

УДК 536.46

ВЛИЯНИЕ ДОБАВКИ H_2 И РАЗБАВЛЕНИЯ УГЛЕКИСЛЫМ ГАЗОМ НА МЕТАНОВОЗДУШНОЕ ДИФфуЗИОННОЕ ПЛАМЯ СО СПУТНЫМ ПОТОКОМ

I. Hraiech^{1,3}, Z. Riahi^{2,3}, J.-Ch. Sautet³, A. Mhimid¹¹National Engineering School of Monastir, LESTE, Monastir 5019, Tunisia, ibtissemhraiech@gmail.com²Research and Technology Center of Energy, Laboratory of Wind Energy Master and Waste Energy Recovery (LMEEVED), Hammam-Lif 2050, Tunisia³Aerothermochemistry Interprofessional Research Complex (CORIA), University of Rouen Saint-Etienne-du-Rouvray 76801, France

Описывается влияние добавки водорода и разбавления углекислым газом на изменение скорости и параметров турбулентности (интегральный и колмогоровский масштабы) пламени природного газа, стабилизированного на цилиндрической горелке. Объемное содержание водорода в топливе варьировалось от 0 до 20 %, а углекислого газа — от 0 до 50 %. Поля скорости и ее среднеквадратичное значение определялись методом скоростной визуализации частиц (PIV) в реагирующем потоке, а концентрации CO и NO_x определялись с использованием соответствующего анализатора. Параметры турбулентности пламен рассчитывались численным методом. Результаты показали, что в отсутствие водорода в исходной смеси и при содержании углекислого газа более 20 % пламя срысывается. Следовательно, пламя устанавливается на горелке при добавлении водорода, а максимальная нормированная скорость газа ($U_{\max}/U_0$) вдоль струи биогитана вдали от горелки менее важна из-за низкой плотности и высокой молекулярной диффузии водорода. Измерение двух проекций среднеквадратичной скорости (U'_x и U'_z) показывает, что турбулентность более важна для величины U'_z .

Ключевые слова: биогитан, добавка водорода, разбавление CO₂, параметры турбулентности.

DOI 10.15372/FGV20220310

ВВЕДЕНИЕ

Положения об охране окружающей среды стимулируют разработку новых, более экологически чистых технологий сжигания для получения энергии. Существует необходимость в разработке нового альтернативного топлива для повышения эффективности традиционных систем, снижения выбросов загрязняющих веществ (NO_x, SO_x, частицы сажи и др.) и утилизации бытовых и сельскохозяйственных отходов с помощью метантенков. Новое смешанное топливо под названием биогитан (смесь CH₄, H₂, CO₂), полученное в результате переработки органических отходов, обработанных анаэробным сбраживанием, в частности, лесосечных и биологических отходов, может рассматриваться в качестве источника возобновляемой энергии. Биогитан представляет собой очень интересное решение, соответствующее стандартам защиты окружающей среды и оптимизации камер сгорания. Авторы [1, 2] показа-

ли, что добавление водорода к топливу способствует снижению концентрации сажи и эмиссии CO, однако приводит к увеличению эмиссии оксидов азота. В экспериментах [3] добавление водорода привело к улучшению стабильности пламени и уменьшению высоты факела, но, с другой стороны, увеличилась концентрация NO и CO в продуктах сгорания. В [4] установлено, что введение водорода в топливо повышает результирующую скорость реакции горения и расширяет концентрационные пределы распространения пламени. В [5] экспериментальное изучение ламинарного диффузионного пламени сжиженного природного газа (ПГ) с водородом показало, что добавление большого количества водорода способствует уменьшению длины факела пламени. В [6] экспериментальное исследование влияния добавки водорода и коэффициента избытка горючего на структуру турбулентного диффузионного пламени гитана (ПГ—H₂) с кислородом подтвердило, что в топливно-кислородной горелке при добавлении водорода в бедной смеси ($\phi < 1$) возможны

более раннее возгорание, лучшая стабильность пламени и значительное снижение расхода топлива.

В [7, 8] изучали пределы гашения пламени на чашечной горелке путем введения различных разбавителей (включая углекислый газ, азот, аргон) в спутный поток воздуха. Установлено, что эффективность гашения пропорциональна теплоемкости разбавителей при постоянном давлении: $\text{CO}_2 > \text{CO}_2 + \text{Ar} \approx \text{N}_2 > \text{Ar}$. Это доказывает преобладание теплового механизма над другими факторами. В [9] при изучении влияния разбавителей на образование сажи в диффузионном пламени пропан/воздух обнаружены аналогичные закономерности. Введение разбавителей в поток горючего или в поток воздуха приводит к изменению стабильности пламени. В работе [10] показано, что добавление CO_2 в пламя вызывает как химическое, так и термическое воздействие. Многие авторы [7, 8, 11–14] исследовали влияние разбавления воздуха углекислым газом на устойчивость пламени. В [9] установлено, что добавление углекислого газа к диффузионному пропановоздушному пламени снижает концентрацию сажи. Авторы измерили концентрацию и размер частиц сажи при добавлении нескольких разбавителей (CO_2 , N_2 , Ar и $\text{CO}_2 + \text{Ar}$). Оказалось, что относительная эффективность снижения образования сажи коррелирует с молярной теплоемкостью при постоянном давлении в ряду $\text{CO}_2 > \text{CO}_2 + \text{Ar} \approx \text{N}_2 > \text{Ar}$. В [15, 16] на основании проведенных экспериментов сделан вывод о том, что разбавление углекислым газом ограничивает образование сажи в пламени метан/воздух без предварительного смешивания за счет снижения концентрации реагентов в зоне реакций. Как установлено в [17], разбавление вызывает увеличение молярной концентрации радикалов O и OH в зоне сажеобразования. Следовательно, эти два радикала вызывают окисление сажи и тем самым снижают ее концентрацию. Замена азота воздуха углекислым газом численно изучена в [18], влияние CO_2 на скорость распространения пламени $\text{CH}_4\text{—H}_2$ оказалось более эффективным и привело к увеличению скорости пламени. В исследованиях [9, 10, 19, 20] установлено, что в диффузионном пламени при добавлении CO_2 к спутному потоку воздуха образование сажи уменьшается из-за малого времени пребывания различных продуктов в начальной области пламени. Предыдущие работы показали

дестабилизацию пламени при добавлении CO_2 в воздух и его гашение при достижении критической концентрации разбавителя. Установлена следующая последовательность относительной эффективности разбавителей: $\text{CO}_2 > \text{N}_2 \approx \text{He} > \text{Ar}$. Таким образом, наибольшую способность к дестабилизации пламени проявил CO_2 [21]. Эффект добавления CO_2 также изучался в работе [22], экспериментально и численно показано, что добавление CO_2 в предварительно не перемешанное пламя метан/воздух снижает температуру пламени за счет уменьшения концентрации компонентов пламени внутри зоны реакции.

В настоящем исследовании изучается гибридный эффект добавления водорода в горючее и разбавления углекислым газом, оказываемый на скорость и среднеквадратичное значение пульсаций скорости вдоль пламени. В первой части работы методом скоростной визуализации частиц (PIV) исследовалась аэродинамика струи, что позволило охарактеризовать поля течения. Во второй части численно определялись параметры турбулентности (интегральный и колмогоровский масштабы) по мере добавления водорода и разбавления CO_2 . Используемое топливо представляет собой смесь природного газа, водорода и углекислого газа, а в качестве окислителя использовался воздух.

1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

1.1. Формулировка проблемы

Настоящая работа направлена на экспериментальное и численное изучение влияния добавления водорода к природному газу и разбавления углекислым газом на аэродинамику потока в пламени. Экспериментальная установка, работающая на биогитане ($\text{ПГ—H}_2\text{—CO}_2$), показана на рис. 1. Коаксиальная горелка внутреннего диаметра $d = 6$ мм и высотой $L = 20$ см подает смесь $\text{ПГ—H}_2\text{—CO}_2$ в окружающий воздух.

Плотность природного газа 0.83 кг/м^3 , его объемный состав — 85 % CH_4 , 9 % C_2H_6 , 3 % C_3H_8 , 2 % N_2 , 1 % CO_2 и следы высших углеводородов. Объемная доля водорода в топливной смеси ПГ—H_2 варьировалась от 0 до 20 %. Объемное содержание CO_2 в смеси $\text{ПГ—H}_2\text{—CO}_2$ варьировалось от 0 (без разбавления) до 50 %.

Характеристики потоков газа

Топливо					Результаты экспериментов					
Состав, %		Q_v , л/мин								
ПГ	H ₂	ПГ	H ₂	общее	CO ₂ , %	CO ₂ , л/мин	Q_{tot} , л/мин	U_0 , м/с	Re	ρ_{jet} , кг/м ³
100	0	24.09	0	24.09	0	0	24	14.2	6 312	0.83
					10	2.6	26.7	15.7	9 005	0.93
					20	6	30.1	17.7	10 741	1.03
95	5	23.73	1.25	24.98	0	0	24.9	14.7	7 518	0.79
					10	2.7	27.7	16.3	8 959	0.9
					20	6.2	31.2	18.4	10 769	1
90	10	23.34	2.59	25.94	0	0	25.9	15.3	7 422	0.75
					10	2.8	28.8	16.9	8 914	0.85
					20	6.4	32.4	19.1	10 804	0.97
85	15	22.92	4.046	26.97	0	0	26.9	15.9	7 322	0.71
					10	2.9	29.9	17.6	8 868	0.83
					20	6.7	33.7	19.8	10 847	0.95
					30	11.5	38.5	22.7	13 486	1.06
80	20	22.47	5.61	28.09	0	0	28.1	16.5	7 205	0.66
					10	3.1	31.2	18.4	8 822	0.78
					20	7	35.1	20.7	10 899	0.9
					30	12	40.1	23.6	13 713	1.02

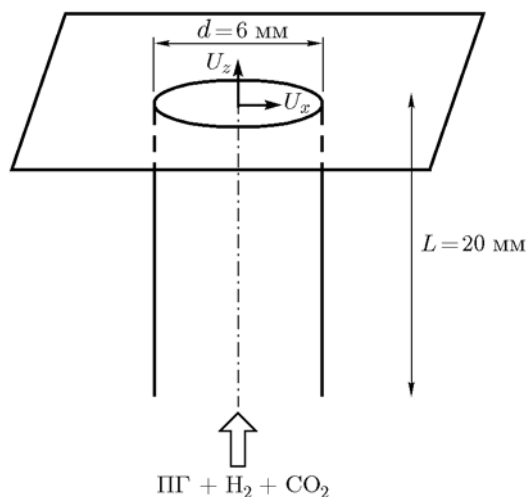


Рис. 1. Схема горелки

В таблице приведены параметры этого экспериментального исследования, включая расходы Q_v природного газа, водорода и углекислого газа, скорость подачи топлива U_0 , чис-

ло Рейнольдса Re и плотность струи ρ_{jet} .

1.2. Измерение скорости

В настоящей работе методом PIV получены двумерные изображения потока и полей мгновенных скоростей. В качестве источника света использовался двухимпульсный Nd:YAG-лазер (модель Big Sky CFR200, Quantel) с длиной волны 532 нм и частотой импульсов 10 Гц.

Сигнал рассеяния, излучаемый частицами в потоке, регистрировался цифровой камерой с усилением сигнала, расположенной перпендикулярно источнику света. Разрешение камеры составляло 2048×2048 пиксель, а динамический диапазон — 14 бит. Камера укомплектована объективом Nikon Nikkor с фокусным расстоянием 50 мм и диафрагмой 1.2.

Для измерения скорости при горении использовался поток частиц оксида циркония ZrO_2 со средним размером $5 \div 10$ мкм. Этот материал пригоден для изучения аэродинамики при горении, поскольку его температура плав-

ления 2715 °C обеспечивает стойкость к высоким температурам, а значительный показатель преломления 2.2 обеспечивает хорошее рассеяние лазерного излучения по направлению к датчику камеры.

Для изучения поля средних скоростей использовалась запись 500 мгновенных пар изображений с разрешением 2048×2048 пиксель на каждой высоте от среза горелки для каждой конфигурации экспериментов. Это позволило определить радиальную и продольную составляющие скорости газа и их пульсации.

1.3. Измерение эмиссии NO_x и CO

Концентрацию газов, образующихся при сгорании, измеряли на выходе из камеры сгорания с помощью пробоотборника. Отобранные газы подавались в газоанализатор (модель Horiba PG-250) для измерения концентраций NO_x и CO . Анализ оксидов азота проводился хемилюминесцентным методом. При этом при введении озона (O_3) в отобранные газы часть NO , содержащегося в пробе, вступала в реакцию с озоном и окислялась до NO_2 . Диоксид азота образуется в возбужденном состоянии и, возвращаясь в исходное состояние, испускает фотон. По излучению определяют концентрацию NO . Что касается измерения концентрации NO_2 , то он преобразуется в NO с использованием молибден-углеродного катализатора. Точность измерения концентраций NO_x позволяет определить тенденции выбросов NO_x в зависимости от концентрации водорода и разбавления углекислым газом в исходном горючем. Концентрацию монооксида углерода CO измеряли с помощью недиспергирующего инфракрасного анализатора. Диапазон измерения концентраций CO данным методом составлял $0 \div 200$ ppm с погрешностью ± 1.0 % от полной шкалы.

1.4. Численное моделирование

1.4.1. Вычислительный интервал

Уравнения сохранения массы, импульса, компонентов и энергии в стационарном состоянии решались численно. Расчеты проводились с помощью программы Fluent с использованием k - ε -модели турбулентности.

Топливная смесь CH_4 — H_2 — CO_2 подавалась через цилиндрическое сопло диаметром

6 мм. Осесимметричная расчетная область составляла 800 мм в осевом направлении и 250 мм — в радиальном, а также включала в себя коаксиальную горелку с радиусом инжектора биогитана 3 мм. Неравномерная координатная сетка состояла из 16 200 ячеек. Использование неравномерного шага сетки обеспечивало адекватное разрешение зоны химических реакций вблизи оси горелки.

Цель расчетов состояла в сравнении численных результатов с данными эксперимента, поэтому граничные условия расчетов определялись соответствующей конфигурацией экспериментальной установки.

1.4.2. Моделирование турбулентности

Для моделирования турбулентной кинетической энергии k и скорости диссипации кинетической энергии ε использовалась k - ε -модель турбулентности, предложенная в [23]. Уравнения переноса имеют следующий вид.

Уравнение переноса турбулентной кинетической энергии:

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + 2\mu_t E_{ij} E_{ij} - \rho \varepsilon, \quad (1)$$

где

$$\mu_t = \bar{\rho} C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}, \quad C_\mu = 0.09, \quad (2)$$

— турбулентная вязкость, ρ — плотность, u_i — составляющая скорости в соответствующем направлении, σ_k — аналог числа Прандтля переноса турбулентной кинетической энергии, E_{ij} — компонент скорости деформации.

Уравнение скорости диссипации турбулентной кинетической энергии:

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} 2\mu_t E_{ij} E_{ij} - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k}, \quad (3)$$

σ_ε — аналог числа Прандтля для скорости диссипации кинетической энергии.

Обычные константы k - ε -модели турбулентности извлекаются из данных эксперимента или теории:

$$C_{1\varepsilon} = 1.44, \quad C_{2\varepsilon} = 1.92, \quad C_\mu = 0.09, \\ \sigma_k = 1.0, \quad \sigma_\varepsilon = 1.3.$$

1.4.3. Моделирование горения

Процесс турбулентного горения без предварительного смешивания горючего и окислителя моделируется с использованием модели вихревой диссипации. В программе Fluent используется модель взаимодействия турбулентности и химии, основанная на работе [24], которая называется моделью вихревой диссипации. Большинство видов топлива горят быстро, и общая скорость реакции определяется турбулентным перемешиванием. В пламени без предварительного смешивания турбулентность медленно перемешивает топливо с окислителем, смещая их в зону химической реакции, где они быстро сгорают. В таких случаях говорят, что горение ограничено перемешиванием, и сложной, к тому же часто неизвестной химической кинетикой можно пренебречь. В этой модели химическая реакция определяется большим временным масштабом вихревого перемешивания. Горение начинается всякий раз, когда в потоке присутствует турбулентность.

Скорость образования i -го соединения в реакции r определяется из следующих выражений:

$$R_{i,r} = \min \left[\vartheta'_{i,r} M_{w,i} A \rho \frac{\varepsilon}{k} \min \left(\frac{Y_R}{\vartheta'_{R,r} M_{w,R}} \right), \right. \\ \left. \vartheta'_{i,r} M_{w,i} A B \rho \frac{\varepsilon}{k} \left(\frac{\sum_p Y_p}{\sum_j^N \vartheta''_{j,r} M_{w,j}} \right) \right], \quad (4)$$

где ϑ' , ϑ'' — стехиометрические коэффициенты для реагентов и продуктов реакции r , $\vartheta'_{i,r}$ — стехиометрический коэффициент для любого i реакционноспособного компонента, $\vartheta'_{R,r}$ — стехиометрический коэффициент для любого компонента реагента, Y_R — массовая доля любого реагента, Y_p — массовая доля любого компонента продукта, A и B — константы модели ($A = 4$ и $B = 0.5$), $M_{w,i}$ — молекулярная масса.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

2.1. Условия реализации пламени

Предыдущие исследования доказали, что отрыв пламени происходит по трем причинам: разбавление, термическое воздействие, химическое воздействие. Добавление разбавителя в один из реагентов, топливо или окислитель,

проявляется в уменьшении концентрации реакционноспособных частиц, что, в свою очередь, вызывает снижение скорости реакции [25] при уменьшении скорости пламени [26, 27]. Это уменьшение ослабляет устойчивость пламени [11, 28], что может вызвать в случае очень малых скоростей большую пульсацию точки стабилизации пламени в режиме поднятого пламени, вплоть до его гашения [29].

Были протестированы все диапазоны параметров (концентрации H_2 и CO_2). Похоже, что во всех 18 конфигурациях пламя не срыгается. На рис. 2 показаны фотографии пламени. По-видимому, в выбранной экспериментальной конфигурации (одинарная струя диаметром $d = 6$ мм) пламя смеси с 10 % H_2 существует только при степени разбавления углекислым газом в пределах $0 \div 20$ %, что находится за гранью срыва пламя. Как только добавляется H_2 , пламя остается на горелке независимо от разбавления CO_2 . Фактически, добавление водорода способствует перемешиванию и позволяет стабилизировать пламя на горелке благодаря его высокой молекулярной диффузии и реакционной способности.

2.2. Поля скорости и пульсации

Для того чтобы количественно оценить эффекты добавления водорода и CO_2 , изучали динамическое поле биогитанового пламени. Для этого в смесь ПГ— H_2 — CO_2 засеивали частицы оксида циркония.

На рис. 3 показаны поля средней продольной скорости в плоскости (XZ), измеренные методом PIV. Увеличение концентрации водорода и разбавления CO_2 приводит к росту продольной скорости газа, что связано с повышением расхода топливной смеси. На рис. 4 представлены радиальные профили средней продольной скорости струи U_z , нормированной на скорость истечения U_0 в реагирующем потоке, без разбавления углекислым газом ($CO_2 = 0$), при добавлении водорода в концентрации $0 \div 20$ % (по объему), на двух разных высотах от среза горелки ($Z = 10$ и 100 мм). Из приведенных данных видно, что на высоте $Z = 10$ мм с добавлением водорода максимум нормированной продольной скорости биогитановой струи увеличился на 7 %, от $U_{\max,z}/U_0 = 1.3$ без добавления H_2 до $U_{\max,z}/U_0 = 1.4$ при $H_2 = 20$ %. На высоте $Z = 100$ мм различие составило 3.4 %, от $U_{\max,z}/U_0 = 0.73$ при $H_2 = 0$



Рис. 2. Фотографии пламен разного состава

до $U_{\max,z}/U_0 = 0.75$ при $H_2 = 20\%$. Как следует из рис. 4, различие максимальных нормированных скоростей $U_{\max,z}/U_0$ в пламенах без водорода и с 20 % водорода уменьшилось вдвое от горелки благодаря высокой молекулярной диффузии и низкой плотности водорода. Рис. 5 позволяет проследить влияние разбавления диоксидом углерода на нормированную среднюю скорость на высоте $Z = 10$ и 100 мм в конфигурации без добавления H_2 . При разбавлении углекислым газом значение $U_{\max,z}/U_0$ уменьшается только на 4 % на двух высотах в пламени. Например, на высоте $Z = 100$ мм $U_{\max,z}/U_0 = 0.73$ при $CO_2 = 0$ и $U_{\max,z}/U_0 = 0.69$ при $CO_2 = 20\%$.

Измерение методом PIV в плоскости (XZ) позволяет вывести зависимость среднеквадратичного значения пульсаций двух компонентов скорости. Эволюция компонентов стандартного отклонения скорости U'_x и U'_z , нормированных на выходную скорость U_0 вдоль струи биогитана, показана на рис. 6 как функция объемной доли водорода. Пик двух компонентов появляется на высоте, в шесть раз превышающей диаметр горелки. Из-за высокой средней продольной скорости пульсационный компонент U'_z больше, чем U'_x , что соответствует классическому поведению струи. При добавлении в топливо 20 % водорода максимальные значения U'_x и U'_z повышаются на 14 и 24 % со-

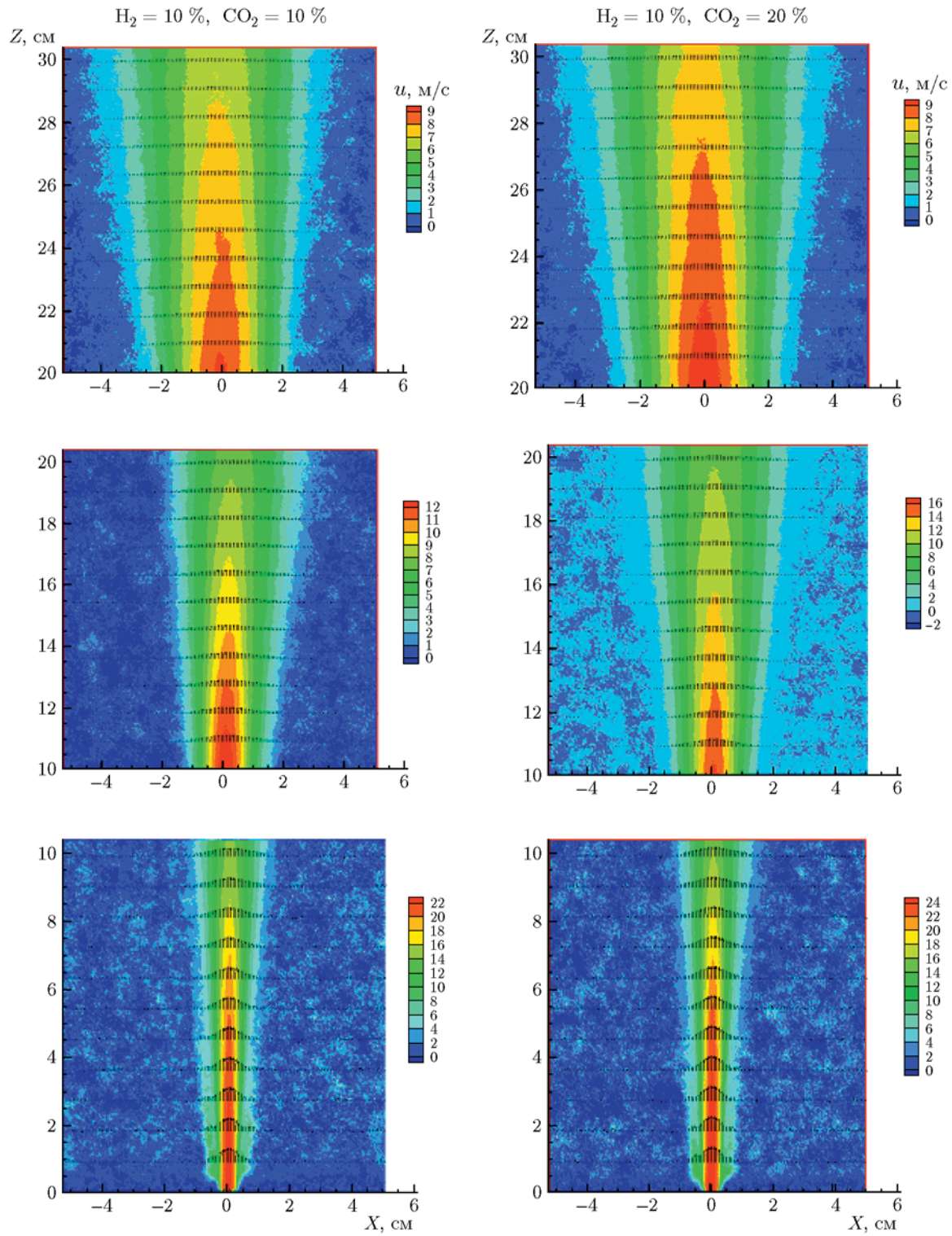


Рис. 3. Поля средних продольных скоростей топлива в реагирующем потоке

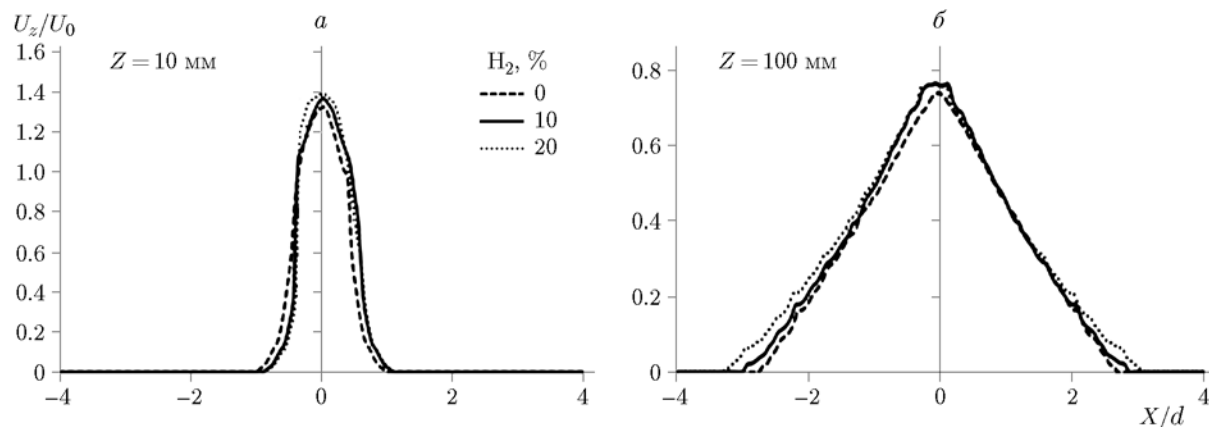


Рис. 4. Радиальные профили нормированной средней продольной скорости в струе биогазита на высоте от среза горелки $Z = 10$ (а) и 100 мм (б) в зависимости от объемной доли водорода ($\text{CO}_2 = 0$)

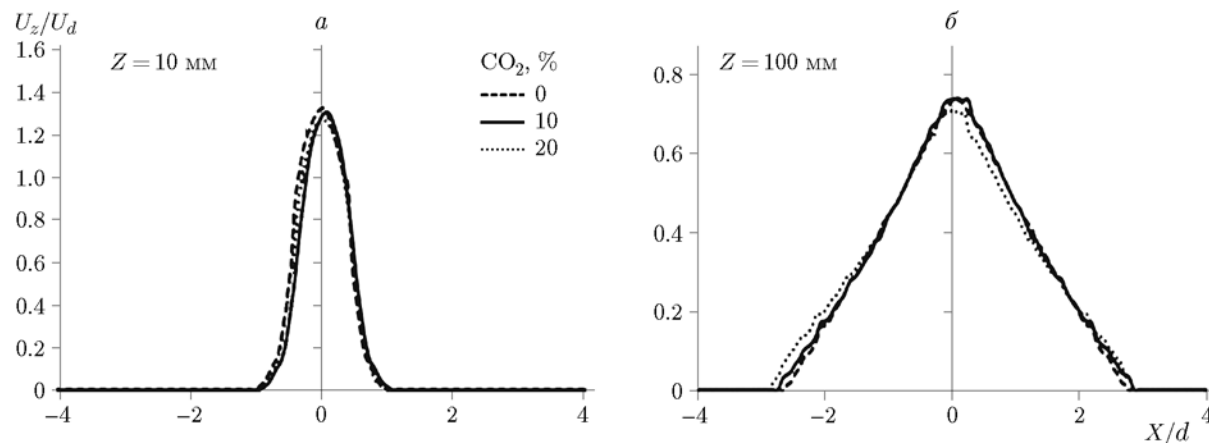


Рис. 5. Радиальные профили нормированной средней продольной скорости в струе биогазита на высоте от среза горелки $Z = 10$ (а) и 100 мм (б) в зависимости от объемной доли углекислого газа ($\text{H}_2 = 0$)

ответственно. Это доказывает, что зона турбулентности увеличивается из-за более высокой молекулярной диффузии биогазита, что способствует его смешиванию с окружающим воздухом.

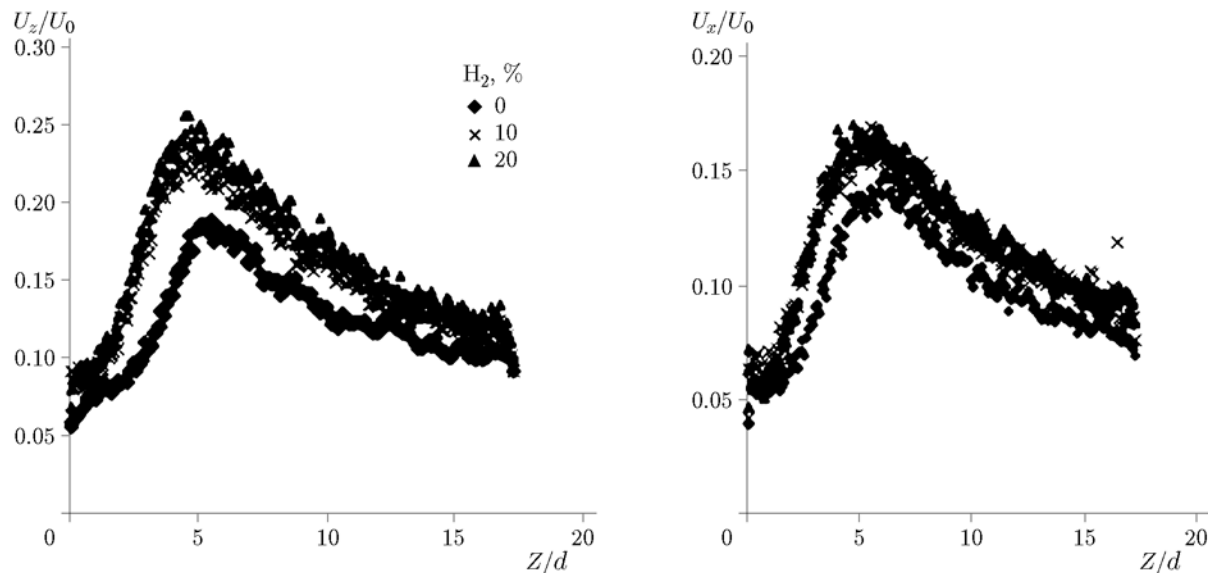
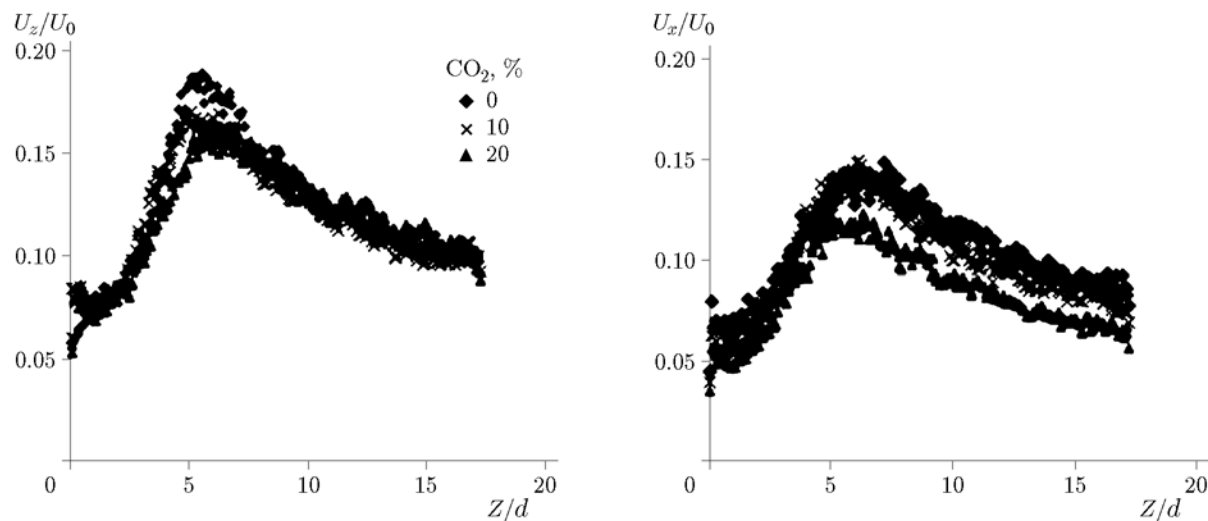
Рис. 7 иллюстрирует влияние разбавления топлива диоксидом углерода на две составляющие среднеквадратичной скорости струи биогазита. Разбавление диоксидом углерода снижает турбулентность. Максимум отношения U_z/U_0 располагается примерно на расстоянии $Z = 6d$ от сопла, и максимальный уровень пульсаций уменьшается из-за более высокой плотности струи и снижения вовлечения окружающего воздуха [30].

2.3. Продукты горения

2.3.1. Эмиссия оксидов азота

Оксид азота образуется из азота и кислорода в зонах высоких температур, которые обычно наблюдаются при горении углеводородов. Оксиды NO и NO_2 представляют собой вредные для здоровья газы, эффективно разрушающие озоновый слой. NO_x образуются в результате прямого окисления молекулярного азота или быстрой реакции между молекулярным азотом и свободными радикалами углеводорода, при этом их концентрация зависит от количества азота в топливе [31].

На рис. 8 показано, как разбавление топлива диоксидом углерода влияет на эмис-

Рис. 6. Продольная среднеквадратичная скорость струи биогитана ($\text{CO}_2 = 0$)Рис. 7. Продольная среднеквадратичная скорость струи биогитана ($\text{H}_2 = 0$)

сию NO_x на выходе из камеры сгорания при различном содержании водорода в биогитане. Здесь эмиссия определяется как $E_{\text{NO}_x} = \text{NO}_x(\alpha_{\text{H}_2}; \beta_{\text{CO}_2}) / \text{NO}_x(\text{pur NG})$ (где pur NG — чистый природный газ). Добавление водорода в природный газ увеличивает концентрацию NO_x . Фактически, добавка водорода уменьшает разбавление реагентов продуктами сгорания и время их пребывания в пламени, следовательно, увеличивает температуру пламени и термическое образование NO_x . Сжигание смеси при разбавлении диоксидом CO_2 сокращает

выбросы NO_x вследствие понижения температуры пламени за счет уменьшения концентрации реагентов внутри реакционной зоны.

Этот результат хорошо согласуется с данными [21]. В работах [9, 18, 32] также получено, что разбавление приводит к снижению температуры сгорания и, следовательно, к уменьшению образования сажи и NO_x .

2.3.2. Эмиссия монооксида углерода

Монооксид углерода CO образуется в результате частичного окисления углеводородов

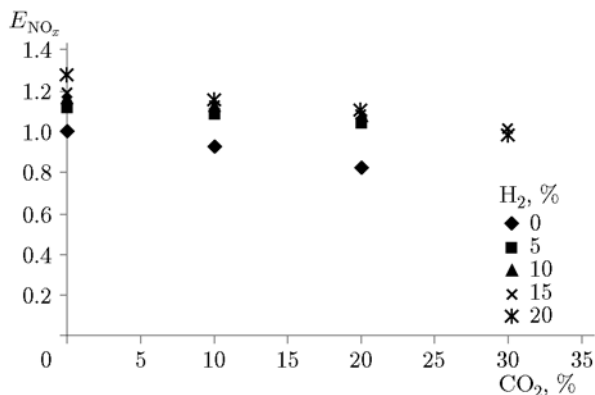


Рис. 8. Эмиссия оксидов азота в зависимости от объемной доли водорода и CO₂

C_nH_m . Он формирует вторичную фазу горения, когда промежуточные компоненты (H_2 , O, H и OH) образуются в результате цепных реакций. Окисление CO до CO₂ происходит сравнительно медленно и практически невозможно в отсутствие водородсодержащих соединений.

На рис. 9 показано изменение абсолютных выбросов монооксида углерода при разбавлении диоксидом CO₂ топлив с разным содержанием водорода в них. На выходе из камеры сгорания эмиссия CO определяется как $E_{CO} = CO(\alpha_{H_2}; \beta_{CO_2}) / CO(\text{pur NG})$. Из рисунка видно, что добавление водорода при постоянном содержании CO₂ снижает выбросы CO. Кроме того, эмиссия CO возрастает с увеличением разбавления диоксидом CO₂ при постоянном содержании H₂. Это связано с тем, что добавление CO₂ в пламя метан/воздух снижает его температуру из-за уменьшения концентрации реагентов в зоне реакции.

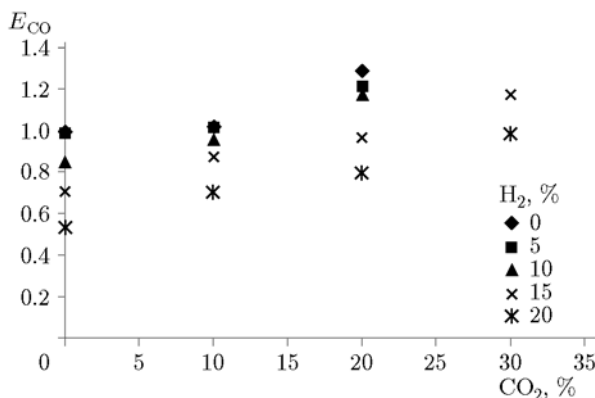


Рис. 9. Эмиссия монооксида углерода в зависимости от объемной доли водорода и разбавления CO₂

2.4. Численная валидация

На рис. 10 представлены экспериментальные и численные осевые профили продольной скорости для трех конфигураций экспериментов: ($H_2 = 0$, $CO_2 = 0$), ($H_2 = 20\%$, $CO_2 = 0$) и ($H_2 = 10\%$, $CO_2 = 10\%$). Из их сравнения видно, что экспериментальные осевые профили продольных скоростей правильно воспроизводятся численным моделированием с максимальной ошибкой 4 % при максимальном значении скорости.

На рис. 11 показана турбулентная кинетическая энергия k вдоль центральной оси потока биогитана для трех рассматриваемых конфигураций экспериментов. Наблюдается разумное согласие между тенденциями численного моделирования и данными эксперимента. Количественные различия усиливаются по сравнению со случаем «без реагирования» из-за больших изменений плотности, вызванных тепловой сгорания.

2.5. Параметры турбулентности

2.5.1. Масштабы турбулентности

Интегральный масштаб L_f характеризует размер самых больших вихрей. Он выражается как функция турбулентной кинетической энергии k , поскольку большие структуры несут основную часть энергии k и скорости диссипации ε независимо от вязкости:

$$L_t = k^{3/2} / \varepsilon. \quad (5)$$

На рис. 12 представлена радиальная зависимость интегрального масштаба турбулентности реагирующих потоков на высоте $Z = 10$ и 100 мм для исследуемых конфигураций экспериментов ($H_2 = 0$, $CO_2 = 0$), ($H_2 = 20\%$, $CO_2 = 0$) и ($H_2 = 10\%$, $CO_2 = 10\%$). Из этой зависимости можно сделать вывод, что при добавлении водорода температура в струе увеличивается, вязкость возрастает, что приводит к повышению скорости диссипации и уменьшению интегрального масштаба. При добавлении CO₂ интегральный масштаб увеличивается из-за высокой плотности CO₂. Интегральный масштаб имеет порядок размера турбулентного потока. Это означает, что турбулентное перемешивание коррелирует с масштабом системы.

Турбулентные течения характеризуются наличием множества вихрей разного размера.

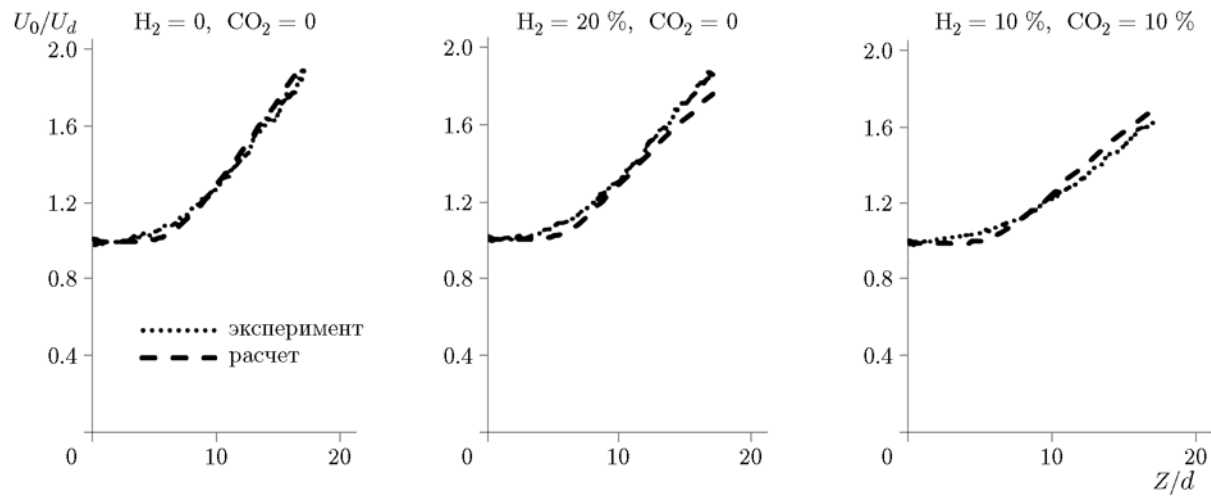


Рис. 10. Нормированная средняя продольная скорость по оси струи в реагирующем потоке

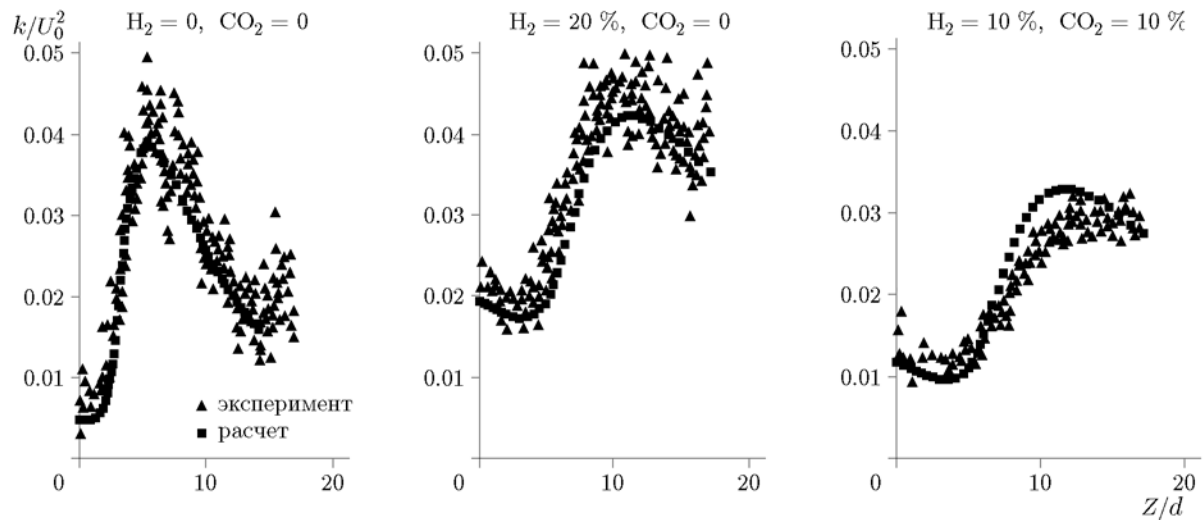
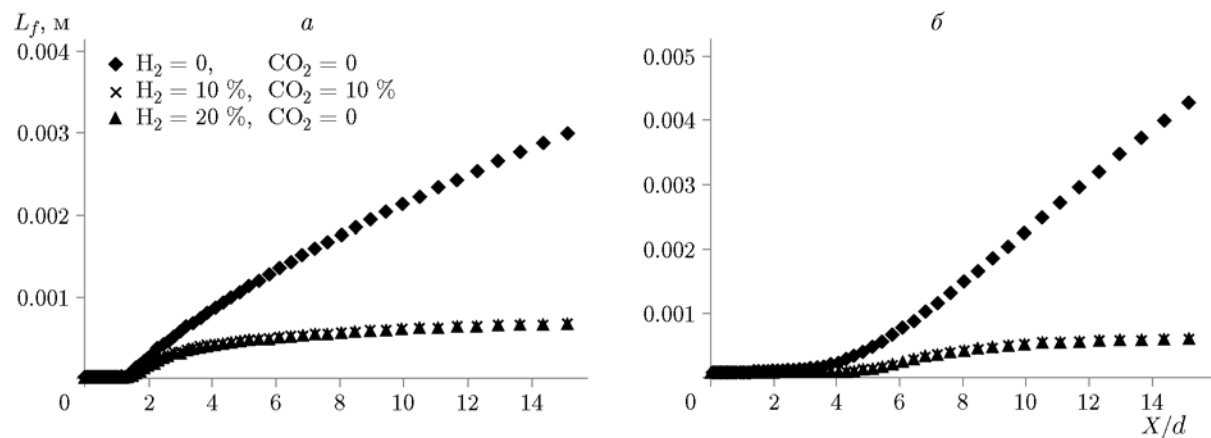


Рис. 11. Нормированная турбулентная кинетическая энергия вдоль центральной линии струи биогитана в реагирующем потоке

Рис. 12. Радиальные профили интегрального масштаба на высоте от среза горелки $Z = 10$ (а), 100 мм (б) в реагирующем потоке

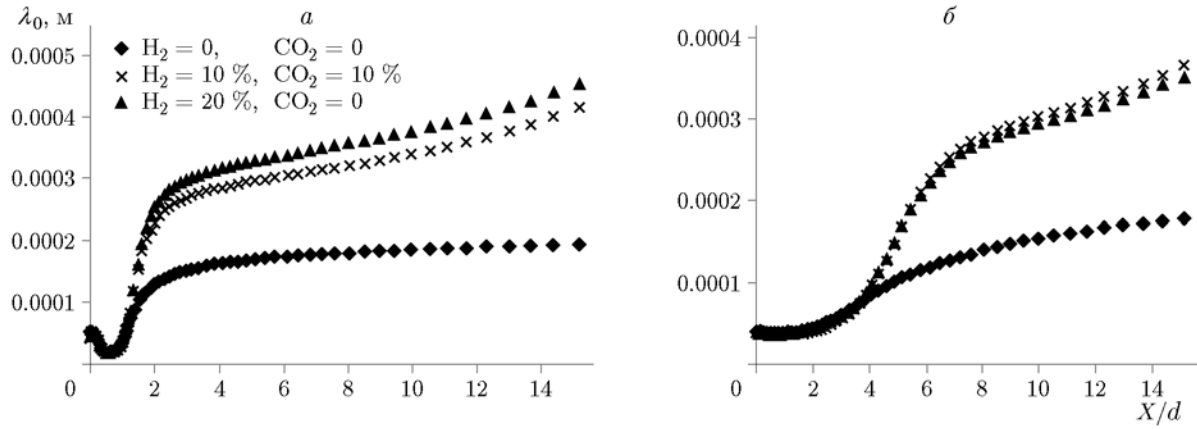


Рис. 13. Радиальные профили масштаба Колмогорова на высоте от среза горелки $Z = 10$ (а), 100 мм (б) в реагирующем потоке

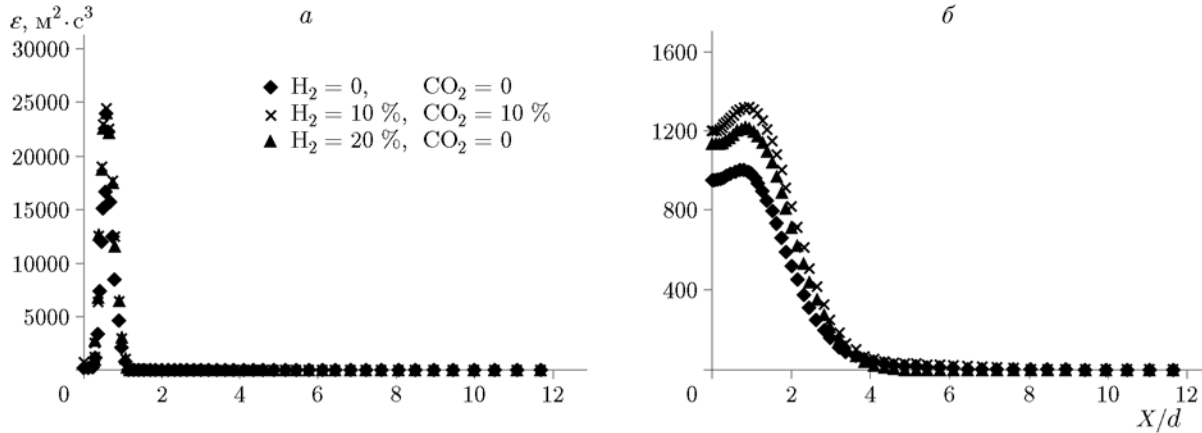


Рис. 14. Радиальные профили скорости диссипации на высоте $Z = 10$ (а), 100 мм (б) в реагирующем потоке

Это связано с тем, что при больших числах Рейнольдса большие вихри разделяются на более мелкие, которые, в свою очередь, разделяются на еще более мелкие вихри. Процесс продолжается до перевеса сил, рассеивающих более мелкие вихри. Этот вихревой каскад вводится теорией Колмогорова для однородной и изотропной турбулентности [33].

Масштаб Колмогорова λ_0 характеризует размер мельчайших структур, в которых вязкая диссипация становится очень важной. В этом масштабе преобладают вязкие силы, они преобразуют кинетическую энергию мельчайших вихрей в тепловую. Масштаб Колмогорова можно выразить как функцию скорости диссипации и вязкости независимо от волнового числа:

$$\lambda_0 = (\nu^3/\varepsilon)^{1/4}. \quad (6)$$

На рис. 13 показана радиальная зависимость масштаба Колмогорова на высоте от среза горелки $Z = 10$ и 100 мм для тех же конфигураций экспериментов, что и на рис. 12. Видно, что при добавлении водорода большие структуры уменьшаются до тех пор, пока не исчезнут совсем, что позволяет развиваться маленьким структурам и увеличивает масштаб Колмогорова.

2.5.2. Скорость диссипации

На рис. 14 представлено радиальное изменение скорости рассеяния кинетической энергии турбулентности на высоте от среза горелки $Z = 10$ и 100 мм для тех же конфигура-

ций экспериментов, что рассматривались выше. Для всех трех составов пламен скорость рассеяния увеличивается до максимума, а затем уменьшается. Большие структуры увеличиваются, затем они уменьшаются, давая развитие малым структурам.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведено экспериментальное и численное исследование реагирующих потоков в цилиндрической горелке с биогитаном (смесь ПГ— H_2 — CO_2) в зависимости от добавления водорода и разбавления углекислым газом.

Метод PIV позволяет получать мгновенные двумерные поля скорости газа и их пульсации. Результаты показали, что горение снижает унос окружающего газа, увеличивает вязкость и ускоряет поток, что приводит к возрастанию продольной скорости вдоль струи топлива. Эти эффекты становятся все более важными с добавлением водорода в топливо благодаря увеличению скорости тепловыделения. При разбавлении диоксидом CO_2 нормированная максимальная скорость ($U_{\max}/U_0$) уменьшается только на 4 % на трех высотах над срезом горелки. Исследование среднеквадратичных значений пульсаций компонентов скорости U'_x и U'_z показывает, что добавление углекислого газа снижает высокие колебания из-за большей плотности струи и уменьшает унос окружающего воздуха. Следует отметить, что нормированная среднеквадратичная пульсация продольной скорости U'_z/U_0 возрастает с добавлением водорода из-за его низкой плотности. Кроме того, показано, что добавление водорода повышает температуру пламени, что увеличивает и вязкость. В результате происходит увеличение скорости рассеяния и снижение интегрального масштаба турбулентности. Горение топлива с добавкой CO_2 уменьшает интегральный масштаб из-за более высокой плотности струи.

ЛИТЕРАТУРА

1. Choudhuri A. R., Gollahalli S. R. Combustion characteristics of hydrogen — hydrocarbon hybrid fuels // *Int. J. Hydrogen Energy*. — 2000. — V. 25, N 5. — P. 451–462. — DOI: 10.1016/S0360-3199(99)00027-0.
2. Choudhuri A. R., Gollahalli S. R. Characteristics of hydrogen — hydrocarbon composite fuel turbulent jet flames // *Int. J. Hydrogen Energy*. — 2003. — V. 28, N 4. — P. 445–454. — DOI: 10.1016/S0360-3199(02)00063-0.
3. El-Ghafour S. A. A., El-Dein A. H. E., Aref A. A. R. Combustion characteristics of natural gas — hydrogen hybrid fuel turbulent diffusion flame // *Int. J. Hydrogen Energy*. — 2010. — V. 35, N 6. — P. 2556–2565. — DOI: 10.1016/j.ijhydene.2009.12.049.
4. Ilbas M., Crayford A. P., Yilmaz I., Bowen P. J., Syred N. Laminar-burning velocities of hydrogen-air and hydrogen-methane-air mixtures: An experimental study // *Int. J. Hydrogen Energy*. — 2006. — V. 31, N 12. — P. 1768–1779. — DOI: 10.1016/j.ijhydene.2005.12.007.
5. Kumar P., Mishra D. P. Experimental investigation of laminar LPG— H_2 jet diffusion flame // *Int. J. Hydrogen Energy*. — 2008. — V. 33, N 1. — P. 225–231. — DOI: 10.1016/j.ijhydene.2007.09.023.
6. Yon S., Sautet J. C. Flame lift-off height, velocity flow and mixing of hythane in oxy-combustion in a burner with two separated jets // *Appl. Therm. Eng.* — 2012. — V. 32. — P. 83–92. — DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2011.08.033.
7. Takahashi F., Linteris G. T., Katta V. R. Extinguishment mechanisms of coflow diffusion flames in a cup-burner apparatus // *Proc. Combust. Inst.* — 2007. — V. 31, N 2. — P. 2721–2729. — DOI: 10.1016/j.proci.2006.08.112.
8. Takahashi F., Linteris G. T., Katta V. R. Extinguishment of methane diffusion flames by carbon dioxide in coflow air and oxygen-enriched microgravity environments // *Combust. Flame*. — 2008. — V. 155, N 1-2. — P. 37–53. — DOI: 10.1016/j.combustflame.2008.03.005.
9. Oh K. C., Shin H. D. The effect of oxygen and carbon dioxide concentration on soot formation in non-premixed flames // *Fuel*. — 2006. — V. 85, N 5-6. — P. 615–624. — DOI: 10.1016/j.fuel.2005.08.018.
10. Guo H. S., Liu F. S., Smallwood G. J., Gülder Ö. L. A numerical study of the influence of transport properties of inert diluents on soot formation in a coflow laminar ethylene/air diffusion flame // *Proc. Combust. Inst.* — 2002. — V. 29, N 2. — P. 2359–2365. — DOI: 10.1016/S1540-7489(02)80287-5.
11. Lock A., Briones A. M., Aggarwal S. K., Puri I. K., Hegde U. Liftoff and extinction characteristics of fuel- and air-stream-diluted methane — air flames // *Combust. Flame*. — 2007. — V. 149, N 4. — P. 340–352. — DOI: 10.1016/j.combustflame.2007.02.007.
12. Lock A., Aggarwal S. K., Puri I. K., Hegde U. Suppression of fuel and air stream diluted methane — air partially premixed flames in normal and microgravity // *Fire Saf. J.* — 2008. — V. 43, N 1. — P. 24–35. — DOI: 10.1016/j.firesaf.2007.02.004.
13. Lock A., Aggarwal S. K., Puri I. K. Effect of fuel type on the extinction of fuel and air stream

- diluted partially premixed flames // *Proc. Combust. Inst.* — 2009. — V. 32, N 2. — P. 2583–2590. — DOI: 10.1016/j.proci.2008.05.031.
14. **Katta V. R., Takahashi F., Linteris G. T.** Suppression of cup-burner flames using carbon dioxide in microgravity // *Combust. Flame.* — 2004. — V. 137, N 4. — P. 506–522. — DOI: 10.1016/j.combustflame.2004.01.015.
 15. **Sidebotham G. W., Glassman I.** Flame temperature, fuel structure and fuel concentration effects on soot formation in inverse diffusion flames // *Combust. Flame.* — 1992. — V. 90, N 3-4. — P. 269–272. — DOI: 10.1016/0010-2180(92)90088-7.
 16. **Gülnder Ö. L., Snelling D. R.** Influence of nitrogen dilution and flame temperature on soot formation in diffusion flames // *Combust. Flame.* — 1993. — V. 92, N 1-2. — P. 115–124. — DOI: 10.1016/0010-2180(93)90202-E.
 17. **Park J., Hwang D.-J., Choi J.-G., Lee K.-M., Keel S.-I., Shim S.-H.** Chemical effects of CO₂ addition to oxidizer and fuel streams on flame structure in H₂–O₂ counterflow diffusion flame // *Int. J. Energy Res.* — 2003. — V. 27, N 13. — P. 1205–1220. — DOI: 10.1002/er.946.
 18. **Liu F. S., Guo H. S., Smallwood G. J.** The chemical effect of CO₂ replacement of N₂ in air on the burning velocity of CH₄ and H₂ premixed flames // *Combust. Flame.* — 2003. — V. 133, N 4. — P. 495–497. — DOI: 10.1016/S0010-2180(03)00019-1.
 19. **Du D. X., Axelbaum R. L., Law C. K.** Soot formation in strained diffusion flames with gaseous additives // *Combust. Flame.* — 1995. — V. 102, N 1-2. — P. 11–20. — DOI: 10.1016/0010-2180(95)00043-6.
 20. **Liu F. S., Guo H. S., Smallwood G. J., Gülnder Ö. L.** The chemical effects of carbon dioxide as an additive in an ethylene diffusion flame: Implications for soot and NO_x formation // *Combust. Flame.* — 2001. — V. 125, N 1-2. — P. 778–787. — DOI: 10.1016/S0010-2180(00)00241-8.
 21. **Min J., Baillet F., Guo H., Domingues E., Talbaut M., Patte-Rouland B.** Impact of CO₂, N₂ or Ar diluted in air on the length and lifting behavior of a laminar diffusion flame // *Proc. Combust. Inst.* — 2011. — V. 33, N 1. — P. 1071–1078. — DOI: 10.1016/j.proci.2010.06.100.
 22. **Dally B. B., Riesmeier E., Peters N.** Effect of fuel mixture on moderate and intense low oxygen dilution combustion // *Combust. Flame.* — 2004. — V. 137, N 4. — P. 418–431. — DOI: 10.1016/j.combustflame.2004.02.011.
 23. **Launder B. E., Spalding D. B.** The numerical computation of turbulent flows // *Comput. Meth. Appl. Mech. Eng.* — 1974. — V. 3, N 2. — P. 267–289. — DOI: 10.1016/0045-7825(74)90029-2.
 24. **Magnussen B. F., Hjertager B. H.** On mathematical modeling of turbulent combustion with special emphasis on soot formation and combustion // *Symp. (Int.) Combust.* — 1976. — V. 16, N 1. — P. 719–729. — DOI: 10.1016/S0082-0784(77)80366-4.
 25. **Vanquickenborne L., van Tiggelen A.** The stabilization mechanism of lifted diffusion flames // *Combust. Flame.* — 1966. — V. 10, N 1. — P. 59–69. — DOI: 10.1016/0010-2180(66)90028-9.
 26. **Han P., Checkel M. D., Fleck B. A., Nowicki N. L.** Burning velocity of methane/diluent mixture with reformer gas addition // *Fuel.* — 2007. — V. 86, N 4. — P. 585–596. — DOI: 10.1016/j.fuel.2006.08.011.
 27. **Hermanns R. T. E., Konnov A. A., Bastiaans R. J. M., de Goey L. P. H., Lucka K., Köhne H.** Effects of temperature and composition on the laminar burning velocity of CH₄ + H₂ + O₂ + N₂ flames // *Fuel.* — 2010. — V. 89, N 1. — P. 114–121. — DOI: 10.1016/j.fuel.2009.08.010.
 28. **Briones A. M., Aggarwal S. K., Katta V. R.** A numerical investigation of flame liftoff, stabilization, and blowout // *Phys. Fluids.* — 2006. — V. 18, N 4. — P. 740–764. — DOI: 10.1063/1.2191851.
 29. **Takahashi F., Linteris G. T., Katta V. R.** Vortex-coupled oscillations of edge diffusion flames in coflowing air with dilution // *Proc. Combust. Inst.* — 2007. — V. 31, N 1. — P. 1575–1582. — DOI: 10.1016/j.proci.2006.07.227.
 30. **Зельдович Я. Б.** Окисление азота при горении и взрывах // *Докл. АН СССР.* — 1946. — Т. 51, № 3. — С. 213–216.
 31. **Sautet J. C., Salentey L., Ditaranto M., Samaniego J. M.** Length of natural gas-oxygen non-premixed flames // *Combust. Sci. Technol.* — 2001. — V. 166, N 1. — P. 131–150. — DOI: 10.1080/00102200108907823.
 32. **Park J., Hwang D. J., Kim K. T., Lee S. B., Keel S. I.** Evaluation of chemical effects of added CO₂ according to flame location // *Int. J. Energy Res.* — 2004. — V. 28, N 6. — P. 551–565. — DOI: 10.1002/er.984.
 33. **Pope S. B.** *Turbulent Flows.* — 1st ed. — Cambridge Univ. Press, 2000.

Поступила в редакцию 23.03.2021.

После доработки 24.09.2021.

Принята к публикации 12.01.2022.