топлива $\phi = 0.8 \div 1.2$. Скорости пламен с $\phi = 0.8$ и 1.2 , рассчитанные с помощью данной кинетической модели, имеют значения меньше, чем в эксперименте. Исключение составляет пла-

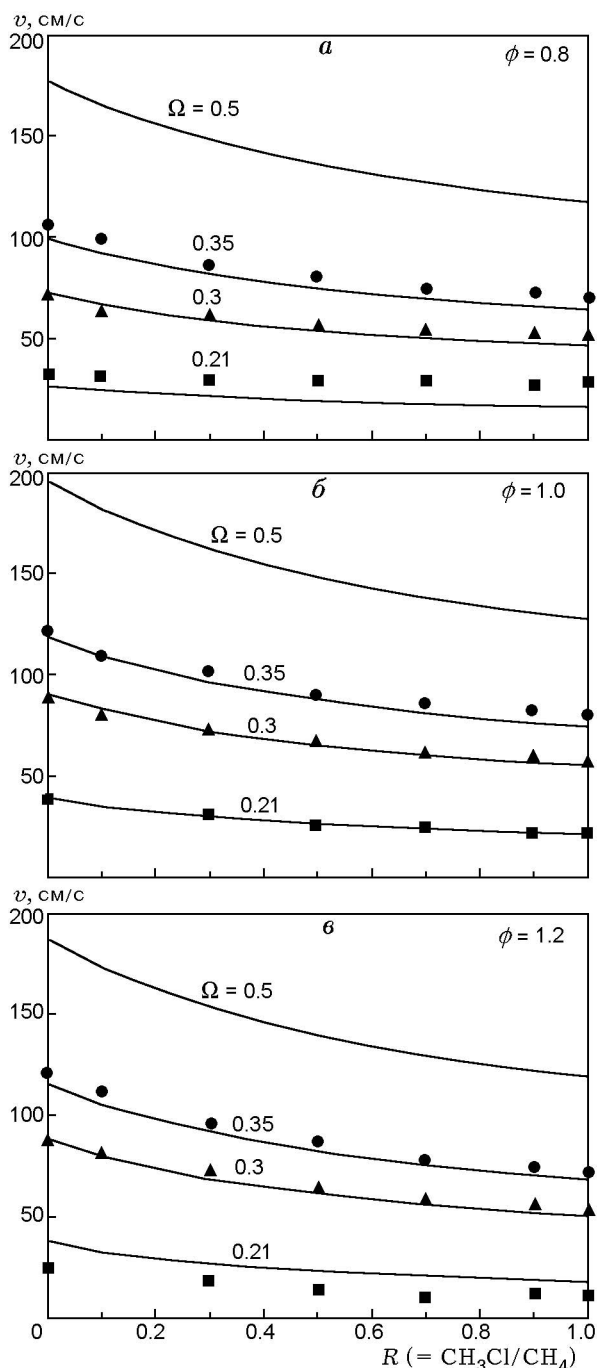


Рис. 3. Сравнение измеренных (точки) и рассчитанных (линии) скоростей распространения пламени при различных коэффициентах избытка топлива и различных мольных долях кислорода

мя с $\phi = 1.2$ и $\Omega = 0.21$. Для стехиометрических пламен наблюдается удовлетворительное согласие результатов моделирования и эксперимента во всем диапазоне изменения R . Расхождения между данными расчета и результатами эксперимента следует отнести на счет несовершенства механизма и ошибок измерения. Тем не менее численное моделирование в целом удовлетворительно предсказывает экспериментальные данные. Рост содержания хлора в пламени снижает скорость его распространения благодаря ингибирующему эффекту хлора на углеводородные пламена [13, 14]. Этот эффект наиболее резко выражен при малых и умеренных концентрациях добавок метилхлорида, при которых снижение скорости распространения пламен максимально. Наблюдается он и для пламен, усиленных действием добавки кислорода. Более того, падение скорости тем сильнее, чем выше обогащение пламени кислородом.

Известно, что хлорсодержащие соединения, добавленные в углеводородные пламена препятствуют реакции $\text{H} + \text{O}_2$ из-за расхождения атомов H на образование HCl [14]. Эффективность ингибирования хлором возрастает в богатых пламенах, где концентрация H выше, чем в бедных пламенах. Таким образом, в пламенах с $\phi = 1.2$ наблюдается относительно большее снижение скорости распространения, чем в пламенах с $\phi = 0.8$.

Максимальная температура пламени и тепловой поток

На рис. 4 показано влияние увеличения добавки метилхлорида на максимальную температуру пламен в диапазоне $\phi = 0.8 \div 1.2$ и $\Omega = 0.21 \div 0.5$. В качестве самой высокой температуры пламени выбиралось ее максимальное значение на рассчитанном профиле. Введение метилхлорида в бедные и богатые пламена с $\Omega = 0.21$ не приводит к существенному снижению температуры во всем диапазоне R , хотя теплотворная способность метилхлорида меньше, чем у метана, на 84 %. Это происходит благодаря уменьшению теплоемкости продуктов сгорания при добавлении метилхлорида, что компенсирует уменьшение тепловыделения. Поэтому добавка метилхлорида в пламена с ПСК только слегка снижает их максимальную температуру. Аналогично увеличение мольной доли кислорода до 0.5 приводит

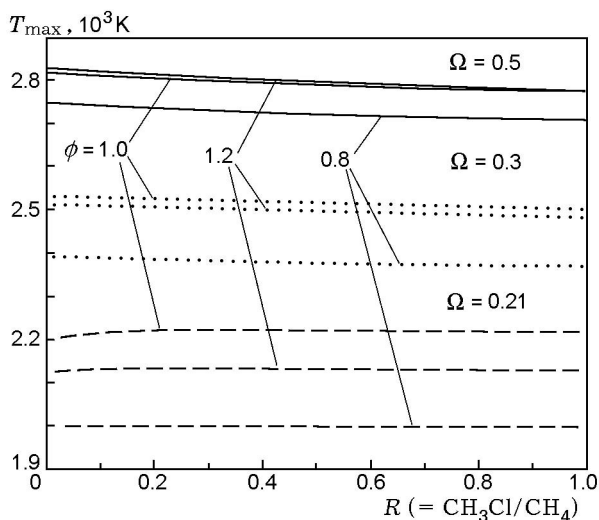


Рис. 4. Максимальные температуры пламен с различными коэффициентами избытка топлива при различных мольных долях кислорода

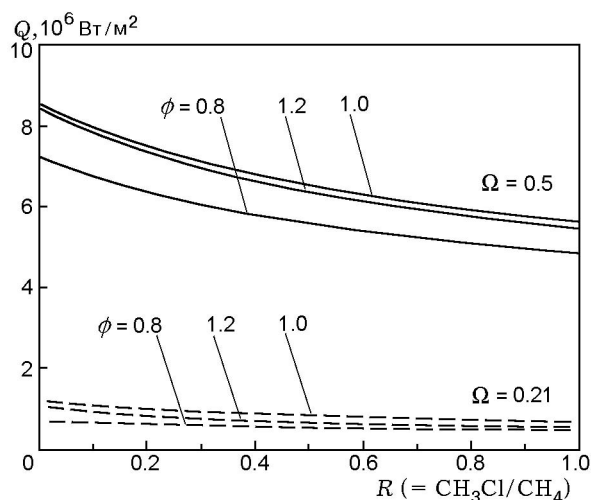


Рис. 5. Тепловой поток при различных коэффициентах избытка топлива и различных мольных долях кислорода

к малому снижению температуры. Уменьшение максимальной температуры в диапазоне $R = 0 \div 1$ меньше 50 К.

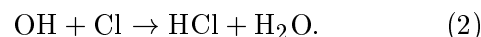
На рис. 5 показан тепловой поток, рассчитанный путем интегрирования скорости тепловыделения по расчетному массиву данных. Влияние добавки метилхлорида на скорость тепловыделения проявляется в зоне химических реакций пламени и вызывает уменьшение теплового потока.

Добавка галогенсодержащего соединения в пламя играет важную роль в изменении его структуры за счет одного или комбинации трех

факторов (разбавление, теплофизический и химический факторы) [15]. Это, в частности, верно и для хлорсодержащих соединений таких, как метилхлорид, которые легко разлагаются в пламени, выделяя хлор из-за низкой энергии диссоциации связи C—Cl. Благодаря способности хлорсодержащих соединений захватывать радикалы, хлор быстро реагирует с радикалами H и OH, играющими важную роль в горении углеводородов, и снижает концентрацию радикалов в пламени. Среди реакций расщепления и образования этих радикалов реакция



вносит максимальный вклад в скорость выделения тепла в пламени метана. Однако в пламени с добавкой метилхлорида роль реакции (1) берет на себя реакция



С ростом концентрации кислорода в пламени влияние реакции (2) уменьшается и реакция (1) становится основной в скорости выделения тепла.

Концентрация радикалов

На рис. 6 приведены максимальные концентрации радикалов в пламенах с $\phi = 0.8 \div 1.2$ и $\Omega = 0.21 \div 0.5$ в зависимости от отношения мольных долей метилхлорида к метану. Максимальная концентрация радикала выбрана как точка с наибольшей мольной долей на рассчитанном профиле. Соотношение концентраций радикалов в зоне реакций бедных пламен ($OH > O > H$) отличается от соотношения в стехиометрических и богатых пламенах ($OH > H > O$). В пламенах, усиленных действием добавки кислорода, концентрации радикалов выше, чем в воздушных пламенах, и, кроме того, снижение концентрации радикалов в них наименьшее. Химическое влияние добавки метилхлорида проявляется, в том числе, и в снижении скоростей реакций, в которых образуются радикалы H, O и OH, например, в реакции $H + O_2 \rightarrow OH + O$ [14]. Последняя конкурирует с несколькими реакциями с участием H и хлорсодержащих соединений, и из-за присутствия HCl концентрация H снижается тем сильнее, чем больше метилхлорида добавлено в пламя. Это сильнее проявляется в богатых, чем в бедных пламенах, где концентрация атома H выше (см. рис. 6).

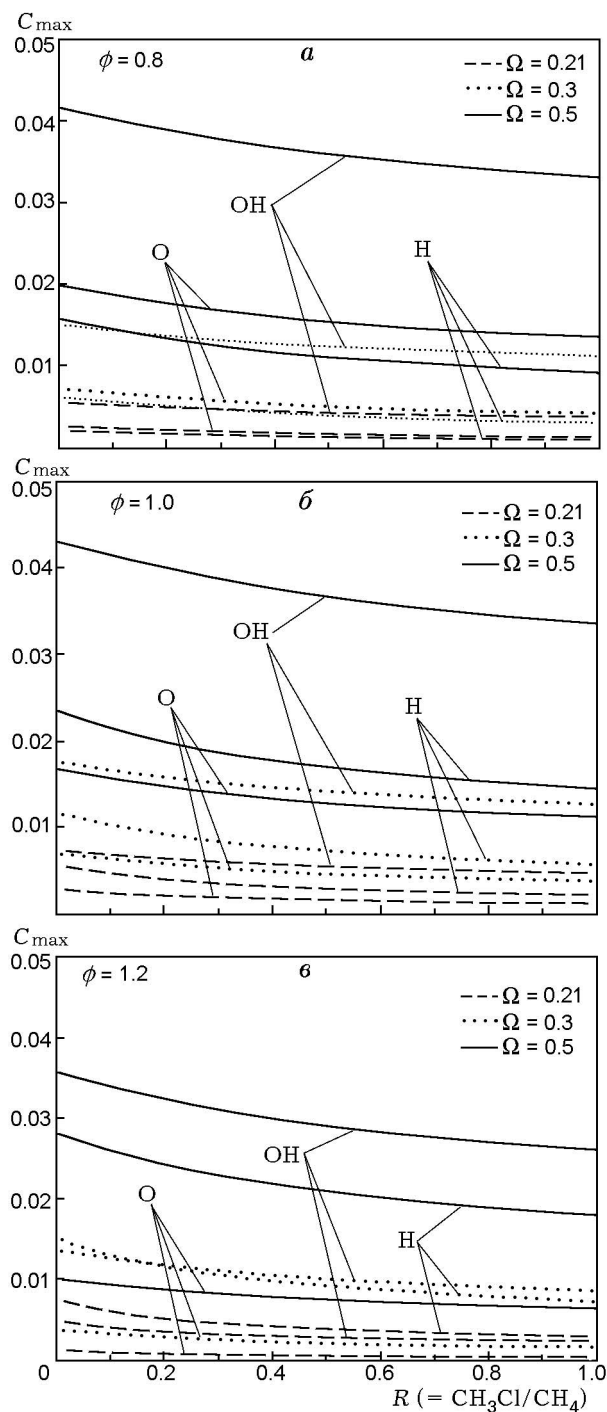


Рис. 6. Мольные концентрации радикалов Н, О и ОН при различных коэффициентах избытка топлива и различных мольных долях кислорода

Падение концентраций радикалов уменьшается по мере обогащения пламени кислородом. Для богатых пламен степень падения концентрации атома Н в диапазоне $R = 0 \div 1.0$ для $\Omega = 0.21, 0.3$ и 0.5 составляет 63.7, 51.6 и 36.3 % соответственно. Концентрация атомов О, существенно влияющая на образование термического NO, также уменьшается на 76.2, 58.4 и 37.7 % по мере изменения R от 0 до 1.0. Это происходит благодаря тому, что роль реакции $H + O_2 \rightarrow OH + O$ возрастает в высокотемпературных пламенах, усиленных действием добавки кислорода.

Индекс эмиссии NO

Индекс эмиссии показывает количество образовавшегося загрязняющего агента на единицу массы горючего и не зависит от концентрации добавки в горючей смеси. Для его вычисления используются два выражения, основанные на результатах моделирования и эксперимента.

Если весь углерод горючего превращается в CO или CO₂, то индекс эмиссии рассчитывается по следующей формуле [16]:

$$EI_i = \left[\frac{X_i}{X_{CO} + X_{CO_2}} \right] \left[\frac{xW_i}{W_f} \right],$$

где X_i — мольная доля i -го компонента, измеряемая экспериментально, x — число молей углерода в моле горючего, W_i и W_f — молекулярные массы i -го компонента и горючего.

Для вычисления индекса эмиссии i -го компонента на основе численного моделирования используется следующее уравнение [17]:

$$EI_i = \frac{\int_0^L W_i \omega_i dx}{\int_0^L W_{CH_4} \omega_{CH_4} dx + \int_0^L W_{CH_3Cl} \omega_{CH_3Cl} dx},$$

где ω_i — скорость образования i -го компонента во всех реакциях, L — диапазон расстояний, в численных расчетах равный 10 мм. CH₄ и CH₃Cl рассматриваются как горючее.

На рис. 7 показан индекс эмиссии в пламенах с $\Omega = 0.3$, рассчитанный методом моделирования и измеренный экспериментально. Наблюдается хорошее согласие между расчетными предсказаниями и данными эксперимента в диапазоне $R = 0 \div 1.0$ и $\phi = 0.8 \div 1.2$. Ис-

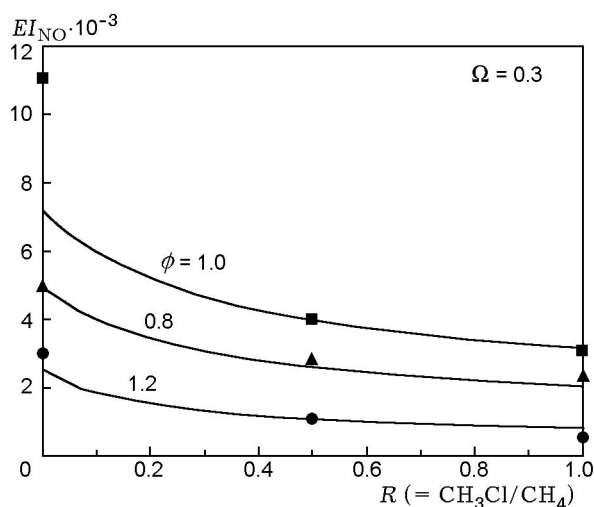


Рис. 7. Сравнение измеренных (точки) и рассчитанных (линии) индексов эмиссии NO при различных коэффициентах избытка топлива

ключением является стехиометрическое пламя метана.

С ростом концентрации добавки хлора наблюдается снижение индекса образования NO. Аналогичная зависимость наблюдается и во влиянии хлора на скорость пламени (см. рис. 3): уменьшение индекса эмиссии NO больше для пламен с малым и умеренным содержанием метилхлорида. Значение индекса эмиссии NO изменяется в зависимости от коэффициента избытка топлива ϕ следующим образом: $EI(\phi = 1.0) > EI(\phi = 0.8) > EI(\phi = 1.2)$, хотя зависимость максимальной температуры пламени от ϕ имеет вид $T_{\max}(\phi = 1.0) > T_{\max}(\phi = 1.2) > T_{\max}(\phi = 0.8)$ (см. рис. 4). Следовательно, индекс эмиссии NO зависит не только от температуры пламени, но и от состава горючей смеси.

Степень уменьшения индекса эмиссии NO в диапазоне $R = 0 \div 1.0$ по данным расчетов для пламен с $\phi = 0.8, 1.0$, и 1.2 составляет 58.0, 56.3 и 67.8 % соответственно. Уменьшение индекса эмиссии NO при добавлении метилхлорида в горючую смесь больше в богатых, чем в стехиометрических и бедных пламенах. Это обусловлено способностью хлора удалять радикалы, которая проявляется сильнее в богатых пламенах, где велика концентрация радикалов H. Таким образом, снижение индекса эмиссии NO за счет введения в пламя метилхлорида происходит благодаря химическому воздействию, а не снижению температуры из-за разбавления.

ВЫВОДЫ

Влияние добавки метилхлорида в ламинарные пламена, усиленные действием добавки кислорода, был изучен экспериментально и методом моделирования. Результаты проведенных исследований позволили сделать следующие выводы.

- Увеличение содержания хлора в горючей смеси способствует понижению скорости распространения пламени, усиленного действием добавки кислорода. Чем больше обогащение пламен кислородом, тем сильнее наблюдаемое падение скорости распространения.
- Введение метилхлорида в метановые пламена, усиленные действием добавки кислорода, снижает их максимальную температуру не больше чем на 50 К.
- Концентрация H, O и OH в пламени, усиленном действием добавки кислорода, падает по мере роста концентрации добавки метилхлорида. Этот эффект проявляется сильнее в богатых пламенах с высокой концентрацией H, чем в бедных. Однако влияние добавки на снижение концентрации радикалов ослабевает по мере роста мольной доли кислорода в пламени.
- Увеличение концентрации добавки хлора в пламени снижает индекс эмиссии NO. Снижение индекса больше в пламенах с малыми и умеренными концентрациями метилхлорида и в богатых пламенах по сравнению с бедными и стехиометрическими. Снижение индекса эмиссии NO добавками метилхлорида обусловлено в большей степени его химическим влиянием, чем влиянием его концентрации на температуру.

Данная работа выполнена при финансовой поддержке по проекту «Brain Korea 21» в 2004 г. и по инновационному проекту для Нового университета в 2005 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. Tanner R. K. // Prog. Energy Combust. Sci. 1979. N 5. P. 245–252.
2. Valeiras H., Gupta A. K., Senkan S. M. // Combust. Sci. Technol. 1987. V. 36. P. 333–357.

3. **Lee K. Y., Yang M. H., Puri I. K.** Numerical simulation of stoichiometric premixed flames burning $\text{CH}_3\text{Cl}/\text{CH}_4/\text{air}$ mixtures at atmospheric pressure with a full and short reaction mechanism and comparison of the flame speeds with experimental results // *Combust. Flame*. 1993. V. 92. P. 419–439.
4. **Baukal C. E., Jr.** Oxygen Enhanced Combustion. Boca Raton, FL: CRC Press, 1999. P. 9–42.
5. **Morel T.** // *ASME J. Fluid Enging*. 1975. V. 97, N 2. P. 225–233.
6. **Rogg B.** // *Reduced kinetic mechanisms for applications in combustion systems* / N. Peters, B. Rogg (Eds). Berlin; Heidelberg: Springer-Verlag, 1993.
7. **Rogg B.** RUN-1DL: The Universal Laminar Flame and Flamelet Computer Code. User Manual, 1994.
8. http://www.me.berkeley.edu/gri_mech.
9. **Leylegian J. C., Zhu D. L., Law C. K., Wang H.** Experiments and numerical simulation on the laminar flame speeds of dichloromethane and trichloromethane // *Combust. Flame*. 1998. V. 114. P. 285–293.
10. **Lee K. Y., Nam T. H., You H. S., Choi D. S.** // *Trans. Korean Soc. Mech. Eng.* 2002. V. 26. P. 555–560.
11. **Miller G. P.** The structure of a stoichiometric $\text{CCl}_4\text{-CH}_4\text{-air}$ flat flame // *Combust. Flame*. 1995. V. 101. P. 101–112.
12. **Shin S. S.** The influence of CH_3Cl on $\text{CH}_4/\text{CH}_3\text{Cl}/\text{O}_2/\text{N}_2$ premixed flames under the O_2 enrichment: MS Thesis. Andong National Univ., 2004. P. 66–90.
13. **Wilson W. E., O'Donovan J. T., Fristrom R. M.** Flame inhibition dy halogen compounds // *Proc. Combust. Inst.* 1969. V. 12. P. 929–942.
14. **Westbrook C. K.** Inhibition of hydrocarbon oxidation laminar flames and detonation by halogenated compounds // *Proc. Combust. Inst.* 1982. V. 19. P. 127–141.
15. **Ronald S. S., Mames E. P., Doren I.** // *Fire Safety J.* 1989. V. 15. P. 437–450.
16. **Turns S. R.** *An Introduction to Combustion*. McGraw-Hills, 1996. P. 475.
17. **Takeno T., Nishioka M.** Species conservation and emission indices for flames described by similarity solutions // *Combust. Flame*. 1993. V. 92. P. 465–468.

Поступила в редакцию 28/II 2006 г.