

УДК 517.95:536.2:533.2

Математическое моделирование процесса комбинированного сжигания и анализ влияния разных способов инъекции на эффективность сгорания

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

Южный технический университет¹, Университет Аль-Шатра²,
Ульяновский государственный технический университет³

Аннотация: Поиск экологически чистых альтернативных источников энергии является одной из главных забот современного общества. Биогаз является потенциальным альтернативным топливом, получаемым из органических отходов. Биогаз содержит меньше метана, что снижает теплоту сгорания, и больше углекислого газа, что влияет на скорость распространения пламени. Максимальная адиабатическая температура в камере сгорания котлов тепловых электростанций может быть снижена с одновременным повышением устойчивости горения биогаза за счет комбинированного сжигания природного газа и биогаза при условии тщательного перемешивания топливной смеси с окислителем. В данном исследовании сначала строится аналитическое стационарное температурное поле в струях с использованием автомодельных решений уравнений осесимметричного движения жидкости (газа) в модели вязкой несжимаемой среды. Это решение служит начальным приближением для последующего решения задачи с помощью программного продукта ANSYS Fluent, который используется для моделирования и исследования тепловых и газодинамических процессов в камере сгорания. Процесс горения топливно-воздушной смеси моделируется с использованием модели турбулентности $k - \varepsilon$ (реальная). Проведено численное исследование распределения температуры газа в струе.

Ключевые слова: газодинамика, температура, биогаз, комбинированное горение, модель турбулентности $k - \varepsilon$, ANSYS Fluent.

1. Конфигурация для численного решения и граничные условия

Начальное приближение в предлагаемом численном методе получается из аналитического решения задач тепло и массопереноса струйного течения. Вместо того, чтобы начинать вычисления с нуля, программное обеспечение ANSYS будет использовать первое приближение из [1], [2], которое будет введено в программу в точке, где задача определена с требуемыми граничными условиями. В результате решение задачи более точно и получено за меньшее время.

В граничные условия (рис. 1) для комбинированного процесса сжигания природного газа и биогаза были включены расход воздуха $\dot{m}_{air} = 0.1$ кг/с, расход биогаза $\dot{m}_{biogas} = 0.01$ кг/с, и для расхода природного газа (ch_4) рассмотрены два случая:

1. Расход природного газа $\dot{m}_{ch_4} = 0.005$ кг/с.
2. Расход природного газа $\dot{m}_{ch_4} = 0.005 (1 + \sin(16t))$ кг/с.

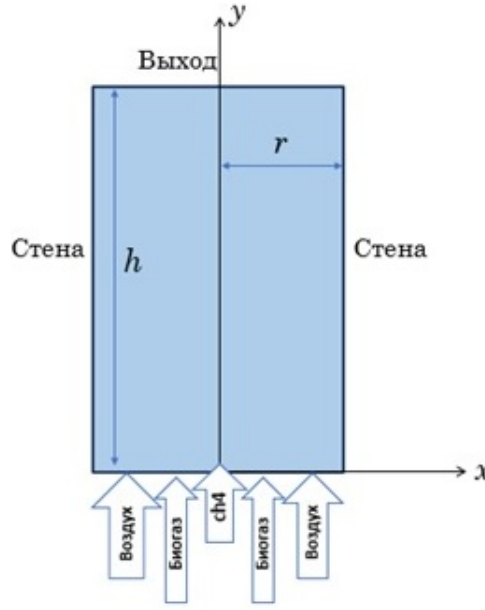


Рис. 1. Схема камеры сгорания и настройки граничных условий

2. Основные уравнения математической модели

Уравнение непрерывности, уравнения Навье-Стокса и уравнение энергии являются тремя компонентами математической модели, которая предлагается для имитации процесса горения потока топлива и воздуха [3–5]:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i) = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i u_j) = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\tau_{ij} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_l}{\partial x_l} \right] + \frac{\partial}{\partial x_j} (-\rho \overline{u'_i u'_j}), \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho e) + \frac{\partial \rho e u_i}{\partial x_i} = \rho \dot{q} + \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x_i^2} - \frac{\partial P u_i}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i \tau_{ij}}{\partial x_i}, \quad (3)$$

где

$$\tau_{ij} = \tau_{ji} = \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right), \quad (4)$$

$$-\rho \overline{u'_i u'_j} = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \left(\rho k + \mu_t \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \right) \delta_{ij}. \quad (5)$$

Здесь u_i и u_j – компоненты скорости; t – время; ρ – плотность; P – давление; δ_{ij} – символ Кронекера ($\delta_{ij} = 1$ если $i = j$ и $\delta_{ij} = 0$ если $i \neq j$); μ – динамическая вязкость; μ_t – турбулентная вязкость; $(-\rho \overline{u'_i u'_j})$ – напряжения Рейнольдса; e – внутренняя энергия; q – скорость объемного подвода тепла на единицу массы; T – температура; λ – теплопроводность.

Используется модель турбулентности $k - \varepsilon$ (реальная). Кинетическая энергия турбулентности k и скорость ее диссипации ε удовлетворяют следующим уравнениям переноса [6, 7]:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho k u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k,$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho\varepsilon u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \rho C_1 S_\varepsilon - \rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\nu\varepsilon}} + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} C_{3\varepsilon} G_b + S_\varepsilon,$$

где $\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$; $C_1 = \max \left[0.43, \frac{\eta}{\eta + 5} \right]$; $\eta = S \frac{k}{\varepsilon}$; $C_{3\varepsilon} = \tanh \left| \frac{v}{u} \right|$.

Константы модели $C_{1\varepsilon}$, C_2 , σ_k и σ_ε имеют следующие значения по умолчанию [6]: $C_{1\varepsilon} = 1.44$, $C_2 = 1.9$, $\sigma_k = 1.0$, $\sigma_\varepsilon = 1.2$; G_k представляет собой генерацию кинетической энергии турбулентности из-за средних градиентов скорости; G_b – генерацию кинетической энергии турбулентности из-за плавучести; Y_M представляет собой вклад флуктуационного расширения в сжимаемой турбулентности в общую скорость рассеяния (диссипации); σ_k , σ_ε являются турбулентными числами Прандтля для k и ε соответственно; S_ε , S_k – определяемые пользователем исходные члены; S – тензор средней скорости деформации; $\nu = \frac{\mu}{\rho}$ – кинематическая вязкость; C_μ – эмпирический коэффициент; $C_\mu = 0.09$; u и v – компоненты скорости вдоль осей x и y соответственно.

3. Некоторые результаты исследования

С помощью разработанного комплекса программ [8] были исследованы процессы совместного горения природного газа и биогаза. Программное обеспечение было использовано для моделирования процесса горения в камере сгорания, схема которой представлена на рис. 1. Стенки камеры сгорания имеют постоянную температуру $T_w = 300$ К и следующие геометрические характеристики: $r = 100$ мм; $h = 1000$ мм. В состав горелочного устройства входят канал подачи биогаза 16 мм, канал подачи газа (метана) 4 мм и канал подачи воздуха 180 мм. Ниже на рис. 2 представлены некоторые результаты расчетов.

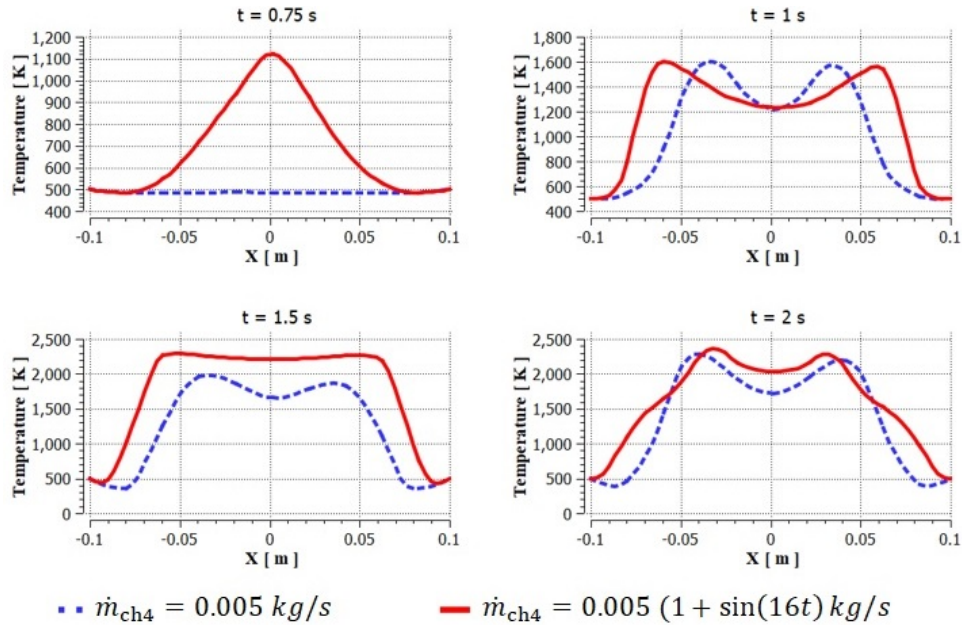


Рис. 2. Распределение температуры на выходе из камеры сгорания в зависимости от времени

На рис. 2 отражены распределения температуры на выходе в различные моменты времени. Рисунок иллюстрирует, как синусоидальная функция подачи природного газа влияет на эффективность процесса совместного сжигания.

В результате численного эксперимента построены также контуры распределения температуры и контуры распределения CO_2 (углекислого газа) в зоне горения в различные периоды для расходов природного газа ($\dot{m}_{ch4} = 0.005$ кг/с) и ($\dot{m}_{ch4} = 0.005(1 + \sin(16t))$ кг/с).

Литература

1. Velmisov P. A., Mizher U. J. Asymptotic study of heat and mass transfer processes in viscous fluids. AIP Conference Proceedings. 2021. Vol. 2333, No 1.
2. Velmisov P. A., Mizher U. J., Semenova E. P. Asymptotic study of nonlinear viscous gas flows. AIP Conference Proceedings. 2018. Vol. 2048, No 1.
3. Hoffman K. A., Chiang S. T. Computational Fluid Dynamics. 4th ed. Vol. II. USA: EESbooks.com, 2000.
4. Chung T. J. Computational Fluid Dynamics. Cambridge: Cambridge University Press, 2010.
5. Anderson J. D. Computational Fluid Dynamics: The Basics with Applications. New York: McGraw-Hill, 1995.
6. ANSYS Fluent Theory Guide. 2021 R2. USA: ANSYS Inc., 2021. 1069 p.
7. Versteeg H. K., Malalasekera W. An Introduction to Computational Fluid Dynamics. 2nd ed. 2007. 517 p.
8. Мизхер У. Д., Ковальногов В. Н., Вельмисов П. А., Чукалин А. В., Федоров Р. В. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021615282 Российская Федерация. Программный комплекс для исследования стационарных газодинамических и тепловых процессов в камере сгорания с автоматизированной подготовкой геометрических и граничных условий модели : № 2021614306 : заявл. 29.03.2021 : опубл. 06.04.2021.

MSC 49K20, 76F60, 80A20

Mathematical modeling of the combined combustion process and analysis of the effect of different injection methods on combustion efficiency

U.J. Mizher¹, M.J. Mizher², P.M. Abrashkin³, P.A. Velmisov³

Southern Technical University¹, Al-Shatrah University²,
Ul'yanovsk State Technical University³

Abstract: The search for environmentally friendly alternative energy sources is one of the main concerns of modern society. Biogas is a potential alternative fuel derived from organic waste. Biogas contains less methane, which reduces the heat of combustion, and more carbon dioxide, which affects the flame spreading rate. The maximum adiabatic temperature in the combustion chamber of thermal power plant boilers can be reduced while increasing the stability of biogas combustion through the combined combustion of natural gas and biogas, provided the fuel mixture is thoroughly mixed with oxidizer.

In this study, an analytical stationary temperature field in the jets is first constructed using self-similar solutions of the equations of axisymmetric fluid (gas) motion in a viscous incompressible medium model. This solution serves as an initial approximation for the subsequent solution of the problem using the ANSYS Fluent software product, which is used for modeling and research of thermal and gas-dynamic processes in the combustion chamber. The combustion process of fuel-air mixture is modeled using the $k - \varepsilon$ (real) turbulence model. A numerical study of the gas temperature distribution in the jet is carried out.

Keywords: gas dynamics, temperature, biogas, combined combustion, turbulence model $k - \varepsilon$, ANSYS Fluent.

References

1. Velmisov P. A., Mizher U. J. Asymptotic study of heat and mass transfer processes in viscous fluids. AIP Conference Proceedings. 2021. Vol. 2333, No 1.
2. Velmisov P. A., Mizher U. J., Semenova E. P. Asymptotic study of nonlinear viscous gas flows. AIP Conference Proceedings. 2018. Vol. 2048, No 1.
3. Hoffman K. A., Chiang S. T. Computational Fluid Dynamics. 4th ed. Vol. II. USA: EESbooks.com, 2000.
4. Chung T. J. Computational Fluid Dynamics. Cambridge: Cambridge University Press, 2010.
5. Anderson J. D. Computational Fluid Dynamics: The Basics with Applications. New York: McGraw-Hill, 1995.
6. ANSYS Fluent Theory Guide. 2021 R2. USA: ANSYS Inc., 2021. 1069 p.
7. Versteeg H. K., Malalasekera W. An Introduction to Computational Fluid Dynamics. 2nd ed. 2007. 517 p.

8. Mizher U. J., Kovalnogov V. N., Velmisov P. A., Chukalin A. V., Fedorov R. V. Software package for studying stationary gas-dynamic and thermal processes in a combustion chamber with automated preparation of geometric and boundary conditions of the model: Certificate of state registration of computer program No. 2021615282, Russian Federation. (2021).