

УДК 662.611.2

Иван Игоревич Комаров

ФГБОУВО «Национальный исследовательский университет “МЭИ”», кандидат технических наук, доцент кафедры инновационных технологий наукоемких отраслей, Россия, Москва, e-mail: komarovii.mpei@gmail.com

Дарья Михайловна Харламова

ФГБОУВО «Национальный исследовательский университет “МЭИ”», аспирант кафедры инновационных технологий наукоемких отраслей, Россия, Москва, e-mail: daria-rostov@yandex.ru

Андрей Николаевич Вегера

ФГБОУВО «Национальный исследовательский университет “МЭИ”», аспирант кафедры инновационных технологий наукоемких отраслей, Россия, Москва, e-mail: vegeraan@gmail.com

Владимир Юрьевич Наумов

ФГБОУВО «Национальный исследовательский университет “МЭИ”», инженер кафедры инновационных технологий наукоемких отраслей, Россия, Москва, e-mail: naumovvu@mpei.ru

Исследование влияния CO_2 разбавителя на горение топлива в метан-кислородных камерах сгорания¹

Авторское резюме

Состояние вопроса. Замкнутые газотурбинные циклы на сверхкритическом диоксиде углерода – перспективное направление развития энергетики с точки зрения повышения энергетической эффективности и минимизации выбросов парниковых газов. Горение метана с кислородом в камере сгорания происходит не в среде азота атмосферного воздуха, а в среде углекислого газа – рабочего тела цикла, который является ингибитором химических реакций. Большое массовое содержание подобного разбавителя реагирующей смеси в объеме камеры приводит к рискам возникновения значительного химического недожога, снижению КПД камеры сгорания и цикла в целом. Цель исследования – изучение кинетических параметров горения метана с кислородом в среде сверхкритического CO_2 разбавителя для обеспечения надежного и стабильного горения топлива путем оценки степени ингибирующего воздействия CO_2 и определения его допустимого количества в зоне активного горения камеры сгорания.

Материалы и методы. Исследование проведено методом численного моделирования турбулентно-кинетических процессов горения метана в камере сгорания с использованием редуцированного механизма горения метана в программном комплексе Ansys Fluent.

Результаты. Проведено исследование влияния CO_2 разбавителя на горение топлива в метан-кислородных камерах сгорания. Установлено, что стабилизация факела в объеме камеры сгорания происходит при массовой доле CO_2 разбавителя, подаваемого в смеси с окислителем, не более 0,46–0,5, добавление дополнительного CO_2 разбавителя формирует локальные зоны с пониженной температурой, что приводит к торможению процессов горения. При этом должны быть исключены подмеси охлаждающего CO_2 в зону стабилизации факела.

Выводы. Полученные результаты позволяют сформулировать следующие рекомендации по организации процесса горения в камере сгорания: в камеру сгорания должно подаваться не более 20 % от общего содержания углекислого газа; для стабилизации факела и сокращения его длины необходима установка лопаток для завихрения топлива и окислителя в смеси с CO_2 на входе в камеру сгорания; подача CO_2 на охлаждение должна осуществляться не менее чем в 130 мм от устья горелки.

Ключевые слова: Цикл Аллама, газотурбинный цикл, диоксид углерода, камера сгорания, химическая кинетика, нормальная скорость распространения пламени, реакционный механизм, стабилизация пламени, устойчивое горение

Ivan Igorevich Komarov

National Research University “Moscow Power Engineering Institute”, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor of Innovative Technologies for High-Tech Industries Department, Russia Moscow, e-mail: komarovii.mpei@gmail.com

¹ Исследование выполнено в НИУ “МЭИ” при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания № FSWF-2020-0020. This study conducted by Moscow Power Engineering Institute was financially supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (project No. FSWF-2020-0020).

Daria Mikhailovna Kharlamova

National Research University "Moscow Power Engineering Institute", Postgraduate of Innovative Technologies for High-Tech Industries Department, Russia Moscow, e-mail: daria-rostov@yandex.ru

Andrej Nikolaevich Vegera

National Research University "Moscow Power Engineering Institute", Postgraduate of Innovative Technologies for High-Tech Industries Department, Russia Moscow, e-mail: vegeraan@gmail.com

Vladimir Yurevich Naumov

National Research University "Moscow Power Engineering Institute", Engineer of Innovative Technologies for High-Tech Industries Department, Russia Moscow, e-mail: naumovvy@mpei.ru

Study on effect CO₂ diluent on fuel combustion in methane-oxygen combustion chambers

Abstract

Background. Studying closed gas turbine cycles on supercritical carbon dioxide is currently a promising issue in the development of power energy sector in terms of increasing energy efficiency and minimizing greenhouse gas emissions into the atmosphere. Combustion of methane with oxygen in the combustion chamber occurs not in the nitrogen environment, but in the environment of carbon dioxide, that is the working fluid of the cycle, which is an inhibitor of chemical reactions. A large mass content of such a diluent of the reaction mixture in the volume of the chamber leads to the risks of significant chemical underburning, efficiency decrease of the combustion chamber and the cycle as a whole. The aim of the research is to study the kinetic parameters of the combustion of methane with oxygen in a supercritical CO₂ diluent medium to ensure reliable and stable combustion of fuel by assessing the degree of the inhibitory effect of CO₂ and determining its permissible amount in the active combustion zone of the combustion chamber.

Materials and methods. The research method is a numerical simulation of turbulent-kinetic processes of methane combustion in the combustion chamber using the reduced methane combustion mechanism. Ansys Fluent software package has been used.

Results. The authors have studied the impact of CO₂ diluent on fuel combustion in methane-oxygen combustion chambers. It is found that the combustor flame stabilization takes place if the content of CO₂ diluent supplied to the mixture with oxidizer is 0,46–0,5 of mass fraction; additional CO₂ diluent forms local low temperature zones which slow down the combustion process. When this happens, adding cooling CO₂ into the flame stabilization zone should be eliminated.

Conclusions. The study has found that no more than 20 % of the total carbon dioxide content should be supplied to the combustion chamber; to stabilize the flame and reduce its length, it is necessary to install blades to swirl the fuel and oxidizer mixed with CO₂ at the inlet of the combustion chamber; CO₂ supply for cooling should be carried out not less than 130 mm away from the burner mouth.

Key words: Allam cycle, gas turbine cycle, carbon dioxide, combustor, chemical kinetics, normal flame propagation velocity, reaction mechanism, flame stabilization, stable combustion

DOI: 10.17588/2072-2672.2021.2.014-022

Введение. Энергетически эффективное и экологически безопасное производство электроэнергии – одна из важнейших задач XXI века. Основная доля электроэнергии производится за счет сжигания органического топлива на тепловых электрических станциях, работающих по циклам Ренкина, Брайтона и Брайтона-Ренкина. Продукты горения топливно-воздушной смеси, содержащие большое количество парниковых газов, выбрасываются в окружающую среду, способствуя росту их концентрации в атмосфере Земли. К тому же присутствие атмосферного азота в зоне горения приводит к образованию токсичных

выбросов (оксидов азота), снижение которых до около нулевых значений является труднодостижимой задачей для классической энергетики [1, 2]. Решить проблему выбросов вредных веществ в атмосферу при производстве электроэнергии на ТЭС можно за счет создания замкнутых термодинамических циклов с кислородным сжиганием топлива (кислородно-топливных энергетических комплексов). Отличительной особенностью и вместе с тем основным преимуществом данных технологий производства электроэнергии, по сравнению с традиционными, является кислородное сжигание органического топлива, со-

проводящееся образованием водяного пара и углекислого газа. Диоксид углерода может быть отделен от пара с минимальными затратами энергоресурсов путем конденсации последнего.

Цикл Аллама, принципиальная схема которого представлена на рис. 1, на сегодняшний день является одним из наиболее перспективных кислородно-топливных энергетических циклов с точки зрения достижения максимальной энергетической эффективности и экологичности [3, 4].

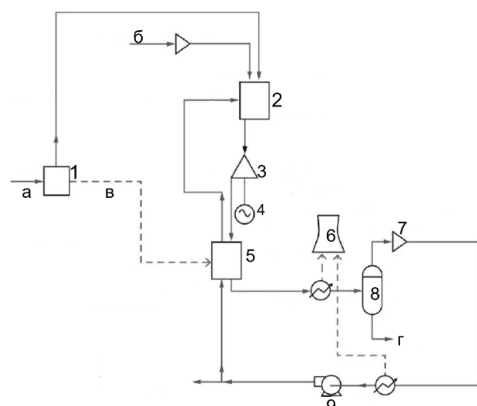


Рис. 1. Принципиальная тепловая схема цикла Аллама на природном газе: 1 – установка разделения воздуха; 2 – камера сгорания; 3 – турбина; 4 – электрогенератор; 5 – теплообменник; 6 – охлаждение; 7 – компрессор CO_2 ; 8 – сепаратор воды; 9 – насос CO_2 ; а – воздух; б – природный газ; в – тепло от воздухоразделительной установки; г – H_2O

Для внедрения кислородно-топливных энергетических комплексов (КТЭК) необходимо решить целый ряд научно-технических задач, включая разработку теоретических основ создания энергетического оборудования, работающего на сверхкритическом диоксиде углерода, в частности конструкции камеры сгорания (КС). Исследование влияния диоксида углерода одновременно со сверхкритическим давлением на входе в КС на стабильность процесса горения необходимо для разработки принципиального дизайна камеры, так как от этого напрямую зависит надежность ее работы, тепловая экономичность кислородно-топливного цикла и объем накапливающихся в рабочем теле неконденсирующихся газов, в частности CO , O_2 , H_2 , радикалов H , OH и других веществ, являющихся продуктами неполного сгорания топлива.

Изменение компонентного состава и термодинамических параметров рабочей

среды предопределяет изменение характера процесса горения. В камере сгорания КТЭК горение природного газа с кислородом происходит в среде CO_2 разбавителя при давлении 300 бар, что сильно отличает условия работы от классических камер сгорания ГТУ, где давление не превышает 30 бар и разбавителем является атмосферный азот.

Согласно литературным данным [5], углекислый газ является ингибитором химических реакций, скорость распространения пламени в среде $\text{O}_2\text{-CO}_2$ меньше, чем в смеси $\text{O}_2\text{-N}_2$ при одинаковой концентрации разбавителя и прочих равных условиях. Эффект торможения реакций горения в среде CO_2 разбавителя обусловлен отличием его физических свойств от N_2 , который также выступает разбавителем в камерах сгорания, но не оказывает столь сильного ингибирующего воздействия. Влияние изменения разбавителя на процесс горения объясняется отличиями в свойствах веществ, таких как удельная теплоемкость, теплопроводность, вязкость, коэффициент диффузии (табл. 1). Удельная теплоемкость CO_2 выше теплоемкости N_2 при сопоставимых температурах, поэтому для достижения одинаковой температуры пламени при сжигании в углекислотной среде требуется большая концентрация окислителя. Теплопроводность и вязкость CO_2 и N_2 при равных температурах близки, а коэффициент диффузии CO_2 примерно на 20 % ниже по сравнению с N_2 , что приводит к ухудшению условий смесеобразования и диффузии компонентов реакций в среде CO_2 [6–9].

Таблица 1. Теплоемкость и коэффициент диффузии N_2 и CO_2

Параметр	N_2		CO_2	
	500	1000	500	1000
Температура, °C	500	1000	500	1000
Удельная теплоемкость c_p , кДж/кг·°C	1,08	1,20	1,16	1,30
Коэффициент диффузии D , см ² /с	0,51	1,64	0,39	1,31
Коэффициент теплопроводности λ , Вт/м·K	39,0	68,6	33,3	69,1

Влияние давления на кинетику горения и скорость распространения пламени не однозначно. В [6] показано, что с повышением давления нормальная скорость распространения пламени линейно снижа-

ется. В [7, 8] установлено, что если скорость горения смеси при атмосферном давлении ниже 0,5 м/с, то с возрастанием давления она будет уменьшаться, если скорость горения при атмосферном давлении выше 0,5 м/с, то с возрастанием давления она будет увеличиваться. Причины неоднозначной зависимости скорости горения от давления на сегодняшний день малоизучены.

В [9] с использованием многореакционного механизма горения GRI-Mesh 3.0 выполнен комплекс теоретических исследований влияния параметров работы КТЭК, в частности массового содержания разбавителя в зоне активного горения $\text{CO}_2/(\text{CO}_2+\text{O}_2)$ γ , на основной параметр химической кинетики – нормальную скорость распространения пламени.

В ходе исследований определены основные зависимости физико-химических процессов окисления горючей смеси $\text{CH}_4\text{-O}_2$ в среде CO_2 разбавителя и сделаны следующие основные выводы:

- CO_2 разбавитель является ингибитором химических реакций. При прочих равных условиях скорость нормального распространения пламени в среде CO_2 разбавителя в 4 раза меньше скорости распространения пламени в среде N_2 разбавителя (рис. 2);
- сверхкритическое давление в камере сгорания приводит к снижению нормальной скорости распространения пламени (рис. 3);
- сокращение количества CO_2 разбавителя в зоне активного горения на 20 % позволяет повысить нормальную скорость распространения пламени более чем в 8 раз при прочих равных условиях (рис. 4).

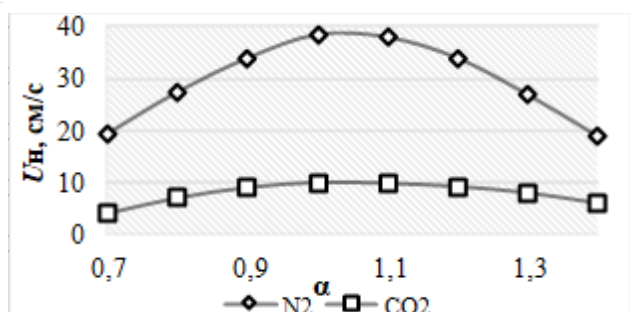


Рис. 2. Нормальная скорость распространения пламени в среде N_2 и CO_2 разбавителей ($\gamma = 0,79$) при атмосферном давлении и $T_{\text{твс}} = 300 \text{ К}$

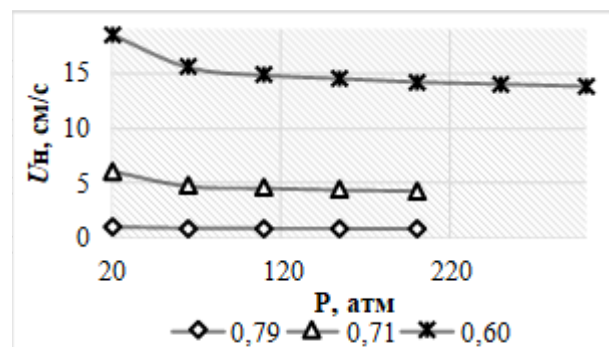


Рис. 3. Нормальная скорость распространения пламени от давления и массовой концентрации CO_2 разбавителя γ при $T_{\text{твс}} = 300 \text{ К}$

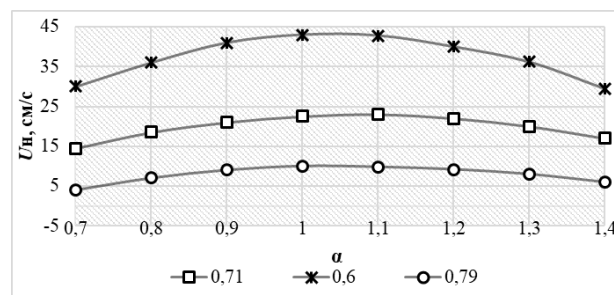


Рис. 4. Нормальная скорость распространения пламени от содержания CO_2 разбавителя при атмосферном давлении ($T_{\text{твс}} = 300 \text{ К}$)

Отметим, что детальное исследование химии процессов горения проводится с использованием моделей реакторов идеального смешения. В реальных камерах сгорания идеальное перемешивание компонентов труднодостижимо, поэтому в условиях, когда необходимо полагаться на движения газов, т. е. на крупные вихри и турбулентность, для эффективного перемешивания компонентов реакции данный подход может давать некорректные результаты.

Целью данного исследования является изучение совместного влияния давления и изменения типа разбавителя в условиях турбулентно-кинетического взаимодействия реагирующих сред для предоставления информации о структуре и форме факела в объеме камеры сгорания.

Объект исследования. Объектом исследования является камера сгорания кислородно-топливного энергетического цикла.

Для определения массовой доли CO_2 разбавителя в камере сгорания КТЭК необходимо определить расход топлива, требуемый для догрева углекислого газа от тем-

пературы 660 до 1083 °С, как того требует рассматриваемый цикл.

Расход топлива можно определить исходя из простого уравнения теплового баланса:

$$Q_{\text{физ}}^{\text{CO}_2} + Q_{\text{физ}}^{\text{O}_2} + Q_{\text{хим}}^{\text{CH}_4} = Q_{\text{физ}}^{(\text{CO}_2+\text{ПГ})}, \quad (1)$$

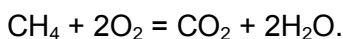
где $Q_{\text{физ}}^{\text{CO}_2}$ – физическая теплота углекислого газа на входе в камеру сгорания, кВт; $Q_{\text{физ}}^{\text{O}_2}$ – физическая теплота кислорода, кВт; $Q_{\text{хим}}^{\text{CH}_4}$ – теплота сгорания метана, кВт; $Q_{\text{физ}}^{(\text{CO}_2+\text{ПГ})}$ – физическая теплота CO_2 и продуктов горения метана в кислороде.

Физическая теплота определяется по уравнению

$$Q_{\text{физ}}^{\text{эл-та}} = c_k t_k G_k, \quad (2)$$

где c_k – теплоемкость при заданном давлении и температуре, кДж/кг·°С; t_k – температура, °С; G_k – расход, кг/с.

Для определения количества требуемого метана необходимо знать удельные выходы продуктов горения при горении 1 кг топлива. Для этого составим уравнение горения метана с кислородом:



С учетом мольной массы каждого из элементов получаем, что на 1 кг метана требуется 4 кг кислорода (O_2), при этом образуется 2,75 кг CO_2 и 2,25 кг H_2O . Необходимый расход топлива составляет 0,015 кг CH_4 на 1 кг CO_2 . На расчетные 560 кг CO_2 требуется всего 8,1 кг CH_4 и 32,4 кг O_2 .

В большинстве ГТУ используется несколько камер сгорания, однако массовое соотношение метана, кислорода и углекислого газа в каждой из камер сгорания сохраняется вне зависимости от принятого при проектировании числа КС (табл. 2).

Таблица 2. Массовое соотношение CH_4 , O_2 и CO_2 , подаваемых в область горения

Компонент	Массовое соотношение компонентов
CH_4	0,013
O_2	0,054
CO_2	0,933

Массовая доля разбавителя в камере сгорания КТЭК равна 0,945, что значительно выше, чем в стандартных ГТУ, работающих на воздухе. Учитывая ингибирующее воздействие углекислого газа на процесс

горения (в сочетании с повышенным давлением), весь объем CO_2 не целесообразно подавать в смеси с окислителем. Однако часть его необходимо подать в зону активного горения для снижения максимальной температуры и охлаждения металла жаровой трубы.

В связи с этим предложено углекислый газ разделить на два потока (рис. 5):

1) первый поток подается в область горения метана с кислородом;

2) второй поток – в камеру сгорания после области выгорания основной массы топлива для конвективного охлаждения и смешения с высокотемпературными продуктами горения.

Результаты исследования кинетики окисления метана [8] позволили определить отправные точки для формирования конструктивного облика камеры сгорания:

- в зону горения подается не более 20 % от общего количества CO_2 , участвующего в цикле, основной объем подмешивается в смесителе (при подмесе большего количества разбавителя величина скорости распространения пламени слишком мала);

- в смеси с кислородом во фронтное устройство подается не более 10 % от общего количества CO_2 разбавителя, что соответствует массовой доле γ не более 0,634;

- область стабилизации горения до подачи дополнительного CO_2 не менее 130 мм.

Объем жаровой трубы был определен по величине объемной теплонапряженности $Q_v = 700 \text{ кДж} / (\text{м}^3 \cdot \text{час} \cdot \text{Па})$ согласно выражению

$$Q_v = \frac{3600 G_T Q_{\text{хим}}^{\text{CH}_4} \eta_r}{V_{\text{ж}} P_k}, \quad (3)$$

где G_T – расход топлива, кг/с; $Q_{\text{хим}}^{\text{CH}_4}$ – теплота сгорания топлива, кДж/кг; η_r – полнота выгорания топлива; $V_{\text{ж}}$ – объем жаровой трубы, м^3 ; P_k – давление на выходе из камеры сгорания, Па.

Рекомендуемое соотношение высоты и диаметра камеры сгорания $L_{\text{ж}}/H = 2,5$.

Методы исследований. Моделирование горения метана с кислородом в углекислотной среде при сверхкритических давлениях проводилось в программном комплексе Ansys Fluent. Для учета турбулентно-кинетического взаимодействия были использованы модель горения Eddy Dis-

sipation and Finite Rate Chemistry и трехступенчатый механизм окисления метана. При проведении расчетов были сделаны следующие допущения:

- окислителем выступает 100 % кислород (O_2);
- модель камеры сгорания не включает в себя зону смешения;
- кинетический механизм упрощен до 3-х глобальных реакций;

• скорость химических реакций определяется как минимальная, определенная по скорости образования/расходования веществ, и скорость химической реакции с константой скорости, определенной по уравнению Аррениуса:

$$R = \text{MIN}(R_{\text{react}}, R_{\text{prod}}), \quad (4)$$

где R_{react} , R_{prod} – скорости расходования исходных веществ и образования продуктов соответственно;

$$R = K(T) T^{\beta} (C_A)(C_B), \quad (5)$$

где T^{β} – температурный коэффициент; C_A , C_B – концентрации исходных компонентов;

$$K(T) = A e^{\left(\frac{-E_a}{RT}\right)}, \quad (6)$$

где A – предэкспоненциальный множитель; E_a – энергия активации.

Для снижения времени расчетов задача была разделена на две:

1) моделирование подачи компонентов в горелочное устройство, их смешение и закрутка в целях подбора оптимального диаметра сопел подачи кислорода для равномерного смешения с CO_2 , получения эпюр концентраций компонентов на выходе;

2) моделирование горения в объеме камер сгорания с добавлением дополнительного CO_2 для конвективного охлаждения стен (при этом была рассмотрена только область горения, без зоны смешения).

Рис. 5 символично иллюстрирует предварительный дизайн внутреннего объема камеры сгорания, который включает в себя сопло подачи газовой смеси, корпус камеры сгорания, отверстия для ввода CO_2 вдоль стен. Задание в качестве граничного условия теплового потока от стен имитирует наличие охлаждающего канала для конвективного охлаждения стен.

На входе в модель задан массовый расход смеси топлива с окислителем с концентрациями, полученными при моделировании горелочного устройства. Поток CO_2 на входе в отверстия системы охлаждения

задан с цилиндрическими координатами, моделирующими наклон сопел на 60° .

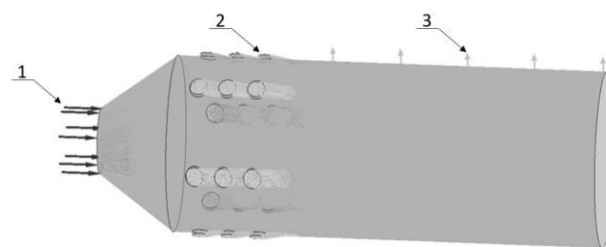


Рис. 5. Дизайн внутреннего объема камеры сгорания: 1 – подача топливно-воздушной смеси; 2 – подача CO_2 вдоль стен камеры сгорания; 3 – тепловой поток

Моделирование проводилось для двух величин наклона лопаток горелки – 30° и 45° и двух массовых концентраций разбавителя – 0,634 и 0,46.

В процессе численного моделирования основной задачей являлось получение объемных контуров распределения температуры и концентрации монооксида углерода для оценки наличия факела, стабилизирующегося в районе устья горелки.

Результаты исследования. Результаты моделирования показывают, что массовая концентрация CO_2 разбавителя в зоне активного горения, равная 0,634, оказывает подавляющее воздействие на процесс возгорания метана и стабилизации пламени. Имеет место локальное возгорание, однако факел не стабилизируется на выходе из горелки, и при достижении потоком области подачи вторичного CO_2 процесс горения прекращается. Об этом свидетельствуют величины химического недожога, равные 29 и 13 % для углов закрутки лопаток 30° и 45° (рис. 6).

В случае, когда $\gamma = 0,460$, факел стабилизируется у устья горелки при угле закрутки потока, равном 45° (на рис. 7,б четко видны области зажигания). Протяженность области активного горения для расчета составляет 40 % от общей длины камеры сгорания для угла закрутки 30° , при закрутке ТВС на 45° она сокращается до 20 % длины камеры сгорания, активное горение завершается до подачи вторичного CO_2 на охлаждение. Наличие конуса в начале камеры сгорания позволяет изолировать область стабилизации факела от вторичных токов охлаждающего CO_2 .

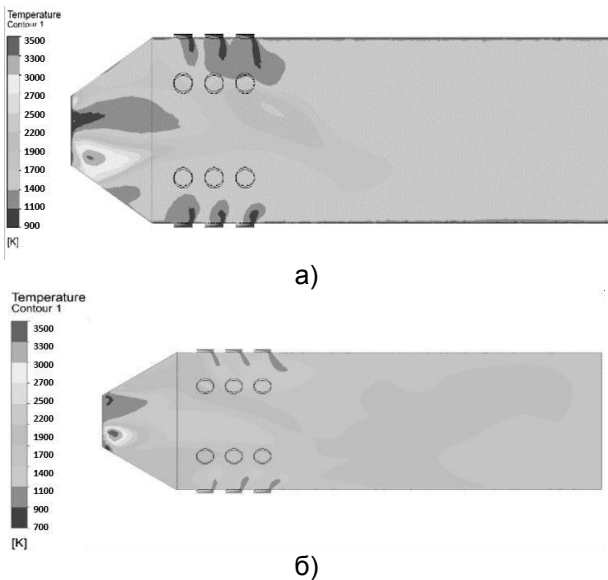


Рис. 6. Контуры температур в поперечном сечении камеры сгорания при $\gamma = 0,634$: а – угол поворота лопаток 30° , б – угол поворота лопаток 45°

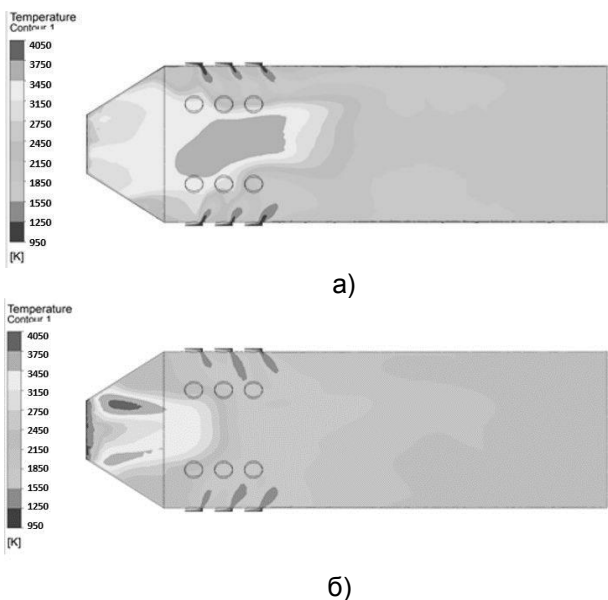


Рис. 7. Контуры температур в поперечном сечении камеры сгорания для $\gamma = 0,460$: а – угол поворота лопаток 30° , б – угол поворота лопаток 45°

В области, где струи CO_2 разбавителя проникают в поток, происходит снижение температуры, что тормозит процессы горения, поэтому подача дополнительного CO_2 разбавителя должна осуществляться после области стабилизации факела и основного горения.

Контуры молярной концентрации монооксида углерода и линии тока представлены на рис. 8, 9.

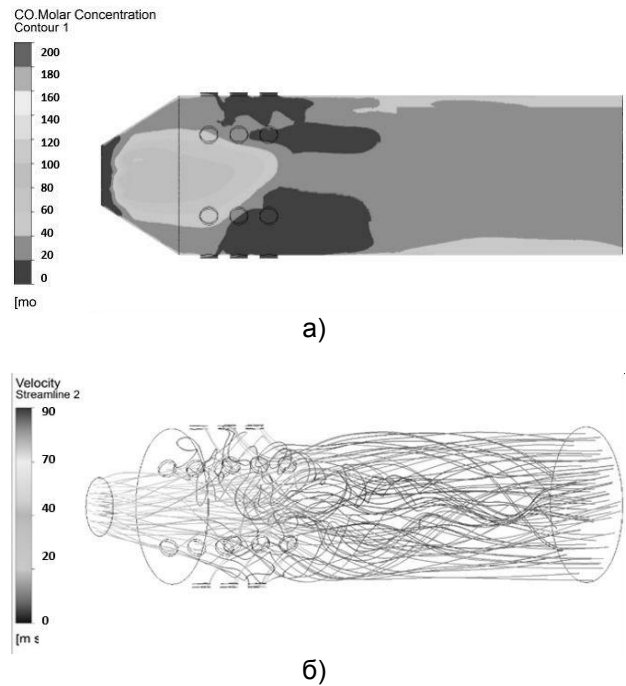


Рис. 8. Результаты моделирования при $\gamma_1 = 0,460$ и угле закрутки 30° : а – контур молярной концентрации CO_2 разбавителя в поперечном сечении; б – линии тока в объеме

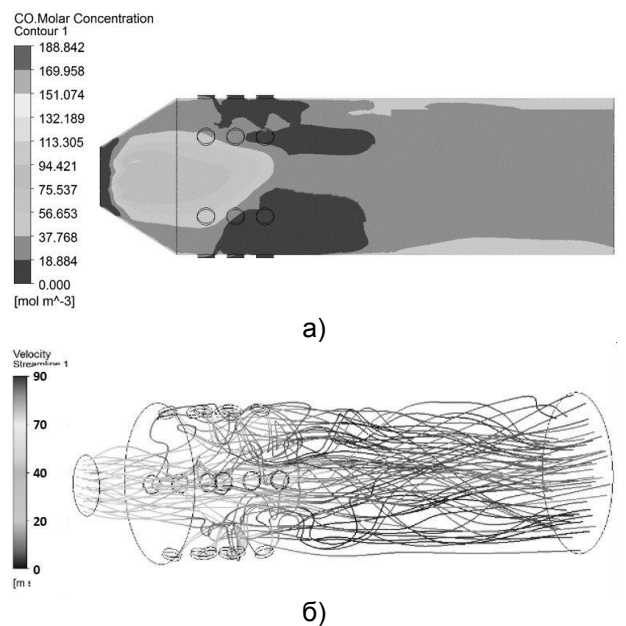


Рис. 9. Результаты моделирования при $\gamma_1 = 0,460$ и угле закрутки 45° : а – контур молярной концентрации CO_2 разбавителя поперечном сечении; б – линии тока в объеме

В результате данного исследования получены значения максимальной массовой концентрации ингибирующего разбавителя, не способствующие затуханию факела в объеме камеры сгорания. Величина должна составлять не более 50 %, причем для стабилизации пламени необходима интенсивная закрутка компонентов горения.

Таблица 3. Результаты моделирования горения $\text{CH}_4\text{-O}_2$ в среде углекислого газа при сверхкритическом давлении

Угол поворота лопаток	Массовая концентрация CO_2	Средне-массовая температура на выходе, °C	Недожог CH_4 на выходе, %	Концентрация CO_2 разбавителя на выходе, ppm
30	0,634	1270	29	80,4
30	0,460	1778	2	106,4
45	0,634	1391	17	95,2
45	0,460	1789	0,2	146

Выводы. На основе результатов численного моделирования в программном комплексе CFD были исследованы аэродинамика структуры потока, процессы смесеобразования и горения топлива в камере сгорания и сделаны следующие выводы:

1. Стабилизация факела в объеме камеры сгорания происходит при доле CO_2 разбавителя, подаваемого в смеси с окислителем не более 0,46–0,5, дальнейший прирост приводит к торможению процессов горения.

2. Закрутка потока способствует стабилизации факела и сокращению его длины.

3. Добавление дополнительного CO_2 разбавителя формирует локальные зоны с пониженной температурой, что приводит к торможению процессов горения.

4. В зону стабилизации факела должны быть исключены подмеси охлаждающего CO_2 .

5. В условиях стабильного горения профили температур и скорости на выходе из объема камеры сгорания равномерны.

На основе полученных результатов были сформулированы следующие рекомендации по организации процесса горения в камере сгорания:

1. В камеру сгорания должно подаваться не более 20 % от общего содержания углекислого газа, причем его необходимо разделять на два подпотока – в смеси с окислителем (массовая концентрация не более 0,5) и вдоль стен камеры сгорания для охлаждения. Подобная организация процесса горения позволяет брать за основу рекомендации по конструкции для классических ГТУ с внесением некоторых корректировок.

2. Для стабилизации факела и сокращения его длины необходима установка лопаток для завихрения топлива и окисли-

теля в смеси с CO_2 на входе в камеру сгорания.

3. Скорость подачи топлива и окислителя в смеси с CO_2 в камеру сгорания должна быть не более 20–25 м/с, скорость подачи охлаждающего CO_2 – не более 60 % от скорости подачи смеси топлива и окислителя.

4. Подача CO_2 на охлаждение должна осуществляться не менее чем в 130 мм от устья горелки. Область стабилизации факела должна быть изолирована от вторичных токов охлаждающего CO_2 .

Список литературы

1. **Weizhong F.** The research on design and technology of new high efficiency supercritical unit – a kind of cross-compound steam turbine generator unit in a manner of elevated and conventional layout // Proceedings of the 2-nd IEA CCC Workshop on Advanced Ultras-Supercritical Coal-Fired Power Plants. – Rome, Italy, 2014.

2. **Alenezi A., Kapat J.S.** Thermodynamic analysis of CO_2 Allam cycle for concentrated solar power complemented with oxy-combustion // Proceedings of AIAA Propulsion and Energy Forum, Indianapolis. – Indiana, USA, 2019.

3. **High** pressure combustion test of gas turbine combustor for 50MWth supercritical CO_2 demonstration power plant on Allam cycle / S. Suzuki, Y. Iwai, M. Itoh, et al. // Proceedings of the International Gas Turbine Congress. – Tokyo, Japan, 2019.

4. **Methane** oxy-combustion for low CO_2 cycles: Blowoff measurements and analysis / A.B. Amato, P.D. Hudak, D. Carlo, et al. // Journal of Engineering for Gas Turbines and Power. – 2011. – 133(6).

5. **Polezhaev I.L., Yu V.** Normal flame propagation speed and analysis of the influence of system parameters on it // Thermophysics of high temperatures. – 2005. – Vol. 43. – P. 933–942.

6. **Karpov V.L., Mostinsky I.L., Polezhaev Yu.V.** Laminar and turbulent regime of combustion of hydrogen flooded streams // High Temperature Thermal Physics. – 2005. – Vol. 43, no. 1. – P. 115.

7. **Lewis B., Elbe G.** Combustion, flame and explosions in gases: trans. from English. – New York; London, 1968. P. 592.

8. **Natural** Gas-Oxygen Combustion in a Super-Critical Carbon Dioxide Gas Turbine Combustor / I. Komarov, D. Kharlamova, B. Makhmutov, et al. // E3S Web of Conferences. – 2020. – Vol. 178. – P. 01027.

9. **USC Mech** Version II, High-temperature combustion reaction model of $\text{H}_2/\text{CO}/\text{C}_1\text{-C}_4$ compounds / H. Wang, X. You, A.V. Joshi, et al. 2007.

http://ignis.usc.edu/Mechanisms/USCMech%20II/USC_Mech%20II.htm.

References

1. Weizhong, F. The research on design and technology of new high efficiency supercritical unit – a kind of cross-compound steam turbine generator unit in a manner of elevated and conventional layout. In Proceedings of the 2-nd IEA CCC Workshop on Advanced Ultras-Supercritical Coal-Fired Power Plants. Rome, Italy, 2014.
2. Alenezi, A., Kapat, J.S. Thermodynamic analysis of CO₂ Allam cycle for concentrated solar power complemented with oxy-combustion. In Proceedings of AIAA Propulsion and Energy Forum, Indianapolis. Indiana, USA, 2019.
3. Suzuki, S., Iwai, Y., Itoh, M., Morisawa, Y., Jain, P., Kobayashi, Y. High pressure combustion test of gas turbine combustor for 50MWth supercritical CO₂ demonstration power plant on Allam cycle. In Proceedings of the International Gas Turbine Congress. Tokyo, Japan, 2019.
4. Amato, A.B., Hudak, P.D., Carlo, D., Noble, D., Scarborough, J., Seitzman, T., Lieuwen, T. Methane oxy-combustion for low CO₂ cycles: Blowoff measurements and analysis. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 2011, 133 (6).
5. Polezhaev, I.L., Yu, V. Normal flame propagation speed and analysis of the influence of system parameters on it. *Thermophysics of high temperatures*, 2005, vol. 43, pp. 933–942.
6. Karpov, V.L., Mostinsky, I.L., Polezhaev, Yu.V. Laminar and turbulent regime of combustion of hydrogen flooded streams. *High Temperature Thermal Physics*, 2005, vol. 43, no. 1, pp. 115.
7. Lewis, B., Elbe, G. *Combustion, flame and explosions in gases*. 1968, p. 592.
8. Komarov, I., Kharlamova, D., Makhmutov, B., Shabalova, S., Kaplanovich, I. Natural Gas-Oxygen Combustion in a Super-Critical Carbon Dioxide Gas Turbine Combustor. *E3S Web of Conferences*, 2020, vol. 178, p. 01027.
9. Wang, H., You, X., Joshi, A.V., Davis, S.G., Laskin, A., Egolfopoulos, F., Law, C.K. USC Mech Version II, High-temperature combustion reaction model of H₂/CO/C₁-C₄ compounds, 2007. Available at: http://ignis.usc.edu/Mechanisms/USC_Mech%20II/USC_Mech%20II.htm.