

Топливо и энергетика

УДК 665.612:662.611.001.24

Определение основных характеристик горения газовых смесей. 2. Расчет скорости горения газовых смесей с использованием двухпараметрического обобщения

Сорока Б.С., Брадулов П.А.

Институт газа НАН Украины, Киев

Полуэмпирическая зависимость для определения скорости распространения пламени — нормальной u_n (ламинарной) скорости горения — опробована применительно к сжиганию смесей с воздухом-окислителем некоторых горючих газов. Расчеты построены на использовании двухпараметрической зависимости u_n от теоретической температуры горения T_T горючей смеси и переменной смешения (Mixture Fraction — MF). Доказана приемлемость расчетной зависимости и оценены погрешности определения u_n для случая горения сильно забалластированных низкокалорийных газов, углеводородов, в том числе разбавленных азотом, а также для природных газов различных европейских месторождений.

Ключові слова: ламинарное горение, низкокалорийные газы, нормальная скорость распространения пламени, переменная смешения (Mixture Fraction), природный газ, теоретическая температура горения, фронт пламени.

Напівемпіричну залежність для визначення швидкості розповсюдження полум'я — нормальної u_n (ламінарної) швидкості горіння — випробувано стосовно до спалення сумішей із повітрям-окислювачем деяких горючих газів. Розрахунки побудовано на використанні двопараметричної залежності u_n від теоретичної температури горіння T_T горючої суміші та перемінної змішування (Mixture Fraction — MF). Доведено прийнятність розрахункової залежності та оцінено похибки визначення u_n для випадку горіння сильно забаластованих низкокалорійних газів, вуглеводнів, у тому числі розбавлених азотом, а також для природних газів різних європейських родовищ.

Ключові слова: ламінарне горіння, низкокалорійні гази, нормальна швидкість розповсюдження полум'я, перемінна змішування (Mixture Fraction) MF, природний газ, теоретична температура горіння, фронт полум'я.

В работе [1] развита методология определения нормальной (ламинарной) скорости распространения пламени u_n газовых горючих смесей различного состава, построенная на использовании полуэмпирической зависимости [2].

Реализация соответствующего подхода потребовала разработки доступных методик расчета основных физико-химических параметров, определяющих скорость горения: теоретической температуры горения T_T и переменной смешения

(Mixture Fraction – MF) [2]. Далее предложенный подход будем именовать двухпараметрическим MF-обобщением.

Задачей настоящего исследования является определение круга (набора) топливных и топливо-окислительных смесей, для которых справедлива расчетная зависимость [2], учитывая наличие в ней эмпирической составляющей. В указанной работе обобщались данные по скорости горения низкокалорийных газовых смесей. Поэтому логично прежде всего сопоставить результаты расчетов по нашей методике, базирующейся на зависимости [2] и реализуемой с использованием предложенных нами подходов и компьютерных программ расчета T_T и MF [1], с экспериментами авторов [2]. Далее попытаемся оценить возможность расширения составов газовых смесей, для которых зависимость [2] пригодна, на углеводороды чистые и с частичной примесью других горючих и инертных составляющих. Значительный практический интерес связан с опробованием предложенной методики для различных альтернативных топлив (помимо использованных при получении обобщения по u_n).

1. Оценка расчетного метода определения u_n при сжигании тестовых забалластированных смесей

1.1. Большинство данных, использованных при получении двухпараметрического MF-обобщения [2], относится к многокомпонентным забалластированным газам, то есть к таким топливам, для которых определение u_n особенно осложнено. По составам газы, для которых определялась скорость горения, являются смесями CH_4 , CO и H_2 , сильно разбавленными N_2 и CO_2 . Имеются указания на то, что содержание $[N_2]$ в таких газах соответствует 45–55 % (об.), $[CO_2]$ – 10–20 % (об.), общее содержание инертных газов в среднем соответствует диапазону 50–60 % (об.), адиабатная (теоретическая) температура горения – около 1700 К [3].

Далее излагаются результаты наших расчетов значения u_n для сжигания различных горючих газов в смеси с воздухом-окислителем при стехиометрических условиях (коэффициент избытка воздуха $\alpha = 1,0$), а также для обедненных смесей ($\alpha > 1,0$). Характеристики низкокалорийных (Low Calorific Value – LCV) горючих газов, которые были использованы для измерений u_n в работе [2], приведены в табл.1. В табл.2 для проверки были использованы смеси LCV газов с метаном: D_1 – LCV газ; D_2 – 75 % LCV газ + 25 % CH_4 (D_2); D_3 – 50 %

LCV газ + 50 % CH_4 (D_3); D_4 – 25 % LCV газ + 75 % CH_4 (D_4).

Рассмотрим влияние замещения инертной составляющей (азота) горючим газом в LCV газе (смеси). LCV газы являются продуктами воздушной конверсии (газификации) биомассы; на это указывает значительное содержание N_2 в газе и низшая теплота сгорания $Q_{нр} = 4–6$ МДж/нм³ [3]. При использовании пара или O_2 газ как продукт газификации имеет $Q_{нр} = 9–13$ МДж/нм³. Сходную теплоту сгорания можно обеспечить при смешении генераторного LCV газа с природным газом, состоящим в основном из CH_4 .

Предложенная в работе [2] зависимость для определения скорости ламинарного распространения пламени, реализуемая с использованием нашей методики [1], дает хорошее совпадение с экспериментальными данными норвежских авторов [2], полученными при частичном замещении N_2 горючими газами: CH_4 , CO , H_2 .

На рис.1 представлено сравнение полученных нами результатов расчета u_n с использованием полуэмпирического обобщения на основе теории «mixture fraction» (MF-обобщение) с

Таблица 1. Характеристики LCV горючих газов для расчета u_n в условиях сжигания LCV воздушных стехиометрических смесей ($\alpha = 1,0$) [2]

N_2, N_2 п/п	$CH_4, \%$ (об.)	$CO, \%$ (об.)	$H_2, \%$ (об.)	$N_2 /$ CO_2	LHV ($Q_{нр}$), МДж/нм ³
1	1	15	10	74	3,29
2	3	15	10	72	3,99
3	5	15	10	70	4,70
4	8	15	10	67	5,76
5	10	15	10	65	6,47
6	1	18	10	71	3,66
7	1	20	10	69	3,91
8	1	23	10	66	4,29
9	1	25	10	64	4,54
10	1	15	13	71	3,61
11	1	15	15	69	3,82
12	1	15	18	66	4,14
13	1	15	20	64	4,35

Таблица 2. Характеристики смесей LCV газов с CH_4 ($D_1–D_4$) для расчета u_n в условиях сжигания LCV/ CH_4 воздушных смесей при $\alpha = 1,0–1,3$ [2]

Состав, характеристика	D_1	D_2	D_3	D_4	CH_4
$CO, \%$ (об.)	16	12	8	4	–
$H_2, \%$ (об.)	10	7,5	5	2,50	–
$CH_4, \%$ (об.)	4	28	52	76	100
$N_2, \%$ (об.)	53	39,75	26,50	13,25	–
$CO_2, \%$ (об.)	17	12,75	8,50	4,25	–
$Q_{нр}$, МДж/нм ³	4,54	12,37	20,21	28,04	35,88

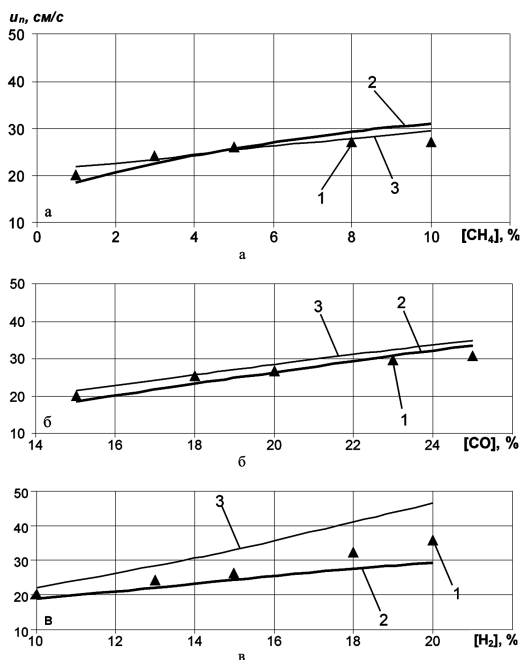


Рис.1. Зависимость нормальной (ламинарной) скорости распространения пламени u_n для стехиометрических ($\alpha = 1,0$) смесей LCV газов от замещения N_2 горючими составляющими CH_4 (а), CO (б), H_2 (в): 1 – результаты экспериментальных исследований [2]; 2 – наши расчеты по двухпараметрическому обобщению; 3 – расчетные зависимости (CHEMKIN-II code). Исходный состав топлива, % (об.): а: $[CO] = 15$; $[H_2] = 10$; $[N_2] = 75 - [CH_4]$; б: $[CH_4] = 1$; $[H_2] = 10$; $[N_2] = 89 - [CO]$; в: $[CO] = 15$; $[CH_4] = 1$; $[N_2] = 84 - [H_2]$.

экспериментальными данными из работы [2], а также нанесены расчетные зависимости, полученные с применением программного продукта CHEMKIN в соответствии с 8-стадийным «reduced» механизмом Chang и Chen [3].

Видно, что наши расчеты и опытные данные, касающиеся горения холодных (здесь и далее в рамках настоящей работы $T = 298$ K) стехиометрических смесей ($\alpha = 1,0$), качественно и в достаточной мере количественно соответствуют друг другу, верно отражая влияние основных параметров: концентраций горючих и инертных компонент, соответствующих теоретических температур горения воздушных смесей такого топлива в условиях нулевого избытка окислителя.

Значение невязок наших расчетов и экспериментальных данных [2] составило: при изменении доли $[CH_4]$ – $(-7,65...+15,0)$ %; $[CO]$ – $(-6,85...+10,5)$ %; $[H_2]$ – $(-7,0...-20,9)$ %, что не уступает результатам норвежских авторов. В работе [2] они оговорили, что предложенная ими зависимость (при отсутствии в работе методики ее реализации) обеспечивает отклонение от эксперимента в пределах 20 %.

Таким образом, эмпирическое обобщение, выполненное авторами [2] с помощью не из-

вестных нам процедур, с одной стороны, и предложенный нами способ (включая определение Z_{st} по представлениям, изложенным в [1], и определение T_T с помощью программного продукта «FUEL»), с другой стороны, дают значения u_n , не различающиеся между собой.

Учитывая, что расчетная зависимость для определения u_n использует не связанные с конкретным составом топлива физико-химические параметры, являющиеся универсальными характеристиками при горении топливо-окислительных смесей, считаем предлагаемый подход физически обоснованным двухпараметрическим обобщением (см. выше). В этой связи можно предположить, что зависимость [2] и методика [1] будут служить не просто полуэмпирическим описанием скорости распространения пламени u_n для тестовых (апробированных) смесей, а обеспечат достаточно общий подход к решению задачи расчета u_n .

В целом описанное двухпараметрическое обобщение дает расчетные значения u_n при горении стехиометрических LCV газо-воздушных смесей, не уступающие по точности определения расчетам по программе CHEMKIN II.

1.2. В работе [2] показаны результаты экспериментального определения влияния избытка

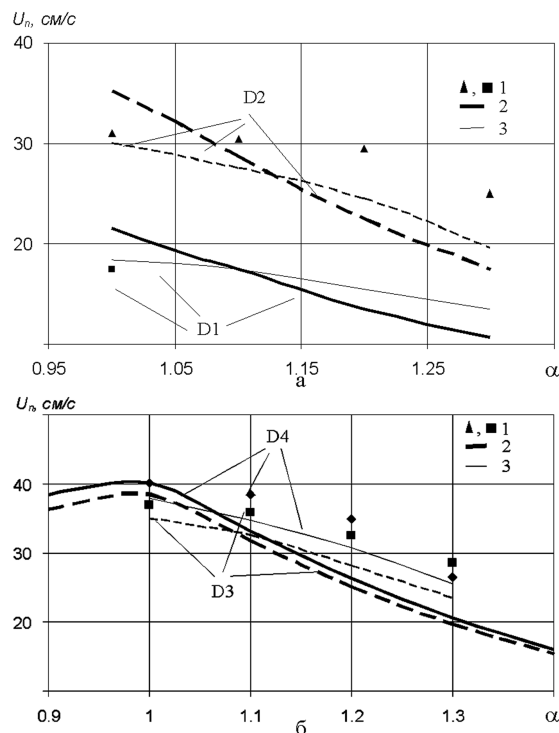


Рис.2. Зависимость u_n топливных смесей D_1 и D_2 (а), D_3 и D_4 (б) с окислителем-воздухом от α : 1 – результаты экспериментальных исследований [2]; 2 – наши расчеты; 3 – Premix code – расчет (CHEMKIN II – package). Смесей D_1 и D_4 – сплошные линии, D_1 и D_2 – пунктирные.

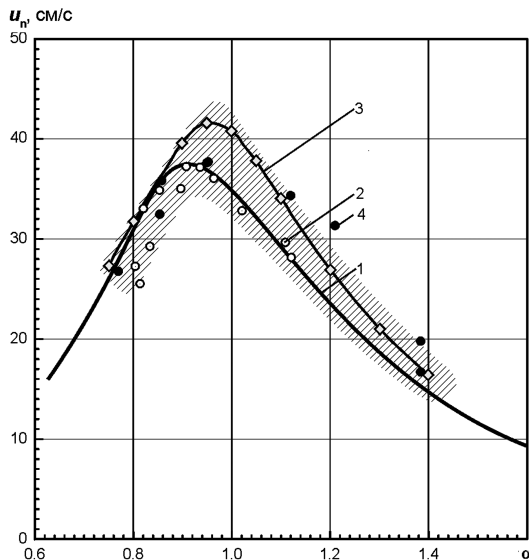


Рис.3. Зависимость u_n от α при сжигании метано-воздушной смеси (1–3) и смеси природного газа с воздухом (4): 1 – по данным Зингера, Грумера, Кука [4]; 2 – данные Яна, Денъюса, Хаффа по сжиганию метано-воздушной смеси [4]; 3 – наши расчетные данные по сжиганию метано-воздушной смеси; 4 – экспериментальные данные ОНУ по сжиганию смеси природного газа (91,2 % CH_4) с воздухом.

воздуха в случае обедненных смесей на ламинарную скорость горения. В качестве топлива рассматривался LCV газ такого состава, % (об.): CO – 16, H_2 – 10, CH_4 – 4, N_2 – 53, CO_2 – 17, и теплотой сгорания $Q_{\text{нр}} = 4,54$ МДж/нм³ (обозначен D₁), а также смеси D₂: 75 % LCV + 25 % CH_4 ; D₃: 50 % LCV + 50 % CH_4 ; D₄: 25 % LCV + 75 % CH_4 (см. табл.2).

Результаты измерений и расчетов по программе CHEMKIN в сопоставлении с нашими вычислениями по двухпараметрическому обоб-

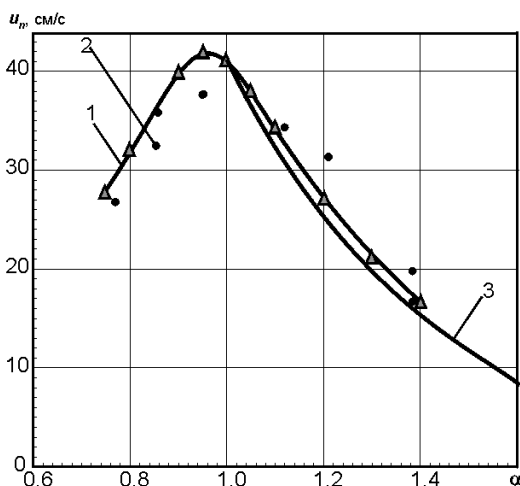


Рис.4. Сравнение наших расчетных (1) и измеренных (2) значений u_n смеси природного газа ($[\text{CH}_4] = 91,2\%$) с воздухом в зависимости от α ; кривая 3 – по данным компании GE Jenbacher GmBH&Co OHG [7].

щению представлены на рис.2 в диапазоне варьирования α {1,0; 1,3}.

Несмотря на достаточно удовлетворительное в целом совпадение опытных и расчетных значений u_n , приходится констатировать более удачное описание зависимостей $u_n(\alpha)$ с помощью программного продукта CHEMKIN II по сравнению с двухпараметрическим обобщением.

Расхождения расчетных значений u_n по упомянутым методикам находятся в пределах +(5,4...16,7) % и -(10,1...20,7) %. При отдельных значениях α значения u_n , рассчитанные по сопоставляемым методикам, совпадают. Однако зависимость $u_n(\alpha)$, найденная нами по двухпараметрическому обобщению, дает более резкое, чем в эксперименте, влияние α .

2. Расчет скорости горения углеводородов и природных газов различных месторождений

В работе [1] проведено опробование двухпараметрического MF-обобщения для расчета u_n на примере шести европейских природных газов. Показана высокая точность расчета скорости горения стехиометрических ($\alpha = 1,0$) холодных воздушных смесей природных газов с высоким содержанием метана ($[\text{CH}_4] > 80\%$). Возможность использования предложенной методики для расчета горения индивидуальных углеводородов и природных газов различных месторождений в рамках построения универсальных подходов относится к числу приоритетных задач при выполнении прикладных разработок в области сжигания органического топлива.

Кроме контрольных топливных смесей (LCV газов) и европейских природных газов, была выполнена проверка возможности использования расчетной формулы [2] в рамках нашей методологии [1] для чистых топлив: CH_4 , C_3H_8 , а также смеси CH_4 с LCV газами. Эти расчеты были проведены в условиях варьирования коэффициента избытка воздуха, начиная от $\alpha = 1,0$, и при $\alpha > 1,0$. Значительная часть расчетов связана с определением u_n для богатых смесей ($\alpha < 1,0$). Таким образом, было апробировано расширение области использования предложенного подхода.

2.1. На рис.3 для случаев сжигания стехиометрических ($\alpha = 1,0$) и нестехиометрических ($\alpha \neq 1,0$) воздушных смесей с CH_4 приведено сравнение u_n в зависимости от α : по нашим расчетам и по данным из разных источников, сведенных в монографии [4]. Достигнуто неплохое совпадение сравниваемых значений u_n по нашим расчетам и экспериментальным данным из литературы при общем для всех групп данных ха-

рактуре влияния α на u_n в условиях варьирования соотношения воздух-окислитель : горючий газ. Максимальный разброс всех сравниваемых значений u_n находится в диапазоне $\pm 10\%$ от среднего значения по данным всех источников, использованных при построении рис.3.

Еще более убедительными относительно приемлемости подхода являющиеся результаты сравнения расчета по нашей методике и измерений u_n , выполненных в Институте горения Одесского национального университета (ОНУ), для случая сжигания смеси природный газ : воздух с переменным α . Эти данные приведены на рис.4, где сопоставлены значения u_n при расчетном определении скорости горения с использованием двухпараметрического МФ-обобщения и при экспериментальных исследованиях сжигания смеси природного газа ($[CH_4] = 91,2\%$) с воздухом.

Дополнительно на рис.3 нанесены значения u_n для горения природного газа, содержащего $[CH_4] = 91,2\%$, с воздухом. Эти данные также хорошо ложатся на область расчетных значений $u_n(\alpha)$ для горения чистых метано-воздушных смесей.

2.2. В Западной Польше и Восточной Германии, как и в Нидерландах, имеются месторождения природных газов, в состав которых наряду с углеводородами входит инертный газ, обычно азот [5]. Теплота сгорания этих газов, именуемых природными низкокалорийными, $МДж/нм^3$: $Q_{нр} = 29,6-13,4$; $Q_{вр} = 32,8-14,4$. Содержание N_2 в этих газах составляет 17-64,5%, то есть может быть существенно выше, чем балластировка распространенного газа из Грёнингема. Обычно эти газы направляются в установки, где удаляются N_2 и CO_2 . Основная часть газа сжигается в газовых турбинах GT8 фирмы «Alston» электрической мощностью 57 и 143 МВт.

В связи с распространенностью подобных газов сжигание смеси CH_4/N_2 (Low Caloric

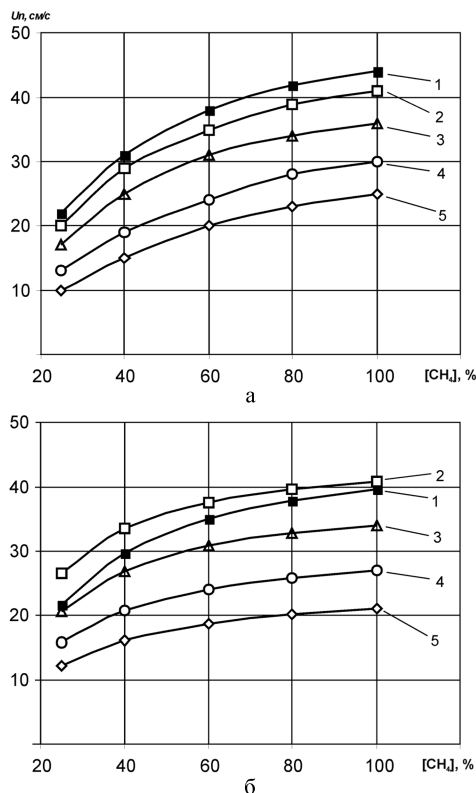


Рис.5. Зависимость u_n воздушных смесей LCNG от содержания (молярной, объемной доли) метана \tilde{D}_{CH_4} в них (а – по результатам расчетов работы [6]; б – по нашим расчетам) при разных α : 1 – 0,9; 2 – 1,0; 3 – 1,1; 4 – 1,2; 5 – 1,3.

Natural Gas (LCNG) – низкокалорийный природный газ [6]) с воздухом-окислителем представляет практический интерес и является предметом нашего анализа.

На рис.5 представлены значения u_n (S_L – ламинарная скорость горения) в зависимости от содержания CH_4 в газе ($0,25 \leq \tilde{D}_{CH_4} \leq 1,0$), где \tilde{D}_{CH_4} – объемная (молярная) доля CH_4 в газе при варьировании α в диапазоне $0,9 \leq \alpha \leq 1,3$ по результатам кинетических расчетов [6] и по нашим данным. При сходной в целом картине

Таблица 3. Составы (% (об.)) низкокалорийных природных газов в Западной Польше

Месторождение	CH_4	C_2H_6	C_3H_8	C_4H_{10}	N_2	He	CO_2	$Q_{вр}^p, МДж/нм^3$	$Q_{нр}^p, МДж/нм^3$
Niemierzyce	81,2	0,59	0,03	0,48	17,1	0,000	0,39	32,8	29,6
Mlodarsko	75,8	0,57	0,02	0,51	22,5	0,000	0,5	30,5	27,5
Paproc	68,5	0,92	0,05	0,19	30,0	0,026	0,17	28,0	25,2
Zuchlow	56,8	1,37	0,24	0,27	40,9	0,000	0,15	24,0	21,7
Antonin	42,2	8,06	3,51	1,57	44,1	0,000	0,35	27,9	25,3
Wilkow	38,1	0,65	0,08	0,14	60,8	0,010	0,06	15,8	14,3
Sychry	42,0	4,61	2,28	0,55	50,5	0,000	0,00	22,5	20,3
Grochowice	34,6	0,74	0,08	0,04	64,45	0,090	0,00	14,4	13,4

Примечание. В ГОСТ Р 51847-2001 приняты обозначения: $Q_{вр}^p = HVH$; $Q_{нр}^p = LHV$.

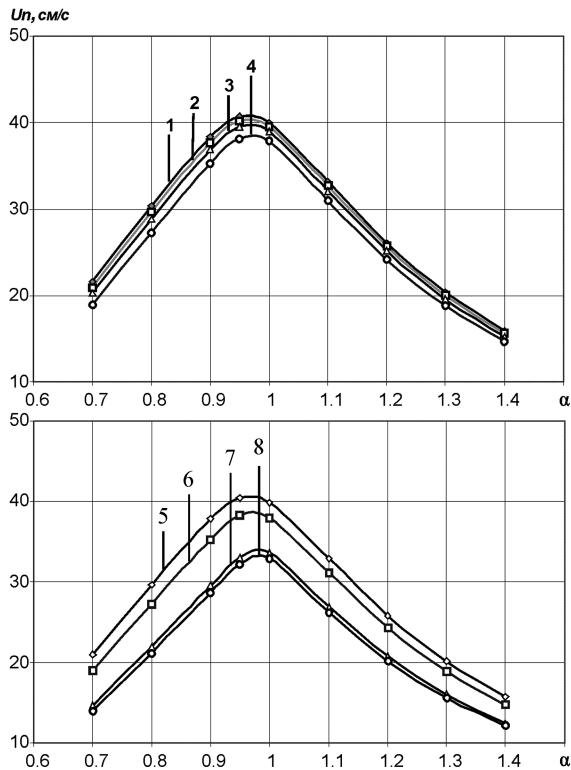


Рис.6. Зависимость u_n от α для обедненных CH_4 природных газов польских месторождений: 1 – Niemierzyce; 2 – Mlodarsko; 3 – Paproc; 4 – Zuchlow; 5 – Antonin; 6 – Cychry; 7 – Wilkow; 8 – Grochowice.

по сопоставляемым данным обращает на себя внимание различие взаимного расположения кривых u_n при $\alpha = 0,9$ и $\alpha = 1,0$ во всем диапазоне соотношений исходных компонент $[\text{CH}_4] : [\text{N}_2]$. В нашем случае $u_n (\alpha = 1,0) > u_n (\alpha = 0,9)$; в работе [6] $u_n (\alpha = 0,9) > u_n (\alpha = 1,0)$ во всем диапазоне $D_{\text{CH}_4} \in \{0,25; 1,0\}$. В нашем случае $u_{n,\text{max}}$ приходится на $\alpha \approx 0,95$, которое соответствует максимальному значению теоретической температуры горения $T_T = f(\alpha) = T_{T,\text{max}}$. Действительно, значение $u_{n,\text{max}}$ для метано-воздушного пламени смещено в сторону слегка обогащенных смесей: $0,9 < \alpha (u_{n,\text{max}}) < 1,0$ (см. рис.3, 4).

Убедившись в адекватности предложенного подхода при определении скорости горения метано-азотных смесей с воздухом-окислителем, перейдем к результатам двухпараметрического расчетного анализа величин u_n для обедненных природных газов, забалластированных N_2 . В табл.3 представлен состав природных газов LCNG из польских месторождений по данным [5].

В соответствии с результатами расчетов u_n для месторождения Antonin, где $[\text{CH}_4] = 42,2\%$ и $[\text{N}_2] = 44,1\%$, скорость горения имеет примерно такое же значение, как для газов из месторождений Niemierzyce ($[\text{CH}_4] = 81,2\%$, $[\text{N}_2]$

$= 17,1\%$,) и Mlodarsko ($[\text{CH}_4] = 75,8\%$, $[\text{N}_2] = 22,5\%$). Это указывает на то, что для определения скорости горения газового топлива произвольного состава не могут быть использованы подходы, построенные на принципе весовой аддитивности по соответствующим характеристикам индивидуальных компонентов топлива.

2.3. Рассмотрим возможность использования нашей методики для расчета u_n воздушных смесей более высоких углеводородов.

В этом смысле представляет интерес работа [8], где рассмотрены ламинарные скорости горения углеводородов, именуемых авторами «подобными природному газу» (natural gas like mixtures), по существу, алкановых смесей – от метана до этана, включая чистые CH_4 и C_2H_6 , а также u_n смеси $75\% \text{CH}_4 + 25\% \text{C}_2\text{H}_6$, а также случаи разбавления горючего газа CO_2 (до 60%), N_2 (до 40%). На рис.7 приведена верификация наших расчетных значений u_n при сжигании этано-воздушных смесей по экспериментальным данным [8].

В целом можно констатировать неплохое совпадение наших расчетных данных с экспериментальными данными иностранных авторов, однако последние данные имеют несколько более пологую зависимость u_n от α . В результате расхождение данных между нашими расчетными значениями u_n и средними величинами из опытного массива составляет $+(4..8)\%$ в области стехиометрических смесей ($\alpha = 1,0$) и смесей, где $u_n = u_{n,\text{max}}$ ($\alpha \approx 0,90-0,95$), и $-(5..9)\%$ (богатые смеси), $-(11..20)\%$ (бедные смеси) – для нестехиометрических горючих смесей.

Таким образом, из рис.8 следует, что и в случае этана C_2H_6 предлагаемая нами методика также может быть рекомендована для практического использования.

В работе [8] оценивалась адекватность расчетного определения u_n сравнением между собой опытных данных разных авторов и расчет-

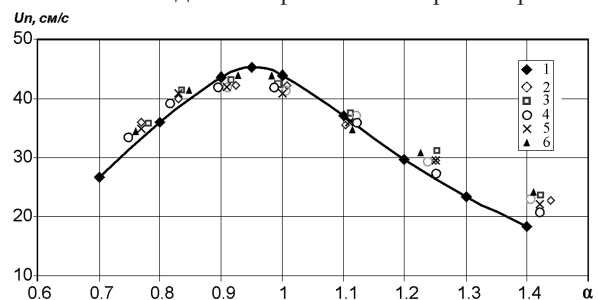


Рис.7. Зависимость скорости горения этано-воздушных смесей (307 К, 1 бар) от α . Результаты расчетов: 1 – наших по двухпараметрическому описанию; 2 – по данным [8] с корректировкой температуры; 3 – то же без корректировки температуры. Экспериментальные данные [8]: 4 – Konnov ($T = 298 \text{ K}$); 5 – Bosschaart ($T = 295 \text{ K}$); 6 – Vagelopoulos.

ных величин, найденных с использованием механизма горения GRI-3.0 (GRI-Mech 3.0). Расчеты выполнялись при исходных температурах горючей смеси 298 и 307 К, давление процесса 1 бар.

Представленные в работе [8] результаты указывают на отличное описание зависимостей $u_n = f(\alpha)$, полученных при использовании кинетического механизма GRI-3.0 с программной версией PREMIX code, для расчета скоростей горения метано-воздушных и этано-воздушных смесей, включая газы, разбавленные N_2 и CO_2 .

Наш опыт использования GRI-3.0 механизма при описании u_n для метано- и пропано-воздушного пламени указывает на удовлетворительное совпадение данных (значений u_n), полученных по двухпараметрическому обобщению: по существу без учета кинетики реакций и по GRI-3.0 кинетическому механизму.

При двухпараметрическом описании расчетная зависимость использует в качестве факторов-аргументов теоретическую температуру горения T_T и переменную смешения Mixture Fraction (MF), что отражает структуру фундаментальных зависимостей Зельдовича и Франк-Каменецкого для расчета скорости ламинарного горения:

$$S_L \sim (a/\tau)^{1/2}; [9]$$

$$S_L \sim (a W_r)^{1/2}, [10]$$

где a — коэффициент температуропроводности реакционной смеси (физический фактор), характеризующий смесь горючий газ + воздух-окислитель, $a = \lambda / (c_p \rho)$; τ — характерное время реакции; W_r — скорость химической реакции. Здесь λ , c_p , ρ — соответственно коэффициент теплопроводности, удельная теплоемкость и плотность реакционной смеси.

GRI-Mech 3.0 является оптимизированным кинетическим механизмом, предназначенным для моделирования горения природного газа, включая образование NO и химизм («гебурн») стадийных процессов. В этой связи основное назначение механизма — расчет горения метана. Что касается других алканов, то этот механизм их учитывает только в той степени, в которой соответствующие более высокие углеводороды входят в состав природных газов, то есть незначительно.

В нашей работе [11] сопоставлены распределения скорости ламинарного горения метано-воздушных смесей в зависимости от коэффициента избытка воздуха по результатам расчетов с использованием двухпараметрического обобщения и с использованием GRI-Mech 3.0. Обе кривые неплохо совпадают между собой и с экспериментальными данными отечественных и зарубежных авторов.

Выводы

Проанализирована возможность использования двухпараметрического описания для определения скоростей нормального u_n (ламинарного S_L) горения индивидуальных топлив и смесей газов различного состава с воздухом-окислителем (по аналогии с подходом I.Glassman [2]). Физический фактор в двухпараметрическом описании представлен величиной MF, химическая кинетика горения при этом характеризуется теоретической температурой горения T_T в экспоненциальной форме.

На основании тестирования и сопоставления с результатами экспериментальных исследований и расчетов по другим методикам определен круг топливных смесей с воздухом, для которых может быть рекомендована предложенная зависимость и методология расчета u_n .

Предполагается, что с приемлемой точностью двухпараметрическая зависимость может быть использована для расчета нормальной скорости горения метана, этана, природных газов различного состава, в том числе обедненных в связи с балластировкой N_2 низкокалорийных (LCV) газов, где основной балластный компонент N_2 , с различным содержанием CH_4 , CO , H_2 , а также смесей LCV с природным газом (CH_4). Соотношение горючий газ (смесь газов) : воздух, в пределах которого проведено опробование методики, соответствует диапазону варьирования коэффициента избытка воздуха $0,7 \leq \alpha \leq 1,4$.

Список литературы

1. Сорока Б.С. Определение основных характеристик горения газовых смесей. 1. Физические основы современных моделей формирования фронта пламени // Энерготехнологии и ресурсосбережение. — 2009. — № 5. — С. 23–30.
2. Fossum M., Hustad J. Laminar burning velocities of inert diluted mixtures of methane, hydrogen and carbon dioxide // The 6th Europ. Conf. on Industrial Furnaces and Boilers (INFUB), Estoril, Lisbon, Portugal, 2–5 Apr., 2002. — Lisbon, 2002. — Vol. 3. — P. 426–435.
3. Fossum M., Beyer R.V. Co-combustion : Biomass Fuel Gas and Natural Gas // SINTEF Energy Research : Techn. Report. — 1998. — 26 p.
4. Льюис Б., Эльбе Г. Горение, пламя и взрывы в газах. — М. : Мир, 1968. — 592 с.
5. Dobski T., Kruszewski W., Kulinski M. Combustion of low-caloric natural gas in gas turbine combustors // State of the Art on Gas Turbine Research in Poland. — 2006.
6. Dobski T., Kruszewski W., Szewczyk D., Swiderski A. Combustion of Low Caloric Natural Gases in Industrial Boilers // Prepr.-Proc. the of 6th Europ. Conf. on Industrial Furnaces and Boilers (INFUB),

- Estoril, Lisbon, Portugal, 2–5 Apr., 2002. — Lisbon, 2002. — Vol. 3.
7. Heroin G. Stromerzeugung aus Schwachgas mittels Gasmotoren. — Leipzig : Jenbacher Gas Engines, 2007.
 8. Ratha Kishore V., Duhan N., Ravi M.R., Ray A. Measurement of adiabatic burning velocity in Natural Gas like mixtures // Preprint submitted to Elsevier, 2 Dec., 2007. — Elsevier, 2007. — 23 p.
 9. Варнатц Ю., Маас У., Диббл Р. Горение (физические и химические аспекты, моделирование, эксперименты, образование загрязняющих веществ). — М. : Наука, 2003. — 352 с.
 10. Вильямс Ф.А. Теория горения. — М. : Наука, 1971. — 815 с.
 11. Soroka B., Sandor P. Thermodynamic analysis of the combined energy and environmental efficiency of furnaces by fuel combustion // The 10th Conf. on Energy for a Clean Environment, Lisbon, Portugal, 7–10 July, 2009. — Lisbon, 2009.

Поступила в редакцию 03.03.10

Definition of Principal Characteristics of Gas Mixtures Combustion. 2. Computations of the Burning Velocities of the Gas Mixtures by Means of Two-Parametric Generalization

Soroka B.S., Bradulov P.A.

The Gas Institute of NASU, Kiev

Semi-empirical dependence on definition of flame propagation velocity — normal u_n (laminar S_L) burning velocity has been tested in respect of burning of some combustibles with the air-oxidant. The mentioned equation has been proposed earlier, in the 1st part of our present work [1]. The calculations are basing upon using of two-parametric dependence of u_n on theoretical combustion temperature T_T of the burning mixture and on Mixture Fraction (MF) value. The acceptability of the proposed approach of u_n computations has been proven for some cases of burning the following combustibles with an air-oxidant: of highly ballasted low-calorific (LCV) gases, of hydrocarbons including those been diluted with nitrogen, as well as for natural gases of various European gas deposits.

Key words: laminar burning, normal velocity of flame propagation, low-calorific gases, mixing (mixture fraction) MF, natural gas, theoretical combustion temperature, flame front.

Received March 3, 2010

УДК 662.61

Характер взаимодействия коксов отходов углеобогащения и энергетических углей с кислородом воздуха в кипящем слое

Провалов А.Ю.

Институт угольных энерготехнологий НАН Украины, Киев

Описана методика проведения исследований и обработки экспериментальных данных по кинетике взаимодействия коксов углей с кислородом воздуха в установке кипящего слоя. Представлены сопоставительные результаты экспериментов по определению характера и скорости взаимодействия коксов шламов и коксов дробленых углей марок АШ, ДГ и Л-В(Г) с кислородом воздуха в кипящем слое. Показано, что скорости выгорания коксов шламов энергетических углей выше, чем скорости выгорания коксов дробленых углей тех же марок. Определены кинетические характеристики выгорания для коксов шламов и коксов дробленых углей (энергия активации и предэкспоненциальные коэффициенты) в кислороде воздуха.

Ключевые слова: кокс, шлам, кипящий слой, степень конверсии, энергия активации, кинетические константы.