

УДК 536.46+536.2+541.123

# ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ЗОНЫ РЕАКЦИЙ И ЭМИССИИ CO И NO В ПРОТИВОТОЧНЫХ ПЛАМЕНАХ CH<sub>4</sub>/O<sub>2</sub>/N<sub>2</sub>—O<sub>2</sub>/N<sub>2</sub>

Цз. Ло, Л. Тянь, Л.-Ш. Лю, Цз.-Чж. Чэн

Хэбэйский технологический университет, 300401 Тяньцзинь, Китай, luojing1981@163.com

Исследованы пламена, стабилизированные на противотоках предварительно перемешанной горючей смеси с низким содержанием кислорода и обогащенного кислородом воздуха (ППНК/ОКВ). Получены фотографии исследуемых пламен и проведено численное моделирование с использованием детального механизма реакций GRI-Mech 3.0. Выполнено сравнение результатов, полученных для противоточных пламен ППНК/ОКВ с различной долей кислорода в горючей смеси, с результатами для пламен частично перемешанных реагентов и полностью перемешанных реагентов при одних и тех же коэффициентах избытка горючего ( $\phi_{\Sigma} = 0.95$ ,  $\phi_f = 1.4$ ). Показано, что пламена частично перемешанных реагентов и ППНК/ОКВ имеют выраженную двухзонную структуру, однако положение зоны реакций предварительно перемешанного пламени и расстояние от нее до зоны реакций предварительно не перемешанного пламени значительно различаются в этих пламенах. В пламени ППНК/ОКВ максимальная температура в зоне реакций предварительно перемешанного пламени ниже, а сама зона находится дальше от торца трубки с горючей смесью, что приводит к снижению эмиссии NO и CO. Показано, что, изменяя соотношение концентраций кислорода, подаваемого вместе с горючей смесью и вместе с окислителем, можно эффективно влиять на соотношение скоростей химических реакций в различных зонах горения и, таким образом, добиться снижения эмиссии CO и NO.

Ключевые слова: пламя ППНК/ОКВ, двухзонная структура пламени, эмиссия загрязняющих веществ.

DOI 10.15372/FGV20170502

## ВВЕДЕНИЕ

В случае, когда горение происходит в потоке предварительно перемешанной смеси окислителя и горючего, в которой окислителя меньше стехиометрического количества, но он подается дополнительно для обеспечения полного сгорания, устанавливается так называемое пламя частично перемешанных реагентов [1]. Такие пламена в последнее время представляют всё больший интерес, поскольку их исследование позволяет лучше понять процессы в камерах сгорания реальных устройств, таких как газовые турбины, двигатели внутреннего сгорания и т. п.

В связи с тем, что образование загрязняющих веществ в пламенах частично перемешанных реагентов зависит от коэффициента избытка горючего, проведено большое количество экспериментальных и численных исследований структуры и эмиссионных характери-

стик таких пламен. Так, в ряде работ исследовалось образование NO при различных значениях глобального градиента скорости в противоточных пламенах частично перемешанных реагентов [2–7]. При малых градиентах скорости индекс эмиссии NO (отношение массы образовавшегося NO к массе сгоревшего CH<sub>4</sub>) увеличивается с ростом коэффициента избытка горючего от 1.4 до 2.2, а при дальнейшем росте коэффициента до 2.4 индекс уменьшается. Однако при высоких значениях градиента скорости индекс эмиссии NO монотонно снижается с увеличением степени предварительного смешения реагентов в том же самом диапазоне коэффициентов избытка горючего [2–6]. В работе [7] экспериментально и численно исследовалось образование NO в противоточных слаборастяжимых метановых пламенах частично перемешанных реагентов. Установлено, что вклад термического NO в общее образование NO растет с увеличением степени предварительного смешения реагентов.

В работе [8] было проведено сравнение структуры метановоздушных и пропановоз-

© Luo Jing, Tian Liang, Liu Liansheng, Cheng Zizhong, 2017.

School of Energy and Environmental Engineering, Hebei University of Technology, 300401 Tianjin, China.

душных ламинарных пламен с частичным перемешиванием реагентов. Обнаружено, что при одинаковом избытке горючего и равных скоростях потоков предварительно перемешанной смеси высота внутреннего пламени пропана меньше, чем пламени метана, однако максимальная концентрация СО в пламени пропана выше. В работе [9] исследовались пламена паров *n*-гептана с частичным перемешиванием реагентов, стабилизированные на противоточной горелке. Установлено, что двухзонная структура пламени становится более выраженной с уменьшением градиента скорости и увеличением степени предварительного смешения реагентов, а максимальная концентрация СО со стороны предварительно перемешанной смеси повышается с уменьшением коэффициента избытка горючего в смеси. Авторы работы [8] пришли к выводу, что, если коэффициент избытка горючего предварительно перемешанной смеси подобран оптимально, пламя имеет выраженную двухзонную структуру (внутреннее, предварительно перемешанное богатое пламя и внешнее, предварительно не перемешанное пламя). Оптимальное значение коэффициента избытка горючего зависит от вида горючего и растяжения пламени, которое определяется геометрией горелки [8].

Следует отметить, что добиться снижения выбросов загрязняющих веществ в пламенах с частичным перемешиванием реагентов можно путем перераспределения подаваемого в систему кислорода [10–19]. Такие исследования проводились в различных устройствах: двигателях внутреннего сгорания [10, 11], рекуперативной печи [12] и т. п. Требования на выбросы загрязняющих веществ все время ужесточаются, поэтому производители горелочных устройств применяют различные средства для их снижения. Одним из основных и легко осуществимых способов снижения выбросов  $\text{NO}_x$  является введение в горючую смесь инертного разбавителя. На примере различных видов топлива показано, что разбавление горючей смеси позволяет эффективно снижать выбросы  $\text{NO}_x$  [13–15]. Однако это приводит не только к повышению концентрации углеводородов и СО в продуктах сгорания [13, 15, 16], но и к возникновению неустойчивостей, связанных со снижением температуры горения в результате разбавления [17–19].

Авторы работы [13] исследовали адиабатическую скорость распространения пламени и

образование загрязняющих веществ при горении смесей  $\text{C}_2\text{H}_4 + \text{O}_2 + \text{N}_2$ , в которых содержание кислорода варьировалось от 14 до 18 %. Было показано, что при повышении степени разбавления смеси азотом скорость горения и концентрация NO уменьшались, а концентрация СО увеличивалась при малом содержании кислорода в смеси. В работе [14] изучалось образование NO в пламенах метана и диметилового эфира, стабилизированных с помощью плохобтекаемого тела, в которых варьировалась степень разбавления потока воздуха добавками  $\text{CO}_2$  и  $\text{H}_2\text{O}$ . Установлено, что в обоих случаях вода по сравнению с  $\text{CO}_2$  (в пересчете на массу) являлась более эффективным разбавителем, позволяющим снизить выбросы NO. Авторы работы [15], проводя испытания двигателя, работающего на сжиженном природном газе, показали, что разбавление горючей смеси азотом существенно влияет на процесс горения и на концентрацию загрязняющих веществ в выхлопе. Чем больше была степень разбавления азотом, тем ниже была концентрация  $\text{NO}_x$ , но выше концентрация недогоревших углеводородов и СО.

В отличие от разбавленных пламен (с высоким содержанием инертного разбавителя в горючей смеси), при горении смесей, обогащенных кислородом, концентрация недогоревших углеводородов и СО в конечных продуктах значительно ниже [20]. Несмотря на то, что при горении в условиях обогащения кислородом выбросы  $\text{NO}_x$  велики из-за высокой температуры, такие условия, тем не менее, рассматриваются как более приемлемые для технического применения [20, 21]. В настоящей работе исследованы одномерные пламена, стабилизированные на встречных потоках предварительно перемешанной горючей смеси с низким содержанием кислорода и обогащенного кислородом воздуха (ППНК/ОКВ): 11.2 %  $\text{CH}_4 + 16$  %  $\text{O}_2 + 72.8$  %  $\text{N}_2$  против 24 %  $\text{O}_2 + 76$  %  $\text{N}_2$ . Цель работы — найти условия, в которых пламя будет стабильным, будет иметь высокую температуру и при этом давать низкие концентрации СО и NO в продуктах горения. В работе получены фотографии исследуемых пламен и проведено численное моделирование с использованием химико-кинетического механизма GRI-Mech 3.0 [22]. Исследование проведено в форме сравнения результатов, полученных в противоточных пламенах ППНК/ОКВ с различными долями кислорода в горючей сме-

Условия стабилизации исследуемых пламен

Пламя		Состав горючего, %				Состав окислителя, %		$\phi_f$	$\phi_\Sigma$	$k, c^{-1}$
		CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub> /O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>			
А	Предварительно перемешанное	9.1	71.8	19.1	79/21	100	0	0.95	0.95	40
Б	Частично перемешанных реагентов	12.8	68.9	18.3	79/21	79	21	1.4	0.95	34
В	ППНК/ОКВ*	11.2	72.8	16.0	82/18	76	24	1.4	0.95	36
Г	ППНК/ОКВ	12.6	71.7	15.7	82/18	76	24	1.6	0.95	35
Д	ППНК/ОКВ	14.0	70.6	15.4	82/18	76	24	1.8	0.95	34

\*ППНК/ОКВ — предварительно перемешанная горючая смесь с низким содержанием кислорода / обогащенный кислородом воздух.

си, с результатами в пламенах частично перемешанных и полностью перемешанных реагентов. На основе результатов моделирования проведен анализ путей образования NO в исследуемых пламенах.

## 1. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Экспериментальная установка состоит из системы подачи газов, камер для подготовки газовых смесей и противоточной горелки. Горелка (рис. 1) представляет собой две пары коаксиальных трубок, которые расположены на одной оси. Внутренний диаметр внутренних трубок составлял 25 мм, расстояние между их торцами — 20 мм. CH<sub>4</sub>, O<sub>2</sub> и N<sub>2</sub> использовались в качестве горючего, окислителя и инертного разбавителя, а их смесь подавалась во внутренние трубки горелки. Для предотвращения влияния окружающего воздуха на пламя в коаксиальный зазор между трубками подавался азот. Для выравнивания скорости потока по сечению трубок устанавливали вставки из пористой керамики. В таблице приведены условия экспериментов, в которых наблюдалась стабилизация пламен. В экспериментах расход метана поддерживался постоянным и равным 1 л/мин, суммарный коэффициент избытка горючего  $\phi_\Sigma$  составлял 0.95, а коэффициент избытка горючего в смеси  $\phi_f$  варьировался в пределах 1.4 ÷ 1.8. Коэффициент растяжения рассчитывался по формуле [9, 23, 24]

$$k = \frac{2V_{ox}}{L} \left( 1 + \frac{v_f \sqrt{\rho_f}}{v_{ox} \sqrt{\rho_{ox}}} \right), \quad (1)$$

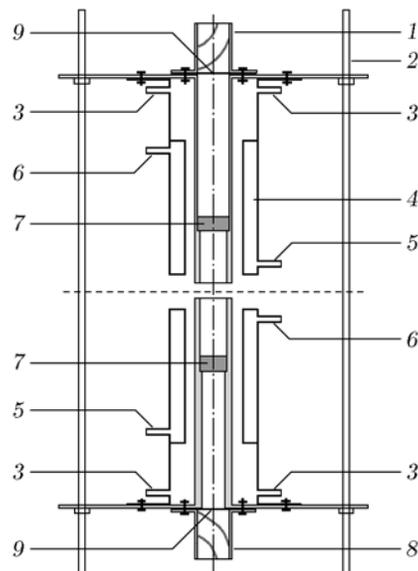


Рис. 1. Схема противоточной горелки:

1 — ввод предварительно перемешанной горючей смеси, 2 — регулировочный винт, 3 — ввод азота, 4 — рубашка водяного охлаждения, 5 — ввод охлаждающей воды, 6 — выход охлаждающей воды, 7 — вставка из пористой керамики, 8 — ввод окислителя, 9 — фильтр

где  $L$  — расстояние между торцами трубок горелки ( $L = 20$  мм),  $v$  и  $\rho$  — рассчитанные значения соответственно скорости и плотности набегающих потоков на выходе из трубок горелки, индексами  $ox$  и  $f$  указаны параметры потоков окислителя и горючего соответственно. Для поддержания неизменным коэффициентом избытка горючего коэффициент растяжения

изучаемых пламен (см. таблицу) варьировался в интервале  $k = 34 \div 40 \text{ с}^{-1}$ .

Фотографии пламен были сделаны фотокамерой Canon EOS 5D Mark II DSLR. Объектив камеры располагался на расстоянии 1 м от пламени. Выдержка составляла  $1/5 \text{ с}$ . Положение камеры при съемке всех пламен не менялось. Профиль температуры измерялся термопарой 70Pt/30Rh—94Pt/6Rh. Диаметр ее спая равнялся 0.4 мм, термопара рассчитана на измерение температур до 2073 К с точностью 0.5 %. Для учета радиационных потерь использовалась формула

$$T_f = T + \frac{\varepsilon\sigma}{\alpha} (T^4 - T_w^4), \quad (2)$$

которая была получена из уравнения теплового баланса для спая термопары. Здесь  $T_f$  — температура с учетом поправки на излучение,  $T$  — измеренное значение температуры,  $T_w$  — температура окружающей среды,  $\varepsilon$  — степень черноты поверхности термопары,  $\sigma$  — постоянная Стефана — Больцмана,  $\alpha$  — коэффициент конвективного теплообмена. Коэффициент  $\alpha$  выражается из соотношения [25]

$$\text{Nu}_f = \frac{\alpha d_c}{\lambda} = 2 + 0.533 \text{Re}_c^{0.5} \text{Pr}_f^{0.33}, \quad (3)$$

где  $d_c$  — диаметр спая,  $\lambda$  — коэффициент теплопроводности набегающего газа,  $\text{Re}$ ,  $\text{Pr}$  — числа Рейнольдса и Прандтля. Таким образом, используя формулы (2) и (3), можно вычислить температуру с учетом поправки на радиационные потери:

$$T_f = T + \frac{\varepsilon\sigma d_c}{\lambda(2 + 0.533 \text{Re}_c^{0.5} \text{Pr}_f^{0.33})} (T^4 - T_w^4). \quad (4)$$

## 2. МЕТОДИКА ЧИСЛЕННЫХ РАСЧЕТОВ

Расчеты выполнялись с использованием кода OPPDIF [26], предназначенного для моделирования пламен, стабилизированных в противотоке. При моделировании использовался детальный механизм реакций GRI-Mech 3.0, а также базы транспортных и термодинамических свойств, предложенные разработчиками механизма. В работах [27–29] было показано, что механизм GRI-Mech 3.0 удовлетворительно описывает метановоздушные пламена, стабилизированные на противотоках частично перемешанных реагентов. Кроме того, в ряде работ

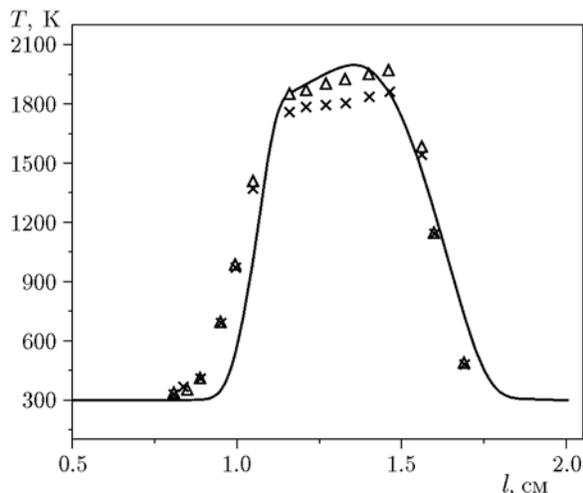


Рис. 2. Сравнение результатов расчета (линия) и измерений (точки) профиля температуры в пламени В (см. таблицу):

расстояние  $l$  отсчитывается от торца трубки с горючей смесью; треугольники — с поправкой на излучение, крестики — без поправки

[2, 4, 7, 28, 29] установлено, что этот механизм хорошо описывает образование  $\text{NO}_x$  при горении. Задаваемые начальные значения молярной доли реагентов на выходе из трубки подачи горючего и трубки подачи окислителя приведены в таблице. На рис. 2 измеренный профиль температуры с учетом поправки на излучение и без нее сопоставлен с рассчитанным профилем для пламени В (ППНК/ОКВ). Видно, что они хорошо согласуются между собой, однако рассчитанная максимальная температура примерно на 35 К выше измеренной. Возможно, это связано с тем, что в модели не учитываются теплотери в горелку.

## 3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

### 3.1. Фотографии пламен

На рис. 3 представлены фотографии пламен предварительно перемешанной смеси, частично перемешанной и ППНК/ОКВ. Как видно, пламя предварительно перемешанной смеси имеет только одну светящуюся область, в то время как пламена частично перемешанных реагентов и ППНК/ОКВ — по две светящиеся зоны, по крайней мере при указанных на рис. 3 условиях. Следует отметить, что даже при одинаковых значениях  $\phi_{\Sigma}$  и  $\phi_f$  пламена Б и В (см. таблицу) внешне различаются: пла-

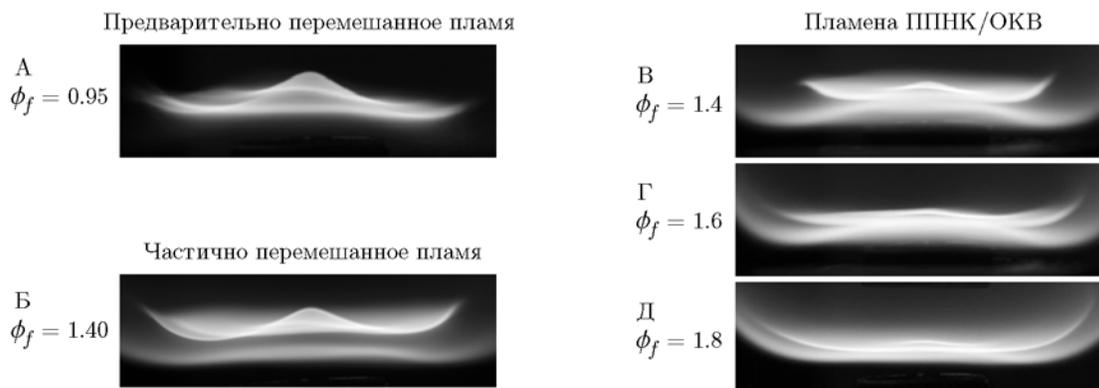


Рис. 3. Фотографии исследуемых пламен (А–Д — см. таблицу)

мя В (ППНК/ОКВ) ярче. Это обусловлено различным содержанием кислорода в смеси с горючим и в окислителе. В двухзонном пламени ППНК/ОКВ верхняя его часть — пламя богатой, предварительно перемешанной смеси, нижняя — пламя предварительно не перемешанных реагентов, где в качестве горючего выступают продукты недогорания верхнего пламени.

В центре пламен, особенно предварительно перемешанных смесей, наблюдается характерная деформация пламени. В работах [30–32] указывалось на такое же явление в противоточных пламенах. Было сделано предположение, что деформация обусловлена тепловым всплытием. При проведении экспериментов мы установили, что степень этой деформации значительно зависит от коэффициента  $\phi_f$ . Из изображений пламен В, Г, Д видно, что с увеличением  $\phi_f$  деформация центральной части пламени уменьшается. Более детальное исследование вопроса о влиянии коэффициента избытка горючего на степень деформации центральной части пламени мы планируем провести в отдельной работе.

### 3.2. Структура пламен

На рис. 4 показаны рассчитанные профили температуры и молярной доли некоторых компонентов ( $\text{CH}_4$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{OH}$ ) в различных пламенах. Как видно из рисунка, температура достигает наибольшего значения в предварительно перемешанном пламени, а наименьшего — в пламени ППНК/ОКВ. В пламени предварительно перемешанной смеси температура имеет один довольно широкий максимум, а в пламени частично перемешанных ре-

агентов, как и в пламени ППНК/ОКВ, наблюдаются два максимума температуры: один — в зоне реакций предварительно перемешанной горючей смеси, другой — в зоне реакций предварительно не перемешанного пламени со стороны окислителя.

В предварительно перемешанном пламени зона расходования  $\text{CH}_4$  и  $\text{O}_2$  довольно узка и пламя формируется достаточно близко к торцу трубки горелки, а в широкой области максимальной температуры максимальную концентрацию имеют основные продукты горения. Однако пламя частично перемешанных реагентов, как и пламя ППНК/ОКВ, имеет двухзонную структуру.  $\text{CO}$ , как и некоторые другие промежуточные продукты, образуется в области предварительно перемешанного богатого пламени, и положение максимума молярной доли  $\text{CO}$  совпадает с максимумом температуры в этой зоне. Радикал  $\text{OH}$  имеет два максимума молярной доли в пламени. Меньший максимум находится в области предварительно перемешанного богатого пламени и совпадает с соответствующим максимумом температуры. В зоне предварительно не перемешанного пламени максимум содержания  $\text{OH}$  существенно выше и его положение совпадает с максимумом температуры.

В остальном структуры пламен частично перемешанных реагентов и ППНК/ОКВ значительно различаются, несмотря даже на то, что оба пламени имеют одинаковый коэффициент избытка горючего. Одним из основных различий является то, что положение зоны реакций предварительно перемешанного пламени и расстояние между зонами реакций различны в этих пламенах. В двухзонном пламени частично перемешанных реагентов и двухзонном пла-

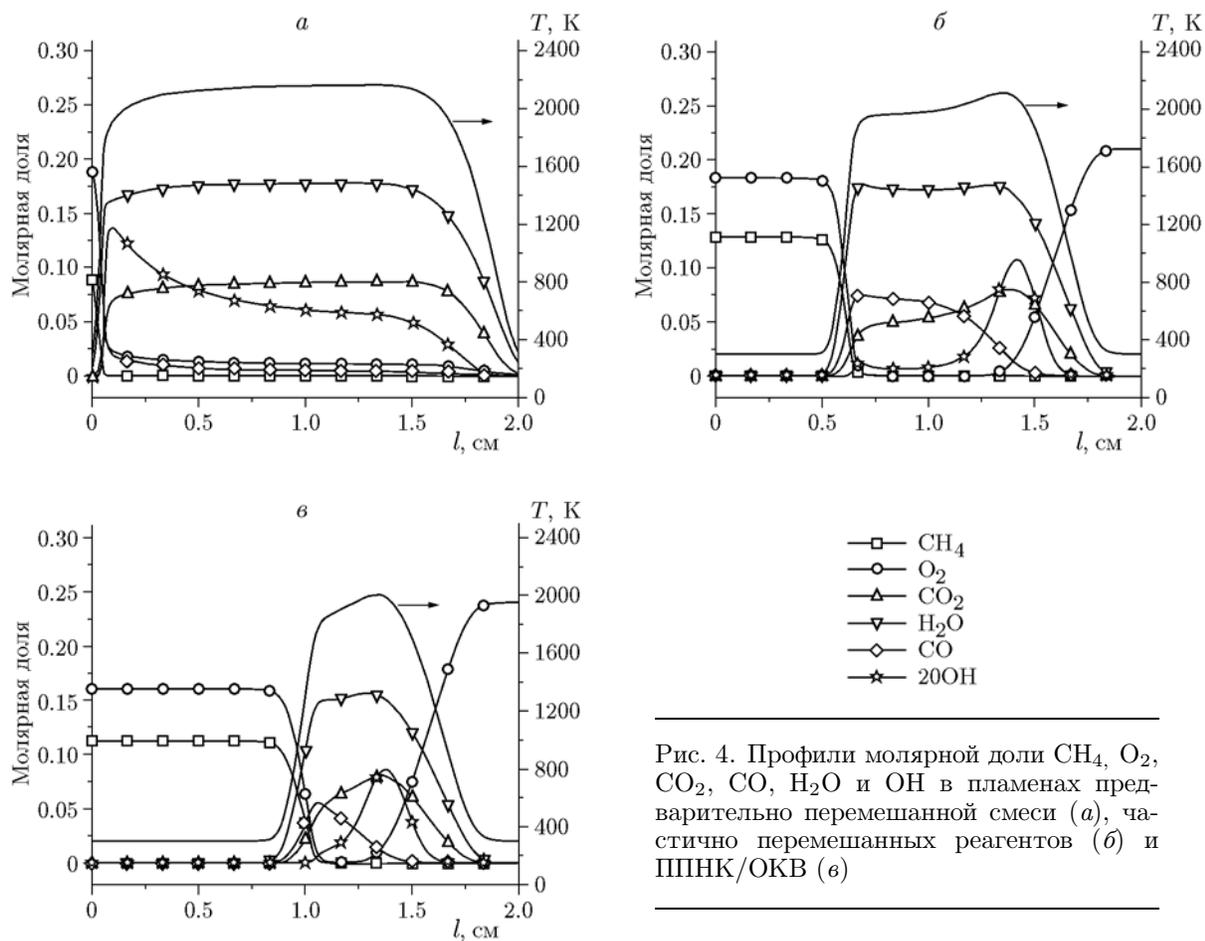


Рис. 4. Профили молярной доли  $\text{CH}_4$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  и  $\text{OH}$  в пламенах предварительно перемешанной смеси (а), частично перемешанных реагентов (б) и ППНК/ОКВ (в)

мени ППНК/ОКВ зона реакций предварительно перемешанного пламени находится на расстоянии 0.7 и 1.0 см соответственно, тогда как зона предварительно не перемешанного пламени в обоих случаях расположена на расстоянии 1.4 см. Таким образом, расстояние между двумя зонами реакций равно соответственно 0.7 и 0.4 см. В пламени ППНК/ОКВ концентрация кислорода в смеси с горючим меньше, следовательно, ниже максимальная температура в зоне реакций (на 165 K), чем в пламени частично перемешанных реагентов. Соответственно, и зона реакций предварительно перемешанного пламени в случае ППНК/ОКВ находится дальше от торца трубки с горючей смесью. Кроме того, более низкая температура в зоне предварительно перемешанного пламени приводит к снижению в ней концентрации промежуточных продуктов (например,  $\text{CO}$ ). Поэтому максимум температуры в зоне предварительно не перемешанного пламени лишь незначительно

превышает максимум температуры в области предварительно перемешанного пламени. Таким образом, можно сделать заключение, что, изменяя концентрацию кислорода, подаваемого в смеси с горючим, и концентрацию кислорода окислителя, можно эффективно влиять на соотношение скоростей химических реакций в зоне как предварительно перемешанного, так и предварительно не перемешанного пламени.

### 3.3. Эмиссия $\text{NO}$ и $\text{CO}$

В противоточном пламени метана индексы эмиссии  $\text{NO}$  и  $\text{CO}$  определялись по следующим формулам [7]:

$$EI_{\text{NO}} = \frac{\int_0^L M_{\text{NO}} \omega_{\text{NO}} dx}{\left( - \int_0^L M_{\text{CH}_4} \omega_{\text{CH}_4} dx \right)}, \quad (5)$$

$EI_{CO} =$

$$= \int_0^L M_{CO} \omega_{CO} dx / \left( - \int_0^L M_{CH_4} \omega_{CH_4} dx \right), \quad (6)$$

где  $M$  — молекулярная масса,  $\omega$  — полная скорость образования/расходования,  $x$  — аксиальная координата.

На рис. 5 приведены индексы эмиссии NO и CO в пламенах предварительно перемешанной смеси, частично перемешанных реагентов и ППНК/ОКВ. Видно, что эмиссия CO наименьшая в предварительно перемешанном пламени, а в пламени частично перемешанных реагентов — наибольшая. Эмиссия NO снижается в следующем порядке: предварительно перемешанное пламя → пламя частично перемешанных реагентов → ППНК/ОКВ. Таким образом, в пламени ППНК/ОКВ эмиссия CO составляет 63.4 % от пламени частично перемешанных реагентов, в то время как эмиссия NO ниже лишь ненамного. Изменяя концентрацию кислорода, подаваемого в смеси с горючей смесью, и концентрацию кислорода окислителя, можно добиться одновременно увеличения полноты сгорания и снижения эмиссии NO. Следует отметить, что хотя в предварительно перемешанном пламени эмиссия CO очень низка, эмиссия NO при этом наибольшая из-за высокой температуры пламени, поэтому этот вариант стабилизации пламени нельзя считать приемлемым.

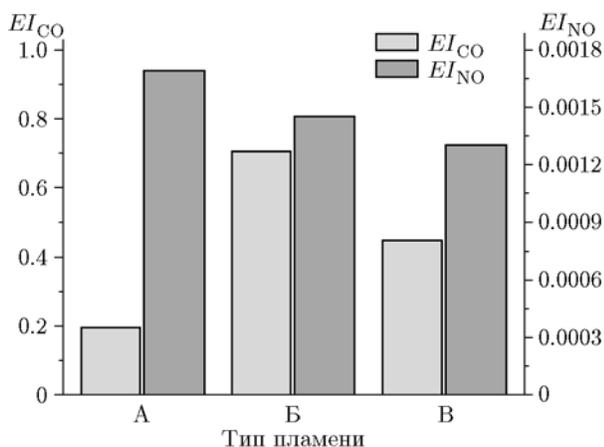


Рис. 5. Индексы эмиссии NO и CO в пламенах предварительно перемешанной смеси (А), частично перемешанных реагентов (Б), ППНК/ОКВ (В)

### 3.4. Скорость образования NO

На рис. 6 приведены профили общей скорости образования NO и скорости термического образования NO в различных пламенах. Как видно из рис. 6,а, в предварительно перемешанном пламени оксид NO образуется в основном только по термическому механизму (82.4 %). В этом пламени окислитель и горючее перемешаны и температура выше, поэтому по быстрому механизму NO образуется слабо. Однако, как видно из рис. 6,б,в, в пламенах частично перемешанных реагентов и ППНК/ОКВ быстрый механизм дает некоторый вклад в общую скорость образования NO.

При окислении метана в зоне предварительно перемешанного пламени образуются радикалы СН, которые, вступая в реакцию с  $N_2$ , инициируют другие реакции, приводящие к образованию таких промежуточных продуктов, как  $NNH$ ,  $HCN$ ,  $NH$ ,  $N$  и т. п., т. е. наличие радикалов СН определяет быстрый механизм образования NO [33]. Из рис. 6,б,в видно, что положение максимума концентрации СН совпадает с положением максимума температуры в зоне реакций предварительно перемешанного пламени, где в результате распада молекулы горючего образуется наибольшее количество радикалов СН. Как в пламени частично перемешанных реагентов, так и в пламени ППНК/ОКВ радикалы СН способствуют образованию ряда промежуточных соединений, которые, реагируя с радикалами O и OH, в дальнейшем дают NO. Следует отметить, что в зоне реакций предварительно перемешанного пламени концентрация OH низка, поэтому образование NO здесь идет слабо (см. рис. 4,б,в). Как видно из рис. 6,г, концентрация NO в зоне предварительно не перемешанного пламени существенно больше, чем в зоне реакций предварительно перемешанного пламени. Это обусловлено более высокими температурой и концентрацией радикалов OH в зоне предварительно не перемешанного пламени (см. рис. 4,б,в).

Несмотря на то, что концентрация кислорода окислителя в ППНК/ОКВ составляет 24 %, концентрация NO ниже, чем в пламени частично перемешанной смеси, при том же самом коэффициенте избытка горючего. Основные причины этого заключаются в следующем: в пламени ППНК/ОКВ по сравнению с пламенем частично перемешанной смеси (1) концентрация радикалов OH ниже, (2) температура

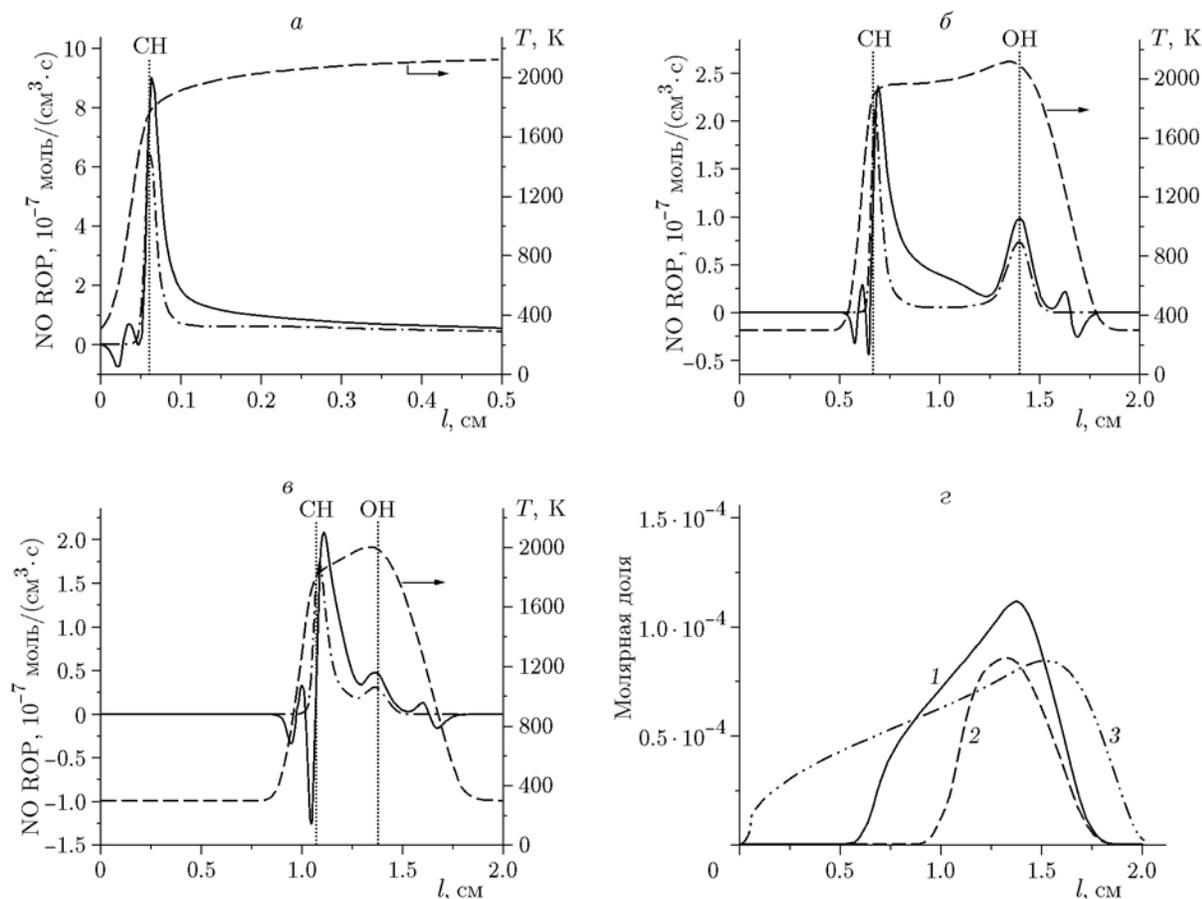


Рис. 6. Профили полной скорости образования (ROP) NO (сплошная линия) и скорости термического образования NO (штрихпунктирная линия) в пламенах предварительно перемешанной смеси (а), частично перемешанных реагентов (б), ППНК/ОКВ (в) (соответственно А, Б, В в таблице), а также профиль молярной доли NO (г):

г: 1 — пламя частично перемешанных реагентов, 2 — ППНК/ОКВ, 3 — предварительно перемешанное пламя

ниже, (3) расстояние между зонами реакций в предварительно перемешанной и предварительно не перемешанной смесях (т. е. ширина зоны горения) меньше.

### 3.5. Реакционные пути образования NO

Как уже обсуждалось выше, в предварительно перемешанном пламени механизм образования NO в основном термический, а в пламенах частично перемешанных реагентов и ППНК/ОКВ играют роль как термический, так и быстрый механизм, поэтому ниже рассмотрим пути образования NO только в пламени ППНК/ОКВ. На рис. 7 представлены диаграммы реакций образования NO в предварительно перемешанном пламени и в пламени ППНК/ОКВ в точке, где концентрация NO

максимальна. В обоих пламенах  $\phi_{\Sigma} = 0.95$ ,  $\phi_f = 1.4$ . Из рис. 7,а видно, что в предварительно перемешанном пламени наиболее важными реакциями, приводящими к образованию NO, являются следующие: R178 ( $N + NO \leftrightarrow N_2 + O$ ), R179 ( $N + O_2 \leftrightarrow NO + O$ ) и R180 ( $N + OH \leftrightarrow NO + H$ ), остальные играют меньшую роль. Приведенные реакции составляют термический механизм образования NO [2]. Однако в пламени ППНК/ОКВ, кроме указанных выше реакций, большую роль играют еще два пути, характерные для быстрого механизма:  $NNH \rightarrow NH \rightarrow HNO \rightarrow NO$  и  $N_2O \rightarrow NO$  (см. рис. 7,б). Пути образования NO в обоих пламенах в целом аналогичны, тем не менее концентрация NO в пламени ППНК/ОКВ ниже, чем в пламени частично перемешанных реагентов. Причины этого уже обсуждались в § 3.3.

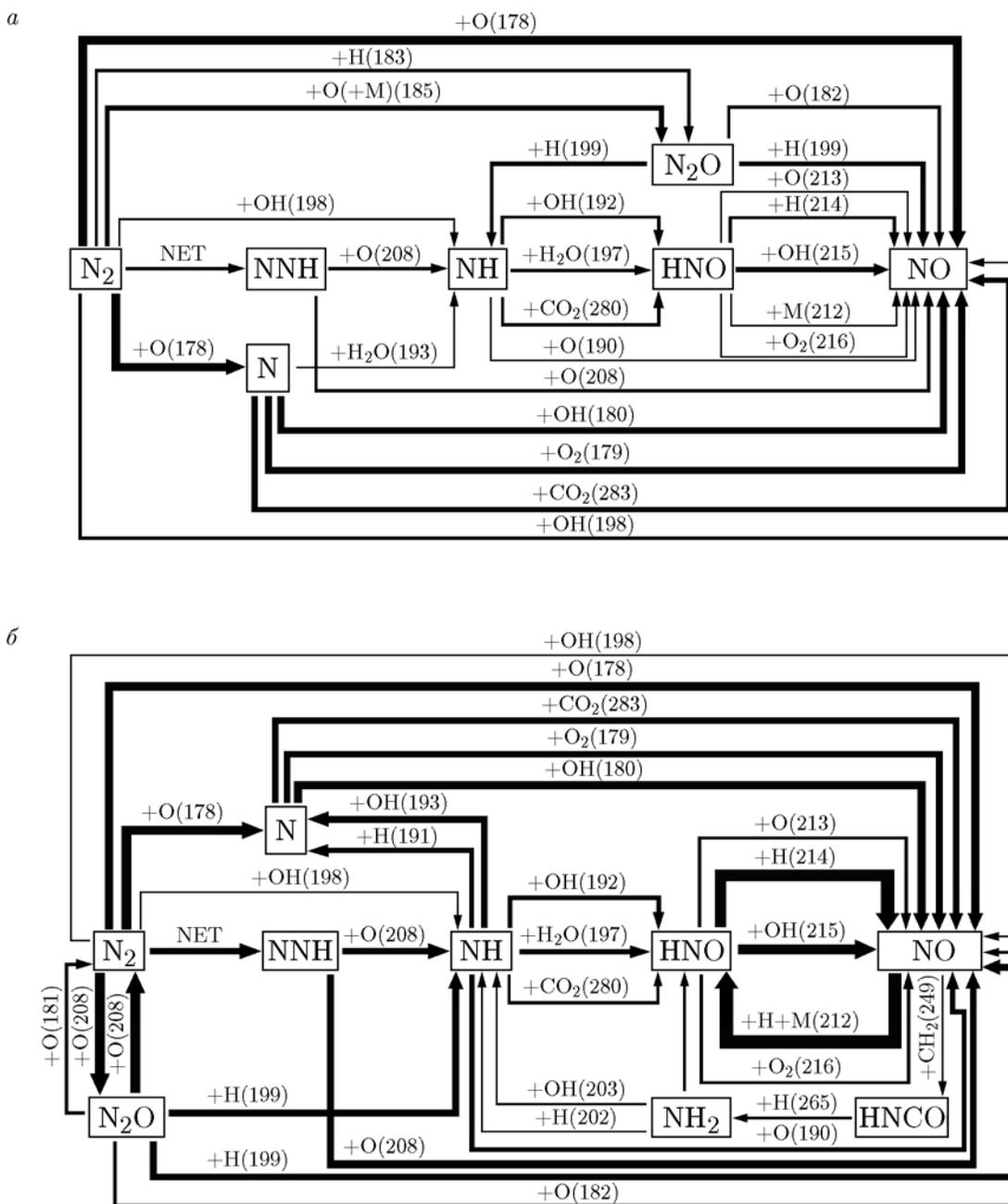


Рис. 7. Диаграммы путей реакций образования NO в области максимальной концентрации NO в предварительно перемешанном пламени (а,  $\phi_{\Sigma} = 0.95$ ) и пламени ППНК/ОКВ (а,  $\phi_{\Sigma} = 0.95$ ,  $\phi_f = 1.4$ ):

стрелки показывают направление реакции, а их толщина соответствует интегральной скорости реакции с реагентом, указанным над стрелкой, в скобках указан номер реакции согласно механизму GRI-Mech 3.0

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе экспериментально и численно исследованы одномерные пламена, стабилизированные на встречных потоках предварительно перемешанной горючей смеси

с низким содержанием кислорода и обогащенного кислородом воздуха (ППНК/ОКВ): 11.2 % CH<sub>4</sub> + 16 % O<sub>2</sub> + 72.8 % N<sub>2</sub> против 24 % O<sub>2</sub> + 76 % N<sub>2</sub>. Исследование проведено в форме сравнения результатов, полученных в про-

тивоточном пламени ППНК/ОКВ с различной долей кислорода в горючей смеси, с результатами в пламенах частично перемешанных реагентов и полностью перемешанных реагентов при одних и тех же коэффициентах избытка горючего ( $\phi_{\Sigma} = 0.95$ ,  $\phi_f = 1.4$ ). Получены следующие основные результаты.

1. При определенных коэффициенте избытка горючего и коэффициенте растяжения пламена частично перемешанных реагентов и ППНК/ОКВ имеют выраженную двухзонную структуру. Несмотря на то, что в этих пламенах одинаковы коэффициенты избытка горючего и коэффициенты растяжения, структуры зон реакций всё же существенно различаются. Нижняя реакционная зона пламени ППНК/ОКВ (со стороны окислителя) значительно более яркая и широкая. Изменяя концентрацию кислорода, подаваемого в смеси с горючим, и концентрацию кислорода окислителя, можно эффективно влиять на соотношение скоростей химических реакций в зонах реагирования в предварительно перемешанном и предварительно не перемешанном пламенах. Ключевыми параметрами, характеризующими противоточные пламена частично перемешанных реагентов, являются коэффициент растяжения, коэффициент избытка горючего и концентрация кислорода.

2. Максимальная температура достигается в предварительно перемешанном пламени, наименьшая — в пламени ППНК/ОКВ. Температура в предварительно перемешанном пламени имеет один широкий максимум. В пламенах частично перемешанных реагентов и ППНК/ОКВ наблюдаются два максимума температуры: в области предварительно перемешанной горючей смеси и в области предварительно не перемешанной смеси со стороны окислителя. Положение зоны предварительно перемешанного пламени и расстояние между зонами реакций различны в пламенах частично перемешанных реагентов и ППНК/ОКВ.

3. Эмиссия CO снижается в следующем порядке: пламя частично перемешанных реагентов  $\rightarrow$  ППНК/ОКВ  $\rightarrow$  предварительно перемешанное пламя, а эмиссия NO уменьшается в порядке: предварительно перемешанное  $\rightarrow$  пламя частично перемешанных реагентов  $\rightarrow$  ППНК/ОКВ. В пламени ППНК/ОКВ эмиссия CO составляет 63.4 %, а эмиссия NO ненамного ниже, чем в пламени частично перемешанных реагентов. Таким образом, изменяя концентра-

цию кислорода, подаваемого в смеси с горючим, и концентрацию кислорода окислителя, можно добиться одновременно увеличения полноты сгорания и снижения эмиссии NO.

4. В предварительно перемешанном пламени NO практически полностью образуется по термическому механизму. Однако в пламенах частично перемешанных реагентов и ППНК/ОКВ, кроме термического образования NO, некоторый вклад в общую скорость образования NO дает быстрый механизм. Наиболее важными путями реакций, приводящими к образованию NO, являются следующие цепочки:  $\text{NNH} \rightarrow \text{NH} \rightarrow \text{HNO} \rightarrow \text{NO}$  и  $\text{N}_2\text{O} \rightarrow \text{NO}$ .

Работа выполнена при финансовой поддержке Национального научного фонда Китая (51276055), Фонда естественных наук провинции Хэбэй (E2015202321), Научно-технологического исследовательского проекта провинции Хэбэй (QN2015063).

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Cònsul R., Oliva A., Pérez-Segarra C. D., Carbonell D., Goey L. P. H. Analysis of the flamelet concept in the numerical simulation of laminar partially premixed flames // *Combust. Flame.* — 2008. — V. 153. — P. 71–83.
2. Dupont V., Williams A.  $\text{NO}_x$  mechanisms in rich methane-air flames // *Combust. Flame.* — 1998. — V. 114. — P. 103–118.
3. Nishioka M., Nakagawa S., Ishikawa Y., Takeno T. NO emission characteristics of methane-air double flame // *Combust. Flame.* — 1994. — V. 98. — P. 127–138.
4. Blevins L. G., Gore J. P. Computed structure of low strain rate partially premixed  $\text{CH}_4$ /air counterflow flames: implications for NO formation // *Combust. Flame.* — 1999. — V. 116. — P. 546–566.
5. Ravikrishna R. V., Laurendeau N. M. Laser-induced fluorescence measurements and modeling of nitric oxide in counterflow partially premixed flames // *Combust. Flame.* — 2000. — V. 122. — P. 474–482.
6. Williams F. A. Progress in knowledge of flamelet structure and extinction // *Prog. Energy Combust. Sci.* — 2000. — V. 26. — P. 657–682.
7. Mungekar H., Atreya A. NO formation in counterflow partially premixed flames // *Combust. Flame.* — 2007. — V. 148. — P. 148–157.
8. Mishra T. K., Datta A., Mukhopadhyay A. Comparison of the structures of methane-air and propane-air partially premixed flames // *Fuel.* — 2006. — V. 85. — P. 1254–1263.
9. Berta P., Puri I. K., Aggarwal S. K. Structure of partially premixed *n*-heptane-air counterflow flames // *Proc. Combust. Inst.* — 2005. — V. 30. — P. 447–453.

10. **Machrafi H., Cavadias S., Guibert P.** An experimental and numerical investigation on the influence of external gas recirculation on the HCCI autoignition process in an engine: thermal, diluting, and chemical effects // *Combust. Flame.* — 2008. — V. 155. — P. 476–489.
11. **Fathi M., Saray R. K., Checkel M. D.** The influence of exhaust gas recirculation (EGR) on combustion and emissions of *n*-heptane/natural gas fueled homogeneous charge compression ignition (HCCI) engines // *Appl. Energy.* — 2011. — V. 88. — P. 4719–4724.
12. **Mi J., Li P. F., Dally B. B., Craig R. A.** Importance of initial momentum rate and air-fuel premixing on moderate or intense low oxygen dilution (MILD) combustion in a recuperative furnace // *Energy Fuels.* — 2009. — V. 23. — P. 5349–5356.
13. **Konnov A. A., Dyakov I. V., Ruyck J.** The effects of composition on the burning velocity and NO formation in premixed flames of  $C_2H_4 + O_2 + N_2$  // *Exp. Therm. Fluid Sci.* — 2008. — V. 32. — P. 1412–1420.
14. **Roy R. N., Sreedhara S.** A numerical study on the influence of airstream dilution and jet velocity on NO emission characteristics of  $CH_4$  and DME bluff-body flames // *Fuel.* — 2015. — V. 142. — P. 73–80.
15. **Wang Z. S., Zuo H. B., Liu Z. C., Li W. F., Dou H. L.** Impact of  $N_2$  dilution on combustion and emissions in a spark ignition CNG engine // *Energy Convers. Manag.* — 2014. — V. 85. — P. 354–360.
16. **Sidey J., Mastorakos E., Gordon R. L.** Simulations of autoignition and laminar premixed flames in methane/air mixtures diluted with hot products // *Combust. Sci. Technol.* — 2014. — V. 186. — P. 453–465.
17. **Gotoda H., Kawaguchi S., Saso Y.** Experiments on dynamical motion of buoyancy-induced flame instability under different oxygen concentration in ambient gas // *Exp. Therm. Fluid Sci.* — 2008. — V. 32. — P. 1759–1765.
18. **Candel S.** Combustion dynamics and control: Progress and challenges // *Proc. Combust. Inst.* — 2002. — V. 29. — P. 1–28.
19. **Stone C., Menon S.** Swirl control of combustion instabilities in a gas turbine combustor // *Proc. Combust. Inst.* — 2002. — V. 29. — P. 155–160.
20. **Wu Y. Y., Huang K. D.** Improving the performance of a small spark-ignition engine by using oxygen-enriched // *SAE-2007-32-0004.*
21. **Cheng Z. X., Wehrmeyer J. A., Pitz R. W.** Experimental and numerical studies of opposed jet oxygen-enhanced methane diffusion flames // *Combust. Sci. Technol.* — 2006. — V. 178. — P. 2145–2163.
22. **Smith G. P., Golden D. M., Frenklach M., Moriarty N. W., Eiteneer B., Goldenberg M., Bowman C. T., Hanson R. K., Song S., Gardiner, Jr, W. C., Lissianski V. V., Qin Z.** GRI Mech-3.0. — [http://www.me.berkeley.edu/gri\\_mech/](http://www.me.berkeley.edu/gri_mech/).
23. **Park J. S., Dong J. H., Park J., Kim J. S., Kim S.** Edge flame instability in low-strain-rate counterflow diffusion flames // *Combust. Flame.* — 2006. — V. 146. — P. 612–619.
24. **Chellian H. K., Law C. K., Ueda T., Smooke M. D., Williams F. A.** An experimental and theoretical investigation of the dilution, pressure and flow-field effects on the extinction condition of methane-air-nitrogen diffusion flames // *Proc. Combust. Inst.* — 1991. — V. 23. — P. 503–511.
25. **Blevins L. G., Pitts W. M.** Modeling of bare and aspirated thermocouples in compartment fires // *Fire Saf. J.* — 1999. — V. 33. — P. 39–59.
26. **Lutz A. E., Kee R. J., Grcar J. F., Rupley F. M.** OPPDIF: A Fortran program for computing opposed-flow diffusion flames // SAND-96-8243. — Sandia National Laboratory, 1997.
27. **Xue H. S., Aggarwal S. K., Osborne R. J., Brown T. M., Pitz R. W.** Assessment of reaction mechanisms for counterflow methane-air partially premixed flames // *AIAA J.* — 2002. — V. 40. — P. 1236–1238.
28. **Barlow R. S., Karpets A. N., Frank J. H., Chen J. Y.** Scalar profiles and NO formation in laminar opposed-flow partially premixed methane/air flames // *Combust. Flame.* — 2001. — V. 127. — P. 2102–2118.
29. **Sung C. J., Law C. K., Chen J. Y.** Augmented reduced mechanisms for NO emission in methane oxidation // *Combust. Flame.* — 2011. — V. 125. — P. 906–919.
30. **Mikami M., Mizuta Y., Tsuchida Y., Kojima N.** Flame structure and stabilization of lean-premixed sprays in a counterflow with low-volatility fuel // *Proc. Combust. Inst.* — 2009. — V. 32. — P. 2223–2230.
31. **Watanabe H., Kurose R., Hwang S. M., Akamatsu F.** Characteristics of flamelets in spray flames in a laminar counterflow // *Combust. Flame.* — 2007. — V. 148. — P. 234–248.
32. **Wang C. H., Ueng G. J., Tsay M. S.** An experimental determination of the laminar burning velocities and extinction stretch rates of benzene/air flames // *Combust. Flame.* — 1998. — V. 113. — P. 242–248.
33. **Xue H. S., Aggarwal S. K.**  $NO_x$  emissions in *n*-heptane/air partially premixed flames // *Combust. Flame.* — 2003. — V. 132. — P. 723–741.

Поступила в редакцию 5/VII 2016 г.,  
в окончательном варианте — 2/XI 2016 г.