

УДК 517.95:536.2:533.2

Численное моделирование сгорания биогаза в камере с центральным впрыском воздуха

Мизхер У.Д.¹, Мизхер М.Д.², Абрашкин П.М.³, Вельмисов П.А.³

Южный технический университет (Ирак)¹, Университет Аль-Шатра (Ирак)²,
Ульяновский государственный технический университет³

Аннотация: В работе представлено численное исследование реагирующего турбулентного потока. Результаты исследования предназначены для повышения стабильности и экологичности сжигания низкокалорийного биогаза. На основе решения системы уравнений Навье-Стокса (RANS), дополненной двухпараметрической моделью турбулентности Realizable $k - \epsilon$ и концепцией вихревого рассеяния (EDC), проанализировано влияние центральной струи вторичного воздуха на макроструктуру и термические свойства факела. Показано, что впрыск инициирует образование устойчивой центральной тороидальной зоны рециркуляции (CTRZ), которая возвращает продукты сгорания и надежно стабилизирует корень пламени. Установлено, что подача 20% центрального воздуха является оптимальным интегральным режимом, обеспечивающим эффективное микроперемешивание, минимизацию выбросов недогоревшего угарного газа (CO) и удержание термических оксидов азота в допустимых безопасных пределах. Полученные данные формируют теоретическую базу для проектирования и модернизации промышленных эко-горелок.

Ключевые слова: вычислительная гидродинамика (CFD), горение биогаза, центральный впрыск воздуха, концепция вихревого рассеяния (EDC), снижение выбросов.

1. Введение

В условиях глобальных экологических вызовов использование возобновляемых источников энергии, в частности биогаза, представляет собой перспективное направление для снижения углеродного следа [1]. Однако сырой биогаз характеризуется значительным содержанием диоксида углерода (CO_2), что снижает его низшую теплоту сгорания и скорость распространения пламени. Прямое сжигание такого топлива часто ведет к нестабильности горения, отрыву пламени и высоким выбросам недогоревших углеводородов и оксида углерода (CO). В настоящей работе для решения этих проблем предлагается внедрение центральной струи вторичного воздуха, направленное на интенсификацию смешения в ядре факела и стабилизацию зоны горения.

2. Математическая модель

Для описания стационарного, неизотермического, реагирующего турбулентного потока многокомпонентной газовой смеси применяется система уравнений Навье-Стокса, осредненных по Рейнольдсу (RANS) [2, 3]:

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i) = 0, \tag{1}$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \rho \overline{u'_i u'_j} \right], \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i h) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{k_{eff}}{C_p} \frac{\partial h}{\partial x_i} \right) + S_h, \quad (3)$$

где p – давление, ρ – плотность, u_i – проекции вектора скорости, μ – динамическая вязкость, $(-\rho \overline{u'_i u'_j})$ представляет собой тензор напряжений Рейнольдса, описывающий турбулентный перенос импульса, h – энтальпия смеси, k_{eff} – эффективная теплопроводность (учитывающая турбулентную теплопроводность), C_p – удельная теплоемкость при постоянном давлении, S_h – объемный источник тепла за счет экзотермических химических реакций:

Замыкание системы уравнений осуществляется с помощью двухпараметрической модели турбулентности Realizable $k - \epsilon$, обладающей высокой точностью для коаксиальных струй и зон обратных токов. Уравнения переноса кинетической энергии турбулентности (k) и скорости ее диссипации (ϵ) имеют вид:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i k) &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \rho \epsilon, \\ \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i \epsilon) &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + \rho C_1 S_\epsilon - \rho C_2 \frac{\epsilon^2}{k + \sqrt{\nu \epsilon}}. \end{aligned} \quad (4)$$

Турбулентно-химическое взаимодействие и локальный состав смеси рассчитываются на основе концепции вихревого рассеяния (Eddy Dissipation Concept – EDC), которая предполагает, что химические реакции протекают в микрозонах турбулентных вихрей.

3. Постановка задачи и граничные условия

Расчетная область моделирует горизонтальный осесимметричный канал камеры сгорания. Конструкция включает центральный канал подачи окислителя (воздуха), коаксиальный канал для биогаза и периферийный канал для основной подачи окислителя. Биогаз задавался бинарной смесью: 65% CH_4 и 35% CO_2 при начальной температуре 300 К и фиксированном расходе 0.05 г/с. Массовый расход центрального впрыска варьировался в диапазоне 0–40% от общего расхода воздуха (0.3 г/с). Стенки камеры моделировались как адиабатические с условием прилипания.

4. Результаты вычислительных экспериментов

1. **Анализ базового режима (без центрального впрыска):** Из-за высокого балластирующего эффекта CO_2 , зона воспламенения сдвинута далеко вниз по течению, а ядро факела прижато к периферии. Это приводит к слабой химической реакционной способности смеси в прикорневой зоне (рис. 1, кривая 0%).
2. **Влияние умеренного впрыска (10–20%):** Введение центральной струи окислителя радикально меняет макроструктуру потока. Формируется высокоинтенсивный сдвиговый слой и устойчивая центральная тороидальная зона рециркуляции (CTRZ). Эта зона возвращает раскаленные продукты сгорания к основанию пламени, стабилизируя корень факела (рис. 1, кривая 20%). Режим с 20% впрыска обеспечивает оптимальное турбулентное микроперемешивание,

минимизируя выбросы недогоревшего СО при умеренной генерации термических оксидов азота (NO_x).

3. **Эффект термического демпфирования (30–40%):** При избыточном центральном впрыске массив холодного воздуха (300 К) вызывает локальное термическое разбавление реакционной зоны («эффект продувки»). Для режима 40% зафиксировано резкое падение концентрации NO_x до минимального уровня 0.0055 г/м^3 , так как температура в ядре падает ниже критического порога активации механизма Зельдовича. Однако это сопровождается риском деформации фронта пламени.

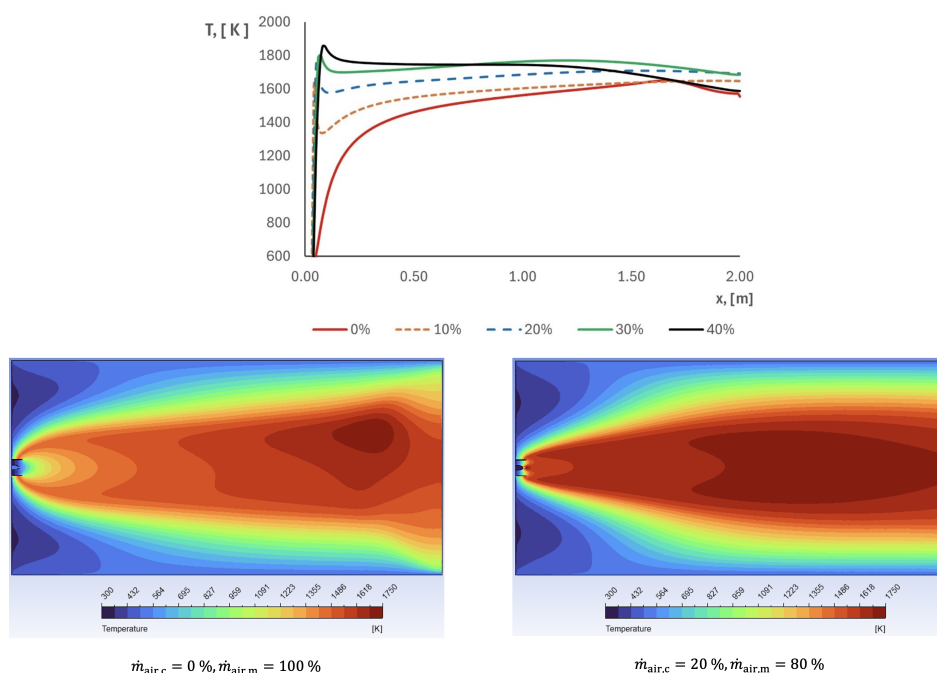


Рис. 1. Двухмерные контуры распределения температуры (К) в камере сгорания при различных режимах распределения центрального ($\dot{m}_{air,c}$) и основного ($\dot{m}_{air,m}$) воздуха и изменение локальной температуры (T) вдоль центральной оси камеры сгорания (x) при различных режимах подачи центрального воздуха (от 0% до 40%).

5. Заключение

Результаты численного моделирования доказывают эффективность метода центрального впрыска вторичного воздуха для повышения стабильности горения низкокалорийных биотоплив. Установлено, что с точки зрения баланса аэродинамической стабилизации, полноты сгорания и экологических показателей оптимальной является конфигурация с подачей 20% центрального воздуха. Полученные данные могут служить теоретической базой для проектирования и модернизации промышленных эко-горелок.

Литература

1. Чжан Л., Чжан Ш., Чжоу Х. и др. Эффективное сжигание низкокалорийных промышленных газов: возможности и вызовы // Energies. 2022. Т. 15, № 23. С.

9224.

2. Бялецкий Т. Математическая модель процесса сгорания для турбореактивного двигателя на основе свойств топлива // International Journal of Energy and Environmental Engineering. 2022. Т. 13. С. 1309-1316. DOI: 10.1007/s40095-022-00489-2.
3. Леонтьев А.И., Кузма-Кичта Ю.А., Попов И.А. Тепломассообмен и гидродинамика в закрученных потоках // Теплоэнергетика. 2017. № 2. С. 36-54.

MSC 49K20, 76F60, 80A20

Numerical simulation of biogas combustion in a chamber with central air injection

U.J. Mizher¹, M.J. Mezher², P.M. Abrashkin³, P.A. Velmisov³

Southern Technical University (Iraq)¹, Al-Shatrah University (Iraq)², Ul'yanovsk State Technical University³

Abstract: The paper presents a numerical study of the reacting turbulent flow. The results of the study are intended to increase the stability and environmental friendliness of low-calorie biogas combustion. Based on the solution of the system of Navier-Stokes equations (RANS), supplemented by the two-parameter model of turbulence Realizable $k - \epsilon$ and the concept of vortex scattering (EDC), the influence of the central jet of secondary air on the macrostructure and thermal properties of the flare is analyzed. It is shown that injection initiates the formation of a stable central toroidal recirculation zone (CTRZ), which returns the combustion products and reliably stabilizes the flame root. It has been established that the supply of 20% of the central air is the optimal integrated mode, ensuring effective micro-mixing, minimizing emissions of unburned carbon monoxide (CO) and the retention of thermal nitrogen oxides within acceptable safe limits. The data obtained form the theoretical basis for the design and modernization of industrial eco-burners.

Keywords: computational fluid dynamics (CFD), biogas burning, central air injection, vortex scattering concept (EDC), emission reduction.