

ГАЗОДИНАМИЧЕСКАЯ СТАБИЛИЗАЦИЯ И ИНТЕНСИФИКАЦИЯ МАКРОКИНЕТИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ОКИСЛЕНИЯ МЕТАНА В ВЫСОКОЭНТАЛЬПИЙНОМ КИСЛОРОДСОДЕРЖАЮЩЕМ ПОТОКЕ

К.Ю. Арефьев

И.М. Гришин

В.С. Захаров

А.В. Никопоренко

arefyev@rambler.ru

maksimgv1327@gmail.com

zvs.aero@ya.ru

pvrtd@yandex.ru

ОИВТ РАН, Москва, Российская Федерация

Аннотация

Представлены результаты экспериментального исследования интенсификации и стабилизации макрокинетических процессов окисления (горения) метана в высокоэнтальпийном кислородсодержащем потоке внутри конечного по длине канала постоянного сечения. Представлены расчетные и экспериментальные данные по газодинамической интенсификации и стабилизации окисления метана в рециркуляционной зоне высокоэнтальпийного кислородсодержащего потока, образующейся за плохообтекаемым телом клиновидной формы. При расчетных и экспериментальных исследованиях рассмотрены различные конфигурации плохообтекаемых тел, отличающихся их числом и степенью загромождения канала постоянного сечения. Определена зависимость относительного времени пребывания газов в рециркуляционной зоне за плохообтекаемыми телами при различных конфигурациях. Рассмотрен диапазон значений начальных энтальпий высокоэнтальпийного кислородсодержащего потока 350...700 кДж/кг. Установлены закономерности влияния степени загромождения потока на завершенность физико-химических процессов в исследуемом канале. Проведено сравнение интенсивности окисления метана в высокоэнтальпийном кислородсодержащем потоке с газодинамической стабилизацией и без нее. Определен уровень нижнего предельного значения коэффициента избытка

Ключевые слова

Окислительно-восстановительные реакции, метан, кислородсодержащий поток, диффузионный режим горения, кинетический режим горения, эксперимент

горючего, соответствующего стабильному воспламенению и горению метана. Полученные данные указывают на интенсификацию диффузионно-кинетических режимов окисления метана и позволяют оценить факторы, лимитирующие завершенность физико-химических процессов

Поступила 12.11.2022

Принята 30.11.2022

© Автор(ы), 2023

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России (проект № 075-15-2020-806 от 29.09.2020)

Введение. Согласно исследованиям, в частности [1–3], одними из перспективных топлив для энергетической, технологической и транспортной отраслей промышленности являются метан (CH_4) и природный газ. Применение метана и природного газа обусловлено их высокой энергоемкостью, относительно низкой стоимостью, наличием большого количества сырья и возможностью минимизации загрязнения окружающей среды по сравнению с другими углеводородными топливами. Еще одно преимущество — в продуктах окисления метана достигается высокое отношение массовой доли паров воды к массовой доле диоксида углерода $g_{\text{H}_2\text{O}}/g_{\text{CO}_2}$, что является позитивным фактором для снижения сажеобразования на элементах энергосиловых установок по сравнению с применением других углеводородов в качестве топлива. Однако обеспечение эффективного и устойчивого окисления метана в камерах энергосиловых установок является сложной научно-технической задачей [4–6] ввиду низкой скорости его окисления [6–8] и узкого концентрационного диапазона воспламенения метана CH_4 в воздухе [8–10].

Для поиска методов организации эффективного окисления метана CH_4 проводятся фундаментальные исследования химической и физической интенсификации диффузионных и кинетических процессов при взаимодействии метана с кислородсодержащими потоками. Одним из эффективных методов химической интенсификации окислительно-восстановительных реакций в метан-воздушной смеси является добавление более активных компонентов, например, водорода или этилена. Результаты исследований [11–20] показывают, что добавление водорода позволяет сократить протяженность реакционной зоны и повысить интенсивность окисления метана вследствие увеличения скорости химических реакций. Отмечено, что увеличение доли водорода приводило к росту концентрации радикала OH и к снижению радикалов CO и NO_x в продуктах окисления. Добавление $\sim 40\%$ водорода (по объему) позволяет повысить коэффициент завершенности физико-химических реакций примерно

на 20 % [12, 13]. Согласно [16, 17], сопутствующая добавлению водорода турбулизация потока повышает среднюю скорость распространения пламени в многокомпонентной среде. Эффекты возникновения термодиффузионной неустойчивости, а также увеличения реакционной способности смеси при добавлении водорода в турбулентный поток подтверждены численным моделированием [18]. Аналогичные эффекты могут быть получены и при добавлении к метану этилена [21–23], однако смеси метана с этиленом обладают меньшей детонационной способностью. Одновременно, согласно [24, 25], обнаружено значительное ускорение распространения пламени путем дополнительного импульсного вложения энергии вблизи фронта горения, что является причиной быстрого перехода к детонации в газообразной горючей смеси.

Одним из методов физической интенсификации горения метана является организация вихревых зон [26–28]. Реализуемые в специальных нишах, за уступами или за плохообтекаемыми телами, вихревые зоны позволяют увеличить время пребывания смеси в локализованной области, что обеспечивает газодинамическую интенсификацию и стабилизацию окисления (горения).

Газодинамическая стабилизация окисления (горения) предварительно подготовленной смеси метана с воздухом в свободном пространстве посредством расположения в потоке плохообтекаемого тела обеспечивает увеличение скорости, при которой происходит срыв пламени более чем в 2 раза. По мере изменения скорости потока может происходить M-V трансформация пламени. Условия, при которых происходят трансформации или срыв пламени, зависят от геометрической конфигурации стабилизирующего тела, соотношения компонентов смеси и воздействия внешних полей (гравитационного, акустического [29], электрического). Следует учитывать, что, согласно результатам исследования [30–32], нестационарные вихревые зоны могут увеличить газодинамические потери и в некоторых случаях стать причиной развития вибрационного горения.

Следует отметить, что одним из наиболее технологичных способов интенсификации горения топлива является предварительный нагрев окислителя [33], который может быть осуществлен в специальных теплообменниках. Учитывая низкую реакционную способность, нагрев (повышение энтальпии) окислителя может значительно улучшить эффективность горения метана. На данный момент на практике энтальпия окислителя зачастую ограничена — около 700 кДж/кг, что определяется максимально допустимой температурой нагрева в известных промышленных и технологических теплообменниках. Положительное влияние

температуры на интенсивность и стабильность горения продемонстрировано в [34], но полученные данные справедливы для значений энтальпии более 1500 кДж/кг.

Большое число экспериментов по горению метана при повышенных значениях энтальпии проведено в малоразмерных лабораторных установках [35, 36]. Некоторые из представленных данных получены при горении метана в присутствии паров воды или других ингибирующих добавок, что необходимо учитывать при их анализе. Данные, полученные в малоразмерных лабораторных установках, имеют ограниченное применение в силу отличия моделируемых параметров смешения и турбулентности от натуральных значений. Некоторые исследования влияния энтальпии воздуха на горение метана в условиях, максимально приближенных к натурным, представлены в [36–42]. В частности, в [42] исследованы вопросы горения метана в короткой камере сгорания при параметрах воздушного потока на входе, соответствующих числу Маха $M = 2$, полному давлению $p = 3,6 \dots 7,6$ бар, температуре торможения воздуха $T_v^* = 690 \dots 910$ К. Исследованная в [42] конфигурация камеры сгорания, система инъекции метана и режимы горения имеют специфические особенности, связанные с организацией неравномерного сверхзвукового течения на входе, нагревом метана (до 880 К), газодинамическим дросселированием течения и организацией стабилизации горения за уступами. Отрывочные данные по установлению дефлаграционного и детонационного режимов горения метана при высоких значениях температуры окислителя представлены в [43–45].

Несмотря на большое число публикаций, на данный момент можно отметить недостаточный объем расчетно-экспериментальных данных по газодинамической интенсификации и стабилизации макрокинетических процессов, происходящих при окислении метана в кислородсодержащем потоке с энтальпией, обеспечиваемой потенциальными возможностями нагрева в технологических теплообменниках.

Учитывая изложенное, *цель настоящей работы* — проведение параметрических расчетно-экспериментальных исследований газодинамической интенсификации и стабилизации горения, проведение анализа полученных данных для выявления закономерностей окисления метана в высокоэнтальпийном (энтальпия до 700 кДж/кг) кислородсодержащем потоке (ВКП).

Экспериментальная установка и методика обработки данных. Учитывая многостадийность физических и химических процессов, исследо-

вание окисления метана в ВКП может быть выполнено в канале постоянного сечения [46, 47]. Эксперименты проведены на установке, схема которой представлена на рис. 1.

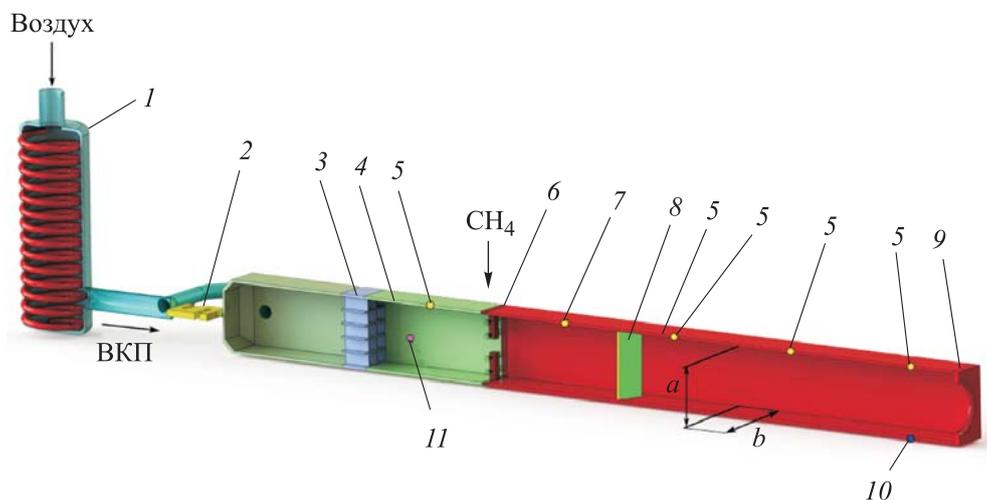


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

Установка состоит из теплообменного аппарата 1, спрямляющего элемента 3, переходной секции 4, пилонов подачи метана 6, газодинамических стабилизаторов 7, канала постоянного сечения 8, дросселирующего устройства 9 и датчика продольной силы 2. В установке предусмотрены пять тензометрических датчиков давления 5, пьезоэлектрический датчик давления для регистрации быстропротекающих процессов 10 и датчик температуры 11 для определения энтальпии ВКП.

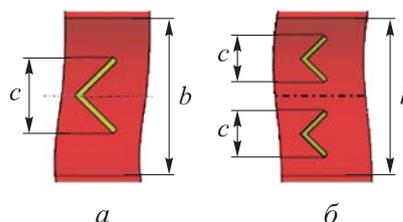
Принцип действия экспериментальной установки заключается в следующем. Кислородсодержащий поток (воздух), проходя по тракту теплообменного аппарата омического типа, нагревается до требуемых значений энтальпии. После теплообменного аппарата ВКП проходит через спрямляющий элемент и переходную секцию для обеспечения равномерности полей скорости, давления, температуры и нормирования параметров турбулентности на входе в канал постоянного сечения. Спрямляющий элемент выполнен по принципу сотовой решетки (хонейкомба) с характерным поперечным размером ячейки 5 мм и длиной 20 мм.

Канал 8 имеет поперечное сечение площадью $a \times b = 0,01 \text{ м}^2$ и десятикратное относительное удлинение. На входе в канал установлены конструктивные элементы (пилоны) с топливными инжекторами диаметром около 0,8 мм, распределенными равномерно по сечению канала. Относи-

тельное число инжекторов соответствует значению 1600 м^{-2} . Через инжекторы подается метан, который смешивается и вступает в химические реакции с ВКП. Иницирование химических реакций осуществляется с использованием электроискровой свечи.

Основная особенность рассматриваемой экспериментальной установки (по сравнению с установкой, описанной в [48]) — наличие газодинамических стабилизаторов, которые расположены на расстоянии около 200 мм от топливных инжекторов по направлению движения ВКП. В качестве газодинамических стабилизаторов использованы плохообтекаемые тела, поперечное сечение которых показано на рис. 2. В экспериментальной установке предусмотрена возможность размещения в качестве газодинамического стабилизатора одного или двух плохообтекаемых тел.

Рис. 2. Геометрические конфигурации газодинамических стабилизаторов при установке одного (а) и двух (б) плохообтекаемых тел



Поперечные размеры стабилизаторов позволяют локально изменять площадь канала и обеспечивать степень загромождения $\Psi = 20...60 \%$ относительно площади проходного сечения канала. Исследуемые конфигурации стабилизаторов приведены в таблице (N — число плохообтекаемых тел). Угол заострения плохообтекаемых тел 90° . В случае установки двух плохообтекаемых тел зазор между ними составляет $d = b/2 - c$ (см. рис. 2).

Конфигурации газодинамических стабилизаторов

Параметр	Номер конфигурации						
	1	2	3	4	5	6	7
c/b	0,20	0,30	0,40	0,60	0,15	0,20	0,30
N	1				2		
$\Psi, \%$	20	30	40	60	30	40	60

На выходе из канала установлено дросселирующее устройство с эквивалентной площадью проходного сечения $3,9 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$, необходимое для обеспечения требуемых скорости и давления в канале постоянного

сечения. Создаваемая за счет выходного импульса потока продуктов окисления метана с ВКП сила регистрируется датчиком.

Регистрация статического давления осуществлялась тензометрическими датчиками с частотой опроса 100 Гц. Погрешность измерения составляет не более $\pm 0,25$ % верхнего предела измерения. Для измерения пульсаций давления использованы высокочастотные пьезоэлектрические датчики с рабочим диапазоном частот до 200 кГц. Сигнал с датчиков поступал на вход регистратора-анализатора, который позволяет в реальном времени осуществлять измерения и экспресс-анализ пульсаций давления. Регистрация сигналов пульсаций давления проведена при частоте опроса $\sim 13,5$ кГц, что позволяло проводить частотный анализ в диапазоне 0...6,75 кГц.

Один из наиболее значимых показателей эффективности рабочего процесса — коэффициент завершенности физико-химических реакций η [49]. С учетом этого важным аспектом исследования окисления метана в канале постоянного сечения является косвенное измерение коэффициента η . В настоящей работе использован подход, ранее достаточно подробно описанный в [47].

В канал постоянного сечения поступает ВКП с массовым расходом G_a и метан с массовым расходом G_f . Массовые доли компонентов связаны с коэффициентом завершенности физико-химических процессов η в соответствии со следующими уравнениями:

$$g_{pc} = \frac{\varphi^{1-\gamma}(1+L_0)\eta}{\varphi+L_0}; \quad g_f = \frac{\varphi - \varphi^{1-\gamma}\eta}{\varphi+L_0}; \quad g_a = \frac{L_0 - L_0\varphi^{1-\gamma}\eta}{\varphi+L_0},$$

где g_a, g_f, g_{pc} — массовые доли ВКП, метана и продуктов окисления; L_0 — стехиометрическое соотношение компонентов; $\varphi = (L_0 G_f) / G_a$ — коэффициент избытка топлива. Показатель γ принимается равным:

$$\gamma = \begin{cases} 1, & \varphi > 1, \\ 0, & \varphi \leq 1. \end{cases}$$

Расчетная зависимость действующей на экспериментальную установку силы от коэффициента η определялась решением уравнений сохранения энергии, импульса и массы для смеси ВКП, метана и продуктов окисления с соответствующими массовыми долями g_a, g_f, g_{pc} .

Сопоставление расчетных и экспериментальных значений силы, действующей на экспериментальную установку, позволяет определить коэффициент завершенности физико-химических реакций.

Расчеты течения в проточном тракте экспериментальной установки. Для анализа характеристик течения в проточном тракте экспериментальной установки при размещении в нем газодинамических стабилизаторов различной геометрической конфигурации проведено численное моделирование. Проведенные расчеты газовой динамики основаны на решении осредненной по Фавру системы нестационарных уравнений Навье — Стокса (сохранения массы, импульса и энергии) для теплопроводного вязкого газа с зависящими от температуры теплофизическими свойствами. Система замыкается уравнением состояния идеального газа и модели турбулентности $k-\omega$ SST [50].

В качестве граничных условий заданы термодинамические параметры на входе в канал (за спрямляющим элементом) и давление в выходном сечении расчетной области. Стенки приняты адиабатическими. Моделирование проведено с использованием неструктурированных тетрагональных расчетных сеток с числом ячеек более 2 млн.

Расчетная структура течения для различных геометрических конфигураций представлена на рис. 3. Для примера показаны линии тока в плоскости симметрии, окрашенные в цвет скорости потока. Данные приведены для полной энтальпии потока $H = 700$ кДж/кг. Наличие газодинамического стабилизатора приводит к возникновению рециркуляционной зоны в следе за ним. Для рассматриваемых условий длина L рециркуляционной зоны значительно зависит от поперечного размера стабилизатора.

Наличие рециркуляционной зоны приводит к локальному снижению статического давления в проточном тракте, начиная с сечения установки газодинамических стабилизаторов ($x / x_{\max} = 0,2$). С ростом степени загромождения проточного тракта газодинамическим стабилизатором статическое давление снижается интенсивнее. Так, при $\Psi = 30$ % минимальное значение статического давления p составляет около 90 % полного давления на входе p_0 , а при $\Psi = 60$ % — около 70 % p_0 . Характерные распределения относительного статического давления p/p_{01} приведены на рис. 4 (p — осредненное для сечения с рассматриваемой продольной координатой x статическое давление на стенке канала; p_{01} — полное давление потока на входе в канал; x — продольная координата, отсчитываемая от области инъекции метана; x_{\max} — максимальная длина канала). Для рассматриваемого случая увеличение числа плохообтекаемых тел в газодинамическом стабилизаторе приводит к уменьшению длины зоны с пониженным статическим давлением, что является следствием уменьшения длины рециркуляционной зоны.

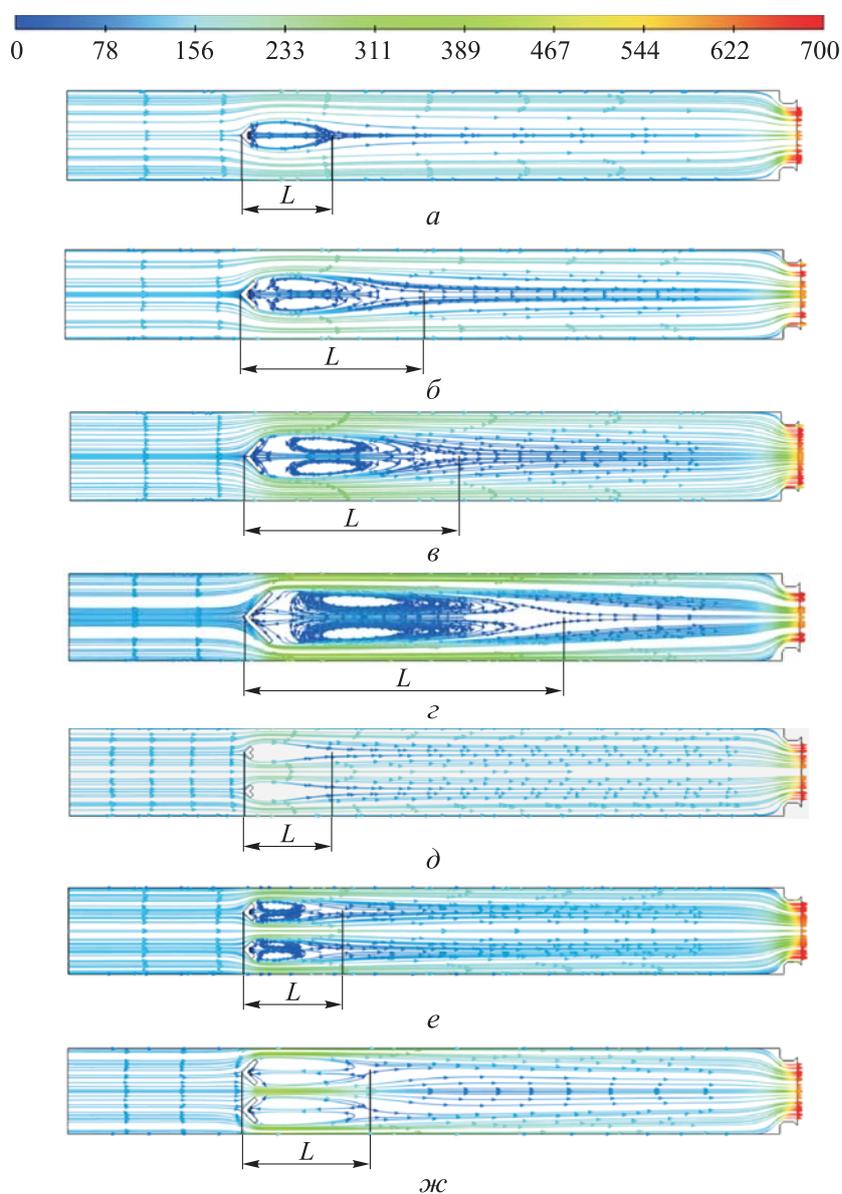


Рис. 3. Структура течения в плоскости симметрии для конфигураций №№ 1–7 (а–ж)

Для анализа влияния газодинамического стабилизатора на структуру и параметры течения введем две относительные величины: 1) коэффициент восстановления полного давления $\sigma = p_{02} / p_{01}$; 2) относительное время пребывания газа в рециркуляционной зоне $t = t_{\text{рц}} / t_0$, p_{02} — полное давление потока в выходном сечении канала; t_0 — характерное время пребывания газов в канале без газодинамических стабилизаторов;

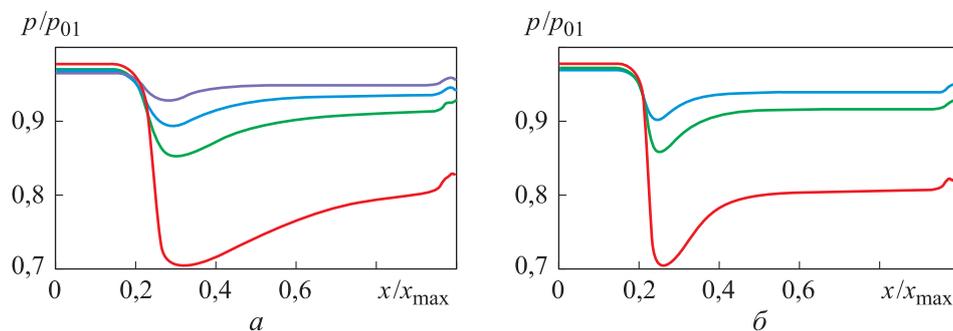


Рис. 4. Изменение относительного статического давления по длине канала для $\Psi = 20$ (—), 30 (—), 40 (—) и 60 % (—) при $N = 1$ (а) и $N = 2$ (б)

$t_{\text{рц}}$ — характерное время пребывания газа в рециркуляционной зоне. Здесь в качестве характерного времени пребывания газов в рециркуляционной зоне длиной L принята величина $t_{\text{рц}} = 2L / V_{\text{рц}}$, где $V_{\text{рц}}$ — осредненное по пространству значение модуля скорости в области рециркуляционной зоны. Зависимости σ и τ от степени загромождения Ψ приведены на рис. 5. Согласно проведенным расчетам, полученные значения σ и τ в рассматриваемом диапазоне значений параметров слабо зависят от полной энтальпии потока.

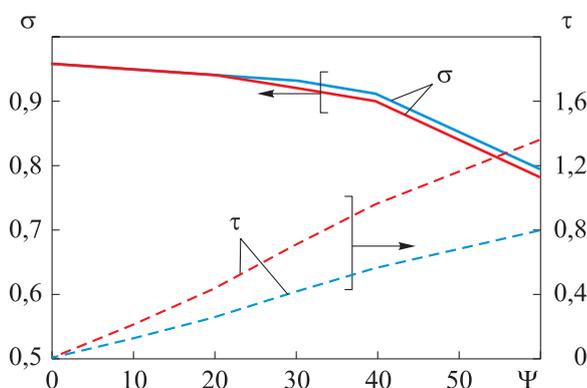


Рис. 5. Зависимости коэффициента σ и относительного времени τ от степени загромождения Ψ для $N = 1$ (—, ---), $N = 2$ (—, ---)

Расчетным путем получено, что увеличение степени загромождения проточного тракта Ψ приводит к возрастанию потерь полного давления в канале. Уровень потерь может составлять до 20 % ($\sigma \approx 0,8$) при степени загромождения $\Psi = 60$ %. Интенсивное падение σ наблюдается при $\Psi > 40$ %, что связано со значительным локальным повышением ско-

рости потока на периферии рециркуляционной зоны и увеличением L . Следует отметить, что при равной степени загромождения коэффициент восстановления полного давления σ слабо зависит от N .

С повышением степени Ψ наблюдается близкий к линейному рост относительного времени τ , что является следствием увеличения длины рециркуляционной зоны L . При этом для конфигураций при $N = 1$ относительное время τ на 60...70 % выше, чем для конфигураций при $N = 2$.

Далее полученные расчетные закономерности использованы при анализе экспериментальных данных.

Результаты экспериментов и их анализ. Экспериментальные исследования проведены для диапазона начальных полных энтальпий ВКП $H = 350...700$ кДж/кг. Выбраны четыре режима, для каждого из которых проведено варьирование коэффициента избытка топлива φ в диапазоне значений 0,5–1,0. Давление в канале постоянного сечения на каждом режиме не превышало 0,5 МПа, а расходонапряженность потока изменялась в узком диапазоне 130...140 кг/(с · м²) в зависимости от исследуемого режима.

Эксперименты проведены согласно циклограмме на рис. 6, где показана зависимость показания датчика продольной силы R от времени t .

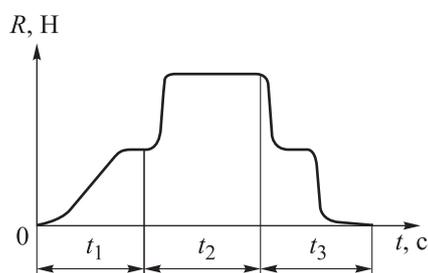


Рис. 6. Циклограмма эксперимента

На участке t_1 циклограммы эксперимента представлен выход экспериментальной установки на заданный режим — нагрев ВКП в теплообменном аппарате до заданной температуры. На участке t_2 осуществляется подача метана, который воспламеняется и сгорает в канале постоянного сечения, наблюдается резкий рост показания датчика продольной силы. На участке t_3

завершается подача метана и горение прекращается, что сопровождается резким снижением показания датчика продольной силы, после чего подача ВКП в экспериментальную установку прекращается.

Зависимость отношения измеренного статического давления к полному давлению на входе p_{01} в различных сечениях канала приведена на рис. 7. Графики представлены для геометрической конфигурации № 6. Следует отметить, что после воспламенения метана в ВКП экзотермичность процесса окисления метана приводит к повышению температуры газов. При этом для сохранения расходонапряженности ВКП происходит

повышение полного давления на входе в канал p_{01} . Статическое давление p возрастает практически пропорционально увеличению p_{01} , поэтому распределение относительного давления p/p_{01} (см. рис. 7) практически не изменяется. Повышение статического давления в канале происходит на 20...40 % относительно первоначального значения.

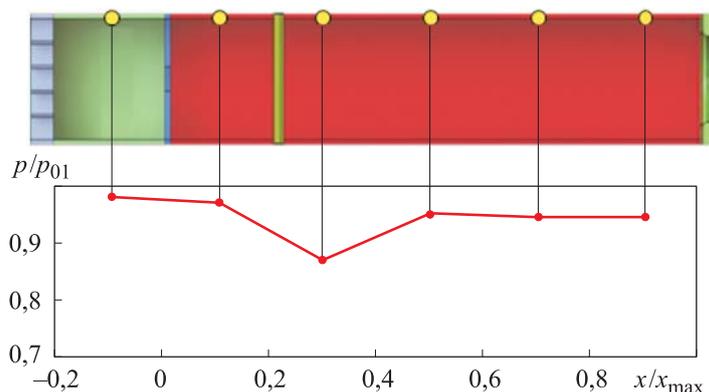


Рис. 7. Изменение относительного статического давления по длине канала

Сопоставление расчетных и экспериментальных данных показывает, что представленные на рис. 4 и 7 распределения относительного статического давления в проточном тракте удовлетворительно совпадают (различия не превышают 6 %). В соответствии с этим можно предположить о корректном моделировании газодинамической структуры течения в канале и адекватном прогнозировании длины рециркуляционной зоны и коэффициента восстановления полного давления.

Анализируя зарегистрированные распределения статического давления после воспламенения, можно предположить, что экзотермические реакции при окислении метана увеличивают длину рециркуляционной зоны до 40 %. Такое изменение связано с ростом скорости течения в канале при повышении температуры газов. Дозвуковая скорость течения в канале при постоянстве расходонапряженности пропорциональна $\sim \sqrt{T_0}$, где T_0 — реализуемая при горении температура газа.

По результатам проведенных экспериментов установлены зависимости коэффициента завершенности физико-химических процессов η от степени загромождения Ψ при различных значениях энтальпии потока и коэффициентах избытка горючего ϕ . Обобщенные данные представлены на рис. 8. Для рассмотренных случаев повышение степени загромождения приводит к росту коэффициента завершенности физико-химических реакций.

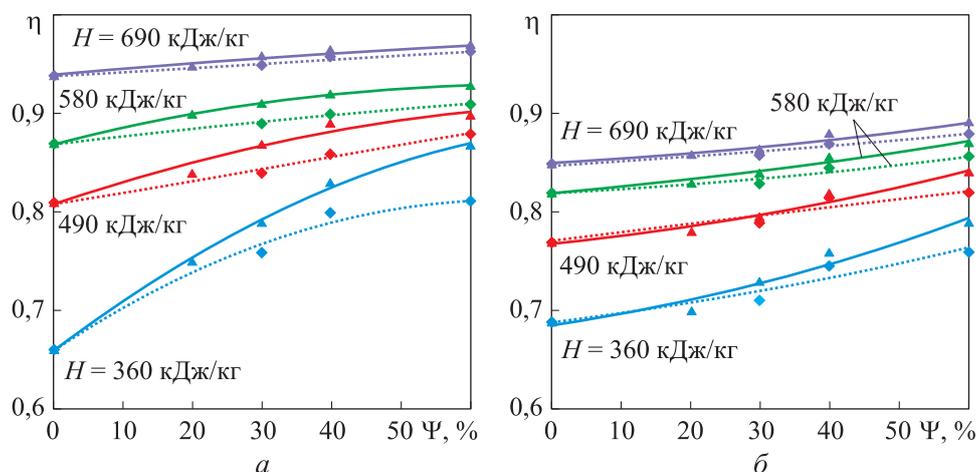


Рис. 8. Зависимости $\eta(\Psi)$ для газодинамических стабилизаторов с одним (сплошные линии) и двумя (штриховые линии) плохообтекаемыми телами для $\varphi = 0,5$ (а) и $\varphi = 1,0$ (б)

Для анализа влияния газодинамического стабилизатора на интенсивность макрокинетических процессов, соответствующих преимущественно кинетическому режиму окисления, рассмотрим режим при $\varphi = 0,5$ (рис. 8, а). Загромождение канала одним плохообтекаемым телом позволяет повысить коэффициент завершенности физико-химических реакций примерно в 1,3 раза до $\eta = 0,86$ (при $\Psi = 60\%$ и $H = 360$ кДж/кг) относительно случая без газодинамического стабилизатора ($\Psi = 0$). Установка двух плохообтекаемых тел при той же степени загромождения приводит к менее значительному повышению коэффициента η , чем при одном плохообтекаемом теле. Это связано с сокращением протяженности рециркуляционной зоны и уменьшением относительного времени t_{rc} . При росте энтальпии потока эффективность газодинамической стабилизации с позиции повышения коэффициента η нивелируется. Так, при $H = 690$ кДж/кг установка газодинамических стабилизаторов позволяет повысить η не более чем на 4...5%. Это является следствием повышения скорости реакций окисления метана и снижением влияния газодинамической интенсификации макрокинетических процессов.

Для диффузионного режима окисления (при $\varphi = 1$) наличие газодинамических стабилизаторов при энтальпиях потока $H \leq 490$ кДж/кг в меньшей степени влияет на коэффициент η , чем для кинетического режима. Это подтверждают данные, представленные на рис. 8, б. Для диффузионных режимов отмечено максимальное повышение η на 14%

при $\Psi = 60\%$, $H = 360$ кДж/кг (относительно конфигурации без газодинамических стабилизаторов). Однако более значимое, чем для кинетического режима, повышение η при $H = 580\dots 690$ кДж/кг указывает на некоторую интенсификацию турбулентного перемешивания при наличии протяженной рециркуляционной зоны.

Еще один положительный эффект газодинамической стабилизации — расширение концентрационного диапазона стабильного окисления метана [51, 52]. Зависимости нижнего концентрационного предела стабильного окисления метана в ВКП при различных значениях Ψ и H показаны на рис. 9. При рассмотренных условиях, соответствующих режимам, которые расположены выше кривых, представленных на рис. 9, наблюдается стабильное окисление метана в ВКП. На режимах, расположенных ниже этих кривых, отсутствует воспламенение смеси или окисление не стабильно. Согласно диаграмме на рис. 9, с увеличением Ψ и H расширяется диапазон стабильного окисления метана, причем предельное значение φ при стабилизации двумя плохообтекаемыми телами несколько выше, чем одним. Это также является следствием интенсивного воспламенения метана в рециркуляционной зоне потока, при этом стабильность горения повышается с ростом τ .

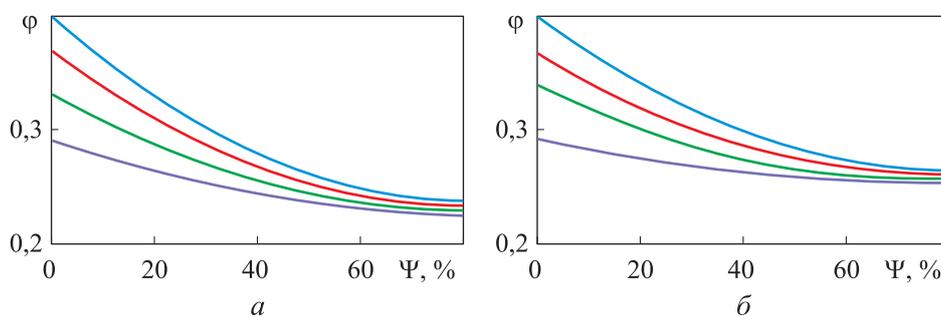


Рис. 9. Зависимости $\varphi(\Psi)$ для газодинамических стабилизаторов с одним (а) и двумя (б) плохообтекаемыми телами при $H = 360$ (—), 490 (—), 580 (—), 690 кДж/кг (—)

Подтверждение стабильности окисления проводилось с использованием анализа динамических процессов в канале постоянного сечения. Одними из основных экспериментально полученных параметров, по показанию которых можно сделать выводы о значениях амплитуды и частоты динамических процессов в канале постоянного сечения, являются временные реализации и спектры нестационарных сигналов давления, зарегистрированные во время эксперимента. Результаты анализа полу-

ченных данных могут дать новые знания о турбулентном горении метана и возникновении термоакустических неустойчивостей.

Для решения поставленных задач проведены измерения пульсаций давления в экспериментальной установке. Эксперименты показали, что амплитуды спектральных составляющих пульсаций статического давления газа Δp в канале в каждый момент времени имеют разные значения. Исследование динамических процессов может быть основано на анализе спектрограммы (рис. 10), которая характеризует зависимость амплитуды и частоты пульсаций в виде функции времени. Спектрограмма позволяет проследить последовательную трансформацию амплитуды и частоты пульсаций давления в каждый момент времени работы экспериментальной установки.

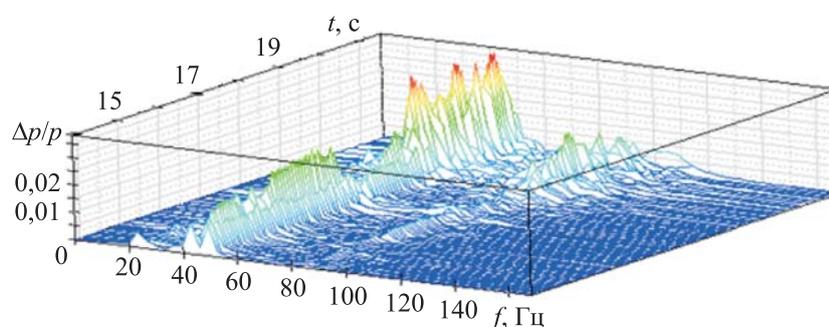


Рис. 10. Спектрограмма пульсаций давления в экспериментальной установке

Спектр сигнала пульсаций давления в экспериментальной установке при реализации горения содержит доминирующую дискретную составляющую на частоте $f \approx 43$ Гц. Относительная амплитуда пульсаций давления не превышает 3,2 %. Такой спектр сигнала может соответствовать двум различным колебательным процессам, вызванным процессом горения. В первом случае могут возникнуть незатухающие автоколебания [53], когда генерация колебательной энергии за счет процесса тепловыделения компенсируется ее диссипацией в объеме канала постоянного сечения, а также выносом акустической энергии через поверхности, ограничивающие объем канала. Развитие во времени такого колебательного процесса в канале постоянного сечения на частоте $f \approx 43$ Гц должно иметь вид гармонического сигнала с практически постоянной амплитудой. Во втором случае, когда подводимой энергии за счет процесса тепловыделения при реализации горения в канале постоянного сечения недостаточно для генерации гармонических колебаний постоянной амплитуды, реализация по времени сигнала пульсаций давления на частоте

$f \approx 43$ Гц должна представлять гармонический сигнал со случайно изменяющейся возрастающей и уменьшающейся амплитудой. Такой тип колебаний относится к узкополосному случайному процессу [54]. В результате максимальные значения суммарной относительной амплитуды пульсаций давления для экспериментально исследованных режимов не превышают 10 %. Это позволяет сделать вывод о том, что режимы окисления в канале постоянного сечения при φ выше предельных значений, показанных на рис. 9, являются устойчивыми [55].

Выводы. В результате расчетно-экспериментального исследования газодинамической интенсификации и стабилизации окисления метана в ВКП установлено следующее.

При увеличении степени загромождения проточного тракта уровень потерь полного давления в канале может составлять до 20 % ($\sigma \approx 0,8$) при степени загромождения $\Psi = 60$ %. Для рассматриваемой конфигурации канала при равной степени загромождения коэффициент восстановления полного давления σ слабо зависит от числа плохообтекаемых тел в газодинамическом стабилизаторе.

С повышением Ψ наблюдается близкий к линейному рост относительного времени τ пребывания газов в рециркуляционной зоне за плохообтекаемым телом. При этом для конфигураций с одним плохообтекаемым телом относительное время τ на 60...70 % выше, чем для конфигураций двумя плохообтекаемыми телами.

Загромождение канала одним плохообтекаемым телом позволяет повысить коэффициент завершенности физико-химических реакций, протекающих в кинетическом режиме, примерно в 1,3 раза до $\eta = 0,86$ (при $\varphi = 0,5$; $\Psi = 60$ % и $H = 360$ кДж/кг) относительно случая без газодинамического стабилизатора ($\Psi = 0$). Установка двух плохообтекаемых тел при той же степени загромождения приводит к менее значительному повышению коэффициента η , чем при одном плохообтекаемом теле. При диффузионном режиме горения наличие газодинамических стабилизаторов в меньшей степени влияет на коэффициент η , чем при кинетическом режиме.

Полученные значения нижнего предельного значения коэффициента избытка горючего, соответствующего стабильному воспламенению и горению метана, показывают, что наличие газодинамического стабилизатора расширяет в 2 раза концентрационный диапазон устойчивого горения метана. При стабильном горении максимальные относительные амплитуды пульсаций давления достигают 3,2 % и реализуются при частоте 43 Гц.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Urzay J. Supersonic combustion in air-breathing propulsion systems for hypersonic flight. *Annu. Rev. Fluid Mech.*, 2018, vol. 50, no. 1, pp. 593–627.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1146/annurev-fluid-122316-045217>
- [2] Tripathi G., Sharma P., Dhar A. Effect of methane augmentations on engine performance and emissions. *Alex. Eng. J.*, 2020, vol. 59, iss. 1, pp. 429–439.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aej.2020.01.012>
- [3] Agora Energiewende and Ember (2021): the European power sector in 2020: up-to-date analysis on the electricity transition.
Available at: <https://www.agora-energiewende.de/en/publications/the-european-power-sector-in-2020> (accessed: 15.12.2021).
- [4] Azatyan V.V. Chain nature of the combustion, explosion, and detonation of gases: new aspects of theory. *Russ. J. Phys. Chem. A*, 2015, vol. 89, pp. 1995–2005.
DOI: <https://doi.org/10.1134/S0036024415110035>
- [5] Kim N.J. Effect of an inlet temperature disturbance on the propagation of methane–air premixed flames in small tubes. *Combust. Flame*, 2009, vol. 156, iss. 7, pp. 1332–1338. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2009.02.004>
- [6] Cheng R.K., Oppenheim A.K. Autoignition in methane–hydrogen mixtures. *Combust. Flame*, 1984, vol. 58, iss. 2, pp. 125–139.
DOI: [https://doi.org/10.1016/0010-2180\(84\)90088-9](https://doi.org/10.1016/0010-2180(84)90088-9)
- [7] Vasil'ev A.A. Ignition delay in multifuel mixtures. *Combust. Explos. Shock Waves*, 2007, vol. 43, no. 3, pp. 282–285. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10573-007-0041-2>
- [8] Austin J.M., Shepherd J.E. Detonations in hydrocarbon fuel blends. *Combust. Flame*, 2003, vol. 132, iss. 1-2, pp. 73–90. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0010-2180\(02\)00422-4](https://doi.org/10.1016/S0010-2180(02)00422-4)
- [9] Vasil'ev A.A. Cell size as the main geometric parameter of multifront detonation wave. *J. Propuls. Power*, 2006, vol. 22, no. 6, pp. 1245–1260.
DOI: <https://doi.org/10.2514/1.20348>
- [10] Hernandez-Rivera R., Troiani G., Pagliaroli T., et al. Detection of the thermoacoustic combustion instabilities of a slot burner based on a diagonal-wise recurrence quantification. *Phys. Fluids*, 2019, vol. 31, iss. 12, art. 124105.
DOI: <https://doi.org/10.1063/1.5124015>
- [11] Schefer R.W., Wicksall D.M., Agrawal A.K. Combustion of hydrogen-enriched methane in a lean premixed swirl-stabilized burner. *Proc. Combust. Inst.*, 2002, vol. 29, iss. 1, pp. 843–851. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1540-7489\(02\)80108-0](https://doi.org/10.1016/S1540-7489(02)80108-0)
- [12] Afarin Y., Tabejamaat S. Effect of hydrogen on H₂/CH₄ flame structure of MILD combustion using the LES method. *Int. J. Hydrog. Energy*, 2013, vol. 38, iss. 8, pp. 3447–3458. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2012.12.065>
- [13] Hernández-Pérez F.E., Groth C.P.T., Gulder O.L. Large-eddy simulation of lean hydrogen–methane turbulent premixed flames in the methane-dominated regime. *Int. J. Hydrog. Energy*, 2014, vol. 39, iss. 13, pp. 7147–7157.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2014.02.028>

- [14] Dinkelacker F., Manickam B., Muppall S.P.R. Modelling and simulation of lean premixed turbulent methane/hydrogen/air flames with an effective Lewis number approach. *Combust. Flame*, 2011, vol. 158, iss. 9, pp. 1742–1749. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2010.12.003>
- [15] Zhang M., Wang J., Xie Y., et al. Flame front structure and burning velocity of turbulent premixed CH₄/H₂/air flames. *Int. J. Hydrogen Energy*, 2013, vol. 38, iss. 26, pp. 11421–11428. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2013.05.051>
- [16] Sun Z.-Y., Li G.-X. Turbulence influence on explosion characteristics of stoichiometric and rich hydrogen/air mixtures in a spherical closed vessel. *Energy Convers. Manag.*, 2017, vol. 149, pp. 526–535. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.07.051>
- [17] Sun Z.-Y. Experimental studies on the explosion indices in turbulent stoichiometric H₂/CH₄/air mixtures. *Int. J. Hydrog. Energy*, 2019, vol. 44, iss. 1, pp. 469–476. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.02.094>
- [18] Day M.S., Gao X., Bell J.B. Properties of lean turbulent methane-air flames with significant hydrogen addition. *Proc. Combust. Inst.*, 2011, vol. 33, iss. 1, pp. 1601–1608. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proci.2010.05.099>
- [19] Therkelsen P.L., Enrique Portillo J., Littlejohn D., et al. Self-induced unstable behaviors of CH₄ and H₂/CH₄ flames in a model combustor with a low-swirl injector. *Combust. Flame*, 2013, vol. 160, iss. 2, pp. 307–321. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2011.11.008>
- [20] Li D., Wang R., Yang G., et al. Effect of hydrogen addition on the structure and stabilization of a micro-jet methane diffusion flame. *Int. J. Hydrogen Energy*, 2021, vol. 46, iss. 7, pp. 5790–5798. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.11.034>
- [21] Liu W., Kelley A., Law C. Flame propagation and counterflow nonpremixed ignition of mixtures of methane and ethylene. *Combust. Flame*, 2010, vol. 157, iss. 5, pp. 1027–1036. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2009.11.002>
- [22] Wang T., Luo Z., Wen H., et al. The explosion enhancement of methane-air mixtures by ethylene in a confined chamber. *Energy*, 2021, vol. 214, art. 119042. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.119042>
- [23] Shao J., Davidson D.F., Hanson R.K. A shock tube study of ignition delay times in diluted methane, ethylene, propene and their blends at elevated pressures. *Fuel*, 2018, vol. 225, pp. 370–380. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.03.146>
- [24] Иванов М.Ф., Киверин А.Д., Гальбурт В.А. Об одном способе ускорения перехода от дефлаграции к детонации в газообразных горючих смесях. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки*, 2008, № 4 (31), с. 38–45.
- [25] Иванов М.Ф., Киверин А.Д., Рыков Ю.В. Особенности распространения пламени в замкнутых объемах. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки*, 2010, № 1 (36), с. 21–39.
- [26] Wilson M.P., Bowersox R.D.W., Glawe D.D. Experimental investigation of the role of downstream ramps on a supersonic injection plume. *J. Propuls. Power*, 1999, vol. 15, no. 3, pp. 432–439. DOI: <https://doi.org/10.2514/2.5462>

- [27] Sislian J.P., Schumacher J. A comparative study of hypersonic fuel/air mixing enhancement by ramp and cantilevered ramp injectors. *AIAA Paper*, 1999, art. 99-4873. DOI: <https://doi.org/10.2514/6.1999-4873>
- [28] Wan J., Zhao H., Akkerman V. Anchoring mechanisms of a holder-stabilized premixed flame in a preheated mesoscale combustor. *Phys. Fluids*, 2020, vol. 32, iss. 9, art. 097103. DOI: <https://doi.org/10.1063/5.0021864>
- [29] Арефьев К.Ю., Федотова К.В., Крикунова А.И. и др. Математическое и физическое моделирование влияния пульсаций скорости сносящего потока воздуха на структуру пламени при диффузионном режиме горения метана. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки*, 2020, № 2 (89), с. 65–84. DOI: <https://doi.org/10.18698/1812-3368-2020-2-65-84>
- [30] Chaudhuri S., Cetegen B.M. Blowoff characteristics of bluff-body stabilized conical premixed flames with upstream spatial mixture gradients and velocity oscillations. *Combust. Flame*, 2008, vol. 153, iss. 4, pp. 616–633. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2007.12.008>
- [31] Nair S., Lieuwen T. Near-blowoff dynamics of a bluff-body stabilized flame. *J. Propuls. Power*, 2007, vol. 23, no. 2, pp. 421–427. DOI: <https://doi.org/10.2514/1.24650>
- [32] Arefyev K.Yu., Krikunova A.I., Panov V.A. Experimental study of premixed methane-air flame coupled with an external acoustic field. *J. Phys. Conf. Ser.*, 2019, vol. 1147, art. 012050. DOI: <http://dx.doi.org/10.1088/1742-6596/1147/1/012050>
- [33] Sosounov V. Research and development of ramjets/ramrockets. Part III. The study of gaseous hydrogen ram combustors. *AGARD Lect. Ser.*, 1993, vol. 194, pp. 1–6.
- [34] Арефьев К.Ю., Александров В.Ю., Рудинский А.В. и др. Исследование плазменного воздействия на эффективность горения газообразного метана в сверхзвуковом потоке. *ТВТ*, 2021, т. 59, № 4, с. 548–556. DOI: <https://doi.org/10.31857/S0040364421040037>
- [35] Zhu Q., Zhao X., Deng Y. Advances in the partial oxidation of methane to synthesis gas. *J. Nat. Gas Chem.*, 2004, vol. 13, no. 4, pp. 191–203.
- [36] Mikofski M.A., Williams T.C., Shaddix C.R., et al. Flame height measurement of laminar inverse diffusion flames. *Combust. Flame*, 2006, vol. 146, iss. 1-2, pp. 63–72. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2006.04.006>
- [37] Tsuji H., Gupta A.K., Hasegawa T., et al. High temperature air combustion. CRC Press, 2003.
- [38] Weber R., Orsino S., Lallemand N., et al. Combustion of natural gas with high temperature air and large quantities of flue gas. *Proc. Combust. Inst.*, 2000, vol. 28, iss. 1, pp. 1315–1321. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0082-0784\(00\)80345-8](https://doi.org/10.1016/S0082-0784(00)80345-8)
- [39] Vinogradov V.A., Shikhman Yu.M., Albegov R.V., et al. Experimental research of methane combustion in high speed subsonic airflow. *AIAA Paper*, 2003, art. 2003-6940. DOI: <https://doi.org/10.2514/6.2003-6940>
- [40] Vinogradov V.A., Shikhman Y.M., Albegov R.V., et al. About possibility of effective methane combustion in high speed subsonic airflow. *AIAA Paper*, 2002, art. 2002-5206.

- [41] Xiao W., Huang Y. Lean blowout limits of a gas turbine combustor operated with aviation fuel and methane. *Heat Mass Transf.*, 2015, vol. 52, no. 5, pp. 1015–1024. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00231-015-1622-3>
- [42] Албегов Р.В., Виноградов В.А., Шихман Ю.М. Горение метана при различных схемах впрыска в воздушный поток с большими дозвуковыми скоростями. *Физика горения и взрыва*, 2016, т. 52, № 1, с. 18–29.
- [43] Batraev I.S., Prokhorov E.S., Ulyanitskii V.Y. Acceleration of dispersed particles by gas detonation productions in an expanding channel. *Combust. Explos. Shock Waves*, 2021, vol. 57, no. 5, pp. 588–596. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0010508221050087>
- [44] Zipf R.K. Jr., Gamezo V.N., Sapko M.J., et al. Methane–air detonation experiments at NIOSH lake Lynn laboratory. *J. Loss Prev. Process. Ind.*, 2013, vol. 26, iss. 2, pp. 295–301. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2011.05.003>
- [45] Александров В.Ю., Арефьев К.Ю., Баскаков А.А. и др. Детонация воздушно-метановых смесей в сверхзвуковом сносящем потоке. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2017, № 2 (683), с. 98–108. DOI: <http://dx.doi.org/10.18698/0536-1044-2017-2-98-108>
- [46] Guiberti T.F., Durox D., Scouflaire P., et al. Impact of heat loss and hydrogen enrichment on the shape of confined swirling flames. *Proc. Combust. Inst.*, 2015, vol. 35, iss. 2, pp. 1385–1392. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.proci.2014.06.016>
- [47] Арефьев К.Ю., Кукшинов Н.В., Серпинский О.С. Методика экспериментального определения полноты сгорания потоков топливной смеси в каналах переменного сечения. *Известия РАН. Механика жидкости и газа*, 2017, № 5, с. 90–102. DOI: <https://doi.org/10.7868/S0568528117050103>
- [48] Grishin I., Zakharov V., Arefev K. Experimental study of methane combustion efficiency in a high-enthalpy oxygen-containing flow. *App. Sci.*, 2022, vol. 12, iss. 2, art. 899. DOI: <https://doi.org/10.3390/app12020899>
- [49] Аннушкин М.Ю. Основные закономерности выгорания турбулентных струй водорода в воздушных каналах. *Физика горения и взрыва*, 1981, № 4, с. 59–71.
- [50] Menter F.R. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications. *AIAA J.*, 1994, vol. 32, no. 8, pp. 1598–1605. DOI: <https://doi.org/10.2514/3.12149>
- [51] Иванов М.Ф., Киверин А.Д., Яковенко И.С. Влияние газодинамических процессов на развитие горения вблизи концентрационных пределов воспламенения. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки*, 2015, № 6 (63), с. 85–98. DOI: <http://dx.doi.org/10.18698/1812-3368-2015-6-85-98>
- [52] Иванов М.Ф., Киверин А.Д., Смыгалина А.Е. Воспламенение водородно-воздушной смеси вблизи нижнего концентрационного предела. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки*, 2013, № 1 (48), с. 89–108.
- [53] Арефьев К.Ю., Воронецкий А.В., Ильченко М.А. Исследование динамических характеристик резонансной газодинамической системы воспламенения топливной смеси. *Физика горения и взрыва*, 2013, т. 49, № 6, с. 41–46.

[54] Арефьев К.Ю., Воронецкий А.В., Ильченко М.А. и др. Расчетно-экспериментальное исследование воспламенения двухфазной топливной композиции воздух + этанол в резонансной газодинамической системе. *Физика горения и взрыва*, 2017, т. 53, № 4, с. 34–42. DOI: <http://dx.doi.org/10.15372/FGV20170403>

[55] Александров В.Ю., Арефьев К.Ю., Ильченко М.А. Расчетно-экспериментальное исследование пульсационных процессов в малогабаритных огневых подогревателях воздуха. *Физика горения и взрыва*, 2016, т. 52, № 4, с. 74–81. DOI: <https://doi.org/10.15372/FGV20160407>

Арефьев Константин Юрьевич — д-р техн. наук, научный сотрудник лаборатории электрофизики и плазменных процессов ОИВТ РАН (Российская Федерация, 125412, Москва, Ижорская ул., д. 13, стр. 2).

Гришин Илья Максимович — научный сотрудник лаборатории электрофизики и плазменных процессов ОИВТ РАН (Российская Федерация, 125412, Москва, Ижорская ул., д. 13, стр. 2).

Захаров Вячеслав Сергеевич — научный сотрудник лаборатории электрофизики и плазменных процессов ОИВТ РАН (Российская Федерация, 125412, Москва, Ижорская ул., д. 13, стр. 2).

Никопоренко Андрей Викторович — научный сотрудник лаборатории электрофизики и плазменных процессов ОИВТ РАН (Российская Федерация, 125412, Москва, Ижорская ул., д. 13, стр. 2).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Арефьев К.Ю., Гришин И.М., Захаров В.С. и др. Газодинамическая стабилизация и интенсификация макрокинетических процессов окисления метана в высокоэнтальпийном кислородсодержащем потоке. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки*, 2023, № 4 (109), с. 52–78.

DOI: <https://doi.org/10.18698/1812-3368-2023-4-52-78>

**GAS-DYNAMIC STABILIZATION AND INTENSIFICATION
OF THE METHANE OXIDATION MACROKINETIC PROCESSES
IN THE HIGH-ENTHALPY OXYGEN-CONTAINING FLOW**

K.Yu. Arefyev

arefyev@rambler.ru

I.M. Grishin

maksimgv1327@gmail.com

V.S. Zakharov

zvs.aero@ya.ru

A.V. Nikoporenko

pvrld@yandex.ru

**Joint Institute for High Temperatures, Russian Academy of Sciences,
Moscow, Russian Federation**

Abstract

The paper presents experimental results of studying the macrokinetic intensification and stabilization processes of methane oxidation (combustion) in the high-enthalpy oxygen-containing flow inside the constant cross section channel being finite along its length. Calculation and experimental data are presented on the methane oxidation gas-dynamic intensification and stabilization in the recirculation zone of the high-enthalpy oxygen-containing flow formed behind the wedge-shaped bluff body. Computational and experimental studies enabled to consider various configurations of the bluff bodies differing in their number and degree of the constant cross section channel obstruction. Dependence of the gas relative residence time in the recirculation zone behind the bluff bodies was determined for various configurations. Range of the initial enthalpy values of the high-enthalpy oxygen-containing flow of 350–700 kJ/kg was considered. Regularities were established for the influence of the flow obstruction degree on the physical and chemical processes completion in the channel under study. Methane oxidation intensity in the high-enthalpy oxygen-containing flow was compared with and without the gas-dynamic stabilization. The level of lower limit value of the fuel excess coefficient corresponding to the stable methane ignition and combustion was determined. The data obtained indicate intensification in the methane oxidation diffusion-kinetic regimes and make it possible to evaluate the factors that are limiting completion of the physical and chemical processes

Keywords

Redox reactions, methane, oxygen-containing flow, combustion diffusion mode, combustion kinetic mode, experiment

Received 12.11.2022

Accepted 30.11.2022

© Author(s), 2023

This research was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (agreement no. 075-15-2020-806 dated 29 September 2020)

REFERENCES

- [1] Urzay J. Supersonic combustion in air-breathing propulsion systems for hypersonic flight. *Annu. Rev. Fluid Mech.*, 2018, vol. 50, no. 1, pp. 593–627.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1146/annurev-fluid-122316-045217>
- [2] Tripathi G., Sharma P., Dhar A. Effect of methane augmentations on engine performance and emissions. *Alex. Eng. J.*, 2020, vol. 59, iss. 1, pp. 429–439.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aej.2020.01.012>

- [3] Agora Energiewende and Ember (2021): the European power sector in 2020: up-to-date analysis on the electricity transition. Available at: <https://www.agora-energiewende.de/en/publications/the-european-power-sector-in-2020> (accessed: 15.12.2021).
- [4] Azatyan V.V. Chain nature of the combustion, explosion, and detonation of gases: new aspects of theory. *Russ. J. Phys. Chem. A*, 2015, vol. 89, pp. 1995–2005. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0036024415110035>
- [5] Kim N.J. Effect of an inlet temperature disturbance on the propagation of methane–air premixed flames in small tubes. *Combust. Flame*, 2009, vol. 156, iss. 7, pp. 1332–1338. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2009.02.004>
- [6] Cheng R.K., Oppenheim A.K. Autoignition in methane–hydrogen mixtures. *Combust. Flame*, 1984, vol. 58, iss. 2, pp. 125–139. DOI: [https://doi.org/10.1016/0010-2180\(84\)90088-9](https://doi.org/10.1016/0010-2180(84)90088-9)
- [7] Vasil'ev A.A. Ignition delay in multifuel mixtures. *Combust. Explos. Shock Waves*, 2007, vol. 43, no. 3, pp. 282–285. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10573-007-0041-2>
- [8] Austin J.M., Shepherd J.E. Detonations in hydrocarbon fuel blends. *Combust. Flame*, 2003, vol. 132, iss. 1-2, pp. 73–90. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0010-2180\(02\)00422-4](https://doi.org/10.1016/S0010-2180(02)00422-4)
- [9] Vasil'ev A.A. Cell size as the main geometric parameter of multifront detonation wave. *J. Propuls. Power*, 2006, vol. 22, no. 6, pp. 1245–1260. DOI: <https://doi.org/10.2514/1.20348>
- [10] Hernandez-Rivera R., Troiani G., Pagliaroli T., et al. Detection of the thermoacoustic combustion instabilities of a slot burner based on a diagonal-wise recurrence quantification. *Phys. Fluids*, 2019, vol. 31, iss. 12, art. 124105. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.5124015>
- [11] Schefer R.W., Wicksall D.M., Agrawal A.K. Combustion of hydrogen-enriched methane in a lean premixed swirl-stabilized burner. *Proc. Combust. Inst.*, 2002, vol. 29, iss. 1, pp. 843–851. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1540-7489\(02\)80108-0](https://doi.org/10.1016/S1540-7489(02)80108-0)
- [12] Afarin Y., Tabejamaat S. Effect of hydrogen on H₂/CH₄ flame structure of MILD combustion using the LES method. *Int. J. Hydrog. Energy*, 2013, vol. 38, iss. 8, pp. 3447–3458. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2012.12.065>
- [13] Hernández-Pérez F.E., Groth C.P.T., Gulder O.L. Large-eddy simulation of lean hydrogen–methane turbulent premixed flames in the methane-dominated regime. *Int. J. Hydrog. Energy*, 2014, vol. 39, iss. 13, pp. 7147–7157. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2014.02.028>
- [14] Dinkelacker F., Manickam B., Muppall S.P.R. Modelling and simulation of lean premixed turbulent methane/hydrogen/air flames with an effective Lewis number approach. *Combust. Flame*, 2011, vol. 158, iss. 9, pp. 1742–1749. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2010.12.003>
- [15] Zhang M., Wang J., Xie Y., et al. Flame front structure and burning velocity of turbulent premixed CH₄/H₂/air flames. *Int. J. Hydrogen Energy*, 2013, vol. 38, iss. 26, pp. 11421–11428. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2013.05.051>

- [16] Sun Z.-Y., Li G.-X. Turbulence influence on explosion characteristics of stoichiometric and rich hydrogen/air mixtures in a spherical closed vessel. *Energy Convers. Manag.*, 2017, vol. 149, pp. 526–535.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.07.051>
- [17] Sun Z.-Y. Experimental studies on the explosion indices in turbulent stoichiometric H₂/CH₄/air mixtures. *Int. J. Hydrog. Energy*, 2019, vol. 44, iss. 1, pp. 469–476.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.02.094>
- [18] Day M.S., Gao X., Bell J.B. Properties of lean turbulent methane-air flames with significant hydrogen addition. *Proc. Combust. Inst.*, 2011, vol. 33, iss. 1, pp. 1601–1608.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proci.2010.05.099>
- [19] Therkelsen P.L., Enrique Portillo J., Littlejohn D., et al. Self-induced unstable behaviors of CH₄ and H₂/CH₄ flames in a model combustor with a low-swirl injector. *Combust. Flame*, 2013, vol. 160, iss. 2, pp. 307–321.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2011.11.008>
- [20] Li D., Wang R., Yang G., et al. Effect of hydrogen addition on the structure and stabilization of a micro-jet methane diffusion flame. *Int. J. Hydrogen Energy*, 2021, vol. 46, iss. 7, pp. 5790–5798. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.11.034>
- [21] Liu W., Kelley A., Law C. Flame propagation and counterflow nonpremixed ignition of mixtures of methane and ethylene. *Combust. Flame*, 2010, vol. 157, iss. 5, pp. 1027–1036. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2009.11.002>
- [22] Wang T., Luo Z., Wen H., et al. The explosion enhancement of methane-air mixtures by ethylene in a confined chamber. *Energy*, 2021, vol. 214, art. 119042.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.119042>
- [23] Shao J., Davidson D.F., Hanson R.K. A shock tube study of ignition delay times in diluted methane, ethylene, propene and their blends at elevated pressures. *Fuel*, 2018, vol. 225, pp. 370–380. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.03.146>
- [24] Ivanov M.F., Kiverin A.D., Galburt V.A. About one method of acceleration of transition from deflagration to detonation in gaseous inflammable mixtures. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Natural Sciences*, 2008, no. 4 (31), pp. 38–45 (in Russ.).
- [25] Ivanov M.F., Kiverin A.D., Rykov Yu.V. Peculiarities of flame propagation in closed volumes. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Natural Sciences*, 2010, no. 1 (36), pp. 21–39 (in Russ.).
- [26] Wilson M.P., Bowersox R.D.W., Glawe D.D. Experimental investigation of the role of downstream ramps on a supersonic injection plume. *J. Propuls. Power*, 1999, vol. 15, no. 3, pp. 432–439. DOI: <https://doi.org/10.2514/2.5462>
- [27] Sislian J.P., Schumacher J. A comparative study of hypersonic fuel/air mixing enhancement by ramp and cantilevered ramp injectors. *AIAA Paper*, 1999, art. 99-4873. DOI: <https://doi.org/10.2514/6.1999-4873>
- [28] Wan J., Zhao H., Akkerman V. Anchoring mechanisms of a holder-stabilized pre-mixed flame in a preheated mesoscale combustor. *Phys. Fluids*, 2020, vol. 32, iss. 9, art. 097103. DOI: <https://doi.org/10.1063/5.0021864>

- [29] Arefyev K.Yu., Fedotova K.V., Krikunova A.I., et al. Mathematical and physical simulation of the cross-flow velocity pulsation effect on the flame structure during the diffusion mode of methane combustion. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Natural Sciences*, 2020, no. 2 (89), pp. 65–84 (in Russ.). DOI: <https://doi.org/10.18698/1812-3368-2020-2-65-84>
- [30] Chaudhuri S., Cetegen B.M. Blowoff characteristics of bluff-body stabilized conical premixed flames with upstream spatial mixture gradients and velocity oscillations. *Combust. Flame*, 2008, vol. 153, iss. 4, pp. 616–633. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2007.12.008>
- [31] Nair S., Lieuwen T. Near-blowoff dynamics of a bluff-body stabilized flame. *J. Propuls. Power*, 2007, vol. 23, no. 2, pp. 421–427. DOI: <https://doi.org/10.2514/1.24650>
- [32] Arefyev K.Yu., Krikunova A.I., Panov V.A. Experimental study of premixed methane-air flame coupled with an external acoustic field. *J. Phys. Conf. Ser.*, 2019, vol. 1147, art. 012050. DOI: <http://dx.doi.org/10.1088/1742-6596/1147/1/012050>
- [33] Sosounov V. Research and development of ramjets/ramrockets. Part III. The study of gaseous hydrogen ram combustors. *AGARD Lect. Ser.*, 1993, vol. 194, pp. 1–6.
- [34] Arefev K.Yu., Aleksandrov V.Yu., Rudinskiy A.V., et al. Investigation of the plasma effect on the combustion efficiency of gaseous methane in a supersonic flow. *High Temp.*, 2022, vol. 60, suppl. 1, pp. S59–S66. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0018151X21040039>
- [35] Zhu Q., Zhao X., Deng Y. Advances in the partial oxidation of methane to synthesis gas. *J. Nat. Gas Chem.*, 2004, vol. 13, no. 4, pp. 191–203.
- [36] Mikofski M.A., Williams T.C., Shaddix C.R., et al. Flame height measurement of laminar inverse diffusion flames. *Combust. Flame*, 2006, vol. 146, iss. 1-2, pp. 63–72. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2006.04.006>
- [37] Tsuji H., Gupta A.K., Hasegawa T., et al. High temperature air combustion. CRC Press, 2003.
- [38] Weber R., Orsino S., Lallemand N., et al. Combustion of natural gas with high temperature air and large quantities of flue gas. *Proc. Combust. Inst.*, 2000, vol. 28, iss. 1, pp. 1315–1321. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0082-0784\(00\)80345-8](https://doi.org/10.1016/S0082-0784(00)80345-8)
- [39] Vinogradov V.A., Shikhman Yu.M., Albegov R.V., et al. Experimental research of methane combustion in high speed subsonic airflow. *AIAA Paper*, 2003, art. 2003-6940. DOI: <https://doi.org/10.2514/6.2003-6940>
- [40] Vinogradov V.A., Shikhman Y.M., Albegov R.V., et al. About possibility of effective methane combustion in high speed subsonic airflow. *AIAA Paper*, 2002, art. 2002-5206.
- [41] Xiao W., Huang Y. Lean blowout limits of a gas turbine combustor operated with aviation fuel and methane. *Heat Mass Transf.*, 2015, vol. 52, no. 5, pp. 1015–1024. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00231-015-1622-3>
- [42] Albegov R.V., Vinogradov V.A., Shikhman Yu.M. Combustion of methane injected into an air flow with high subsonic velocities by different methods. *Combust. Explos. Shock Waves*, 2016, vol. 52, no. 1, pp. 14–25. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0010508216010020>

- [43] Batraev I.S., Prokhorov E.S., Ul'yanitskii V.Y. Acceleration of dispersed particles by gas detonation productions in an expanding channel. *Combust. Explos. Shock Waves*, 2021, vol. 57, no. 5, pp. 588–596. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0010508221050087>
- [44] Zipf R.K. Jr., Gamezo V.N., Sapko M.J., et al. Methane–air detonation experiments at NIOSH lake Lynn laboratory. *J. Loss Prev. Process. Ind.*, 2013, vol. 26, iss. 2, pp. 295–301. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2011.05.003>
- [45] Aleksandrov V.Yu., Aref'ev K.Yu., Baskakov A.A., et al. Detonation of air-methane mixture in a supersonic crossflow. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2017, no. 2 (683), pp. 98–108 (in Russ.). DOI: <http://dx.doi.org/10.18698/0536-1044-2017-2-98-108>
- [46] Guiberti T.F., Durox D., Scouflaire P., et al. Impact of heat loss and hydrogen enrichment on the shape of confined swirling flames. *Proc. Combust. Inst.*, 2015, vol. 35, iss. 2, pp. 1385–1392. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.proci.2014.06.016>
- [47] Aref'ev K.Yu., Kukshinov N.V., Serpinskiy O.S. Methodology of experimental determining the combustion efficiency of fuel mixture flows in channels of variable cross-section. *Fluid Dyn.*, 2017, vol. 52, no. 5, pp. 682–694. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0015462817050106>
- [48] Grishin I., Zakharov V., Aref'ev K. Experimental study of methane combustion efficiency in a high-enthalpy oxygen-containing flow. *App. Sci.*, 2022, vol. 12, iss. 2, art. 899. DOI: <https://doi.org/10.3390/app12020899>
- [49] Annushkin M.Yu. Basic laws of burn-out in turbulent hydrogen jets in air channels. *Fizika goren'ya i vzryva*, 1981, no. 4, pp. 59–71 (in Russ.).
- [50] Menter F.R. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications. *AIAA J.*, 1994, vol. 32, no. 8, pp. 1598–1605. DOI: <https://doi.org/10.2514/3.12149>
- [51] Ivanov M.F., Kiverin A.D., Yakovenko I.S. Gas-dynamic processes influence on combustion evolution close to concentration flammability limits. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Natural Sciences*, 2015, no. 6 (63), pp. 85–98 (in Russ.). DOI: <http://dx.doi.org/10.18698/1812-3368-2015-6-85-98>
- [52] Ivanov M.F., Kiverin A.D., Smygalina A.E. Ignition of hydrogen-air mixture near lower flammability limit. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Natural Sciences*, 2013, no. 1 (48), pp. 89–108 (in Russ.).
- [53] Aref'ev K.Yu., Voronetskii A.V., Il'chenko M.A. Dynamic characteristics of a resonant gas-dynamic system for ignition of a fuel mixture. *Combust. Explos. Shock Waves*, 2013, vol. 49, no. 6, pp. 657–661. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0010508213060038>
- [54] Aref'ev K.Yu., Voronetskii A.V., Il'chenko M.A., et al. Numerical and experimental study of ignition of a two-phase fuel composition (ethanol + air) in a resonance gas-dynamic system. *Combust. Explos. Shock Waves*, 2017, vol. 53, no. 4, pp. 398–405. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0010508217040037>
- [55] Aleksandrov V.Yu., Aref'ev K.Yu., Il'chenko M.A. Numerical and experimental study of oscillatory processes in small-size combustion heaters of air. *Combust. Explos. Shock Waves*, 2016, vol. 52, no. 4, pp. 439–445. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0010508216040079>

Arefyev K.Yu. — Dr. Sc. (Eng.), Researcher, Electrophysics and Plasma Processes Laboratory, Joint Institute for High Temperatures, Russian Academy of Sciences (Izhorskaya ul. 13, str. 2, Moscow, 125412 Russian Federation).

Grishin I.M. — Researcher, Electrophysics and Plasma Processes Laboratory, Joint Institute for High Temperatures, Russian Academy of Sciences (Izhorskaya ul. 13, str. 2, Moscow, 125412 Russian Federation).

Zakharov V.S. — Researcher, Electrophysics and Plasma Processes Laboratory, Joint Institute for High Temperatures, Russian Academy of Sciences (Izhorskaya ul. 13, str. 2, Moscow, 125412 Russian Federation).

Nikoporenko A.V. — Researcher, Electrophysics and Plasma Processes Laboratory, Joint Institute for High Temperatures, Russian Academy of Sciences (Izhorskaya ul. 13, str. 2, Moscow, 125412 Russian Federation).

Please cite this article in English as:

Arefyev K.Yu., Grishin I.M., Zakharov V.S., et al. Gas-dynamic stabilization and intensification of the methane oxidation macrokinetic processes in the high-enthalpy oxygen-containing flow. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Natural Sciences*, 2023, no. 4 (109), pp. 52–78 (in Russ.).

DOI: <https://doi.org/10.18698/1812-3368-2023-4-52-78>