

ИССЛЕДОВАНИЕ НОРМАЛЬНОЙ СКОРОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ПЛАМЕНИ МЕТАНО-ВОЗДУШНОЙ СМЕСИ ПРИ ЕЁ ОБОГАЩЕНИИ ВОДОРОДОМ И РАЗБАВЛЕНИИ ВОДЯНЫМ ПАРОМ

Идрисов Д.В.
Матвеев С.С.
Матвеев С.Г.
Гураков Н.И.
Попов А.Д.
Литарова А.А.

Самарский национальный
исследовательский университет
имени академика С. П. Королёва
(Самарский университет)

Московское шоссе, д. 34,
г. Самара, 443086,
Российская Федерация

idrisov57@yandex.ru

В работе представлены результаты экспериментального исследования нормальной скорости распространения пламени метано-воздушной смеси, обогащённой водородом и/или разбавленной паром при атмосферном давлении и начальной температуре смеси 300 и 330 К. Определение нормальной скорости распространения пламени производилось методом нулевого теплового потока (Heat Flux). Полученные экспериментальные данные сравнивались с результатами численного моделирования адиабатических предварительно подготовленных ламинарных пламен, которое проводилось с использованием трёх кинетических механизмов окисления метано-водородных топлив. При обогащении метана водородом до 35% по объёму скорость пламени увеличивалась пропорционально до 35%. С увеличением концентрации пара наблюдалось линейное снижение скорости пламени метано-воздушной смеси. Динамика снижения скорости пламени при разбавлении водяным паром не зависит от степени обогащения водородом. Предложены рекомендации по использованию кинетических механизмов для моделирования пламени метано-воздушной смеси при её обогащении водородом и разбавлении водяным паром.

Ключевые слова: *пламя; обогащение водородом; разбавление паром; скорость ламинарного пламени; кинетические модели*

1 Введение

В последние десятилетия отечественные и зарубежные газотурбинные фирмы ведут интенсивную работу по созданию малоэмиссионных камер сгорания [1]. Одним из перспективных методов организации рабочего процесса является обеспечение горения бедных, предварительно перемешанных топливовоздушных смесей (ТВС). Преимуществом данного способа является то, что сжигание топлива происходит при пониженных температурах. Это приводит к уменьшению концентрации оксидов азота (NOx) в продуктах сгорания на рабочих режимах газотурбинных установок (NOx ≤ 15-25ppm.). Однако при горении бедных смесей возникают серьезные проблемы по обеспечению устойчивой работы

камеры сгорания газотурбинной установки, так как скорость распространения пламени в таких условиях достаточно низкая, что может привести к бедному срыву пламени. Улучшить стабилизацию пламени можно за счёт увеличения температуры топливовоздушной смеси на входе в камеру сгорания или снижения коэффициента избытка воздуха в зоне горения, однако это приведёт к повышению температуры фронта пламени и, соответственно, к росту уровня выбросов оксидов азота. Исходя из этого, необходимо найти компромисс между стабильной работой камеры сгорания и обеспечением требуемых уровней эмиссии NOx. Данную проблему можно решить за счёт добавок водорода. Использование добавок водорода в топливо позволяет повысить устойчивость горения «сверхбед-

ных» смесей, так как скорость распространения пламени водорода на порядок выше, чем у природного газа, при одинаковых внешних условиях [2]. Также одним из преимуществ обогащения природного газа водородом является то, что при сжигании таких топлив будет образовываться меньше углекислого газа (CO_2), что соответствует общемировой тенденции к снижению углеродного следа и выбросов парниковых газов в атмосферу [3]. Однако добавка водорода при прочих равных условиях приводит к повышению температуры во фронте пламени. Одним из способов снижения этой температуры является использование водяного пара [4], который впрыскивается непосредственно в зону горения. Обогащение топлива водородом и разбавление водяным паром приводит к изменению нормальной скорости распространения пламени, которая является одной из основных фундаментальных характеристик в физико-химических механизмах процесса горения.

Данные по скорости распространения пламени [5-7] используются как при предварительном проектировании камер сгорания, так и на этапе численного моделирования процессов горения. Точное определение скорости распространения пламени важно для разработки методов повышения эффективности всех способов организации процесса горения, а также для валидации кинетических механизмов [11-14].

В исследованиях Boushaki et al. [5] была измерена скорость распространения пламени метана, обогащённого водородом, в горелке Бунзена при температуре ТВС на входе $T_0 = 300$ К и атмосферном давлении. Данные результаты соответствуют более ранней работе Correns et al. [6], в которой методом нулевого теплового потока (Heat Flux) была определена скорость горения аналогичных ТВС. Для метано-воздушных смесей, разбавленных паром, данные из работы Boushaki et al. [5] для $T_0 = 300$ К и $T_0 = 330$ К удовлетворительно согласуются с результатами, полученными в работе

Christensen et al. [7]. При этом определение нормальной скорости распространения пламени метано-воздушной смеси при её одновременном обогащении водородом и разбавлении водяным паром исследовалось только при стехиометрическом составе [7].

Поэтому целью настоящей работы являлось исследование метано-воздушного пламени при его одновременном обогащении водородом и разбавлении водяным паром в широком диапазоне составов ТВС. Результаты определения нормальной скорости распространения пламени метана, обогащённого водородом и/или разбавленного паром, проанализированы с учётом ранее опубликованных работ [5-7]. Кроме того, полученные экспериментальные данные сравнивались с результатами численного моделирования адиабатических предварительно подготовленных ламинарных пламен, которое проводилось с использованием трёх кинетических механизмов окисления метано-водородных топлив [11-13].

2 Экспериментальная установка

Установка для измерения нормальной скорости распространения пламени (S_L) методом нулевого теплового потока (установка Heat Flux) подробно описана в предыдущих работах [8, 9]. Метод Heat Flux позволяет получить одномерное плоское адиабатическое пламя благодаря нулевому суммарному теплообмену между газом и горелкой. Адиабатическое состояние возможно, когда тепловые потери пламени в горелку, необходимые для его стабилизации, компенсируются отбором тепла холодной непрореагировавшей смесью в момент, когда смесь протекает через нагретую потоком воды перфорированную пластину горелки. Адиабатическое состояние регистрируется посредством мониторинга распределения температуры по поверхности пластины термопарами. Зависимость

температуры от координаты пластины определяется выражением:

$$\bar{T}_p(r) = T_{center} - \frac{q}{4\lambda h} r^2,$$

где T_{center} – температура пластины в центральной точке; q – чистый внешний перенос тепла на единицу площади; λ – коэффициент теплопроводности; h – толщина пластины; r – координата по радиусу пластины.

Постоянное распределение температуры на поверхности пластины возможно лишь в случае $q = 0$. Таким образом, путём регулирования суммарного объёмного расхода смеси посредством расходомеров-регуляторов величина q варьируется до момента, когда будет достигнуто постоянное распределение температуры на поверхности пластины, что означает выполнение условия адиабатичности пламени. В момент, когда все термопары имеют одинаковую температуру, нормальная скорость распространения пламени равна ско-

рости истечения ТВС из горелочного устройства, которая для данного стехиометрического соотношения и начальной температуры смеси определяется по следующей формуле:

$$S_L = \frac{G_{ТВС}}{F_{Горелки} * \rho_{ТВС}},$$

где $G_{ТВС}$ – расход топливоздушной смеси; $F_{Горелки}$ – площадь горелки; $\rho_{ТВС}$ – плотность топливоздушной смеси.

Для экспериментов с паром дистиллированную воду выпаривали с использованием управляемого смесителя-испарителя (фирмы Bronkhorst). Перед входом в горелку пар предварительно смешивался с метаном и воздухом. Нагревательная трубка, соединяющая смеситель-испаритель и горелку, позволяла поддерживать необходимую начальную температуру смеси во избежание конденсации пара. Общий вид экспериментальной установки представлен на рисунке 1.



Рисунок 1. Общий вид установки Heat Flux

Нормальная скорость распространения пламени зависит от температуры, давления и коэффициента избытка топлива ϕ . Коэффициент избытка топлива ϕ – обратная величина коэффициента избытка воздуха α :

$$\phi = \frac{1}{\alpha}.$$

Коэффициент избытка воздуха α определяется по формуле:

$$\alpha = \frac{G_B}{G_T * L_0},$$

где G_B – расход воздуха на входе в горелку; G_T – расход топлива на входе в горелку; L_0 – стехиометрический коэффициент.

Стехиометрический коэффициент L_0 рассчитывается пропорционально массовым долям водорода в топливе. Добавки пара учитывались как инертная среда и не влияли на стехиометрический коэффициент L_0 . Состав топлива и соответствующий ему стехиометрический коэффициент для исследуемых режимов представлены в таблице 1.

Таблица 1. Состав топлива для исследуемых режимов.

CH ₄ /H ₂	100/0	75/25	65/35
L_0	17,23	17,92	18,31

Скорость пламени метана, обогащённого водородом, определялась при атмо-

Таблица 2. Используемые кинетические механизмы

Название	Кол-во компонентов	Кол-во реакций
NuigMech1.1 [11]	963	5966
Wang 2018 [12]	48	308
A.Konnov's detailed reaction mechanism [13]	587	4925

4 Результаты и обсуждение

Пламя «метан/пар/воздух». На рисунке 2 представлены данные по нормальной скорости распространения пламени метано-воздушной смеси, разбавленной паром, концентрация которого в

сферном давлении и $T_0 = 300$ К в диапазоне изменения коэффициента избытка топлива $\phi = 0,7-1,4$. Объёмная доля водорода в топливе составляла 0,25 и 0,35. Скорость пламени метана, разбавленного водяным паром, измерялась при атмосферном давлении, $\phi = 1$ и температурах $T_0 = 300$ и $T_0 = 330$ К. Объёмная доля водяного пара в потоке ТВС изменялась в пределах 0–0,023 при $T_0 = 300$ К и 0–0,11 при $T_0 = 330$ К. Диапазон был ограничен величиной давления насыщенного водяного пара при данных температурах. Пламя метана, одновременно разбавленного парами воды и обогащённого водородом, исследовалось в диапазоне $\phi = 0,7-1,4$ при температуре $T_0 = 330$ К. Объёмная доля водяного пара в суммарном потоке изменялась в пределах 0–0,15. Объёмная доля водорода в топливе составляла 0,35.

3 Численное моделирование

Моделирование адиабатических предварительно подготовленных одномерных пламен выполнялось с использованием программного комплекса Ansys Chemkin 18.2 [10]. Скорость пламени рассчитана с учётом функций многокомпонентного переноса и термодиффузии. Расчёты проводились с использованием трёх кинетических механизмов окисления метано-водородных топлив, представленных в таблице 2.

смеси варьировалась от 0 до 11% при $T_0 = 330$ К и от 0 до 2,5% при $T_0 = 300$ К в области стехиометрии ($\phi = 1$).

Результаты опытов при $T_0 = 300$ К и $T_0 = 330$ К хорошо согласуются с данными работы [5], максимальное отклонение не превышает 0,5 см/с, что соот-

ветствует 2% для исследуемого диапазона скоростей пламени. В работе [7] измеренные значения нормальной скорости распространения пламени для $T_0 = 300$ К ниже на 1-2 см/с, а при $T_0 = 330$ К находятся в пределах экспериментальной погрешности. Полученные данные указывают на линейную зависимость между увеличением концентрации пара в исходной ТВС и уменьшением скорости горения. В основном это связано с тепловыми эффектами, возникающими при добавлении пара и приводящими к снижению температуры в области фронта пламени.

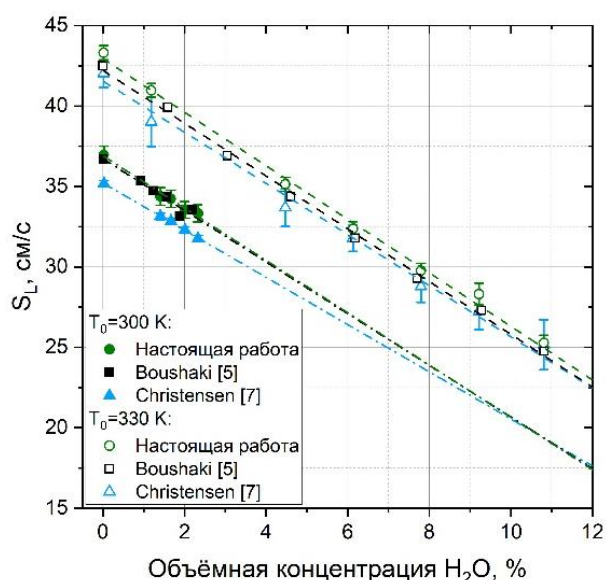


Рисунок 2. Изменение нормальной скорости распространения пламени метано-воздушной смеси стехиометрического состава при разбавлении паром

Для обобщения данных по скорости ламинарного горения метано-воздушных смесей в зависимости от степени разбавления паром можно воспользоваться следующим соотношением:

$$\frac{S_L}{S_L(f=0)} = 1 - F(\phi, T_u, \text{diluent})f,$$

где F – коэффициент разбавления, определяемый по относительной скорости пламени с помощью линейной интерполяции;

f – молярная концентрация пара в смеси. Относительной скоростью пламени является отношение измеренной скорости пламени S_L при разбавлении паром к скорости пламени обычной метано-воздушной смеси $S_L(f = 0)$ при фиксированном коэффициенте избытка топлива и температуре исходной ТВС. Коэффициент разбавления F зависит от температуры, давления и коэффициента избытка топлива. Чем больше величина F , тем сильнее влияние добавок пара в ТВС на снижение нормальной скорости распространения пламени.

При атмосферном давлении и температуре $T_0 = 300$ К для стехиометрического состава смеси коэффициент разбавления F , рассчитанный на основе опытных данных настоящей работы, равен $4,4 \pm 0,1$. Для аналогичных условий обработка экспериментальных данных других авторов даёт величину $F = 4,3 \pm 0,1$ [5] и $F = 4,2 \pm 0,1$ [7]. При начальной температуре смеси $T_0 = 330$ К в данной работе, как и в работах [5, 7], получено значение $F = 3,9 \pm 0,1$. Представленные данные показывают, что для всех исследований при одинаковых параметрах ТВС (P_0, T_0, ϕ) отклонение от среднего значения F не превышает 2-3 %. Это подтверждает хорошую сходимость и высокую достоверность полученных результатов экспериментов, проведённых на различных установках по определению нормальной скорости распространения пламени.

Анализ полученных результатов показывает, что при увеличении начальной температуры смеси (с 300 до 330 К) значение коэффициента разбавления F уменьшается с 4,3 до 3,9. Последнее свидетельствует о том, что при увеличении начальной температуры ТВС влияние добавок пара на снижение нормальной скорости распространения пламени становится слабее.

Пламя «метан/водород/воздух». В данном разделе представлены данные по скорости распространения пламени метано-воздушной смеси, обогащённой водо-

родом на 25% (рисунок 3) и 35% (рисунок 4) при $T_0 = 300$ К и атмосферном давлении. Как видно из представленных графиков, добавка водорода существенно увеличивает скорость пламени метано-воздушной смеси во всём диапазоне составов ТВС по коэффициенту избытка топлива (ϕ). При этом обогащение метана водородом до 35% по объёму приводит к пропорциональному увеличению нормальной скорости распространения пламени на 40-43%.

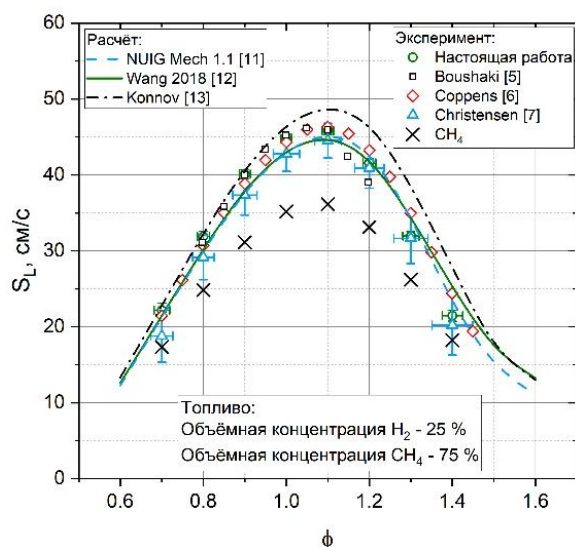


Рисунок 3. Нормальная скорость распространения пламени метано-воздушной смеси, обогащённой на 25% H_2 по объёму

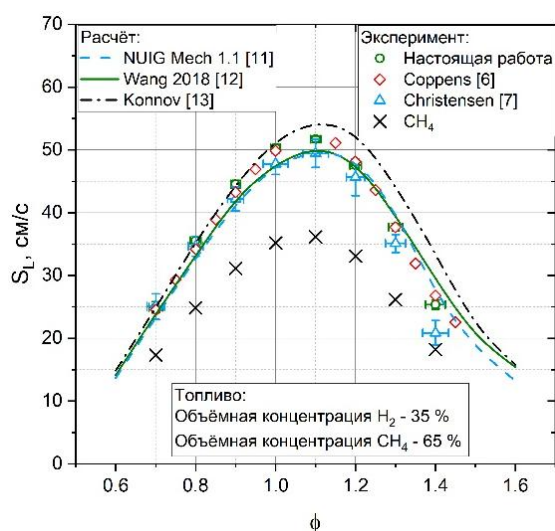


Рисунок 4. Нормальная скорость распространения пламени метано-воздушной смеси, обогащённой на 35% H_2 по объёму

Из анализа представленных на рисунках 3 и 4 результатов опытов следует, что максимальное отклонение полученных различными авторами [5–7] данных, включая настоящую работу, не превышает $\pm 5\%$ от среднего значения в диапазоне $\phi = 0,7 \dots 1,3$. Для более богатых пламен ($\phi > 1,3$) расхождения могут достигать 10...15%, что объясняется повышенной неустойчивостью фронта пламени при обогащении смеси топливом и, как следствие, увеличением погрешности в результатах проводимых экспериментов. Представленный сравнительный анализ экспериментальных исследований по влиянию добавок водорода на нормальную скорость распространения пламени метано-воздушной смеси, проведённых различными методами с использованием отличающихся экспериментальных установок и систем измерения [5–9], подтверждает высокую достоверность полученных результатов и позволяет использовать данную экспериментальную базу данных для разработки и валидации кинетических механизмов горения метано-водородных топлив. В данной работе валидация производилась по среднему значению отображённых на рисунках 3 и 4 результатов опытов, полученных в настоящей работе и работах других авторов [5–7].

Представленные расчётные зависимости (см. рисунки 3–4) по трём кинетическим механизмам окисления метано-водородных топлив [11–13] показывают хорошую сходимость (в пределах погрешности, не превышающей $\pm 5\%$) с экспериментальными результатами для случаев добавок водорода в метан в размере 25% и 35% по объёму при изменении коэффициента избытка топлива в диапазоне $\phi = 0,7 \dots 1,1$. При обогащении ТВС ($\phi > 1,1$) результаты расчёта завышают значения S_L относительно опытных данных, и при $\phi > 1,3$ расхождение может достигать 15...40%. Последнее связано как с погрешностью проведения опытов при исследовании процессов горения вблизи

богатой границы распространения пламени, так и с недостаточной проработанностью кинетических механизмов окисления метано-водородных топлив для этой области горения.

Для бедных ТВС ($\phi < 1,0$) наименьшее отклонение (в пределах +2%) от экспериментальных данных даёт расчёт по кинетическому механизму Коннова [13]. Для близких к стехиометрическому составу и обогащённых ТВС ($\phi = 1,0 \dots 1,3$) лучшие результаты с максимальным отклонением в пределах $\pm 5\%$ получаются по моделям Wang 2018 [12] и NuigMech1.1 [11]. В то же время модель Коннова даёт завышение результатов расчёта нормальной скорости распространения пламени на 5 ... 20% в этом диапазоне коэффициентов избытка топлива.

Пламя «метан/водород/пар/воздух».

Для случая одновременного обогащения водородом и разбавления паром метано-воздушной смеси впервые проведено экспериментальное исследование по определению нормальной скорости распространения пламени при $T_0 = 330$ К и атмосферном давлении для сравнительно широкого состава ТВС по коэффициенту избытка топлива (ϕ). Объёмная доля содержания водорода составляла 35%, разбавление паром проводилось в диапазоне от 0% до 15%.

Из представленных на рисунках 5 и 6 результатов расчётно-экспериментального исследования для стехиометрического состава ТВС следует, что как при горении чистого метана (см. также рисунок 2), так и для метано-водородного топлива разбавление паром приводит к линейному снижению скорости S_L (или относительной скорости $S_L/S_{L(f=0)}$) ламинарного пламени. При этом как для чистого метана, так и для метана с добавками водорода в 35% по объёму разбавление топливовоздушной смеси стехиометрического состава паром до 15% приводит к снижению нормальной скорости распространения пламени в 2 раза (см. рисунок 6). Наименьшее откло-

нение от экспериментальных данных даёт расчёт по кинетическому механизму Коннова [13].

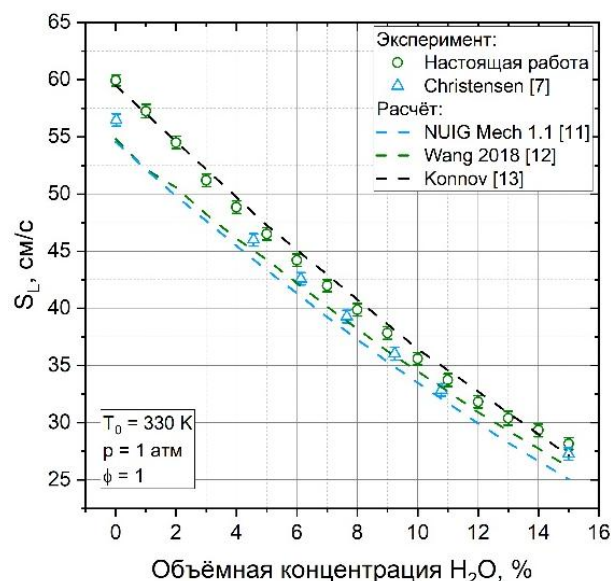


Рисунок 5. Изменение нормальной скорости распространения пламени метано-воздушной смеси стехиометрического состава при обогащении 35% H_2 по объёму и разбавлении паром

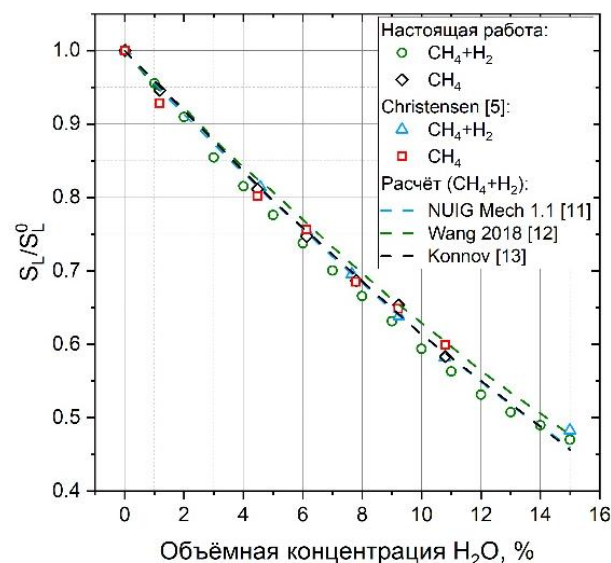


Рисунок 6. Изменение относительной скорости распространения пламени метано-воздушной смеси стехиометрического состава при обогащении 35% H_2 по объёму и разбавлении паром

Результаты расчётно-экспериментального исследования характеристик ламинарного горения смесей метано-водородного топлива с воздухом (при

добавке H_2 в CH_4 в соотношении 35/65 в объёмных процентах) при их разбавлении паром для широкого диапазона по коэффициенту избытка топлива (ϕ) представлены на рисунке 7. Полученные опытные данные показывают, что, как и в случае исследования стехиометрических смесей (см. рисунок 5), для всего диапазона устойчивого горения по коэффициенту избытка топлива (ϕ) снижение нормальной

скорости распространения пламени при разбавлении водяным паром имеет одну и ту же линейную зависимость (рисунок 8).

При этом минимальные значения коэффициента разбавления ($F=4,0\pm 0,2$) наблюдаются для оклостехиометрических смесей $\phi = 0,9...1,2$. Для $\phi \leq 0,9$ и для $\phi \geq 1,3$ коэффициент разбавления увеличивается до $F=5,0\pm 0,2$.

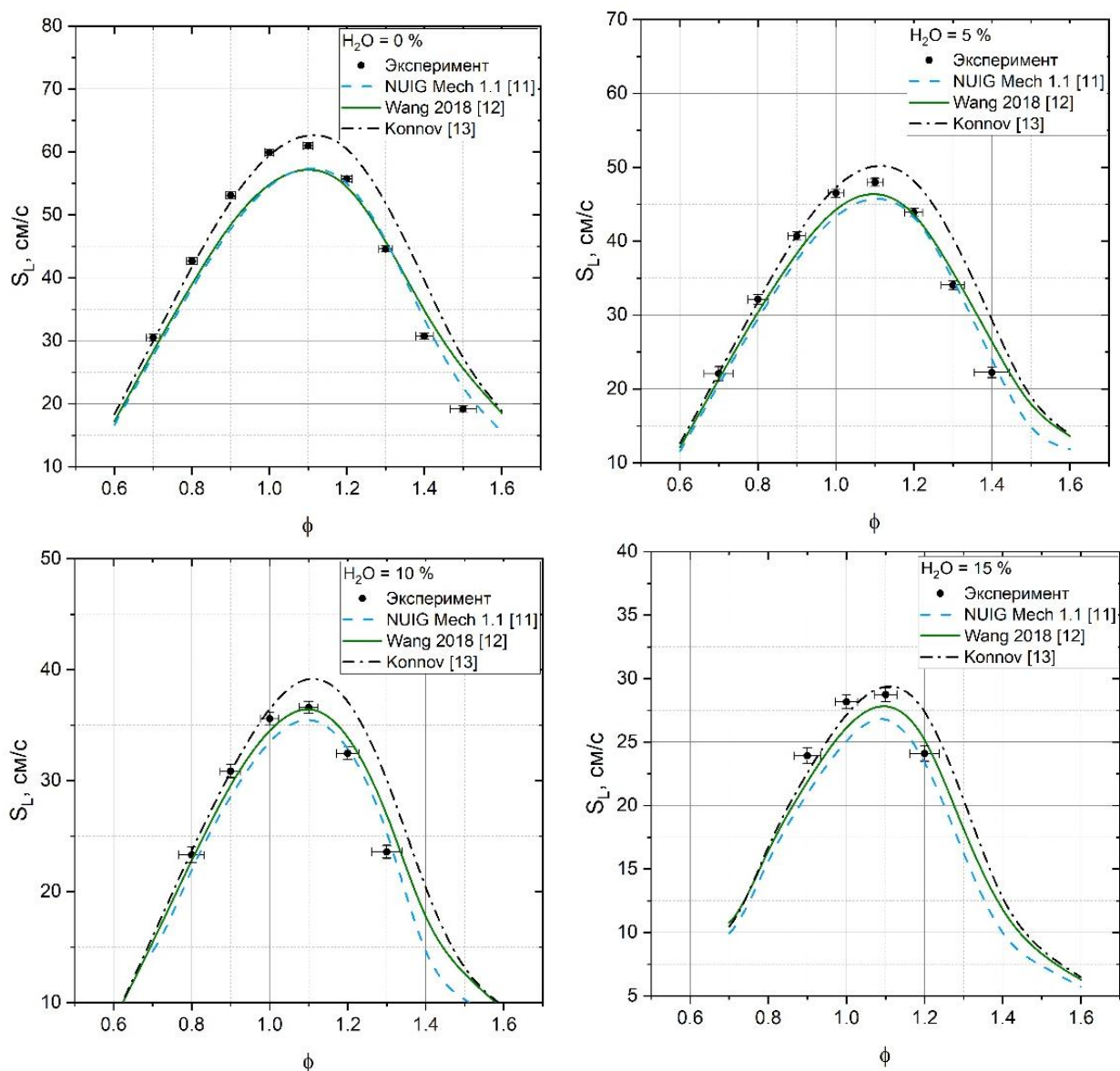


Рисунок 7 Нормальная скорость распространения пламени метано-воздушной смеси, обогащённой 35% H_2 по объёму, с различной долей разбавления паром

На рисунке 8 показано обобщение представленных результатов по нормальной скорости распространения пламени в зависимости от ϕ при различном разбавлении водяным паром. Исходя из анализа представленных результатов, можно отметить, что снижение скорости пламени не линейно и может быть описано полиномом 2 порядка. Таким образом, экспериментально выявлена граница применимости литературной зависимости, которая справедлива лишь для случаев до 8% разбавления паром.

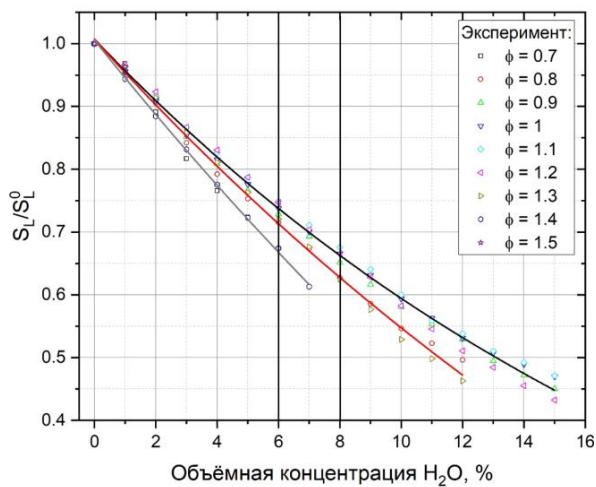


Рисунок 8. Нормальная скорость распространения пламени метано-воздушной смеси, обогащённой 35% H₂ по объёму, с различной долей разбавления паром.

5 Выводы

Выполнено исследование влияния добавки водяного пара на скорость ламинарного пламени. Впрыск водяного пара в зону горения используется для снижения объёма высокотемпературных зон, для предотвращения образования большого количества NO_x. Это особенно актуально при переводе существующих ГТУ и ГТД на водородное топливо, так как конструкция камер сгорания не всегда подразумевает только диффузионный тип горения или ступенчатый впрыск топлива, для организации сухого сжигания (без добавления паров воды) [15].

В результате проделанной работы проведён анализ экспериментальных исследований, представленных различными авторами и авторами настоящей работы, который подтверждает высокую достоверность полученных результатов и позволяет использовать данную экспериментальную базу для исследований скорости метано-водородного пламени при разбавлении водяным паром. Экспериментально, с использованием установки по определению нормальной скорости распространения пламени Heat Flux определено влияние добавки водорода и водяного пара на нормальную скорость пламени. Показано, что добавка водорода до 35% увеличивает скорость пламени до 40%. Разбавление паром до 10% снижает скорость пламени в два раза.

Проведена оценка влияния коэффициента разбавления F с использованием литературной зависимости. Анализ полученных результатов показывает, что при увеличении начальной температуры ТВС влияние добавок пара на снижение нормальной скорости распространения пламени становится слабее. Также уменьшение скорости пламени при разбавлении паром не зависит от степени обогащения водородом.

Проведены исследования скорости распространения метано-водородного пламени при разбавлении паром для широкого диапазона по коэффициенту избытка топлива. Представленные результаты показывают, что снижение скорости пламени нелинейно и может быть описано экспоненциальной аппроксимацией. Таким образом, экспериментально выявлена граница применимости предложенной зависимости, которая справедлива лишь для случаев до 8% разбавления паром.

6 Благодарности

Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда № 22-79-10205, <https://rscf.ru/project/22-79-10205/>.

Список использованных источников

[1] Liu, Y. Review of modern low emissions combustion technologies for aero gas turbine engines / Y. Liu, X. Sun, V. Sethi, D. Nalianda [et al.] // *Progress in Aerospace Sciences* – 2017. V. 94, P.12-45. <https://doi.org/10.1016/j.paerosci.2017.08.001>

[2] Бирюк, В. В. Газ в моторах / В. В. Бирюк, С. В. Лукачев, Д. А. Угланов, Ю. И. Цыбизов // – Самара : Самарский национальный исследовательский университет имени академика С. П. Королева, 2021. – 296 с. – ISBN 978-5-7883-1626-0. – EDN WSISAB.

[3] Öberg, S. Exploring the competitiveness of hydrogen-fueled gas turbines in future energy systems / S. Öberg, M. Odenberger, F. Johnsson // *International Journal of Hydrogen Energy*. – 2022. – V. 47 – no. 1. – PP. 624-644. – DOI: 10.1016/j.ijhydene.2021.10.035

[4] Cong, T. L. Experimental and Detailed Modeling Study of the Effect of Water Vapor on the Kinetics of Combustion of Hydrogen and Natural Gas, Impact on NOx / T. L. Cong, P. Dagaut, // *Energy&Fuels*. – 2009. – 23(2), pp.725-734.

[5] Boushaki, T. Effects of hydrogen and steam addition on laminar burning velocity of methane air premixed flame: experimental and numerical analysis / T. Boushaki, Y. Dhue, L. Selle [et al.] // *International Journal of Hydrogen Energy*. – 2012. – V. 37. – PP. 9412-9422. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2012.03.037

[6] Coppens, F. H. V. The Effects of Composition on the Burning Velocity and Nitric Oxide Formation in Laminar Premixed Flames of $\text{CH}_4 + \text{H}_2 + \text{O}_2 + \text{N}_2$ / F. H. V. Coppens, J. De Ruyck, A. A Konnov // *Combustion and Flame*. – 2007. – V. 149 – no. 4. – P. 409-417. DOI: 10.1016/j.combustflame.2007.02.004

[7] Christensen, M. Effects of hydrogen enrichment and steam dilution on methane-air flames / M. Christensen, V. A. Alekseev, E. J. K. Nilsson, Konnov A. A. // *Proceedings of the European Combustion Meeting 2013*. – Lund, Sweden June, 25-28, 2013. – V. P1-70. – PP. 1-6.

[8] Zubrilin, I. A. Measurements and Experimental Database Review for Laminar Flame Speed Premixed CH_4/Air Flames / I. A. Zubrilin, S. S. Matveev, S. G. Matveev // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – Samara, Russian Federation, September, 28-30, 2018. – V. 302. – no. 012078. – DOI: 10.1088/1757-899X/302/1/012078

[9] Matveev, S. S. Laminar burning velocities of surrogate components blended with ethanol / S. S. Matveev, D. V. Idrisov, S. G. Matveev, A.A. Konnov // *Combustion and Flame*. – 2019. – V. 209. – P. 389-393. – DOI: 10.1016/j.combustflame.2019.08.010

[10] ANSYS Chemkin-Pro Theory Manual 18.2. / San Diego: Reaction Design. – 2017. – 76 p.

[11] Wu, Y. Understanding the antagonistic effect of methanol as a component in surrogate fuel models: A case study of methanol/n-heptane mixtures / Y. Wu,

S. Panigrahy, A. B. Sahu. [et al.] // *Combustion and Flame*. – 2021. – V. 226. – P. 229-242. – DOI: 10.1016/j.combustflame.2020.12.006

[12] Wang, T. Automatic generation of a kinetic skeletal mechanism for methane-hydrogen blends with nitrogen chemistry / T. Wang, X. Zhang, J. Zhang, X. Hou // *International Journal of Hydrogen Energy*. – 2018. – V. 43. – no. 6. – P. 3330-3341. – DOI: 10.1016/j.ijhydene.2017.12.116

[13] Alekseev, V.A. High-temperature oxidation of acetylene by N_2O at high Ar dilution conditions and in laminar premixed $\text{C}_2\text{H}_2 + \text{O}_2 + \text{N}_2$ flames / V. A. Alekseev, N. Bystrov, A. Emelianov [et al.] // *Combustion and Flame*. – 2022. – V. 238. – no. 111924. – P. 1-16. – DOI: 10.1016/j.combustflame.2021.111924

[14] Козлов, В.Е. О механизмах образования экологически опасных соединений в гомогенных камерах сгорания / В. Е. Козлов, А. М. Старик, Н. С. Титова, И. Ю. Ведищев // *Физика горения и взрыва*. – 2013. – Т. 49. – №. 5. – С. 17-33.

[15] Владимиров, А. В. Новые технологии снижения вредных выбросов и CO_2 в продуктах сгорания ГТУ и ГТД путем подмешивания и постепенного перехода к водородному топливу / А. В. Владимиров, Е. Д. Свердлов, А. Н. Дубовицкий // *Авиационные двигатели*. – 2022. – №. 2. – С. 83-103.

STUDY OF THE NORMAL SPEED OF FLAME PROPAGATION OF A METHANE-AIR MIXTURE ENRICHED WITH HYDROGEN AND DILUTED WITH WATER VAPOR

Idrisov D.V.
Matveev S.S.
Matveev S.G.
Gurakov N.I.
Popov A.D.
Litarova A.A.

Samara National Research
 University (Samara University)

34, Moskovskoye shosse,
 Samara, 443086,
 Russian Federation

idrisov57@yandex.ru

The results of an experimental study of the normal flame propagation speed of a hydrogen-enriched and/or water vapor-diluted methane-air mixture at atmospheric pressure and initial mixture temperatures of 300 and 330 K are presented in this paper. The normal flame propagation speed was determined by the zero heat flow method (Heat Flux). The obtained experimental data were compared with the results of numerical simulation of adiabatic premixed laminar flames, which was carried out using three kinetic mechanisms of the methane-hydrogen fuels oxidation. The flame speed increased proportionally up to 35% when the methane was enriched with hydrogen up to 35% by volume. With increasing vapor concentration, a linear decrease in the flame speed of the methane-air mixture was observed. This decrease does not depend on the degree of hydrogen enrichment. Recommendations are proposed for the use of kinetic mechanisms to simulate the flame of a methane-air mixture when it is enriched with hydrogen and diluted with water vapor.

Keywords: flame; hydrogen enrichment; vapor dilution; laminar burning velocity; kinetic models

References

- [1] Liu, Y., Sun, X., Sethi, V., Nalianda, D., Li, Y-Gi. and Wang, L. (2017) "Review of modern low emissions combustion technologies for aero gas turbine engines", *Progress in Aerospace Sciences*, V. 94, P. 12-45, <https://doi.org/10.1016/j.paerosci.2017.08.001>.
- [2] Biryuk, V.V., Lukachev, S.V., Uglanov, D.A. and Tsybizov, Yu.I. (2021), *Gas in engines*, Samara National Research University named after Academician S.P. Korolev, Samara, ISBN 978-5-7883-1626-0, EDN WSISAB. (in Russian).
- [3] Öberg, S., Odenberger, M. and Johnsson, F. (2022), "Exploring the competitiveness of hydrogen-fueled gas turbines in future energy systems", *International Journal of Hydrogen Energy*, V. 47, no. 1, P. 624-644. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2021.10.035.
- [4] Cong, T. L. and Dagaut, P. (2009), Experimental and Detailed Modeling Study of the Effect of Water Vapor on the Kinetics of Combustion of Hydrogen and Natural Gas, *Impact on NOx, Energy&Fuels*, 23(2), pp.725-734.
- [5] Boushaki, T., Dhue, Y., Selle, L., Ferret, B and Poinot, T. (2012), "Effects of hydrogen and steam addition on laminar burning velocity of methane air premixed flame: experimental and numerical analysis", *International Journal of Hydrogen Energy*, V. 37, pp. 9412-9422, DOI: 10.1016/j.ijhydene.2012.03.037
- [6] Coppens, F.H.V., De Ruyck, J. and Konnov, A.A. (2007), "The Effects of Composition on the Burning Velocity and Nitric Oxide Formation in Laminar Premixed Flames of $\text{CH}_4 + \text{H}_2 + \text{O}_2 + \text{N}_2$ ", *Combustion and Flame*, V. 149, no. 4., pp. 409-417, DOI: 10.1016/j.combustflame.2007.02.004.
- [7] Christensen, M., Alekseev, V.A., Nilsson, E.J.K. and Konnov, A.A. (2013), "Effects of hydrogen enrichment and steam dilution on methane-air flames", *Proceedings of the European Combustion Meeting 2013*, June, 25-28, Lund, Sweden, V. P1-70, P. 1-6.
- [8] Zubrilin, I.A., Matveev, S.S., Matveev, S.G. and Idrisov, D.V. (2018), "Measurements and Experimental Database Review for Laminar Flame Speed Premixed CH_4 /Air Flames", *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, September, 28-30, Samara, Russian Federation, V. 302, no. 012078, DOI: 10.1088/1757-899X/302/1/012078.
- [9] Matveev, S.S., Idrisov, D.V., Matveev, S.G. and Konnov, A.A. (2019), "Laminar burning velocities of surrogate components blended with ethanol", *Combustion and Flame*, V. 209, pp. 389-393, DOI: 10.1016/j.combustflame.2019.08.010.
- [10] ANSYS Chemkin-Pro Theory Manual 18.2. (2017) San Diego: Reaction Design, 76 p.

[11] Wu, Y., Panigrahy, S., Sahu, A.B., Barik, C., Liang, J., Mohamed, A., et al. (2021), “Understanding the antagonistic effect of methanol as a component in surrogate fuel models: A case study of methanol/n-heptane mixtures”, *Combustion and Flame*, V. 226, pp. 229-242, DOI: 10.1016/j.combustflame.2020.12.006.

[12] Wang, T., Zhang, X., Zhang, J. and Hou, X. (2018), “Automatic generation of a kinetic skeletal mechanism for methane-hydrogen blends with nitrogen chemistry”, *International Journal of Hydrogen Energy*, V. 43, no. 6, pp. 3330-3341. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2017.12.116.

[13] Alekseev, V.A., Bystrov, N., Emelianov, A., Eremin, A., Yatsenko, P. and Konnov, A.A.(2022), “High-temperature oxidation of acetylene by N₂O at high Ar dilution conditions and in laminar premixed C₂H₂ + O₂ + N₂ flames”, *Combustion and Flame*, V. 238, no. 111924, pp. 1-16, DOI: 10.1016/j.combustflame.2021.111924.

[14] Kozlov, V.E., Starik, A.M., Titova, N.S. and Vedishchev, I.Yu. (2013), “On the mechanisms of formation of environmentally hazardous compounds in homogeneous combustion chambers”, *Physics of Combustion and Explosion*, Vol. 49, No.5, pp. 17-33. (in Russian).

[15] Vladimirov, A.V., Sverdlov, E.D. and Dubovitsky, A.N.(2022), “New technologies for reducing harmful emissions and CO₂ in combustion products of gas turbine engines and gas turbine engines by mixing and gradual transition to hydrogen fuel”, *Aircraft engines*, No.2, pp. 83-103. (in Russian).