

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ И ЧИСЛЕННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НИЖНЕГО ПРЕДЕЛА РАСПРОСТРАНЕНИЯ ПЛАМЕНИ СМЕСИ УГЛЕВОДОРОДОВ C1—C5 С ВОЗДУХОМ

Т. А. Большова, О. П. Коробейничев, Д. А. Князьков, А. Г. Шмаков, А. А. Чернов, С. А. Якимов

Институт химической кинетики и горения СО РАН, 630090 Новосибирск, bolshova@kinetics.nsc.ru

Экспериментально и методом численного моделирования исследовался нижний концентрационный предел распространения пламени углеводородовоздушных смесей. Моделирование с использованием детального механизма химических реакций показало, что результаты расчетов с хорошей точностью описывают данные экспериментов по влиянию паров воды на бедный концентрационный предел горения смеси углеводородов с воздухом. Наличие паров воды в малых концентрациях в исходной смеси не влияет на нижний концентрационный предел распространения пламени, в то же время существенно меняет скорость свободного распространения пламени.

Ключевые слова: концентрационные пределы распространения пламени, пламя предварительно перемешанной смеси, стабилизация на встречных потоках, углеводороды.

ВВЕДЕНИЕ

Разработка и создание экономичных силовых установок, работающих на биотопливе и других новых видах многокомпонентных топлив, становятся возможными благодаря не только экспериментальным исследованиям, но и развитию, особенно в последнее время, расчетных методов оптимизации процессов горения. Верификация кинетических механизмов, на наш взгляд, сегодня стала важным направлением работ в области горения. Для этого используются различные существенные макрокинетические параметры — температура и скорость распространения пламени, задержка воспламенения горючей смеси. Одной из важных характеристик горючих смесей является нижний концентрационный предел распространения (НКПР) пламени. Обоснование существующих экспериментальных методов определения этой характеристики представлено в работах [1–3]. Вычисление НКПР возможно по закону Ле Шателье [4, 5]. В настоящее время разработаны ГОСТы [6, 7] для применения этой методики к горючим смесям без добавок. Если же в горючую смесь добавляется флегматизатор, достаточно при расчете внести поправки, методика вычисления которых описана в справочнике [8]. Точность такого вычисления НКПР оценивается в 30 %, но для простых насыщенных углеводородов и в отсутствие водорода в горючей смеси точность, как правило, значи-

тельно выше.

Один из современных методов определения концентрационных пределов распространения пламени, который позволяет минимизировать влияние теплопотерь на результат испытаний, а также контролировать «растяжение» пламени, является метод с применением горелки со встречными потоками (opposed jet flame method) [9]. Этот тип горелки легко моделируется с минимальными допущениями, что дает возможность провести численный расчет концентрационных пределов.

Целью настоящей работы является проверка метода расчета макрокинетического параметра — НКПР с использованием многостадийного детального кинетического механизма путем сопоставления результатов численного расчета с результатами измерений, литературными данными и оценками НКПР на основе принципа Ле Шателье.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Для определения концентрационных пределов распространения пламени предварительно перемешанной горючей смеси использована методика, предложенная в [9, 10]. Суть метода заключается в нахождении зависимости градиента скорости при погасании (K_{ext}) пламени, стабилизированного на встречных потоках предварительно перемешанной горючей смеси, от концентрации горючего или коэффициента

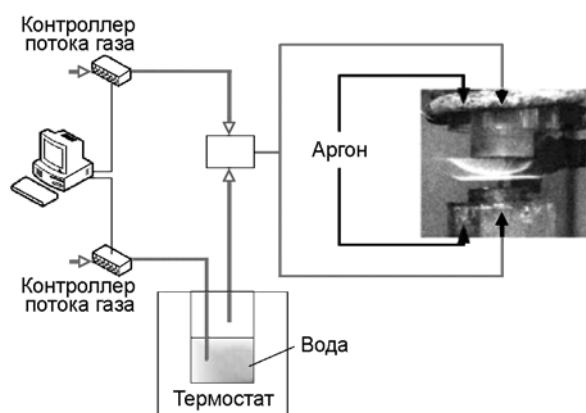


Рис. 1. Схема установки для экспериментального определения пределов распространения пламени методом горелки с противотоком

избытка горючего в смеси (ϕ). Экстраполяция полученных зависимостей до нулевого значения градиента скорости при погасании позволяет определить концентрационные пределы распространения пламени в отсутствие эффектов растяжения и при минимальных теплопотерях в окружающую среду.

Экспериментальная установка для определения концентрационных пределов распространения пламени предварительно перемешанных горючих смесей представляет собой горелку со встречными потоками, оснащенную системой подачи газов и системой подачи добавок исследуемых веществ. Схема установки приведена на рис. 1. Горелка изготовлена из кварцевых трубок длиной 300 мм, их внутренний диаметр (внутренние трубки) 16 мм. По внутренним трубкам сверху и снизу подается предварительно перемешанная горючая смесь (углеводородов с воздухом), а в зазор между внутренними и внешними трубками подается аргон для предотвращения подмешивания атмосферного воздуха в потоки горючей смеси. Расстояние между торцами внутренних трубок горелки составляло 8 мм, что отличается от значения, использованного в работе [10]. Эта величина подобрана так, чтобы измеряемые нами значения соответствовали тем, что получены стандартным методом для пламени метана без добавки воды.

Расход газов горючей смеси устанавливался с относительной точностью $\approx 1\%$ при помощи регуляторов массового расхода газа (MKS Instruments Inc., модель 1299S), управляемых с помощью компьютера. Максимальный поток

горючей смеси через горелки в данных экспериментах составлял $\approx 400 \text{ см}^3/\text{с}$ (при нормальных условиях). Для ввода паров воды в поток метана или смеси углеводородов использовался барботер. Для получения необходимой концентрации паров барботер помещали в водяную баню, температура которой задавалась термостатом. Концентрация паров воды в потоке метана или смеси углеводородов равнялась 25 и 50 % по объему. Для предотвращения конденсации паров на внутренних стенках трубок горелки температура потоков горючей смеси поддерживалась около $\approx 95^\circ\text{C}$. Для этого на внешних трубках горелки были установлены электрические нагреватели, которые прогревали обдуваемый поток, а тот, в свою очередь, — внутренние трубки горелки и горючую смесь. Температура потоков горючей смеси контролировалась при помощи медь-константановых термопар, спаи которых расположены по оси горелки на расстоянии 50 мм от выходных срезов внутренних трубок. Для предотвращения перегрева торца верхней трубки за счет горячего конвективного потока от пламени внешняя трубка горелки вблизи ее среза охлаждалась водой с помощью рубашки из медной трубки.

Пламена на противотоках называют растяженными. Они характеризуются градиентом скорости во фронте пламени, который может быть оценен как отношение скорости потоков к расстоянию между трубками горелки, из которых вытекают потоки навстречу друг другу. Градиент скорости обратно пропорционален времени пребывания молекул в зоне химических реакций в пламени. При увеличении скоростей встречных потоков, а значит, и градиента скорости уменьшается время пребывания. Условием гашения пламени является равенство времени пребывания и характерного времени химических реакций в пламени. Это условие и определяет максимальный градиент скорости (или градиент скорости при гашении пламени), который возможен в пламени того или иного состава.

Увеличение потоков предварительно перемешанной горючей смеси осуществлялось дискретно с шагом $0.5 \text{ см}^3/\text{с}$. Чтобы исключить случайные погасания, при приближении к условиям гашения между каждым последующим шагом увеличения скорости потока выдерживался временной интервал $\approx 15 \text{ с}$. В начальный момент времени, когда скорости потоков относительно малы, в пространстве между

Соотношение углеводородов в горючем в изученных смесях

Смесь	Состав смеси, %				
	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₃ H ₈	C ₄ H ₁₀	C ₅ H ₁₂
Метан	100	—	—	—	—
Смесь № 1	15.8	23.3	34.0	18.9	7.8
Смесь № 2	16.7	10.6	24.2	28.0	19.3

трубками горелки наблюдались два пламени в виде светящихся дисков. Увеличение скоростей потоков свежей смеси приводило к сближению пламен, а при приближении к условиям погасания — к слиянию в один светящийся диск. При проведении экспериментов это помогало отследить приближение к условиям погасания. Для получения надежных данных эксперимент по гашению пламени при одном заданном составе смеси выполнялся не менее трех раз. Эксперименты проводили при температуре барботера 60 и 82 °С, что соответствует объемной концентрации 25 и 50 % паров воды в смеси с горючим (метаном или углеводородами соответственно).

Состав исследованных горючих смесей приведен в таблице. Смесей № 1 и № 2 по составу соответствуют природному газу с малым содержанием метана, добываемому в Алжире и Австралии.

МОДЕЛИРОВАНИЕ

Методика определения КПП методом численного моделирования была аналогична экспериментальной, т. е. рассчитывалась зависимость градиента скорости при гашении пламени K_{ext} от концентрации горючего в смеси и полученная зависимость экстраполировалась к значениям $K_{ext} = 0$ [10]. Использовался пакет программ CHEMKIN-II и OPPDIF, PREMIX (Sandia National Laboratory, USA). Скорость распространения перемешанных адиабатических пламен рассчитывали с помощью модуля PREMIX. Профили температуры и концентраций компонентов пламени в модели на встречных потоках находили по программе OPPDIF. Модуль OPPDIF не позволяет вариацией потоков определить условия погасания пламени, поэтому в настоящей работе для этого применен прямой подход, основанный на пошаговом увеличении скоростей встречных потоков. Для моделирования условий гашения скорость по-

токов увеличивали до тех пор, пока программный модуль TWOPNT не находил решения, соответствующего существованию пламени (это можно определить по полученному значению максимальной температуры), либо вообще не мог найти какого-либо решения. Чтобы сократить время вычислений, для расчета каждой последующей точки с более высокой скоростью потоков в качестве начального использовалось предыдущее решение. Сначала находилось решение для малых скоростей потоков и условий, при которых пламя заведомо существует. Для упрощения расчета значения обеих скоростей потоков из трубок горелки и шаги их приращений принимались одинаковыми. Для ускорения расчета условий гашения пламени при заданном составе горючей смеси использовалась компьютерная программа, разработанная на языке Perl, которая позволяет автоматизировать внесение изменений во входной файл, запуск программы OPPDIF и извлечение данных из выходного файла. Расчеты проведены с различным содержанием воды в потоке горючего: 0, 25, 50 %.

Для проведения расчетов взят механизм Куррана и соавторов [11], разработанный под руководством Вестбрука для горения гептана, бутана и октана. Для описания начальных стадий окисления пентана были привлечены кинетические параметры из работ [12–15].

РЕЗУЛЬТАТЫ

В работе экспериментально определен нижний концентрационный предел распространения пламени метановоздушной смеси и смесей с воздухом № 1 и 2 без добавки и с добавкой паров воды при начальной температуре $T_0 = 95$ °С и давлении $p = 1$ атм.

В экспериментах с метановоздушной смесью при относительно низких скоростях потоков горючей смеси в промежутке между торцами трубок горелки наблюдались две симметричные светящиеся зоны пламени (так называемое двойное пламя) бледно-голубого цвета, свидетельствующего об отсутствии сажеобразования, что очевидно для горючей смеси с избытком окислителя. При добавлении в горючую смесь паров воды в концентрации, равной объемной концентрации метана, симметричные светящиеся зоны незначительно отдалялись друг от друга, но цвет пламени практически не менялся. Для метановоздушной смеси

были измерены зависимости градиента скорости при гашении K_{ext} (сумма скоростей потоков горючей смеси на срезе сопел горелки, отнесенная к расстоянию между торцами трубок горелки) пламени на противотоках как функция объемной концентрации метана $[CH_4]$ (%) в смеси с добавкой паров воды и без них. Полученная экспериментальная зависимость $K_{ext} = f([CH_4])$ при заданной концентрации паров воды аппроксимировалась линейной функцией, экстраполяция которой до значений $K_{ext} = 0$ позволила определить НКПР пламени исследуемых смесей. Экспериментальные значения НКПР были сопоставлены с результатами расчета на основе справочных данных [8] и результатами моделирования с использованием детального кинетического механизма горения углеводородов.

Так как измерения проводились при начальной температуре горючей смеси $T_0 = 95^\circ C$, для применения формул из [8] необходимо было определить зависимость НКПР от температуры. Для этого использовали формулу из работы [8]:

$$A(\text{НКПР}, T) = A(\text{НКПР}, 25^\circ C)(1 - (T - 25)/K), \quad (1)$$

где $A(\text{НКПР}, T)$, $A(\text{НКПР}, 25^\circ C)$ — нижние концентрационные пределы распространения пламени смеси при температуре T и при $25^\circ C$ соответственно, %; $K = 1250$ — температурный коэффициент [8].

На рис. 2 приведены полученные нами экспериментальные данные и результаты расчета с использованием формул из [8]. Значение

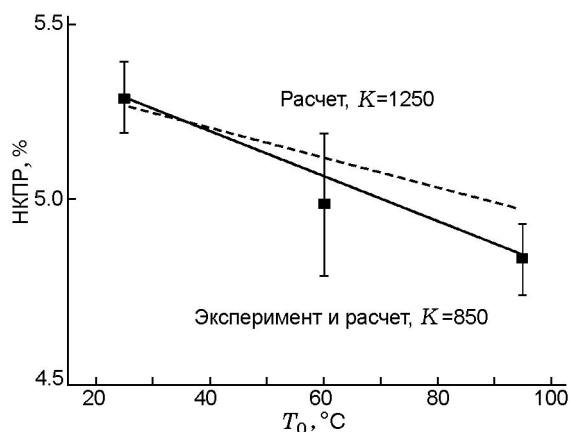


Рис. 2. Зависимость НКПР метана от начальной температуры смеси

для НКПР метановоздушной смеси при температуре $25^\circ C$ составило 5.3 %, что удовлетворительно согласуется с данными [16, 17] и близко к значению 5.28 % из справочника [18]. Это указывает на то, что предложенный метод дает результаты, соответствующие результатам стандартного метода, определяющего предел при распространении пламени снизу вверх.

Для согласования экспериментальных данных и расчетов во всем диапазоне температур коэффициент K варьировался. При $K = 850$ рассчитанные значения НКПР пламени смеси CH_4 /воздух лучше согласуются с данными эксперимента в диапазоне начальных температур $25 \div 95^\circ C$, однако определенный нами температурный коэффициент на 30 % меньше по сравнению с данными [8]. Это различие может быть обусловлено использованием разных экспериментальных методик, значение $K = 1250$ получено для стандартных условий при распространении пламени горючей смеси в трубе снизу вверх.

НКПР пламени смесей горючих веществ и индивидуального вещества в отсутствие и при наличии паров воды при $25^\circ C$ был рассчитан на основе принципа Ле Шателье по формуле из [8]:

$$A(\text{НКПР}, \text{смеси}) = 100/(1 + B), \quad (2)$$

где

$$B = \sum (A_i/A(\text{НКПР}, i) - \left(\sum A_i + \sum (A(H_2O)K(H_2O)) \right) / 100,$$

A_i — концентрация i -го компонента горючей смеси, $A(\text{НКПР}, i)$ — нижний концентрационный предел распространения пламени i -го компонента горючей смеси, $A(H_2O)$ — концентрация паров воды, $K(H_2O) = 1.247$ — коэффициент пропорциональности. Относительная точность вычисления НКПР с помощью этого подхода — около 30 % [8].

На рис. 3 приведены результаты измерения, а также расчетные зависимости НКПР от концентрации паров воды для метановоздушной смеси, полученные с помощью программы ORPDIFF и с использованием формул (1), (2). Эксперименты и расчеты подтверждают слабую зависимость нижнего концентрационного предела распространения пламени от исследуемых концентраций воды. Экспериментальные

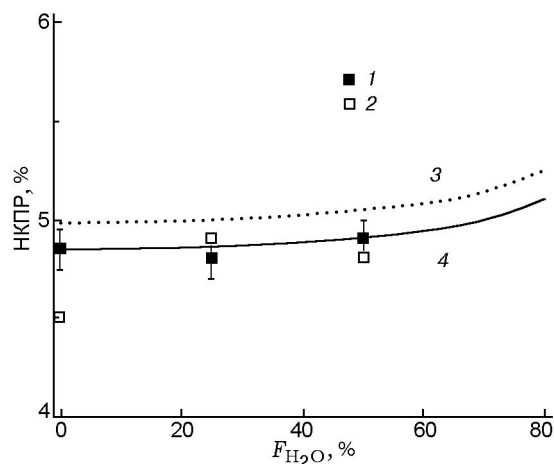


Рис. 3. Зависимость НКПР пламени метана от концентрации паров воды в горючей смеси, $T_0 = 95$ °С:

1 — эксперимент, 2 — моделирование, 3, 4 — расчет по формулам (1) и (2) при $K = 850$ и 1250 соответственно

данные лежат в диапазоне объемной концентрации метана в смеси $4.8 \div 5.0$ %. Близкие результаты получены в экспериментах [16] при комнатной температуре. Необходимо отметить, что на рис. 3–5 объемная концентрация паров воды F_{H_2O} соответствует их доле в смеси с горючим и определяется по формуле $F_{H_2O} = \frac{C_{H_2O}}{C_{H_2O} + C_{fuel}} \cdot 100$ %, где C_{H_2O} — концентрация паров воды, C_{fuel} — концентрация горючего в смеси (метан или смесь углеводородов). Как видно из рис. 3, расчет НКПР по формулам (1) и (2) при $K = 850$ дает лучшее согласие как с экспериментальными данными, так и с результатами моделирования с использованием детального механизма. Также важно отметить, что результаты моделирования лучше описывают экспериментальные данные для смесей CH_4 /воздух с добавкой паров воды по сравнению с данными для метановоздушной смеси без добавки воды, причем наблюдаемое расхождение в последнем случае превышает погрешность эксперимента. Для выяснения причин такого разногласия необходим детальный анализ кинетического механизма и, возможно, его уточнение.

На рис. 4 приведены результаты экспериментов и моделирования зависимости НКПР от концентрации паров воды для смесей с воздухом № 1 и 2 при $T_0 = 95$ °С, полученные с помощью программы ORPDIF и на основе формул

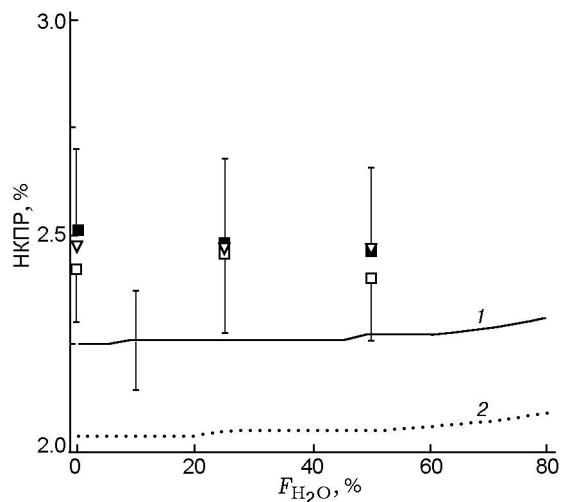


Рис. 4. Зависимость НКПР пламени горючей смеси от концентрации в ней паров воды:

1 — расчет по формулам (1) и (2) для смеси № 1, 2 — расчет по формулам (1) и (2) для смеси № 2, точки — результаты экспериментов (темные квадраты) и моделирования для смеси № 1 (светлые квадраты) и № 2 (светлые треугольники)

(1) и (2). Вначале был определен НКПР пламени при $T_0 = 25$ °С с использованием значений НКПР для индивидуальных веществ из справочника [18], затем по формуле (1) с коэффициентом $K = 850$ при $T_0 = 95$ °С. Погрешность, указанная на кривых, соответствует декларируемой в справочнике [8] точности использования формул. Сравнение результатов показывает, что примененный нами метод расчета с использованием детального кинетического механизма точнее описывает экспериментальные зависимости НКПР пламени смесей углеводородов с воздухом как от состава смеси, так и от концентрации паров воды, чем расчет по эмпирическим формулам (1) и (2). Неточность определения НКПР для смесей № 1 и 2 по формулам (1) и (2) может быть связана как с неточностью определения НКПР для индивидуальных веществ, так и с невыполнением самого принципа Ле Шателье. Для смесей № 1 и 2, так же как и для метановоздушной смеси, зависимость НКПР от концентрации паров воды в смесях практически не наблюдается при использовании всех трех методов его определения. Здесь следует помнить, что в общей смеси (горючее + воздух + пары воды) максимальная концентрация паров воды не более 5 %.

В смесях № 1 и 2 концентрации метана практически одинаковы, но концентрации

остальных углеводородов отличаются, что отражается на величине НКПР, рассчитанной по эмпирическим формулам (1) и (2). Однако в экспериментах такого отличия не обнаружено. Таким образом, можно утверждать, что для смесей № 1 и 2 принцип Ле Шателье дает приближенные результаты. Значения НКПР, вычисленные с использованием детального кинетического механизма, лучше согласуются с экспериментальными данными. Можно предполагать, что величина НКПР пламени углеводородных смесей во многом определяется кинетическими параметрами химических реакций и использованный в данной работе детальный механизм Куррана пригоден для расчета НКПР пламени исследованных горючих смесей.

Для определения влияния паров воды на скорость пламени были проведены расчеты скорости свободного распространения пламени изучаемых горючих смесей с воздухом без и с добавкой паров воды. На рис. 5 представлены результаты моделирования скорости распространения пламени метановоздушной смеси и смеси № 1 с воздухом стехиометрического состава как функции концентрации паров воды в горючем. Видно, что скорость распространения пламени уменьшается при увеличении концентрации паров воды в горючей смеси. В случае метановоздушной смеси с добавкой па-

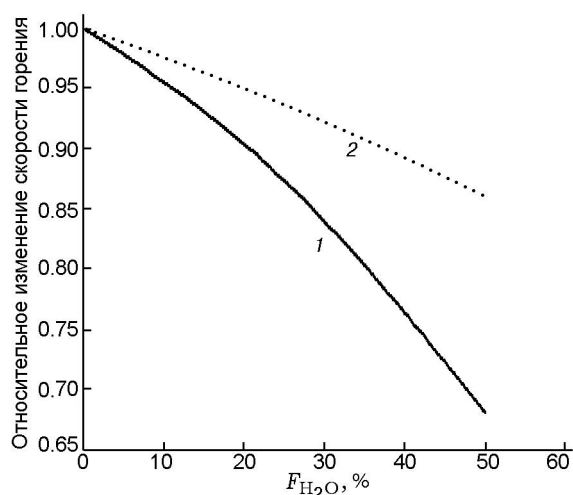
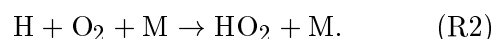


Рис. 5. Относительное изменение скорости распространения пламени метановоздушной смеси стехиометрического состава (кривая 1) и смеси № 1 с воздухом (кривая 2) в зависимости от концентрации паров воды

ров воды падение скорости пламени составляет $\approx 30\%$ от скорости пламени без добавки при концентрации паров воды в горючем 50% . Когда в состав горючего входит смесь углеводородов (смесь № 1), падение скорости пламени при той же концентрации паров воды менее существенное — $\approx 14\%$.

В отличие от зависимости скорости распространения углеводородных пламен от концентрации паров воды, нижний концентрационный предел распространения как для метановоздушной смеси, так и для смесей с воздухом № 1 и 2 не зависит от концентрации паров воды в горючей смеси (см. рис. 2, 3).

Работа [19] посвящена экспериментальному и теоретическому исследованию пределов распространения пламени в системе С—Н—О с инертным разбавителем. Проведенный авторами [19] анализ механизма химических реакций показал, что пределы распространения пламени в таких системах определяются конкуренцией реакций разветвления и гибели носителей цепи. Наиболее существенным фактором, влияющим на нижний предел распространения пламени смесей углеводородов с воздухом, является отношение скорости реакции разветвления (R1) и скорости реакции рекомбинации (R2):



Проведенный нами анализ коэффициентов чувствительности скорости распространения пламени к константам скоростей реакций позволил выделить стадии, наиболее существенно влияющие на распространение пламени смеси № 1 без добавки и с добавкой паров воды $F_{H_2O} = 50\%$. Результаты анализа показаны на рис. 6. Видно, что наибольшее воздействие на скорость свободного распространения пламени смеси углеводородов дает реакция разветвления (R1). Коэффициент для этой реакции самый большой в смеси как без добавки, так и с добавкой паров воды. Больше влияние на скорость распространения смеси № 1 стехиометрического состава оказывают реакции рекомбинации $H + OH + M = H_2O + M$ и (R2), а также реакции $HCO + M = H + CO + M$ и $CO + OH = CO_2 + H$, связанные с окислением СО. В отличие от НКПР, скорость распространения пламени зависит от большего количества кинетических параметров, что объясняет различный характер их зависимости от добавки паров воды.

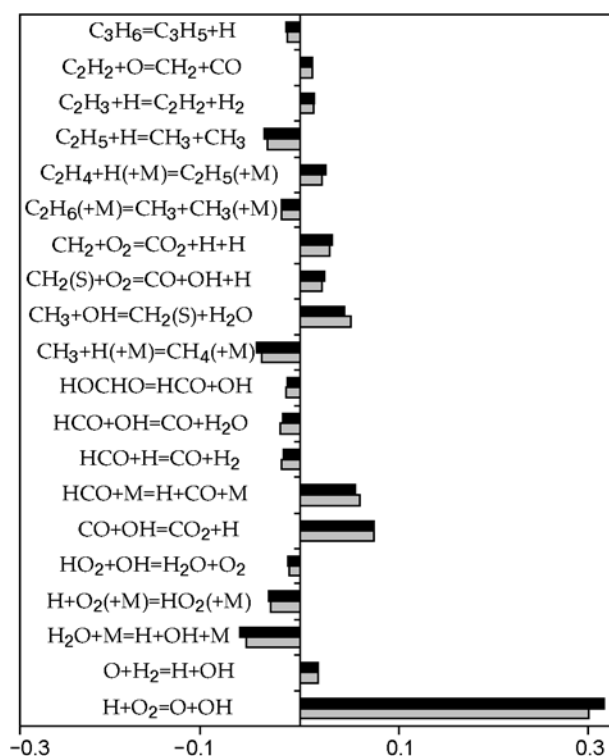


Рис. 6. Коэффициенты чувствительности для скорости распространения пламени смеси № 1 стехиометрического состава с добавкой паров воды ($F_{H_2O} = 50\%$, темные линии) и без добавки (серые линии)

Как показано в работе [19], в богатых пламенах реакция метана с атомарным водородом с образованием молекулярного водорода и метильного радикала дает существенный вклад в рекомбинацию атомов Н в сравнении с реакцией разветвления в области верхнего (богатого) концентрационного предела распространения пламени.

В области бедного (нижнего) концентрационного предела распространения пламени подавляющий вклад в превращение метана и других углеводородов вносит реакция этих веществ с атомарным водородом с образованием H_2 . Из рис. 7, на котором представлена зависимость скорости образования молекулярного водорода от температуры пламени для реакций различных углеводородов с атомом Н, видно, что водород образуется в низкотемпературной зоне в стадиях с участием пентана, пропана и бутана. Максимум скорости образования H_2 в реакции Н с C_5H_{12} , C_4H_{10} и C_3H_8 наблюдается при температурах 1055, 1080 и 1130 °С соответственно. Как видно из рис. 7, метан реа-

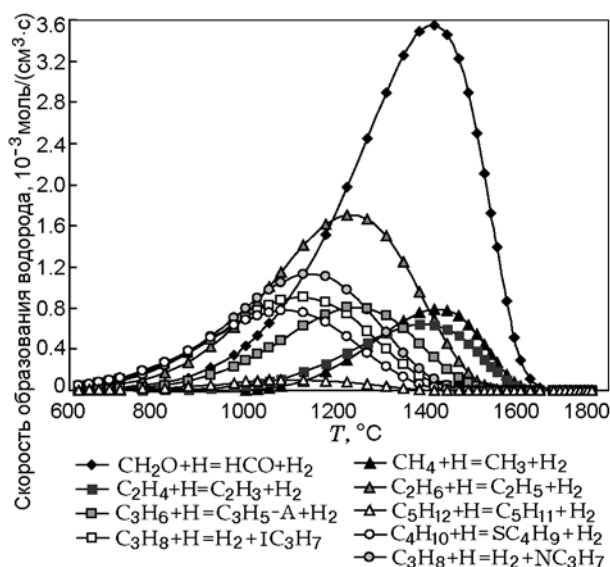


Рис. 7. Зависимость скорости образования молекулярного водорода от температуры пламени смеси № 1 стехиометрического состава

гирует в более высокотемпературной зоне пламени, чем пропан и бутан. Возможно, что наблюдаемый эффект отчасти связан с различной скоростью диффузии исходных веществ в зоне горения, так как коэффициент диффузии, например, для метана в два раза выше, чем у пентана и бутана. Оценки показывают, что при температуре пламени, равной 1000 °С в точке максимального градиента концентраций веществ, несмотря на двукратную разницу в значениях скорости диффузии, линейная скорость массового потока CH_4 отличается от скорости массового потока C_5H_{12} примерно на 12 %.

Как видно из формулы (2), НКПР для смеси зависит от соотношения концентраций ее компонентов, деленных на НКПР этих индивидуальных веществ, и в соответствии с принципом Ле Шателье зависимость носит «тепловой» характер, т. е. определяется соотношением количества тепла при сгорании горючей смеси к минимально необходимому для стационарного распространения пламени. Расчет на основе кинетического механизма позволяет более точно вычислить НКПР, учитывая не только энергетику смесей, но и влияние механизма химических превращений. В данном случае мы наблюдаем влияние деструкции метана на НКПР пламени углеводородной смеси.

В общем случае НКПР пламени горючих смесей зависит от множества различных факторов, но, как было показано в данной работе,

хорошее совпадение результатов расчета и экспериментов свидетельствуют об адекватности применения детального химического механизма реакций горения углеводородов для описания предела распространения пламени.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

• Предложен метод расчета НКПР пламени сложных углеводородных смесей с применением программы OPPDIF и детального механизма химических реакций, отличающийся более высокой точностью, чем расчет по приближенным эмпирическим формулам. Этот подход представляет большой интерес для практического применения.

• Установлено, что малые добавки паров воды (<5 %) существенно влияют на скорость распространения исследованных углеводородовоздушных пламен, но практически не влияют на нижний концентрационный предел их распространения.

• Хорошее согласие результатов расчета и экспериментальных данных по влиянию паров воды на бедный концентрационный предел горения смесей углеводородов с воздухом свидетельствует об адекватности примененного для расчетов химического механизма реакций горения углеводородов Куррана.

ЛИТЕРАТУРА

1. Баратов А. Н., Бабкин В. С., Кривулин В. Н. и др. Пределы воспламенения. — М.: ВНИИПО, 1972.
2. Баратов А. Н. Горение — пожар — взрыв — безопасность. — ФГУ ВНИИПО МЧС России, 2003.
3. Lovachev L. A., Babkin V. S., Bunev V. A., et al. Flammability limits: an invited review // *Combust. and Flame.* — 1973. — V. 20, N 2. — P. 259–289.
4. Coward H. G., Jones G. W. Limits of flammability of gases and vapors // *U. S. Bureau of Mines, Bull.* 503. — 1952.
5. Розловский А. И. Основы техники взрывобезопасности при работе с горючими газами и парами. — М.: Химия, 1980. — С. 185–186.
6. ГОСТ 12.1.039-82. Пожарная безопасность. Методы расчета концентрационных пределов воспламенения газов и паров.
7. ГОСТ 12.1.044-89 Пожарная безопасность. Метод экспериментального определения пределов пламени по газо- и паровоздушным смесям.
8. Баратов А. Н., Иванов Е. Н., Корольченко А. Я. и др. Пожарная безопасность. Взрывобезопасность: справ. изд. — М.: Химия, 1987. — С. 38–60.
9. Law C. K., Zhu D. L., Yu G. Propagation and extinction of stretched premixed flames // *Proc. Combust. Inst.* — 1986. — P. 1419–1426.
10. Князьков Д. А., Якимов С. А., Коробейничев О. П., Шмаков А. Г. Влияние добавок триметилфосфата на концентрационные пределы распространения пламени предварительно перемешанной метановоздушной смеси // *Физика горения и взрыва.* — 2008. — Т. 44, № 1. — С. 12–21.
11. Curran H. J., Gaffuri P., Pitz W. J., Westbrook C. K. A comprehensive modeling study of *n*-heptane oxidation // *Combust. and Flame.* — 1998. — V. 114. — P. 149–177.
12. Marinov N. M., Pitz W. J., Westbrook C. K., Vincitore A. M., Castaldi M. J., Senkan S. M. Aromatic and polycyclic aromatic hydrocarbon formation in a laminar premixed *n*-butane flame // *Combust. and Flame.* — 1998. — V. 114. — P. 192–213.
13. Curran H. J., Gaffuri P., Pitz W. J., Westbrook C. K. A comprehensive modeling study of iso-octane oxidation // *Combust. and Flame.* — 2002. — V. 129. — P. 253–280.
14. Curran H. J., Pitz W. J., Westbrook C. K., Callahan C. V., Dryer F. L. Oxidation of automotive primary reference fuels at elevated pressures // *Proc. Combust. Inst.* — 1998. — V. 27. — P. 379–387.
15. Sjoberg M., Dec J. E. An investigation into lowest acceptable combustion temperatures for hydrocarbon fuel in HCCI engines // *Proc. Combust. Inst.* — 2005. — V. 30. — P. 2719–2726.
16. Egerton A. C., Powling J. J. The limits of flame propagation at atmospheric pressure // *Proc. Roy. Soc. A.* — 1948. — V. 193. — P. 172–190.
17. Oxygen-enhanced combustion. Industrial combustion / Ch. E. Baukal (Ed.). — CRC Press, 1998. — P. 266.
18. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов и средства их тушения. — М.: Химия, 1990.
19. Law C. K., Egolfopoulos F. N. A kinetic criterion of flammability limits: The C—H—O—inert system // *Twenty-Third Symp. (Intern.) on Combustion.* — 1991. — P. 413–421.

Поступила в редакцию 1/Х 2010 г.,
в окончательном варианте — 8/II 2011 г.