

Топливо и энергетика

УДК 665.612:662.611.001.24

Определение основных характеристик горения газовых смесей. 3. Скорость горения природного газа с увлажненным окислителем

Сорока Б.С., Згурский В.А., Воробьев Н.В.

Институт газа НАН Украины, Киев

Предложены три способа расчета нормальной скорости горения u_n метана (природного газа) в условиях обогащения воздуха-окислителя кислородом, увлажнения окислителя, а также подогрева топливоокислительной смеси. Две первые расчетные методики основаны на двухпараметрической полуэмпирической аппроксимации (ДПА) с введением поправок, третий способ базируется на математическом моделировании с использованием кинетического механизма GRI-Mech 3.0. На основании сравнения результатов проведенных расчетов с экспериментальными данными, а также с результатами математического моделирования доказана возможность использования ДПА для расчета u_n сухих и увлажненных метано-азото-кислородных смесей. Оценена адекватность каждой из методик, определены невязки расчетов по отношению к опытным данным. На этой основе рекомендована область применения (типы и начальные параметры топливоокислительных смесей) каждого из развитых методов расчета u_n .

Ключевые слова: водяной пар, кислород, метан, механизм горения, нормальная скорость горения, переменная смешения (Mixture Fraction), природный газ, температура подогрева, теоретическая температура горения, увлажненный окислитель.

Запропоновано три способи розрахунку нормальної швидкості горіння u_n метану (природного газу) в умовах збагачення повітря-окислювача киснем, зволоження окислювача, а також підігріву паливоокисної суміші. Дві перші розрахункові методики базуються на двопараметричній полуемпіричній апроксимації (ДПА) з введенням поправок, третій спосіб базується на математичному моделюванні з використанням кінетичного механізму GRI-Mech 3.0. На підставі порівняння результатів проведених розрахунків з експериментальними даними, а також з результатами математичного моделювання доведено можливість використання ДПА для розрахунку u_n сухих та зволжених метано-азото-кисневих сумішей. Оцінено адекватність кожної з методик, визначено невязки результатів по відношенню до дослідних даних. На цій основі рекомендовано діапазон застосування (типи та початкові параметри паливоокисних сумішей) кожного з розвинених методів розрахунку u_n .

Ключові слова: водяна пара, кисень, метан, механізм горіння, нормальна швидкість горіння, змінна змішування (Mixture Fraction), природний газ, температура підігріву, теоретична температура горіння, зволожений окислювач.

В отечественной литературе в качестве характеристики горючих смесей (топливо + окислитель) обычно используется понятие «нормальной скорости горения» u_n [1, 2], в зарубежных изданиях (в частности, цитируемых в данной работе) оперируют соответствующим u_n понятием — «ламинарная скорость горения» S_L [3, 4]. Обе величины не являются абсолютными константами, ибо зависят от способа определения, режима и локализации фронта горения в пламени при измерениях, однако обязательно соответствуют ламинарному режиму. С учетом особой значимости характеристик горения на протяжении нескольких десятилетий ведутся экспериментальные, а в последние годы и расчетные исследования величин u_n (S_L) различных топливоокислительных смесей. Предпринимаются усилия по учету влияния начальных параметров: температуры T_{in} , давления P_{in} , которые дают в целом однозначную картину относительно места простых и наиболее распространенных смесей в распределении топлив по величине u_n . В [5, 6] были представлены слабо различающиеся между собой наши и литературные данные по значениям u_n для холодных сухих воздушных смесей: природных газов, отдельных углеводородов и LCV-газов (Low-Calorific Value — низкокалорийных).

Сжигание низкокалорийных газов, в частности, продуктов газификации биомассы характеризуется неустойчивым горением вследствие низких скоростей распространения пламени. Срыв горения происходит даже при малых скоростях топлива — горючего газа. Существенное улучшение стабилизации пламени происходит при повышении температуры окислителя выше 973 К в условиях широкого варьирования скорости топлива и концентрации кислорода (21–10 %) в окислителе [7].

В связи с изложенным, метод HiTACG (High Temperature Air Combustion — горение при высокой температуре подогрева воздуха, или FLOX — сжигание) при наличии значительных количеств инертных (балластирующих) компонент (CO_2 , H_2O , N_2) является целесообразным в случае сжигания очень низкокалорийных топлив — продуктов газификации биомассы [8, 9].

Разбавление топливоокислительной смеси продуктами полного (CO_2 , H_2O) и неполного (CO , H_2) горения происходит при различных структурах пламени: при обеспечении стабилизации горения у корня факела за счет рециркуляции продуктов горения, в условиях «повисшего» (lifted) пламени, а также при организации «беспламенного» (flameless или FLOX)

сжигания [10–13]. Поэтому значительный интерес представляет кинетика соответствующих процессов горения в условиях подачи водяного пара [14], а также ее влияние на фундаментальную характеристику — скорость распространения пламени, или ламинарную S_L (нормальную u_n) скорость горения.

Учитывая, что в условиях диффузионного горения в отдельных локализациях потока значения соотношения окислитель : горючее могут существенно различаться (по существу коэффициент избытка окислителя принадлежит области $\alpha \in \{0 \leq \alpha \leq \infty\}$), имеет значение определение зависимости $u_n(\alpha)$ для стехиометрических и нестехиометрических смесей: бедных ($\alpha > 1,0$) и богатых ($\alpha < 1,0$) — в пределах горения.

Сжигание газовых смесей, содержащих воду и (или) водяной пар, представляет значительный интерес в силу следующих причин.

Во-первых, воздух-окислитель обязательно содержит водяной пар, равновесная концентрация которого резко возрастает с ростом температуры. Обычно используемые методы анализа, в рамках которых игнорируется влагосодержание воздуха для расчета процесса горения, представляет упрощенный подход, который дает только приближенный результат [15].

Во-вторых, введение воды или пара в факел является мощным средством подавления образования NO_x в энергоустановках (газовых турбинах, дизелях) [4, 16–20], что подтверждается нашим анализом, проведенным в 1990-е гг. [21], и систематическими расчетами, проведенными в последнее время [22]. С подачей увлажненного забалластированного воздуха связано использование в качестве окислителя отходящих газов из газовой турбины [4, 5]. Такая схема принята в когенерационных установках с газовой турбиной и канальной горелкой (duct burner), в которой сжигается газ перед парогенератором-теплоутилизатором [4].

В-третьих, процессы паровой конверсии углеводородов реализуются как в соответствующем (целевом) технологическом процессе, так и в отдельных локализациях горящего факела, особенно в условиях повисшего (lifted) пламени, а также при FLOX-методе сжигания [8–12].

В связи с изложенным определение нормальных скоростей горения природного газа с кислородо-азотным окислителем в условиях добавок водяного пара приобретает особую научную и прикладную значимость.

В работе [14] изучалась сравнительная кинетика окисления горючего (1 % H_2 или 1 % CH_4) в азото-кислородной смеси сухой или при 10 % H_2O в области температур 800–1300 К.

Исследования проводились в экспериментальном реакторе со смешивающимися струями и расчетным путем при использовании механизма детальной кинетики.

Установлено замедление протекания реакции окисления в обоих случаях: с горючим H_2 (1 %) и CH_4 (1 %) при различных соотношениях топливо : окислитель — в случае добавления 10 % H_2O .

В рамках настоящей работы предлагаются три расчетные методики определения нормальной (ламинарной) скорости горения газовых смесей u_n : 1) двухпараметрическая полуэмпирическая аппроксимация (ДПА), развитая в наших работах [5, 6] на основе подхода, предложенного в [23]. В настоящей работе этот метод дополнен учетом факторов, характеризующих состояние исходной горючей смеси: обогащения воздуха-окислителя и отклонения температуры подогрева горючей смеси T_{in} от стандартной температуры T_0 — ДПА 1; 2) упомянутая выше ДПА для расчета u_n горючих смесей различного состава при стандартной температуре $T_0 = 298$ К с последующим использованием эмпирической зависимости для прямого учета температурного фактора T_{in}/T_0 , прежде всего в виде сомножителя — степенной зависимости [5] — ДПА 2:

$$u_n(T_{in}) = u_n(T_0) f(T_{in}/T_0); \quad (1)$$

3) кинетический механизм GRI-Mech 3.0 (программный продукт).

Ниже будут представлены результаты расчетов и области применения каждой из методик, адекватность которых будет оцениваться сопоставлением расчетных и опытных значений u_n .

Укажем на наличие плюсов и минусов каждого из упомянутых подходов. В целом доказана возможность определения скорости ламинарного горения u_n стехиометрических и нестехиометрических смесей метана с воздухом либо с воздухом, обогащенным кислородом. Увлажнение горючих смесей за счет введения пара, который рассматривается как балластирующий компонент, не является препятствием для использования предлагаемых методик.

Определение скорости горения с использованием двухпараметрического описания с введением корректирующих поправок (ДПА 1)

Как в [5, 6], принятая методология в случае различных тестируемых топливоокислительных смесей состоит в адаптации соответствующих опытных данных к результатам расчетного анализа. По результатам сопоставления расчетных и опытных скоростей горения отбираются горючие смеси, для которых обеспечивается

удовлетворительное совпадение опытных и расчетных значений u_n в диапазоне варьирования определяющих факторов. В отличие от расчетов [5, 6], где определялось значение $u_n = u_n^{base}$ для «холодных» горючих смесей в сухом воздухе-окислителе, целью настоящей работы является определение $u_n = u_n^{cor}$ в условиях варьирования температуры, влагосодержания смеси, а также обогащения воздуха кислородом.

При использовании ДПА в случае окислителя — увлажненного воздуха — следует учитывать, что полуэмпирическое выражение для расчета u_n получено при обобщении данных, относящихся к температуре, близкой к стандартной ($T_0 = 298$ К). Поскольку в настоящем исследовании в состав реагирующих компонентов входит H_2O с температурой выше температуры парообразования ($T \geq 373$ К), то следует ввести температурную поправку на числовой коэффициент, входящий в базовое расчетное уравнение.

Для того, чтобы рассчитать u_n^{cor} в этих условиях, следует оценить влияние температурных и концентрационных параметров, изменивших характер исходной смеси по отношению к начальным условиям, использованным при получении обобщенной расчетной зависимости для u_n^{base} (ДПА) [5, 6]. Такую оценку можно выполнить, основываясь на фундаментальной функциональной зависимости [5]:

$$u_n^{base} \sim (W_r^{base})^{0,5}; \quad u_n^{cor} \sim (W_r^{cor})^{0,5}, \quad (2)$$

где W_r^{base} — скорость химической реакции горения метано-воздушной смеси при T_0 ; W_r^{cor} — скорость реакции для смесей, отличающихся от базовых смесей начальной температурой и составом окислителя.

Выражения (2) относятся соответственно к тем случаям, когда обеспечивается адекватность ДПА и когда исходные составы и температуры смеси отличаются от принятых при получении расчетной зависимости [5, 23].

Существует множество зависимостей, описывающих скорость глобальной реакции горения фиксированной топливоокислительной смеси. Например, некоторая сводка таких уравнений для метаноокислительных смесей представлена в [24]. В случае использования выражения из работы [24] для расчета W_r при одностадийном представлении реакции (в соответствии с классической моделью Зельдовича и Франк-Камецецкого):

$$W_r = k [CH_4]^{-0,3} [O_2]^{1,3} = A T \exp(-E_a/RT) [CH_4]^{-0,3} [O_2]^{1,3}; \quad (3)$$

$$u_n^{cor} \sim [CH_4]^{-0,3/2} [O_2]^{1,3/2}. \quad (4)$$

В наших работах [5, 6, 25], выполненных в развитие работы [23], предложен и реализован полуэмпирический метод расчета нормальной скорости горения u_n газо-воздушных смесей топлив: низкокалорийных (LCV) газов, углеводородов. В целом этот подход оказывается продуктивным для расчета u_n для стехиометрических ($\alpha = 1,0$) и нестехиометрических ($0,7 \leq \alpha \leq 1,4$) смесей. Результаты наших исследований показывают существенное влияние вида инертного компонента на возможность использования аналитического метода расчета. В наших исследованиях в качестве балласта для LCV и других горючих газов прежде всего рассматривался N_2 , в меньшей степени CO_2 и совершенно не рассматривалось влияние H_2O .

Воздействие H_2O как инертного компонента не отличается от влияния N_2 или CO_2 : водяной пар сужает пределы горения [26], особенно для H_2 (больше, чем N_2 или CO_2). При допущении, что H_2O (пар) является обычным нейтральным компонентом окислителя при горении, отличие условий горения от базовых (для которых получено эмпирическое выражение для расчета u_n [5, 23]) состоит в том, что в качестве окислителя используется не холодный воздух, а кислородно-азотная смесь с добавкой пара (или другого нейтрального вещества), причем температура окислителя и соответственно исходной смеси $T_{in} > T_0$.

В общем случае u_n^{base} относится к рассматриваемой смеси, где в качестве окислителя взят сухой воздух ($[O_2]/([O_2] + [N_2]) = 0,21$), при начальной стандартной температуре компонентов смеси $T_0 = 298$ К. При отличии начальных условий от базовых вводятся такие поправки: дополнительные множители, учитывающие переход от воздуха-окислителя к иному окислителю (в частности, к обогащенному кислородом воздуху) — поправка v_1 , а также учитывается отличие начальной температуры смеси T_{in} от стандартной (T_0) — поправка v_2 .

С учетом вышеизложенных предпосылок зависимость для расчета u_n^{arb} произвольных смесей с учетом корректирующих множителей v (ДПА 1) будет иметь вид:

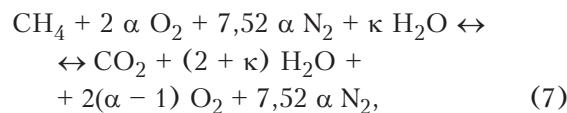
$$u_n^{arb} = u_n^{base} v_n^{arb} = u_n^{base} v_1 v_2. \quad (5)$$

Это означает, что необходимо предпринять коррекцию эмпирического выражения для расчета u_n , полученного для горючих воздушных смесей газовых топлив. Например, если отталкиваться от приемлемости базового выражения для расчета u_n^{base} в случае метано-воздушных смесей, то для использования предложенного подхода при сжигании смеси $CH_4/O_2/N_2/H_2O$ с измененной начальной (исходной) температурой T_{in} получим:

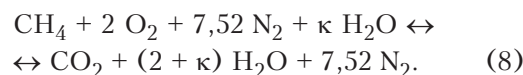
$$v_n^{arb} = v_1 v_2 = \{([CH_4]^{ox}/[CH_4]^{air})^{-0,15} \times ([O_2]^{ox}/[O_2]^{air})^{0,65}\} \times \exp[-0,5 E R^{-1} \times (T_T^{-1} - T_{T,0}^{-1})]. \quad (6)$$

Здесь для (5) и (6) u_n^{arb} — нормальная скорость горения (распространения пламени) при сжигании обогащенных кислородом подогретых ($T_{in} > T_0 = 298$ К) метано-воздушных смесей в случае влажного ($d > 0$) окислителя; u_n^{base} — нормальная скорость горения (распространения пламени) смесей $CH_4/O_2/N_2/H_2O$ при использовании ДПА с принятием $T_{T,0}$ при нормальной температуре смеси $T_0 = 298$ К и Mixture Fraction Z для реального состава и параметров горючей смеси; E , R — соответственно энергия активации в глобальном уравнении для скорости реакции и универсальная газовая постоянная; T_T , $T_{T,0}$ — теоретическая температура горения рассматриваемой смеси при начальной температуре смеси T_{in} и при стандартных условиях ($T_{in} = T_0$); $[CH_4]^{ox}$, $[O_2]^{ox}$ — концентрация CH_4 и O_2 в случае рассматриваемой смеси горючего и окислителя в условиях заданного коэффициента избытка воздуха α ; $[CH_4]^{air}$, $[O_2]^{air}$ — концентрация CH_4 и O_2 в случае базовой смеси горючего с воздухом при заданном α .

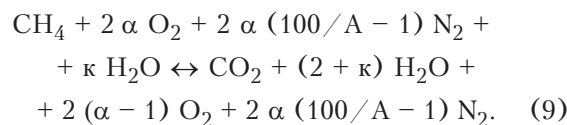
Стехиометрическое уравнение горения метано-воздушных смесей в присутствии влаги (увлажненный окислитель) может быть представлено в виде:



при $\alpha = 1$ (стехиометрическая смесь):



В случае окислителя — увлажненной кислородно-азотной смеси с объемной (молярной) долей кислорода $100 [O_2]/([O_2] + [N_2]) = A$, %, стехиометрическое уравнение горения метана имеет общий вид:



Для сопоставления результатов расчетов с опытными данными [23] необходимо установить молярную (объемную) долю отдельных компонент в топливоокислительной смеси, а также найти соотношение между влажностью d , кг H_2O /кг сухого воздуха (метано-воздушного окислителя), с долей пара D_{H_2O} в смеси горючего с окислителем.

Таблица 1. Молярная (объемная) доля компонентов в исходной влажной метаноокислительной смеси

Доля компонента	Доля в стехиометрической метано-воздушной смеси	Доля в метаноокислительной смеси при произвольном α
$X_{H_2O} = D_{H_2O}$	$\kappa (10,52 + \kappa)^{-1}$	$\kappa (1 + 200 \alpha A^{-1} + \kappa)^{-1}$
D_{CH_4}	$(10,52 + \kappa)^{-1}$	$(1 + 200 \alpha A^{-1} + \kappa)^{-1}$
D_{O_2}	$2(10,52 + \kappa)^{-1}$	$2\alpha (1 + 200 \alpha A^{-1} + \kappa)^{-1}$
D_{N_2}	$7,52(10,52 + \kappa)^{-1}$	$2\alpha (100A^{-1}-1)(1 + 200\alpha A^{-1} + \kappa)^{-1}$
d_{H_2O}	$\kappa M_{H_2O} (2M_{O_2} + 7,52M_{N_2})^{-1}$	$\kappa M_{H_2O} \{2\alpha [2M_{O_2} + (100A^{-1} - 1)M_{N_2}]\}^{-1}$

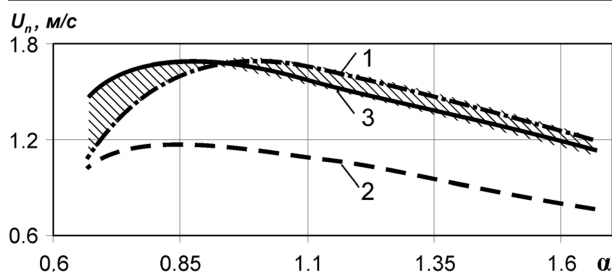


Рис.1. Зависимость нормальной (ламинарной) скорости распространения пламени u_n для метано-азото-кислородной смеси, $A = 50\%$ в случае сухого окислителя ($X_{H_2O} = 0$) от коэффициента избытка воздуха при стандартной температуре смеси $T_0 = 298\text{ K}$ и атмосферном давлении: 1 – расчет с использованием двухпараметрической аппроксимации u_n^{base} [23] ($T_0 = 298\text{ K}$); 2 – наши результаты с использованием GRI-Mech 3.0; 3 – наши результаты по расчету u_n^{cor} с учетом поправки.

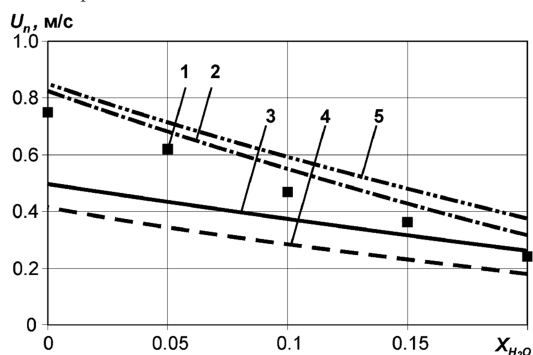


Рис.2. Зависимость нормальной (ламинарной) скорости распространения пламени u_n для стехиометрической ($\alpha = 1,0$) метано-воздушной смеси, $A = 21\%$ от мольной доли водяных паров в смеси при начальной температуре смеси $T_{in} = 473\text{ K}$ (температуре подогрева) и атмосферном давлении: 1 – результаты экспериментальных исследований [27]; 2 – GRI-Mech 3.0 – расчет; 3 – наши результаты по [23] с учетом поправки v_n^{arb} (формула (6)); 4 – наши результаты по [23]; 5 – наши результаты по [23] с учетом степенной поправки [28] (формула (11)).

В табл.1 представлены соответствующие зависимости для случаев простейшего (стехиометрическая ($\alpha = 1,0$) метано-воздушная смесь) и наиболее общего (метано-азото-кислородная смесь при $\alpha \neq 1,0$).

Верификация нашей расчетной методики (ДПА 1) в условиях сухого ($X_{H_2O} = 0$) азото-кислородного окислителя ($A = 50\%$) при

стандартной температуре компонентов смеси $T_0 = 298\text{ K}$ по результатам математического моделирования (GRI-Mech 3.0) приведена на рис.1. Введение соответствующей поправки (v_1), учитывающей переход от воздуха-окислителя к обогащенному кислородом воздуху (кривая 2) хорошо согласуется с результатами математического моделирования (кривая 1), что подтверждает справедливость выбранного нами подхода.

На рис.2 представлена зависимость u_n от доли H_2O в стехиометрической метано-воздушной смеси при температуре компонентов (исходной смеси) $T_{in} = 473\text{ K}$, а также сопоставлены экспериментальные данные (кривая 1) из [27] с расчетами по различным методикам: ДПА [23] – кривая 4 для случая $T_T (T_{in})$ (в общем случае ДПА [23] получено для стандартной температуры смеси $T_{in} = T_0 = 298\text{ K}$), по обобщению с поправкой $v_n^{arb} = v_2$ по формуле (5) (ДПА 1) – кривая 3, а также по программному продукту GRI-Mech 3.0 (кривая 2). Хотя наилучшее совпадение с опытными данными обеспечивает расчет по GRI-Mech 3.0, расчет по ДПА 1 дает неплохое совпадение (табл.2).

При расчете скорости горения u_n^{base} , которая относится к рассматриваемой смеси при стандартной $T_0 = 298\text{ K}$ температуре, теоретическая температура горения $T_{T,0}$ была найдена при допущении, что вся влага в окислителе находится в паровой фазе: $d > d$ ($\phi = 100\%$) (где ϕ – относительная влажность). Использование такого допущения в случае отличия (превышения) исходного влагосодержания по сравнению с равновесным при $T_0 = 298\text{ K}$ является условным, так как максимальное содержание влаги в паровой фазе соответствует равновесному коли-

Таблица 2. Отклонения расчетных значений u_n по ДПА 1 (кривая 3) от экспериментальных величин

Номер рисунка	Отклонение $\Delta u_n, \%$	Номер рисунка	Отклонение $\Delta u_n, \%$
Рис.2	-33-8	Рис.5, а	-28-(-18)
Рис.3	-18-1	Рис.5, б	-23-(-12)
Рис.4, а	-25-8,4	Рис.5, в	-13,4-(-17,6)
Рис.4, б	-20-7,4	Рис.6	-12-30
Рис.4, в	-24,5-(-8)		

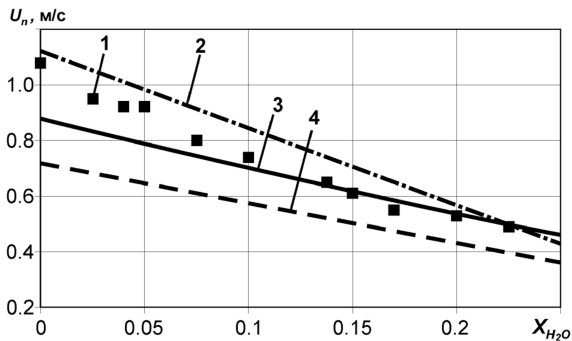


Рис.3. Зависимость нормальной скорости распространения пламени u_n для стехиометрической ($\alpha = 1,0$) метано-кислородной смеси, $\Lambda = 30\%$ от мольной доли водяных паров в смеси при начальной температуре смеси $T_{in} = 373\text{ K}$ (температуре подогрева) и атмосферном давлении: 1 – результаты экспериментальных исследований [29]; 2 – GRI-Mech 3.0 (расчет); 3 – наши результаты по [23] с учетом поправки v_n^{arb} (формула (6)); 4 – наши результаты по [23].

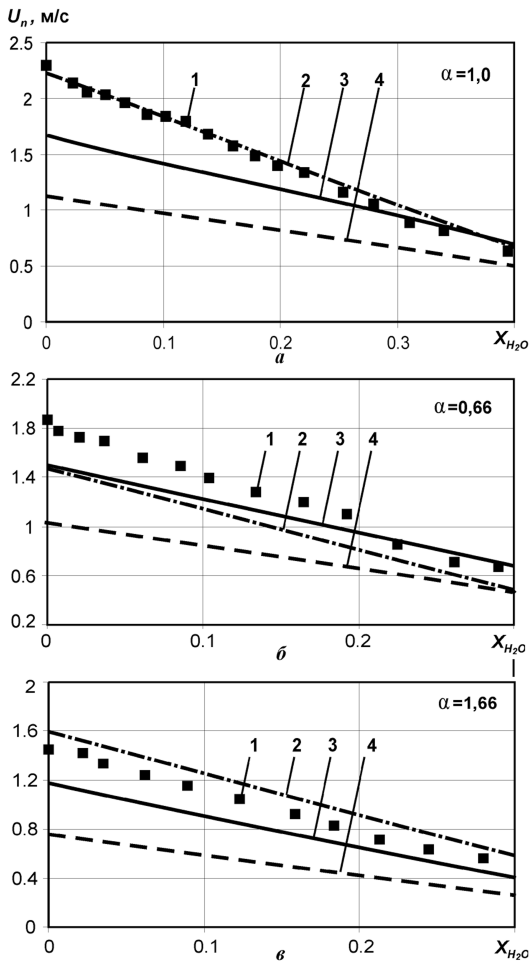


Рис.4. Зависимость нормальной (ламинарной) скорости распространения пламени u_n для метано-кислородной смеси, $\Lambda = 50\%$ при $\alpha = 1,0$ (а); $0,66$ (б); $1,66$ (в) от мольной доли водяных паров в смеси при начальной температуре смеси $T_{in} = 373\text{ K}$ (температуре подогрева) и атмосферном давлении. Обозначения как на рис.3.

честву d ($\phi = 100\%$) при T_0 . Адекватность такой рекомендации в рамках нашего подхода подтверждается апробацией предлагаемой методики и сравнением расчетных величин u_n с экспериментальными результатами.

В табл.2 сведены результаты невязок, рассчитанных по данным ДПА 1 и опытным результатам (отклонения расчетных значений u_n^{calc} от экспериментальных величин u_n^{exp}) для упоминаемых в настоящем разделе примеров (рис.2–6) по формуле:

$$\Delta u_n = (u_n^{calc} / u_n^{exp} - 1) \cdot 100\%$$

В работе [29] представлены результаты обширных экспериментальных исследований влияния увлажнения азото-кислородного окислителя на ламинарную скорость горения S_L , причем рассмотрены окислители с различной долей O_2

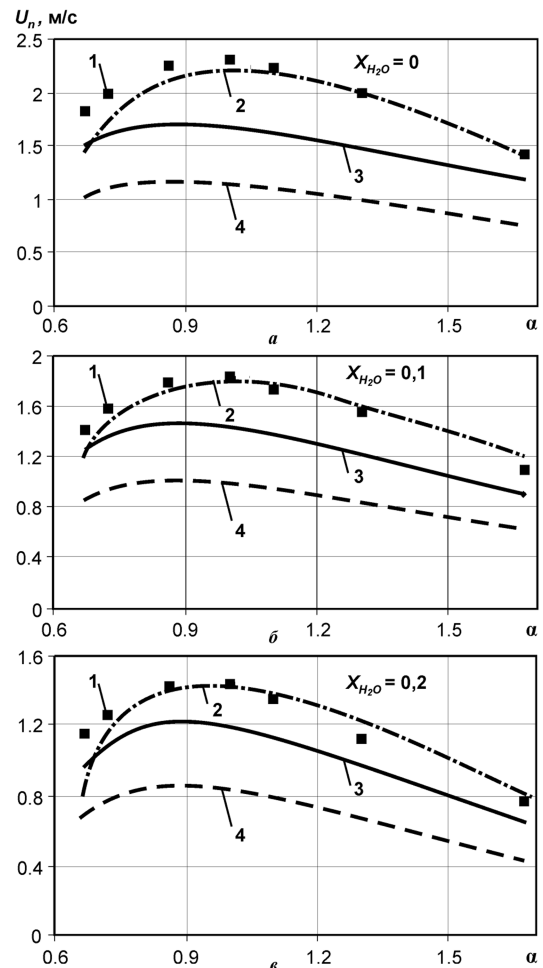


Рис.5. Зависимость нормальной (ламинарной) скорости распространения пламени u_n для метано-кислородной смеси, $\Lambda = 50\%$ при мольной доле водяных паров в смеси $X_{H_2O} = 0$ (а); $0,1$ (б); $0,2$ (в) от α при $T_{in} = 373\text{ K}$ (температуре подогрева) и атмосферном давлении. Обозначения как на рис.3.

в сухом окислителе ($A = 30, 50\%$) при температуре компонентов смеси $T_{in} = 373\text{ K}$. Для $A = 50\%$ представлены также величины S_L в зависимости от коэффициента избытка окислителя в случае бедных ($\alpha > 1,0$), богатых ($\alpha < 1,0$) и стехиометрических ($\alpha = 1,0$) смесей. Соответствующие массивы опытных данных при принятии $S_L = u_n$ были использованы для адаптации нашего расчетного подхода, включая базовую методику с полуэмпирической формулой для расчета u_n^{base} (ДПА), а также представленную в настоящей работе модификацию (ДПА 1) (формула (6)).

Рассчитывались скорости горения u_n для смесей метана с воздухом, обогащенным кислородом, в зависимости от содержания паров в горючей смеси (κ молей H_2O , пересчитанных на величину $X_{H_2O} = D_{H_2O}$). На рис.3–5 сопоставлены значения u_n при разных величинах $A, \alpha, X_{H_2O}, T_{in}$.

Во всех без исключения случаях введение поправки-сомножителя ν для расчета $u_n = u_n^{cor}$ обеспечивает существенное сближение между собой расчетных данных и опытных значений скоростей горения, причем в области проведенных исследований невязки Δu_n значений u_n снижаются по мере увеличения влагосодержания (доли паров H_2O) горючей смеси от $X_{H_2O} = 0$ (сухой окислитель) до $X_{H_2O} = 0,4$. Соответствующие данные для зависимости u_n от коэффициента избытка окислителя $\alpha \in \{0,66; 1,0; 1,66\}$ для случая $A = 50\%$ ($[O_2] = [N_2]$ в окислителе) представлены на рис.4, 5. Расчетные кривые построены по нашей базовой модели (ДПА) (кривые 4), уточненной модели (ДПА1) (уравнение (5), кривая 3), а также с использованием кинетического механизма GRI-Mech 3.0 (кривая 2). При $X_{H_2O} = 0,2$ точность расчета по кривым 2 и 3 практически не отличается, хотя отклонения расчетных и опытных данных Δu_n имеют противоположные знаки.

В работе [30] экспериментально определены значения $S_L = u_n$ для сухих метано-воздушных смесей в зависимости от начальной температуры T_{in} . На рис.6 представлено сопоставление опытных данных (кривая 1), результатов математического моделирования (кривая 2) и данных, полученных с помощью ДПА 1 (кривая 3), для сухой стехиометрической метано-воздушной смеси. Расхождение расчетных значений u_n , найденных по ДПА 1, и опытных данных [30] с ростом T_{in} возрастает. Данные математического моделирования с использованием кинетического механизма GRI-Mech 3.0 (кривая 2) хорошо учитывают влияние начальной температуры T_{in} в рассматриваемом диапазоне температур $T_{in} \in \{298, 450\text{ K}\}$.

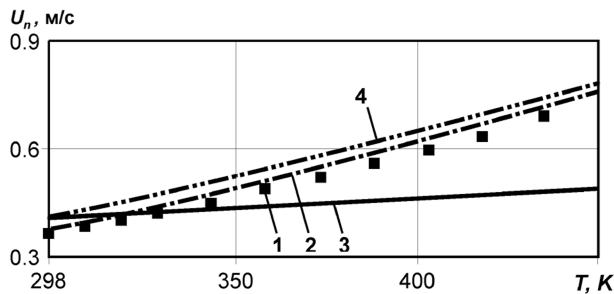


Рис.6. Зависимость нормальной (ламинарной) скорости распространения пламени u_n для сухой стехиометрической ($\alpha = 1,0$) метано-воздушной смеси, $A = 21\%$, от начальной температуры смеси T_{in} (температуры подогрева) при атмосферном давлении: 1 – результаты экспериментальных исследований [30]; 2 – GRI-Mech 3.0 (расчет); 3 – наши результаты по [23] с учетом поправки v_n^{arb} (формула (6)); 4 – наши результаты по [23] с учетом степенной поправки [31] (формула (11)).

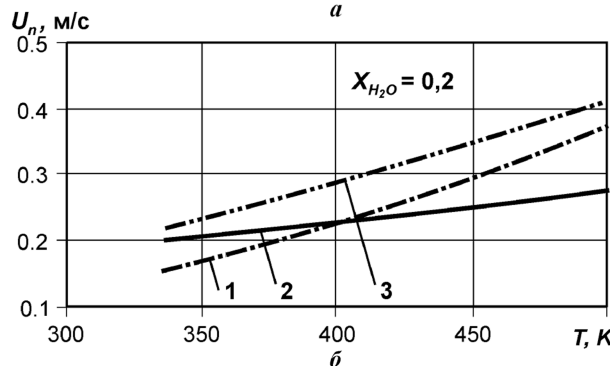
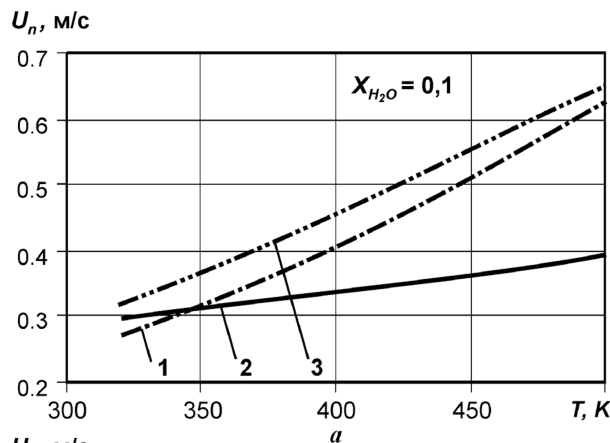


Рис.7. Зависимость нормальной (ламинарной) скорости распространения пламени u_n для влажной стехиометрической ($\alpha = 1,0$) метано-воздушной смеси, $A = 21\%$, при мольной доле водяных паров в смеси X_{H_2O} ($a = 0,1; b = 0,2$) от начальной температуры смеси T_{in} (температуры подогрева) при атмосферном давлении: 1 – GRI-Mech 3.0 (расчет); 2 – наши результаты по [23] с учетом поправки v_n^{arb} (формула (6)); 3 – наши результаты по [23] с учетом степенной поправки [31] (формула (11)).

Предлагаемая нами методика базируется на верификации результатов расчета по опытными данным, которые для увлажненных метано-воз-

душных смесей достаточно ограничены. Проведенный анализ показывает высокую точность GRI-Mech 3.0 и дает возможность использовать данные математического моделирования для оценки величины u_n . Для влажных метано-воздушной смесей в связи с недостатком опытных данных сопоставим результаты, полученные нами по ДПА 1, и данные математического моделирования. На рис.7 представлено изменение нормальной скорости распространения пламени для влажной стехиометрической метано-воздушной смеси от начальной температуры T_{in} . Отклонение расчетных данных по двухпараметрическому обобщению с поправкой (кривая 2) и данных, полученных с помощью математического моделирования (кривая 1), с ростом T_{in} возрастает.

В целом в рамках описанного подхода можно сделать вывод о приемлемости расчетного метода ДПА 1 для случая сжигания увлажненных метано-азото-кислородных смесей (при добавлении водяного пара до 0,3–0,4 объема топливоокислительной смеси). Этот вывод относится к стехиометрическим и нестехиометрическим горючим смесям с относительно невысокой начальной температурой $T_{in} = 373$ К. Правда, тренд $(\partial u_n / \partial [H_2O])$ зависимости $u_n = f([H_2O])$ хуже описывается даже с введением поправок (6), чем расчет с использованием GRI-Mech 3.0.

Двухпараметрическое описание с введением температурной поправки (ДПА 2)

Рассмотрим возможность использования в дополнение к ДПА для получения u_n^{base} температурной поправки-множителя. Это, в частности, важно для смесей горючих газов с паром или использования увлажненного окислителя, поскольку температура пара (и смеси в целом), принятая в упомянутых выше исследованиях, T_{in} будет 373 и 473 К.

Влияние температуры смеси на u_n для большинства углеводородных топлив вполне удовлетворительно описывается эмпирическим уравнением [32, 33]:

$$u_n = A + B T_{in}^n, \quad (10)$$

где A , B — коэффициенты, зависящие от вида газового топлива; показатель степени n изменяется от температурной области и вида газа в пределах $1,4 \leq n \leq 2,1$.

Широко известны степенные зависимости американских авторов середины XX в. для скорости горения от температуры исходной смеси T_{in} , К [26]. Так, для богатых газовых смесей эта скорость меняется приблизительно пропор-

ционально T_{in}^2 , для бедной (6,2 % CH_4) метано-воздушной смеси $u_n \sim T_{in}^{1,8}$, для искусственного газа (36 % CH_4 + 11 % H_2) скорость горения пропорциональна T_{in}^2 , для смесей сухого СО с воздухом $u_n \sim T_{in}^{1,6}$, для стехиометрической (80 % CH_4 , 20 % H_2) газо-воздушной смеси $u_n \sim T_{in}^{1,61}$ [30].

Наиболее известной и универсальной для учета влияния начальной температуры реагентов (состава смеси) и давления на u_n для различных топливно-воздушных смесей является зависимость, предложенная в [34]:

$$u_n = u_{n0} (T_{in}/T_0)^n (P_{in}/P_0)^{\gamma}, \quad (11)$$

где u_{n0} — нормальная скорость распространения пламени при стандартной температуре $T_{in} = T_0 = 293$ К (298 К) и $P_0 = 1$ атм.

В рамках настоящей работы ограничимся рассмотрением влияния температурного фактора T_{in} на изменение u_n , влияние начального давления смеси P_{in} здесь рассматривать не будем.

В работе [34] введен комплекс в форме зависимости Аррениуса $\exp(-0,5 E R_f^{-1} T_f^{-1})$, сходный с использованным в уравнении (6), для учета влияния температуры горения на скорость химической реакции и ламинарного горения. Различие состоит в том, что в цитируемой работе учитывается температура во фронте горения (индекс f), которую определить сложно, а при нашем подходе используется фундаментальная константа — теоретическая температура горения (индекс T).

Эмпирические зависимости, описывающие влияние температуры исходной смеси на нормальную скорость распространения пламени, приведены ниже:

— пропан [26]

$$V = 1,11 + 3,29 \cdot 10^{-3} t + 3,46 \cdot 10^{-6} t^2;$$

V (фут/с) = u_n ; t — температура исходной смеси, °F;

$$t = (-117) - 633 \text{ °F, при } a = 1, P_{in} = 1 \text{ атм;}$$

— метан [35]

$$u_n \text{ (см/с)} = 10 + 0,000371 T_{in}^2; a = 1, P_{in} = 1 \text{ атм;}$$

— метан [28]

$$u_n = u_{n0} (T_{in} / T_0)^{\beta_1} [1 + \beta_2 \ln(P_{in}/P_0)];$$

$$n = \beta_1 = 1,6 + 0,22 (a^{-1} - 1);$$

$$\beta_2 = -0,42 + 0,31 (a^{-1} - 1);$$

$$u_{n0} \text{ (см/с)} = 36,9 - 210 (a^{-1} - 1,12)^2 - 335 (a^{-1} - 1,12)^3;$$

$$T_0 = 291 \text{ К, } P_0 = 1 \text{ атм, } T_{in} = 298\text{--}500 \text{ К, } P_{in} = 0,3\text{--}30 \text{ атм, } a = 0,77\text{--}1,25;$$

— метан, этан, пропан, изобутан, изооктан, гептан, метанол [30, 31, 34, 36–38]

$$u_n = u_n^0 (T_{in}/T_0)^n (P_{in}/P_0)^{\gamma};$$

$T_0 = 293$ (298) К, $P_0 = 1$ атм.

В уравнении (11) значение показателя степени n при симплексе (T_{in}/T_0) зависит от коэффициента избытка воздуха α , рекомендации по определению показателя степени n из различных источников приведены ниже:

— метан, пропан, LPG, изобутан [35]

$$n = A + B a^{-1} + C a^{-2};$$

$$A = -5,8098 + 4,4433 n_c - 0,6599 n_c^2;$$

$$B = 16,0312 - 9,599 n_c + 1,4328 n_c^2;$$

$$C = -7,68 + 4,8306 n_c + 0,7415 n_c^2,$$

где n_c — количество атомов углерода в топливе, $n_c = 1-4$; $T_{in} = 298-348$ К;

— метан [37]

n — фиксированное значение показателя степени для топливо-воздушных смесей в зависимости от вида топлива, для метана, $n = 2,0$;

— метан [31]

$$n = 7,98 - 12,15 a^{-1} + 5,75 a^{-2}.$$

В табл.3 приведены значения показателя степени n в зависимости от коэффициента избытка воздуха α для метано-воздушных смесей по литературным данным.

Таблица 3. Значения n в зависимости от α

α	Показатель степени n			
	[36]	[31]	[38]	[30]
0,83	2,24	1,68	2,0	1,78
1,0	2,25	1,58	1,61	1,65
1,25	1,97	1,94	2,11	1,87

Из анализа выполненных нами расчетов следует, что указанный диапазон значений показателя степени n для метано-воздушных смесей адекватно описывает влияние подогрева горючей смеси (температуры T_{in}) на нормальную скорость распространения пламени u_n . Наиболее точной и универсальной оказалась зависимость, предложенная в [31]. Для случая сухого воздуха-окислителя расхождение между данными из опытного массива [30] и результатами наших расчетов по методу ДПА 2 с использованием рекомендаций [31] составляет $-(12-9)$ % в области стехиометрических значений ($\alpha = 1,0$) (см. рис.6, кривая 4); $-(6-1)$ % — богатые смеси ($\alpha = 0,83$); $+(4-8)$ % — бедные смеси ($\alpha = 1,25$). Выбор степенной зависимости с соответствующими показателями степени может быть рекомендован и в случае влажного воздуха-окислителя. Если принять в качестве достоверных опытные данные и результаты расчетов по GRI-Mech 3.0, можно констатировать неплохое совпадение расчетных величин с экспериментальными данными [27] (см. рис.2, кривая 5) и результатами математического моделирования (GRI-Mech 3.0) (см. рис.7, а, б, кривая 3). В области стехиометрических значений (см. рис.2,

кривая 5) отклонение расчетных величин от экспериментальных составляет $+(13-56)$ % (малые абсолютные отклонения)). Тренд полученных расчетных кривых по методу ДПА 2 совпадает с экспериментальными значениями и результатами математического моделирования (GRI-Mech 3.0).

Для учета влияния на u_n начальной температуры T_{in} смеси метана с воздухом, обогащенным кислородом (ДПА 2), в случае использования степенной поправки при температурном симплексе требуются дополнительные исследования, так как известные значения показателя степени n получены для воздушного окислителя.

Применение кинетического механизма GRI-Mech 3.0 для расчета нормальной скорости горения

Горение метана может быть рассчитано с помощью механизма GRI-Mech 3.0. Это широко используемый кинетический механизм для анализа сжигания природного газа. Механизм включает 53 компонента из элементов H, C, O, N, Ar и базируется на 325 реакциях, большинство из которых являются обратимыми [39]. GRI-Mech 3.0, как и большинство механизмов горения, предназначен для использования в газовых смесях в предположении, что смесь и ее компоненты подчиняются закону идеального газа.

Описание механизма включает следующие составляющие.

1. Список элементарных реакций с числовыми параметрами, позволяющими определить константы скорости реакций. Последние определяются на основании модифицированного уравнения Аррениуса:

$$k = A T^b \exp(-E_a / (R T)),$$

где A — характеризует частоту столкновений реагирующих молекул; b — показатель степени; E_a — энергия активации; R — универсальная газовая постоянная; T — температура.

Для каждой реакции указаны константы A , b и E_a , а также параметры для учета влияния давления и параметры для реакций с участием третьего тела.

2. Выражения для определения термодинамических свойств (энтальпии, энтропии, удельной теплоемкости, индивидуальных газовых постоянных) всех компонент, которые первоначально были взяты из стандартного набора термодинамических баз данных НАСА [40].

Механизм позволяет рассчитывать смеси продуктов реакции, когда в качестве топлива используется не только чистый метан, но и смеси его с этаном, водородом, пропаном. Однако точность расчета для горения пропана несколько

ко ниже, так как он является лишь одним из компонентов природного газа.

Таким образом, кинетический механизм горения представлен набором реакций и коэффициентов. Соответствующая система уравнений может быть решена численно с применением универсальных компьютерных пакетов математического решения систем нелинейных уравнений, либо прямым программированием рассматриваемой системы. Однако с практической точки зрения рационально использовать специализированные пакеты, предназначенные для решения уравнений химической кинетики. Широко известным пакетом решения соответствующих систем уравнений является код CHEMKIN и различные его модификации, который, однако, отличается сложностью.

В последнее время популярность приобрел программный пакет Cantera [41]. Cantera является объектно-ориентированным пакетом с открытым программным кодом для решения задач химической кинетики, термодинамики и расчета транспортных процессов. Пакет включает процедуры расчета реакций химического равновесия в многокомпонентной смеси, средства определения термодинамических и транспортных свойств смесей. Этот пакет позволяет моделировать и рассчитывать скорости химических реакций в реагирующем (горящем) потоке с учетом химической термодинамики, кинетики, а также процессов переноса импульса (аэродинамика), массы (концентраций компонент) и энергии теплоты.

Он может быть использован для моделирования химизма с большими (по количеству реакций) кинетическими механизмами (такими, как GRI-Mech) в условиях реакторов идеального перемешивания (PSR) и (или) идеального вытеснения (PFR) [42]. Использование пакета требует знаний и навыков программирования, так как Cantera не имеет графического интерфейса пользователя (Graphical User Interface – GUI).

Ламинарная скорость горения (распространения пламени) может быть рассчитана в пакете Cantera с применением так называемых Mixture-averaged и Multicomponent (осредненная по смеси и многокомпонентная) вычислительных моделей. Подробное исследование точности счета и сходимости расчета скорости пламени в пакете Cantera для метано-воздушных смесей было проведено в работе [43], в которой проведены исследования пяти механизмов горения: GRI-Mech 3.0, C3-DAVIS, SD20030830, SD20050310, SD20050615, – с варьированием условий процесса (давление, состав смеси) и процедуры решения (количество узлов сетки). В работе отмечено, что Mixture-averaged обеспечивает несколько меньшую точность по сравнению с

Multicomponent моделью, которая базируется на более строгой теории, но требует значительных вычислительных затрат. При этом сходимость расчета для Multicomponent модели затруднена, и не для каждого набора исходных данных достижима. Разница значений ламинарной скорости пламени u_n между этими моделями составляет 1–3,5 % в зависимости от давления и коэффициента избытка воздуха горючей смеси.

В настоящей работе для определения ламинарной скорости горения применялся механизм GRI-Mech 3.0, моделирование осуществлялось с помощью пакета Cantera 1.7.0, программирование и интерфейс с расчетным пакетом были реализованы посредством программирования на языке Python [44]. При расчете использовалось адаптивное улучшение сетки, то есть количество и положение узлов расчетной сетки определялось в процессе расчета индивидуально для каждого случая.

Значения невязок расчетных величин ламинарной скорости пламени, полученные с помощью механизма GRI-Mech 3.0, по отношению к экспериментальным данным (отклонения расчетных значений u_n^{GRI} от экспериментальных величин u_n^{exp}) для упоминаемых в настоящей работе примеров (рис.2–6) сведены в табл.4:

$$\Delta u_n = (u_n^{\text{GRI}} / u_n^{\text{exp}} - 1) \cdot 100 \%. \quad (12)$$

Таблица 4. Пределы отклонения расчетных значений u_n по GRI-Mech 3.0 (кривая 2) от экспериментальных величин

Номер рисунка	Отклонение Δu_n , %	Номер рисунка	Отклонение Δu_n , %
Рис.2	31,4–10,2	Рис.5, а	–21,7–14,3
Рис.3	20,0–1,1	Рис.5, б	7,1–(–17,0)
Рис.4, а	18,0–6,9	Рис.5, в	–30–7,8
Рис.4, б	–3,1–14,5	Рис.6	–3,9–0,44
Рис.4, в	–14,8–(–24,6)		

Как следует из рис.2–6, описанный подход с использованием кинетического механизма GRI-Mech 3.0 является удовлетворительным. Он верно передает тренды влияния на u_n отдельных характеристик и обеспечивает небольшое расхождение абсолютных расчетных и опытных значений u_n . При этом для оценки трендов можно использовать следующие функции:

– влияние коэффициента и избытка окислителя α

$$\begin{cases} \frac{\partial u_n}{\partial \alpha} = f_1(\alpha) \\ \frac{\partial^2 u_n}{\partial \alpha^2} = f_2(\alpha) \end{cases};$$

– влияние температуры окислителя и исходной смеси

$$\begin{cases} \frac{\partial u_n}{\partial T} = f_1(T) \\ \frac{\partial^2 u_n}{\partial T^2} = f_2(T) \end{cases};$$

– влияние концентрации $[H_2O]$ в исходной смеси

$$\begin{cases} \frac{\partial u_n}{\partial [H_2O]} = f_1([H_2O]) \\ \frac{\partial^2 u_n}{\partial [H_2O]^2} = f_2([H_2O]) \end{cases}.$$

Максимальные относительные отклонения Δu_n , %, представленные в табл.4, относятся к низким абсолютным скоростям горения u_n (на краях соответствующих кривых) и потому только кажутся значительными.

Выводы

Предложены три способа расчета скоростей нормального u_n (ламинарного S_L) горения метана в условиях, отличных от базовых. В качестве последних рассматривается сжигание газового топлива с окислителем – атмосферным воздухом, начальные условия стандартные: $T_{in} = T_0 = 298$ К, $P_{in} = 1$ атм.

Две первые расчетные методики, разработанные в Институте газа НАНУ, связаны с возможностью двухпараметрической аппроксимации (ДПА) для определения u_n с введением поправок, третий способ базируется на математическом моделировании с использованием кинетического механизма GRI-Mech 3.0.

Базовый вариант ДПА предназначен для расчета u_n при горении сухих холодных смесей (при стандартной температуре $T_0 = 298$ К) с воздухом различных газовых топлив. 1-й способ (методика) (ДПА 1) связан с введением поправок двух типов: v_1 – учитывающей концентрационные отклонения горючего и окислителя от базовых условий; v_2 – поправки на отклонение исходной температуры от стандартной. 2-й способ расчета u_n (ДПА 2) учитывает только влияние на скорость горения начальной температуры (в общем случае также и давления) исходной смеси заданного состава. В соответствии с 3-м способом, сразу ведется расчет кинетики горения смеси заданного состава при требуемых начальных условиях.

В результате проведенного анализа установлена пригодность 1-го способа (ДПА 1) для расчета нормальной скорости горения u_n природного газа с воздухом, обогащенным кисло-

родом, при стандартных условиях, а также для случая сжигания увлажненных метано-азото-кислородных смесей (при добавлении водяного пара до 0,3–0,4 объема топливоокислительной смеси) с относительно невысокой начальной температурой ($T_{in} = 373$ К).

В рамках 2-го способа расчета u_n (ДПА 2) проведена верификация двухпараметрического описания для расчета скорости горения метана с сухим и увлажненным воздушным окислителем в зависимости от начальной температуры T_{in} с введением температурной поправки. На основании тестирования и сопоставления с результатами экспериментальных исследований, а также математического моделирования методика ДПА 2 может быть рекомендована для оценки величины u_n для сухих и влажных метано-воздушных смесей в зависимости от начальной температуры T_{in} .

Использование кинетического механизма GRI-Mech 3.0 (3-го способа) для расчета u_n оказалось наиболее точным. Во всех рассматриваемых случаях сжигания метана: обогащения воздуха-окислителя кислородом, использование увлажнения окислителя, подогрев топливоокислительной смеси – полученные результаты хорошо согласуются с данными экспериментальных исследований. Применение указанного способа расчета является более сложной процедурой по сравнению с предложенными нами методиками (ДПА 1, ДПА 2).

Список литературы

1. Щетинков Е.С. Физика горения газов. – М.: Наука, 1965. – 740 с.
2. Свиридов Ю.Б. Смесеобразование и сгорание в дизелях. – Л.: Машиностроение, 1972. – 224 с.
3. Льюис Б., Эльбе Г. Горение, пламя и взрывы в газах. – М.: Мир, 1968. – 592 с.
4. Fossum M., Beyer R.V. Co-combustion: Biomass Fuel Gas and Natural Gas. SINTEF Energy Research: Technical Report. – Trondheim, Norway, 1998. – 26 p.
5. 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.
6. Сорока Б.С., Брадулов П.А. Определение основных характеристик горения газовых смесей. 2. Расчет скорости горения газовых смесей с использованием двухпараметрического обобщения // Там же. – 2010. – № 2. – С. 3–10.
7. Jewartowski M., Baranski J., Stasiek J. Combustion of low calorific fuel at room and high temperature and different oxygen content in the oxidizer // 8th Intern. Symp. on high temperature air combustion

- and gasification (HiTACG), Poznan, Poland, 5–7 July, 2010. — Poznan, 2010. — P. 241–244.
8. Wunning J.G. 5-Minute CFD of Flameless Oxidation // *Ibid.* — P. 41–43.
 9. Berger R., Wunning J.G., Zieba M., Schuster A. FLOX™-Burners for the Combustion of difficult fuels R&D overview and commercial applications // *Ibid.* — P. 197–201.
 10. Сорока Б.С. Сжигание природного газа с недостатком окислителя и сажеобразование. 4. Процессы образования углеродсодержащих частиц при новых и нетрадиционных способах сжигания газа // *Экотехнологии и ресурсосбережение.* — 2005. — № 5. — С. 13–30.
 11. Wunning J.G. «FLOXR» — Flameless Combustion // *Thermoprozess Symposium 2003.* — VDMA, 2003. — 19 p.
 12. Flamme M., Brune M., Konold U. et al. Optimization of the energy efficiency of industrial furnaces : Keynote Lecture // *6th Europ. Conf. on Industrial Furnaces and Boilers, Estoril — Lisbon, 2–5 Apr., 2002.* — INFUB. — 2002. — Vol. 1. — 12 p.
 13. Wunning J.G. Reliable and fast CFD-modeling of flameless oxidation // *GASWARME Intern.* — 2010. — Vol. 59, № 5. — P. 369–372.
 14. Le Cong T., Dagaut P. Experimental and detailed modeling study of the effect of water vapor on the kinetics of combustion of hydrogen and natural gas, impact on NO_x // *Energy Fuels.* — 2009. — Vol. 23, № 2. — P. 725–734.
 15. Wesley R.B., Charles E.B. Ambient condition effects on NO_x and CO emissions from process heaters // *2008 ASME Intern. mechan. eng. congr. and exposition. Boston, Mass., USA, 2–6 Nov., 2008.* — Boston, 2008. — 8 p.
 16. Victor de Biasi. 1.8:1 steam-to-fuel ratio reduces NO_x output of LM2500 to 5 ppm // *Gas turbine world.* — 2009. — May-June. — P. 12–15.
 17. Гут А.С. Перспектива применения в условиях Украины газотурбинных установок с впрыском воды // *Тр. Одес. политехн. ун-та.* — 2001. — Вып. 1. — С. 3.
 18. Schlemmer-Kelling U., Ratenstrauch M. The new low-emission heavy fuel oil engines of Caterpillar Motoren // *23rd Intern. Council on combustion engines, CIMAC Congress 2001, Hamburg, Germany, 7–10 May, 2001.*
 19. Аронов И.З. Снижение выбросов оксидов азота путем рециркуляции и увлажнения части дымовых газов // *Сантехника, отопление, кондиционирование.* — 2006. — № 2. — С. 62–63.
 20. Dobski T., Wawrzyniak J. Combustion of natural gases differently composed in gas engines equipped with ignition prechamber // *Archivum combustionis.* — 2008. — Vol. 28, № 3–4. — P. 247–263.
 21. Сорока Б.С. Приближенный метод учета влияния состава и параметров топливной смеси на образование оксидов азота в процессах горения // *Экотехнологии и ресурсосбережение.* — 1993. — № 6. — С. 47–54.
 22. Сорока Б.С., Кудрявцев В.С., Воробьев Н.В., Карабчиевская Р.С. Термодинамика горения газа с влажным воздухом-окислителем // *Дисперс. системы : Материалы XX науч. конф. стран СНГ, 20–24 сент. 2010 г. — Одесса : Астропринт, 2010.* — С. 269–271.
 23. Fossum M., Hustad J. Laminar burning velocities of inert diluted mixtures of methane, hydrogen and carbon dioxide // *6th Europ. conf. on industrial furnaces and boilers, Estoril — Lisbon, Norway, 2–5 Apr., 2002.* — INFUB. — Vol. 3. — P. 426–435.
 24. Zhenjun C., Tong Z., Hai W. Simplified kinetic models of methane oxidation in highly preheated and oxygen deficient air // *8th Intern. Symp. on high temperature air combustion and gasification (HiTACG), Poznan, Poland, 5–7 July, 2010.* — Poznan, 2010. — P. 235–240.
 25. Soroka B., Glanvill P. Calculation of laminar burning velocity of gas fuel // *Ibid.* — P. 383–390.
 26. Vandaveer F.E., Segeler C.G. *Combustion* // *Gas Engineers Handbook.* — New York : The Industrial Press, 1966.
 27. Бабкин В.С., Вьюн А.В. Влияние паров воды на нормальную скорость пламени метано-воздушной смеси при высоких давлениях // *Физика горения и взрыва.* — 1971. — Т. 7, № 3. — С. 392–395.
 28. Iijima T., Takeno T. Effects of temperature and pressure on burning velocity // *Combustion and Flame.* — 1986. — Vol. 65, № 1. — P. 35–43.
 29. Mazas A., Lacoste O., Fiorina B., Schuller T. Effects of water vapor addition on the laminar burning velocity of methane-oxygen enhanced flames at atmospheric pressure // *ECM 2009 Fourth Europ. Comb. Meeting, Vienna, Austria, 14–17 Apr., 2009.* — Vienna, 2009. — 6 p.
 30. Hermanns R.T.E. *Laminar Burning Velocities Methane Hydrogen Air Mixtures : PhD Dissertation.* — Eindhoven, the Netherlands, 2007. — 144 p.
 31. Liao S.Y., Jiang, O.M., Cheng Q. Determination of laminar burning velocities for natural gas // *Fuel.* — 2004. — Vol. 83, № 9. — P. 1247–1250.
 32. *Основы горения углеводородных топлив* / Под ред. Л.Н.Хитрина. — М. : Энергия. — 1973. — 264 с.
 33. Брюханов О.Н., Мاستрюков Б.С. *Аэродинамика, горение и теплообмен при сжигании топлива : Справ. пособие.* — СПб. : Недра, 1994. — 317 с.
 34. Metghalchi M., Keck J.C. Burning velocities of mixtures of air with methanol, isoctane, and indelene at high pressure and temperature // *Ibid.* — 1982. — Vol. 48, № 2. — P. 191–210.
 35. Andrews G.E., Bradley D. *Determination of burning velocity : A critical review* // *American Elsevier Publishing Company, Inc.* — 1972. — P. 133.
 36. Humid M.N., Arkan F.S. The effect of initial temperature on burning velocity of methane, propane, LPG and isobutene-air mixture // *Eng. J. University of Qutare.* — 2001. — № 14. — P. 177–192.
 37. Gulder O.L. Turbulent premixed flame propagation models for different combustion engines // *Proc.*

- of the XXIII Symp. (Intern.) on Comb. – Pittsburgh, USA : The Comb. Inst., 1990. – P. 743–750.
38. Gu X.J., Haga M.Z., Lawes M., Woolley R. Laminar burning velocity and markstein lengths of methane-air mixtures // Combustion and Flame. – 2000. – Vol. 121, № 1. – P. 41–58.
39. Smith G.P., Golden D.M., Frenklach M. et al. – http://www.me.berkeley.edu/gri_mech/.
40. Coefficients for Calculating Thermodynamic and Transport Properties of Individual Species, NASA Report TM-4513, by B.J. McBride, S. Gordon and M.A. Reno, October 1993.
41. Goodwin D.G. An Open-Source, Extensible Software Suite for CVD Process Simulation. // Chemical Vapor Deposition XVI and EUROCVI 14, ECS Proceedings Volume 2003–08, M. Allendorf, F. Maury, and F. Teyssandier, editors, The Electrochemical Society, pp. 155–62 (2003).
42. Comparison of Combustion Calculations Using Cantera and Chemkin. B.Tech Project / First Stage Report Submitted by Deep Gupta (04010034). Under the guidance of Prof. A. W. Date & Prof. U. V. Bhandarkar. – 2007. – 24 p.
43. Laurent J.-M. Benezech. Experimental investigation of planar strained methane-air and ethylene-air flames. Thesis for the Degree of Master. CHALMERS in Turbulence California Institute of Technology. Pasadena, California. – 2006. – 60 p.
44. Бизли Д.М. Язык программирования Python : Справ. – Киев : ДиаСофт, 2000. – 336 с.
Поступила в редакцию 23.02.11

Definition of Principal Characteristics of Gas Mixtures Combustion.

3. Burning Velocity of Natural Gas with Humidified Oxidant

Soroka B.S., Zgurskyi V.A., Vorobyov N.V.

The Gas Institute of NASU, Kiev

Three techniques of calculation the laminar burning velocity u_n of methane (natural gas) under various initial temperature T_{in} have been advanced. Oxidants used are as following: an air, oxygen-enriched air, both of dry and humidified composition. The first two calculation methods are based on two-parametric generalization (TPG) with introduction of correction factors, the third method is based on mathematical modeling using kinetic mechanism GRI-Mech 3.0. An opportunity to apply the proposed methods of u_n calculations for dry and humidified methane-nitrogen-oxygen mixtures have been proved by means of comparison the computation results by TPG and mathematical modeling with experimental data. The adequacy for each of the techniques has been tested. The relative accuracy of predicted data in comparison with the measured ones has been estimated in frame of the proposed methods. Basing upon mentioned knowledge the areas of preferable application (the types and initial parameters of fuel-oxidant mixtures under consideration) have been recommended for each of developed methods of u_n calculation.

Key words: combustion mechanism, humidified oxidant, laminar burning velocity, Mixture Fraction, natural gas, oxygen, preheating temperature, water vapor.

Received February 23, 2011