

УДК 621.438

## СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ РАЗЛИЧНЫХ МИКРОФАКЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ ПРИ ПОМОЩИ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

<sup>1</sup>Достияров А.М., <sup>3</sup>Умышев Д.Р., <sup>2</sup>Яманбекова А.К., <sup>2</sup>Катранова Г.С., <sup>2</sup>Ожикенова Ж.Ф.

<sup>1</sup>Казахский агротехнический университет им С. Сейфуллина, Астана, e-mail: dost51@mail.ru;

<sup>2</sup>Алматинский университет энергетики и связи, Алматы;

<sup>3</sup>Казахский национальный исследовательский университет им К.И. Сатпаева, Алматы

В статье представлены результаты численного моделирования различных вариантов горелочных устройств, имеющих микрофакельные устройства. В статье рассматривались четыре варианта горелок – горелка с уголковыми стабилизаторами (а), в которой топливо подается на ось симметрии уголка, горелка с профилями лопаток (б), в которой топливо подается в пространство между спинкой профиля и накладкой, третья горелка (в), работающая по принципу встречно-закрученных струй, четвертая воздушная горелка-стабилизатор (г). Исследование проводилось с помощью программы ANSYSFluent. При моделировании использовалась модель турбулентности k-ε realizable, которая является наиболее оптимальным решением. Ввиду того, что в статье рассматривалось лишь влияние подачи топлива, при моделировании скорость и значение расхода топлива не изменялись. Для определения, какие из исследуемых горелок обладают наилучшими показателями, в ходе моделирования сравнивались такие основные показатели, как температурные и скоростные контуры и концентрация оксидов азота. Исходя из проведенного анализа, можно сделать вывод, что воздушная горелка-стабилизатор и профили имеют достаточно высокие стабилизационные показатели. Наилучшими показателями обладает вариант подачи топлива со спинки турбинного профиля. Данный вариант обеспечивает минимальные концентрации оксидов азота, при всех прочих равных показателях.

**Ключевые слова:** профили, численное моделирование, оксиды азота, топливо, горение

## COMPARATIVE ANALYSIS OF VARIOUS MICROFLAME DEVICES THROUGH NUMERICAL SIMULATION

<sup>1</sup>Dostiyarov A.M., <sup>3</sup>Umyshev D.R., <sup>2</sup>Yamanbekova A.K., <sup>2</sup>Katranova G.S., <sup>2</sup>Ozhikenova Zh.F.

<sup>1</sup>Seifullin Kazakh Agro Technical University, Astana, e-mail: dost51@mail.ru;

<sup>2</sup>Almaty University of Power Engineering and Telecommunications, Almaty;

<sup>3</sup>Satbaev Kazakh National Research University, Almaty

The article contains the numerical simulation results for various burners with microflame devices. The article deals with four variants of burners – burner with corner stabilizers (a), which is fuelled through the corner symmetry axis; burner with blades (b), which is fueled through the space between the blade back and lining; the third burner (c) working on the principle of turbulent opposed jets; the fourth – air burner with stabilizer (d). The research was conducted using ANSYS Fluent software. For simulation realizable K-epsilon (k-ε) turbulence model, which is the best solution for the research, was used. Since the article dealt, with the fuel feed effect only, fuel consumption rate and amount remained constant in simulation. To determine, which of the analyzed burners were best performing, during the simulation we compared such key indicators as temperature and speed loops and nitrogen oxide concentration. Based on the analysis performed it may be concluded that stability performance of air burner with stabilizer and burner profiles is high enough. The best figures belong to the variant of fuelling from the turbine blade back. This variant ensures minimum concentration of nitrogen oxides, all other indicators being equal.

**Keywords:** blades, numerical simulation, nitrogen oxides, fuel, burning

При исследовании использовалась программа ANSYSFluent [1, 2]. В статье представлены результаты численного моделирования различных вариантов горелочных устройств, имеющих микрофакельные устройства. В статье рассматривались четыре варианта горелок – горелка с уголковыми стабилизаторами (а), в которой топливо подается на ось симметрии уголка, горелка с профилями лопаток (б), в которой топливо подается в пространство между спинкой профиля и накладкой, третья горелка (в), работающая по принципу встречно-закрученных струй и четвертая воздушная горелка-стабилизатор (г).

Авторами проведены многочисленные исследования с использованием уголковых

стабилизаторов, несколько экспериментов с турбинными профилями и воздушными горелками-стабилизаторами [3–5].

Эксперименты показали, что уголковые стабилизаторы и воздушные горелки-стабилизаторы имеют высокие стабилизационные показатели, при относительно низких выбросах оксидов азота. Однако наличие большого сопротивления приводит к снижению давления в камере сгорания [6]. Решением этой проблемы может быть использование профилей лопаток или стабилизация встречно-закрученными струями.

Цель исследования: с помощью численного моделирования различных вариантов горелочных устройств, имеющих микрофакельные устройства, определить, какой

из представленных вариантов обладает наилучшими показателями.

### Материалы и методы исследования

После проведенного анализа авторы сочли необходимым численно моделировать процессы горения за микрофакельными устройствами. Также сравнить их с результатами, полученными в ходе эксперимента.

#### Основные уравнения

Ниже приведено уравнение переноса энергии:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \nabla \cdot (\bar{v}(\rho E + p)) = \nabla \cdot (k_{eff} \nabla T - \sum_j h_j \bar{J}_j + (\bar{\tau}_{eff} \bar{v})) + S_h, \quad (1)$$

где  $k_{eff}$  – эффективная проводимость, которая зависит от применяемой модели турбулентности,  $J_j$  – диффузионный поток, первые три члена правой части уравнения определяют перенос энергии теплопроводностью, диффузии частиц и вязкой диссипации соответственно,  $S_h$  – параметр, определяющий теплоту химической реакции.

Ниже приведено уравнение энергии:

$$E = h - \frac{p}{\rho} + \frac{v^2}{2}. \quad (2)$$

Энтальпия определяется с помощью уравнения, приведенного ниже:

$$h = \sum_j Y_j h_j. \quad (3)$$

Финальный вид уравнения для неадиабатического диффузионного горения выглядит следующим образом

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho H) + \nabla \cdot (\rho \bar{v} H) = \nabla \cdot \left( \frac{k_t}{c_p} \nabla H \right) + S_h. \quad (4)$$

Решение уравнения транспорта выполняем для одной или двух консервативных скалярных единиц (доли смеси), чтобы решить задачи диффузионного горения. Уравнения не решаются для каждой отдельной частицы смеси.

Для решения турбулентных процессов применяются различные модели турбулентности. Для нашего случая мы воспользовались моделью  $k$ - $\epsilon$  realizable (реализуемое). Уравнение транспорта определяется следующими уравнениями. Первым уравнением (5) определяется турбулентная кинетическая энергия  $k$ . Вторым уравнением (6) определяется скорость диссипации  $\epsilon$ .

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho H) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho k u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \epsilon - Ym + Sk, \quad (5)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \epsilon u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + \rho C_1 \epsilon - \rho C_2 \frac{\epsilon^2}{k + \sqrt{v \epsilon}} + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} C_{3\epsilon} G_b + S_\epsilon, \quad (6)$$

$G_k$  – определяет генерацию турбулентной кинетической энергии в связи с градиентами скорости,  $G_b$  – определяет генерацию турбулентной кинетической энергии в связи с плавучестью данных.  $Y_m$ ,  $C_{1\epsilon}$ ,  $C_2$  – константы,  $\sigma_k$ ,  $\sigma_\epsilon$  – турбулентные числа Прандтля для  $k$  и  $\epsilon$  соответственно,  $SkS_\epsilon$  – числа определяемые пользователем.

#### Общие данные о процессе моделирования

На рис. 1 представлен изометрический вид на область моделирования. Начальные параметры приведены в табл. 1.

Области моделирования состоят из непосредственно горелок, которые представлены на рис. 1.

На рис. 1, а, представлена горелка с уголковыми стабилизаторами. Уголки имеют угол  $45^\circ$ , по отношению к оси симметрии. Топливо подавалось непосредственно на ось симметрии.

На рис. 1, б, представлена горелка с профилями лопаток. Как видно из рисунка, профили снабжены соплами, направленными на зону рециркуляции создаваемой накладкой.

На рис. 1, в, представлена горелка со встречно-закрученным способом стабилизации. Топливо подается в кольцо между «верхним» и «нижним» ярусом лопаток.

На рис. 1, г, представлен вид на 3-Д модель воздушной горелки-стабилизатора при угле выходного регистра  $45^\circ$ .

При моделировании использовалась модель турбулентности  $k$ - $\epsilon$  realizable. Она согласно [7] является наиболее оптимальным решением.

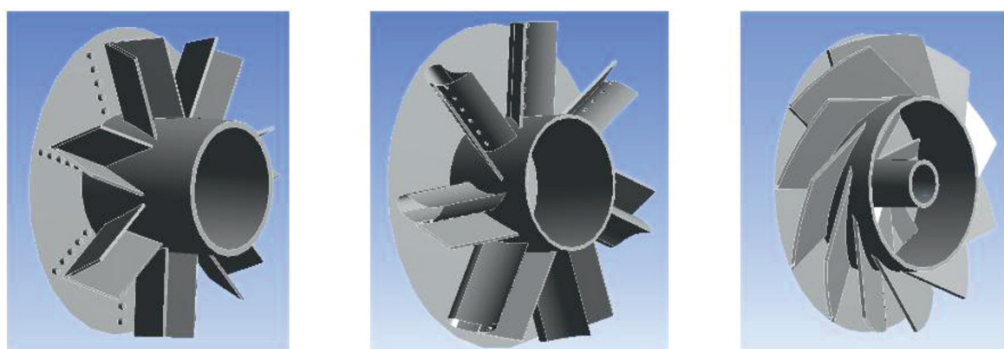
Ввиду того, что в статье рассматривалось лишь влияние подачи топлива, при моделировании скорость и значение расхода топлива не изменялись. Избыток топлива (воздуха) рассчитывался согласно [1].

### Результаты исследования и их обсуждение

*Температурные контуры.* На рис. 2 представлены контуры температуры для различных горелочных устройств. Как вид-

но из рисунков, в горелке с уголковыми стабилизаторами пламя имеет широкую высокотемпературную зону. Горелка с турбинными профилями имеет некоторую закрутку в левую сторону, что заметно по холодной зоне, образующейся за профилями. Заметно, что процесс горения осуществляется в более тонкой зоне по сравнению с уголковыми стабилизаторами. Горелка со встречно-закрученным способом стабилизации имеет тонкую зону горения, образующуюся вокруг зоны рециркуляции.

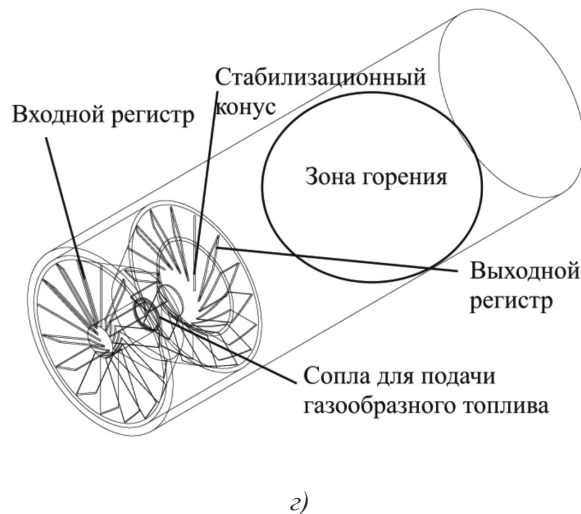
В воздушных горелках кинетическая энергия потока воздуха тратится на дробление струй газа, в результате чего происходит интенсивное перемешивание. Затем топливовоздушная смесь поступает в камеру сгорания и интенсивно выгорает в первичной зоне. В воздушной горелке-стабилизаторе процесс сжигания топлива заканчивается раньше. Это косвенно влияет на габарит камеры сгорания [8, 9]. Пламя имеет симметричную форму. Наиболее высокие температуры достигают 2200 К [10].



а)

б)

в)



г)

Рис. 1. 3Д модели изучаемых горелок

Таблица 1

Начальные параметры

Расход топлива, кг/ч	Скорость воздуха, м/с (бралась согласно экспериментальной установке)	$\phi$ , коэффициент избытка топлива по [1]	Начальная температура окислителя (воздуха)/топлива, К	Количество тетраэдрических элементов в моделируемой области
10	10	0,32	400	200000

*Скоростные контуры.* На рис. 3 представлены контуры скоростей для различных горелочных устройств. При горении за уголковыми стабилизаторами продукты сгорания имеют наиболее высокие скорости. Это можно объяснить тем, что топливо с большой скоростью подается на оси симметрии уголковых стабилизаторов. Горелка с профилями лопаток имеет несимметричный скоростной контур, приводящий к не-

равномерному температурному контуру. Отсутствует полноценная рециркуляционная зона, что снижает гидравлические потери давления.

Горелка со встречно-закрученной стабилизацией имеет относительно низкие продольные скорости по сравнению с другими горелочными устройствами, ввиду закрутки при помощи разнонаправленных лопаточных устройств.

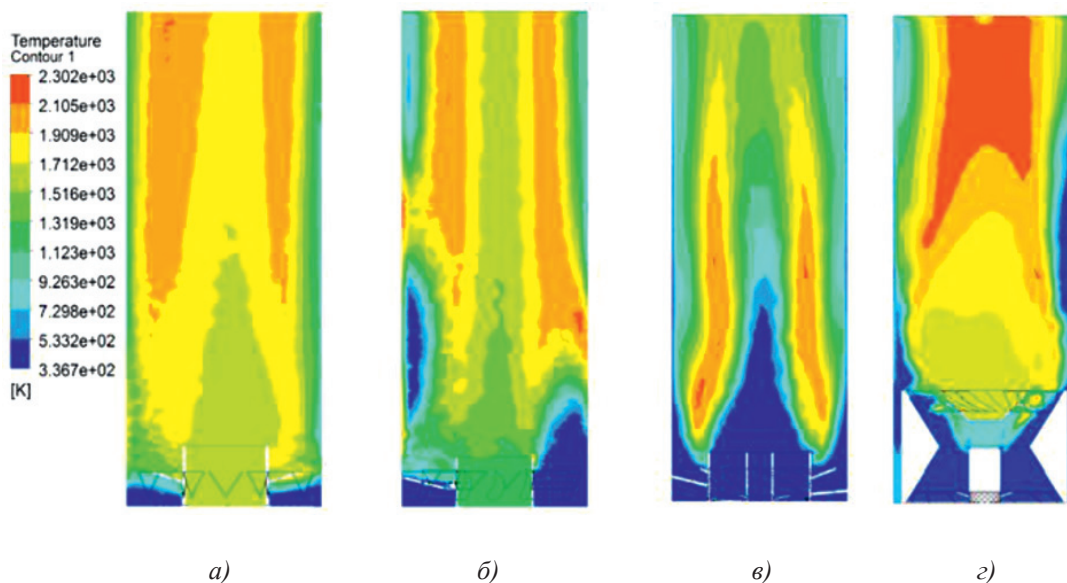


Рис. 2. Контур температуры: а) горелка с уголковыми стабилизаторами, б) горелка с турбинными профилями, в) горелка со встречно-закрученным способом стабилизации, г) воздушная горелка-стабилизатор

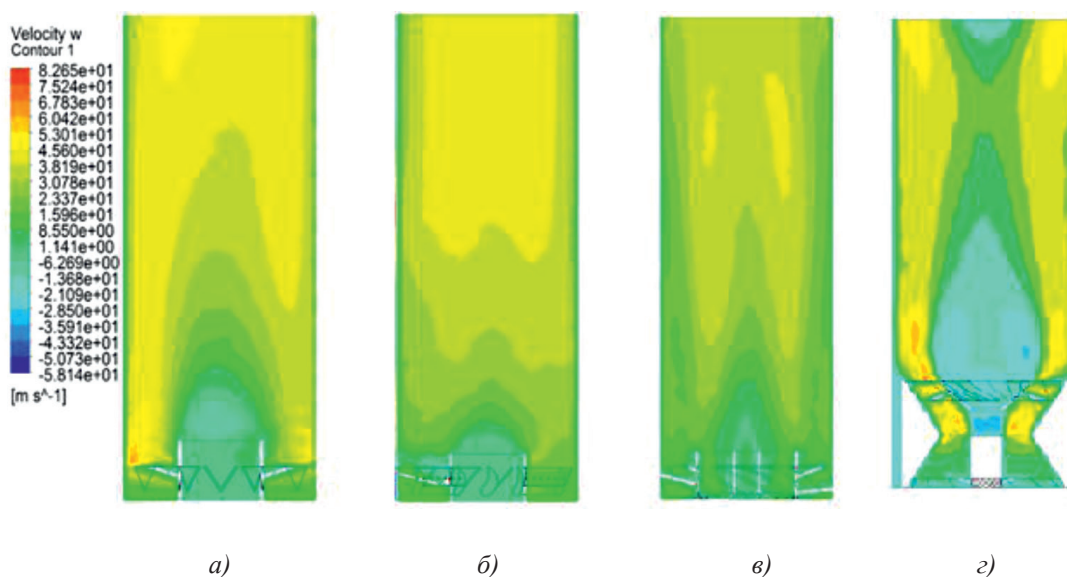


Рис. 3. Контур скоростей: а) горелка с уголковыми стабилизаторами, б) горелка с турбинными профилями, в) горелка со встречно-закрученным способом стабилизации, г) воздушная горелка-стабилизатор

Таблица 2

Данные по результатам моделирования

Вариант	Температура газов на выходе, К	Концентрация NO <sub>x</sub> , ppm	Скорость газов на выходе, м/с
а	1832	55	33,7
б	1645	45	38,04
в	1347	17	33
г	1410	31	33,9

*Концентрация оксидов азота (NO<sub>x</sub>).* Оксиды азота являются побочным продуктом сжигания [7]. К основным причинам образования оксидов азота относятся: время нахождения газов в зоне горения, высокая температура и качество перемешивания топлива с окислителем [11]. Из полученных численных и экспериментальных работ можно сделать вывод: сократить общее время нахождения газов в зоне горения можно обеспечить за счет разделения факела на более мелкие – микрофакельное горение [12, 13].

В табл. 2 представлены данные по результатам моделирования. Как видно из рисунков, максимальные температуры и концентрации оксидов азота имеет горелка с уголковыми стабилизаторами. Это говорит о двух вещах: что уголки имеют более высокую полноту сгорания, за счет чего повышается температура и концентрация оксидов азота на выходе из горелочного устройства. С другой стороны, относительно большой расход топлива непосредственно на угол симметрии приводит к увеличению общей скорости топливно-воздушной смеси.

Наиболее низкие температуры имеет горелочное устройство со встречно-закрученными струями, а также самые низкие концентрации оксидов азота. Данное обстоятельство объясняется тем, что закрутка ТВС приводит к увеличению поперечных скоростей, что приводит к снижению скорости. Однако в таком горелочном устройстве низкий уровень горения, ввиду недостаточной перемешанности газа с окислителем. Горелка с профилями имеет средние значения между двумя вариантами горелочных устройств.

### Заключение

Проведенный анализ позволяет сделать следующие выводы: все вышеприведенные схемы микрофакельных устройств хорошо моделируются с использованием программы ANSYSFluent. Уголковые стабилизаторы обеспечивают высокую полноту сгорания, однако, с другой стороны, это приводит к повышению концентрации оксидов азота. В воздушных форсунках

более устойчивое горение. Профили лопаток имеют более низкие концентрации и температуру уходящих газов. Горелка со встречно-закрученным способом стабилизации имеет наиболее низкие концентрации оксидов азота и скорости. В дальнейшем при проведении экспериментов мы сможем значительно сократить доводку камеры сгорания ГТД с вышеуказанными горелочными устройствами.

### Список литературы

1. ANSYS FLUENT 12.0 Theory Guide: «ANSYS» [Электронный ресурс]. URL: <http://ansys.com> 2009 (дата обращения: 24.12.2018).
2. ANSYS FLUENT 12.0 User's guide. «ANSYS» [Электронный ресурс]. URL: <http://ansys.com> 2009 (дата обращения: 24.12.2018).
3. Достияров А.М., Умышев Д.Р., Катранова Г.С. Численное моделирование процессов горения за профилями лопаток // Академическая наука проблемы и достижения: материалы 8-ой Международ. науч.-прак. конф. North Charleston; USA, 2017. С. 82–87.
4. Umyshev D.R., Zholbaryssov I.A., Borissova N.G., Dostiyarov A.M., Dyussebekova N.K., Stepanova O.A., Tumanov M.E. Application of semi perforated v-gutter flameholders in heat-generating systems for autonomous building heating. International journal of mechanics and mechanotronics. 2016. vol. 16. No 6. P. 63–69.
5. Достияров А.М. Разработка топливосжигающих устройств с микрофакельным горением и методики их расчета: дис. ... докт. техн. наук: Алматы: КазНИИ энергетики им. Чокина, 2000. 237 с.
6. Lefebvre A.H., Dilip R. Ballal. Gas turbine combustion: Alternative Fuels and Emissions. Third Edition. London: Taylor & Francis, 2010. 537 p.
7. Лефевр А. Процессы в камерах сгорания ГТД. М.: Изд-во Мир, 1986. 566 с.
8. Cheon Hyeon Cho, Gwang Min Baek, Chae Hoon Sohn, Ju Hyeong Cho. A numerical approach to reduction of NO<sub>x</sub> emission from swirl premix burner in a gas turbine combustor. Applied Thermal Engineering. 2013. vol. 59. P. 454–463.
9. Fu Zhenbo, Lin Yuzhen, Li Lin, Zhang Chi. Experimental and numerical studies of a lean-burn internally-staged combustor. Chinese Journal of Aeronautics. 2014. vol. 3 (27). P. 488–496.
10. Котлер В.Р. Газотурбинные установки и проблема вредных выбросов в атмосферу // Теплоэнергетика. 2003. № 8. С. 73–78.
11. Достияров А.М., Умышев Д.Р., Кибарин А.А., Тютеебаева Г.М., Катранова Г.С., Акпанбетов Д.Б. Экспериментальное исследование расстояния между клиновидными желобами стабилизации пламени и выбросов NO<sub>x</sub> // Тепловая наука. 2019. № 1 [Электронный ресурс]. URL: <http://thermalscience.vinca.rs/online-first/3141> (дата обращения: 24.12.2018).
12. Христич В.А., Тумановский А.Г. Газотурбинные двигатели и защита окружающей среды. Киев: Техника, 1983. 144 с.
13. Zhang Rongchun, Fan Weijun. Experimental study of entrainment phenomenon in a trapped vortex combustor. Chinese Journal of Aeronautics. 2013. vol. 1 (26). P. 63–73.