

УДК 532.5:536.4:517.9

## Моделирование процессов горения тангенциально закрученной топливовоздушной смеси \*

У. Д. Мизхер

Ульяновский государственный технический университет

*Аннотация:* Поиск и развитие альтернативных источников энергии для обеспечения жизнедеятельности человека является приоритетной задачей для современного общества. Одним из перспективных направлений является использование биогаза как источника тепловой энергии для энергетических установок. Установлено, что основное отличие биогаза от природного газа вызвано наличием в его составе более 30% углекислого газа, что влияет на плотность, теплотворность и скорость распространения пламени. Для сжигания биогаза в современных энергетических установках, работающих на природном газе, необходимо модифицировать горелочные устройства. Для качественной модификации горелочных устройств необходимо иметь теоретические данные об эффективных режимах горения биогаза. В работе представлена модель турбулентности  $k - \epsilon$  (realizable), основой которой является система дифференциальных уравнений с частными производными, позволяющая моделировать процесс горения природного газа и биогаза при тангенциальной закрутке воздуха. Представлены качественные характеристики биогаза, позволяющие провести анализ и развить теорию об эффективном сжигании биогаза в энергетических установках.

*Ключевые слова:* аэрогидродинамика, закрученная струя, выбросы, температура, природный газ, биогаз, компьютерная модель, ANSYS Fluent.

### 1. Введение

Использование биогаза в качестве топлива для энергетических и водогрейных котлов, а также газотурбинных установок, приобретает всё большую актуальность в последние годы. Это можно связать как минимум с тремя причинами:

- 1) загрязнение окружающей среды и большие объёмы выбросов парниковых газов;
- 2) необходимость переработки биоразлагаемых бытовых отходов и очистки городских, а также промышленных сточных вод, в результате которых, как остаточный продукт, образуется биогаз;
- 3) высокая стоимость природного газа.

Основным качественным отличием биогаза от природного газа является наличие примесей, таких как: углекислый газ, водород, сероводород, аммиак [1].

Математическое моделирование в форме систем дифференциальных уравнений и численные методы достаточно широко применяются для исследования процессов горения. При этом, используя известные классические модели, возможно проводить анализ моделируемых процессов на основе асимптотических приближений и реализовывать эффективные технические решения. Для исследования тепловых и газодинамических процессов в работе используется модель турбулентности  $k - \epsilon$  (realizable), позволяющая моделировать процесс горения топливо-воздушной смеси [2], [3].

---

\* Работа выполнена при финансовой поддержке грантами РФФИ и Ульяновской области (проекты № 18-41-730015, №19-41-730006), грантом Президента РФ (проект НШ-2493.2020.8).

## 2. Компьютерная модель

Для моделирования процесса горения закрученного топливно-воздушного потока используются уравнения неразрывности, Навье-Стокса, энергии [2]- [4].

$$\operatorname{div}(\rho \vec{V}) = 0,$$

$$\operatorname{div}(\rho u \vec{V}) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \operatorname{div}(\mu \operatorname{grad} u) + \left( \frac{\partial(\overline{\rho u'^2})}{\partial x} + \frac{\partial(\overline{\rho u'v'})}{\partial y} + \frac{\partial(\overline{\rho u'w'})}{\partial z} \right),$$

$$\operatorname{div}(\rho v \vec{V}) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \operatorname{div}(\mu \operatorname{grad} v) + \left( \frac{\partial(\overline{\rho u'v'})}{\partial x} + \frac{\partial(\overline{\rho v'^2})}{\partial y} + \frac{\partial(\overline{\rho v'w'})}{\partial z} \right),$$

$$\operatorname{div}(\rho w \vec{V}) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \operatorname{div}(\mu \operatorname{grad} w) + \left( \frac{\partial(\overline{\rho u'w'})}{\partial x} + \frac{\partial(\overline{\rho v'w'})}{\partial y} + \frac{\partial(\overline{\rho w'^2})}{\partial z} \right),$$

$$\begin{aligned} \operatorname{div} \left[ \rho \left( E + \frac{V^2}{2} \vec{V} \right) \right] = & \rho \dot{q} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) - p \left( \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) - \\ & - \frac{2}{3} \mu \left( \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 + \mu \left[ 2 \left( \frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + 2 \left( \frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + 2 \left( \frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 + \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + \right. \\ & \left. + \left( \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 \right]. \end{aligned}$$

Здесь  $u, v, w$  – компоненты скорости по оси  $(x, y, z)$  последовательно,  $p$  – давление,  $\rho$  – плотность,  $(-\overline{\rho u'^2}, -\overline{\rho v'^2}, -\overline{\rho w'^2}, -\overline{\rho u'v'}, -\overline{\rho u'w'}, -\overline{\rho v'w'})$  – напряжения Рейнольдса,  $\mu$  – динамическая вязкость,  $E$  – внутренняя энергия,  $\dot{q}$  – скорость объемного добавления тепла на единицу массы,  $T$  – температура,  $\lambda$  – теплопроводность,  $\vec{V}$  – вектор скорости:

$$\vec{V} = ui + vj + wk.$$

Уравнение модели турбулентности  $k$ - $\epsilon$  для описания процесса горения для стационарного потока примет вид, согласно [4]

$$\operatorname{div}(\rho k \vec{V}) = \operatorname{div} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \operatorname{div} k \right] + G_k + G_b - \rho \epsilon - Y_M + S_k,$$

$$\operatorname{div}(\rho \epsilon \vec{V}) = \operatorname{div} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \operatorname{div} \epsilon \right] + \rho C_1 S_\epsilon - \rho C_2 \frac{\epsilon^2}{k + \sqrt{\nu \epsilon}} + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} C_{3\epsilon} G_b + S_\epsilon,$$

где

$$C_1 = \max \left[ 0.43, \frac{\eta}{\eta + 5} \right], \quad C_{3\epsilon} = \tanh \left| \frac{v}{u} \right|, \quad \eta = S \frac{k}{\epsilon}.$$

Постоянные модели  $C_{1\epsilon}, C_2, \sigma_k$  и  $\sigma_\epsilon$  имеют по умолчанию следующие значения [4]:  $C_{1\epsilon} = 1.44, C_2 = 1.9, \sigma_k = 1, \sigma_\epsilon = 1.2$ ,  $k$  – кинетическая энергия турбулентности,  $\epsilon$  – скорость диссипации,  $G_k$  – источник за счёт градиента средней скорости,  $G_b$  – источник за счёт архимедовых сил (важно для конвективных течений),  $Y_M$  – представляет собой вклад флуктуирующей дилатации в сжимаемой турбулентности в общую скорость диссипации,  $C_2$  и  $C_{1\epsilon}$  – постоянные,  $\sigma_k$  и  $\sigma_\epsilon$  – турбулентные числа Прандтля для  $k$  и  $\epsilon$ , соответственно,  $S_\epsilon, S_k$  – определяемые пользователем источники,  $S$  – тензор средней скорости деформации,  $\nu = \mu/\rho$  – кинематическая вязкость,  $\mu_t$  – турбулентная (или вихревая) вязкость, вычисляется путем объединения  $k$  и  $\epsilon$  следующим образом:

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon},$$

где  $C_\mu$  – эмпирический коэффициент, равный  $C_\mu = 0.09$ .

### 3. Результаты исследований

Одним из наиболее эффективных способов интенсификации процесса горения является закрутка топливовоздушного потока для лучшего смешения и распределения топлива и воздуха [5]. Исследование процессов горения природного газа и биогаза проведено с использованием программы ANSYS. С использованием программного продукта была смоделирована камера сгорания с одной горелкой, схема камеры сгорания и горелочного устройства представлена на рис.1. Камера сгорания состоит из четырёх стенок с заданной постоянной температурой  $T_c = 350$  и имеет следующие геометрические характеристики:  $L = 3.11$  м;  $H = 0.75$  м. Горелочное устройство содержит канал для подвода газа (метан/биогаз)  $a = 0.03$  м и канал с завихрителем для подвода воздуха  $b = 0.22$  м.

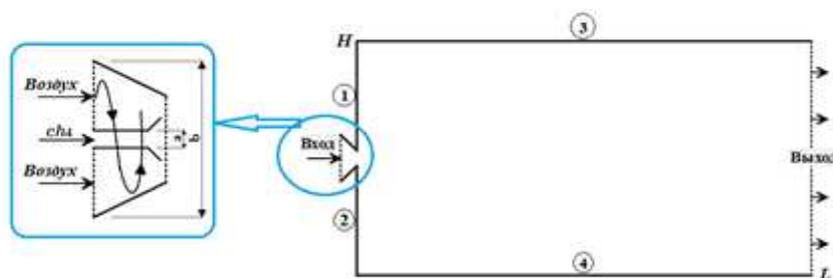


Рис. 1. Схема камеры сгорания.

В ходе математического моделирования было исследовано влияние закрутки воздуха на эффективность процесса горения, проведен сравнительный анализ эффективности сжигания метана и биогаза.

На рис. 2 представлены результаты горения метана с закруткой воздуха  $\omega = 120$  рад/с и  $\omega = 300$  рад/с. Моделируемый расход газа через горелку  $\dot{m}_{methane} = 2$  г/с, расход воздуха  $\dot{m}_{air} = 20$  г/с.

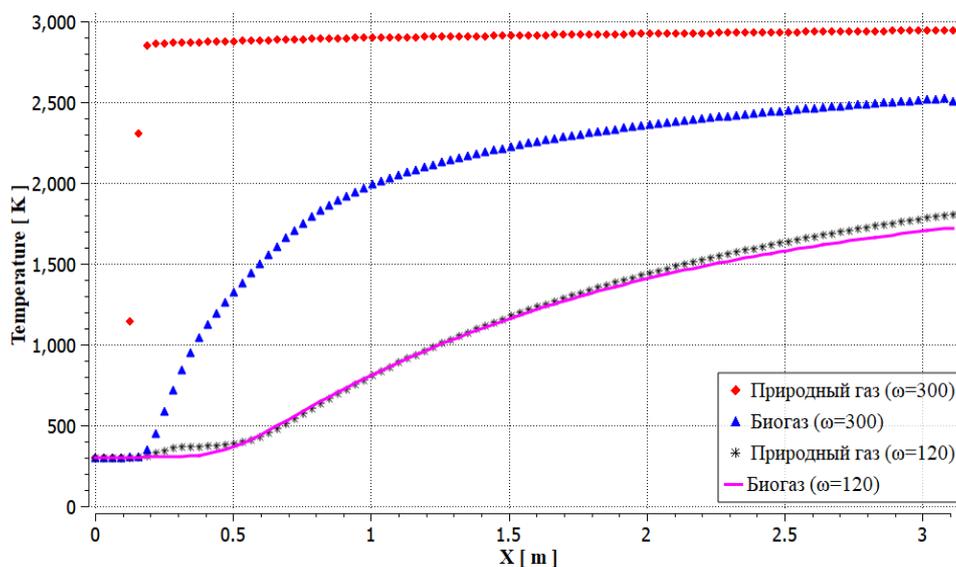


Рис. 2. Значение температур в камере сгорания при сжигании топливовоздушной смеси.

## 4. Заключение

Основной проблемой при сжигании биогаза является низкая скорость распространения пламени в камере сгорания, что приводит к увеличению длины факела и отрыву пламени, вследствие чего может гаснуть горелка. Для стабилизации процесса горения биогаза необходимо увеличивать закрутку топливовоздушного потока.

## Литература

1. Сигал И. Я., Марасин А. В., Смихула А. В. Газогорелочные устройства для сжигания биогаза в котлах. Энерготехнологии и ресурсосбережение. 2014. №. 3. С. 68-71.
2. Versteeg H., Malalasekera V. Introduction to computational fluid dynamics. Prentice Hall. 2nd ed. 2007. 520 p.
3. Hoffman K. A., Chiang S. T. Computational Fluid Dynamics. Vol. 2. Engineering Education System. 2000. 479 p.
4. ANSYS FLUENT 12.0. Theory Guide. April, 2009.
5. Леонтьев А. И., Кузма-Кичта Ю. А., Попов И. А. Теплообмен и гидродинамика в закрученных потоках. Теплоэнергетика. 2017. №. 2. С. 36-54.

MSC2020 76D05, 80A20, 35B40

## Modeling the combustion processes of a tangentially swirled fuel-air mixture

U. J. Mizher

Ulyanovsk State Technical University

*Abstract:* The search and development of alternative energy sources to ensure human life is a priority task for modern society. One of the promising areas is the use of biogas as a source of thermal energy for power plants. It has been established that the main difference between biogas and natural gas is caused by the presence of more than 30% carbon dioxide in its composition, which affects the density, calorific value and flame propagation speed. For the combustion of biogas in modern power plants operating on natural gas, it is necessary to modify the burners. For a qualitative modification of burners, it is necessary to have theoretical data on the effective modes of combustion of biogas. The paper presents a turbulence model  $k - \varepsilon$  (realizable), which is based on the system of partial differential equations, which makes it possible to simulate the combustion of natural gas and biogas with tangential air swirling. The qualitative characteristics of biogas are presented, which make it possible to analyze and develop the theory of efficient combustion of biogas in power plants.

*Keywords:* aerohydrodynamics, swirl jet, emissions, temperature, natural gas, biogas, computer model, ANSYS Fluent.

## References

1. Sigal I. Ya., Marasin A.V., Smikhula A.V. Gas-burning devices for burning biogas in boilers. Energy Technologies and resource conservation. 2014. No. 3. pp. 68-71. (In Russian).
2. Versteeg H., Malalasekera V. Introduction to computational fluid dynamics. Prentice Hall. 2nd ed. 2007. 520 p.
3. Hoffman K. A., Chiang S. T. Computational Fluid Dynamics. Vol. 2. Engineering Education System. 2000. 479 p.
4. ANSYS FLUENT 12.0. Theory Guide. April, 2009.
5. Leontiev A. I., Kuzma-Kichta Yu. A., Popov I. A. Heat and mass transfer and hydrodynamics in swirling flows. Thermal Engineering. 2017. No. 2. pp. 36-54. (In Russian).