

Торайғыров университетінің хабаршысы  
ҒЫЛЫМИ ЖУРНАЛЫ

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ  
Вестник Торайғыров университета

---

# Торайғыров университетінің ХАБАРШЫСЫ

Энергетикалық сериясы  
1997 жылдан бастап шығады



## ВЕСТНИК Торайғыров университета

Энергетическая серия  
Издается с 1997 года

ISSN 2710-3420

---

№ 1 (2023)

ПАВЛОДАР

**НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ**  
**Вестник Торайгыров университета**

**Энергетическая серия**

выходит 4 раза в год \_\_\_\_\_

**СВИДЕТЕЛЬСТВО**

о постановке на переучет периодического печатного издания,  
информационного агентства и сетевого издания

№ 14310-Ж

выдано

Министерство информации и общественного развития  
Республики Казахстан

**Тематическая направленность**

публикация материалов в области электроэнергетики,  
электротехнологии, автоматизации, автоматизированных и  
информационных систем, электромеханики и теплоэнергетики

**Подписной индекс – 76136**

---

<https://10.48081/BNAS6555>

**Бас редакторы – главный редактор**

Кислов А. П.  
*к.т.н., профессор*

Заместитель главного редактора

Талипов О. М., *доктор PhD*

Ответственный секретарь

Калтаев А.Г., *доктор PhD*

**Редакция алқасы – Редакционная коллегия**

Клецель М. Я., *д.т.н., профессор*  
Новожилов А. Н., *д.т.н., профессор*  
Никитин К. И., *д.т.н., профессор (Россия)*  
Никифоров А. С., *д.т.н., профессор*  
Алиферов А.И., *д.т.н., профессор (Россия)*  
Кошеков К.Т., *д.т.н., профессор*  
Приходько Е.В., *к.т.н., профессор*  
Оспанова Н. Н., *к.п.н., доцент*  
Нефтисов А. В., *доктор PhD*  
Омарова А.Р., *технический редактор*

---

За достоверность материалов и рекламы ответственность несут авторы и рекламодатели  
Редакция оставляет за собой право на отклонение материалов  
При использовании материалов журнала ссылка на «Вестник Торайгыров университета» обязательна

© Торайгыров университет

**\*А. М. Достияров<sup>1</sup>, А. К. Макзумова<sup>2</sup>, П. А. Верницкас<sup>1</sup>,**

<sup>1</sup> Алматинский университет энергетики и связи имени Г. Даукеева,

Республика Казахстан, г. Алматы

<sup>2</sup> Евразийский национальный университет им. Л. Н. Гумилева,

Республика Казахстан, г. Астана

e-mail: dost51@mail.ru

## **ПРИМЕНЕНИЕ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ ЭФФЕКТИВНОСТИ КОНСТРУКЦИИ ГОРЕЛОЧНОГО УСТРОЙСТВА КС ГТУ**

*Методы численного моделирования получают все большее распространение при решении научно-исследовательских задач. Процессы, происходящие в камерах сгорания газотурбинных установок, происходят в турбулентных течениях, поэтому описать их течение довольно сложно. Для наглядного изображения аэродинамических процессов довольно удобно использовать численное моделирование.*

*При проектировании газотурбинных установок одной из главных проблем является создание малотоксичных камер сгорания, к конструкциям которых предъявляются все большие требования по совершенствованию процессов, происходящих в них.*

*Целью моделирования является разработка физических моделей и численное моделирование аэродинамического течения воздуха (газообразного топлива) в горелочном устройстве для определения оптимального угла стабилизаторов для эффективного горения топливовоздушной смеси.*

*Были получены следующие сравнительные показатели: контуров скоростей и давления при разных начальных скоростях воздуха, поступающего в камеру сгорания и разных углах стабилизаторов на выходе из фронтальной части горелочного устройства.*

*Результаты показали, что использование моделей турбулентности семейства k-ε, программного пакета COMSOL Multiphysics, позволяют с достаточной точностью глубоко и полно исследовать*

*влияние конструктивных и режимных факторов на основные характеристики камер сгорания и наметить конкретные пути для повышения эффективности всей установки в целом, существенно снизив при этом объем экспериментальных исследований.*

*Ключевые слова: численное моделирование, стабилизаторы, горелочное устройство, камера сгорания, газотурбинная установка, COMSOL Multiphysics.*

### **Введение**

Одним из перспективных направлений повышения эффективности камеры сгорания газотурбинных установок (далее КС ГТУ) при уменьшении экологической нагрузки на окружающую среду является использование метода микрофакельного сжигания топлива [1,2].

Рассмотрев конструкции уже существующих горелочных устройств КС ГТУ [3-6], и в виду повышения требований по совершенствованию рабочего процесса, происходящих в них, авторы пришли к идее об усовершенствовании их конструкции с помощью применения численного моделирования. При проектировании камер сгорания особое внимание уделяется интенсификации сгорания топлива, снижению образования вредных выбросов в процессе сгорания, формированию оптимальных значений температур на выходе из камеры сгорания.

Существующие простые факельные горелочные устройства камеры сгорания ГТУ имеют большую эмиссию выхода оксидов азота. В связи с этим был разработан патент [7], конструкция которого проиллюстрирована на рисунке 1 и рисунке 2.

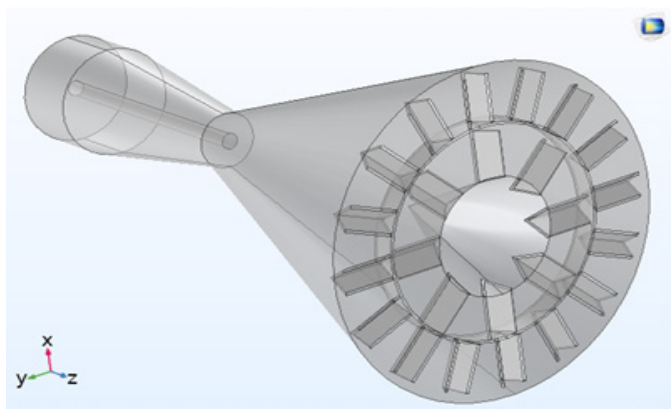


Рисунок 1 – Трехмерная модель двухъярусной микрофакельной горелки для сжигания природного газа

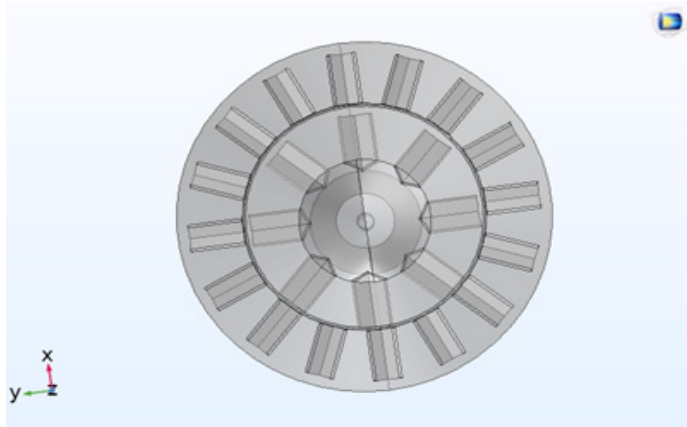


Рисунок 2 – Фронт горелки с двумя ярусами стабилизаторов

Двухъярусная микрофакельная горелка для сжигания природного газа состоит из сужающе-расширяющегося корпуса на входе, которого установлен завихритель воздуха, а на выходе – по оси горелки имеется распределительный конус, соединенный с корпусом с установленными в два яруса стабилизаторами, например: во внутреннем ярусе – восемь стабилизаторов, во внешнем – шестнадцать. Топливо подается по кольцевой медной трубке, например: с двадцатью четырьмя отверстиями, которая расположена по оси между внешним и внутренним ярусами стабилизаторов. Например: 16 отверстий просверлены вверх и 8 отверстий вниз, чтобы впрыск газообразного топлива приходился в вогнутую (внутреннюю) часть стабилизаторов.

Горелка работает следующим образом: воздух для подготовки обедненной топливовоздушной смеси (далее – ТВС) поступает закрученным потоком в расширяющуюся часть горелки через входной завихритель. Затем поток воздуха ускоряется в сужающем канале и в горле горелки перемешивается с топливом поступающим через трубку. Далее в распределительном конусе снижается гидравлическое сопротивление выходного сечения горелки, и как следствие устраняется проскок пламени. Топливо подается из топливной трубки в кольцевую топливную трубку из которой ответвлениями медных трубок топливо подается на каждый из стабилизаторов. На выходе горелки ТВС горит за счет перемешивания с дополнительным воздухом извне.

Уголкового стабилизаторы на выходе горелки обеспечивают микрофакельное сжигание, которое дает низкоэмиссионное горение за счет отсутствия локальных высокотемпературных зон. Уголкового стабилизаторы

создают множество обратных потоков пламени, которые поджигают свежие порции ТВС. Тем самым они повышают устойчивость горения.

### Материалы и методы

Численное моделирование выполнялось в программе COMSOL Multiphysics [8], предназначенной для моделирования конструкции, устройств и процессов во всех областях инженерных, производственных и научных исследований. С помощью такого моделирования можно анализировать как отдельные, так и взаимосвязанные физические процессы, а также визуализировать течения газа в технических и природных объектах методами компьютерной графики [9,10].

Процесс моделирования представлен построением модели в 2-мерном пространстве realizable k-ε модели турбулентности. На рисунке 3 изображена область моделирования.

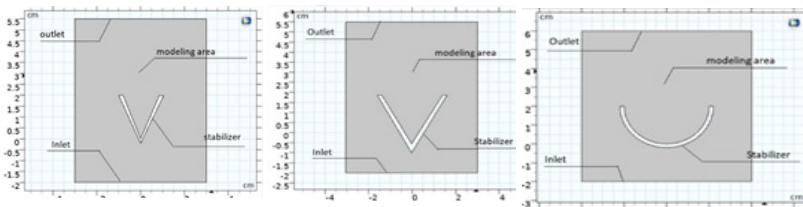


Рисунок 3 – область моделирования в COMSOL Multiphysics

а) угол стабилизатора 45; б) угол стабилизатора 60;

в) полукруг

Область моделирования представлена уголковым стабилизатором с разными углами (45, 60 и полукруг).

В основу модели положена зависимость значений скорости и давления воздуха в зоне горения от начального параметра воздуха, поступающего с нижней части зоны горения и выходящего из верхней части.

Целью моделирования является разработка физических моделей и численное моделирование аэродинамического течения воздуха (газообразного топлива) в горелочном устройстве КС ГТУ для определения оптимального угла стабилизаторов для эффективного горения ТВС.

На рисунке 4 проиллюстрирована тетраэдральная адаптивная расчетная сетка моделируемой области. Количество элементов в области на рис. 4а – 4740, рис.4б – 4505, рис.4в – 3663. Сетка состоит из группы тетраэдров, что позволяет эффективно рассчитывать различные вариации поля напряжений и получить высокоточный результат.

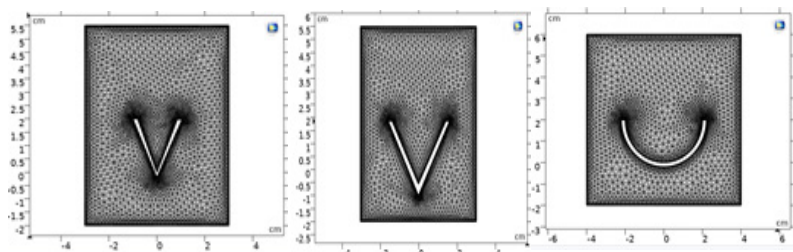


Рисунок 4 – сетка моделируемой области в COMSOL Multiphysics  
а) угол стабилизатора 45; б) угол стабилизатора 60;  
в) полукруг

При моделировании скорость и величина расхода топлива оставались неизменными, в связи с этим в статье рассматривалось лишь влияние подачи топлива и воздуха.

#### **Результаты и обсуждение**

Скоростные контуры. В таблице 1 представлены рисунки контуров скоростей при различных начальных скоростях воздуха (5, 10, 15 м/с) и тремя вариантами углов стабилизатора.

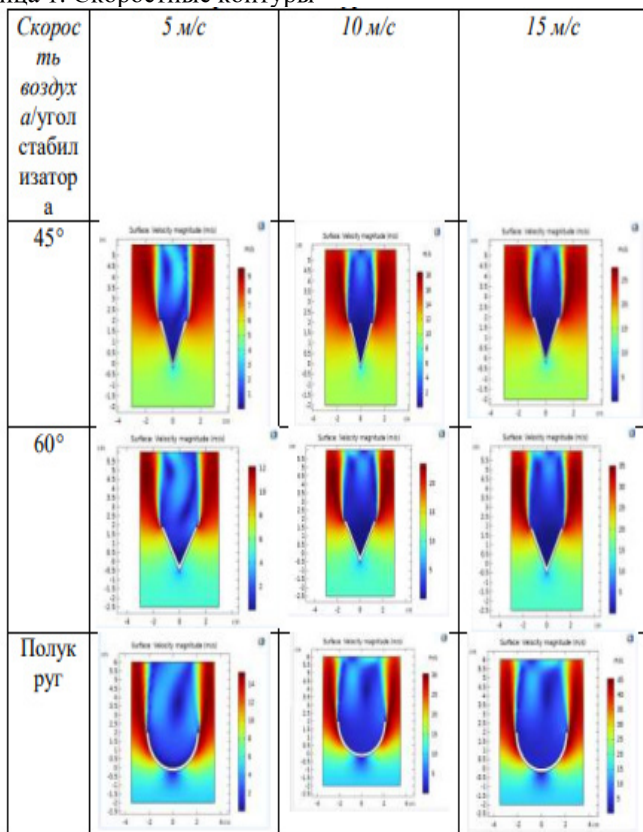
Как видно из рисунка поток воздуха, входя в область моделирования, встречает препятствие в виде уголкового стабилизатора, огибая его, теряет скорость, за стабилизатором образуется зона обратных токов, тем самым предотвращается быстрый унос пламени.

Можно увидеть, что при малых значениях начальных скоростей воздуха, а именно 5 м/с и во всех уголковых стабилизаторах, образуется неравномерная рециркуляционная зона с малыми значениями скоростей. Более стабильная рециркуляционная зона наблюдается при начальных значениях скоростей, равными 10, 15 м/с.

Большие скорости воздуха (газообразного топлива) наблюдаются на конце расширяющейся части стенки стабилизатора, зона рециркуляции с низкими скоростями служит для задержания ТВС до полного сгорания топлива и приводит к высокой стабилизации пламени и понижению недожога топлива.

Наиболее полное сгорание топливовоздушной смеси ожидается в стабилизаторе формой – полукруг, в связи с обширной зоной обратных токов за стабилизатором.

Таблица 1. Скоростные контуры



Контуры давлений. В таблице 1 представлены рисунки контуров давлений при различных начальных скоростях воздуха (5, 10, 15 м/с) и тремя вариантами углов стабилизатора.

Как видно из рисунков, угловая часть стабилизаторов принимает наибольшее давление со стороны воздуха (ТВС), это подтверждается зоной с высокими давлениями, указанными красным цветом на рисунке.

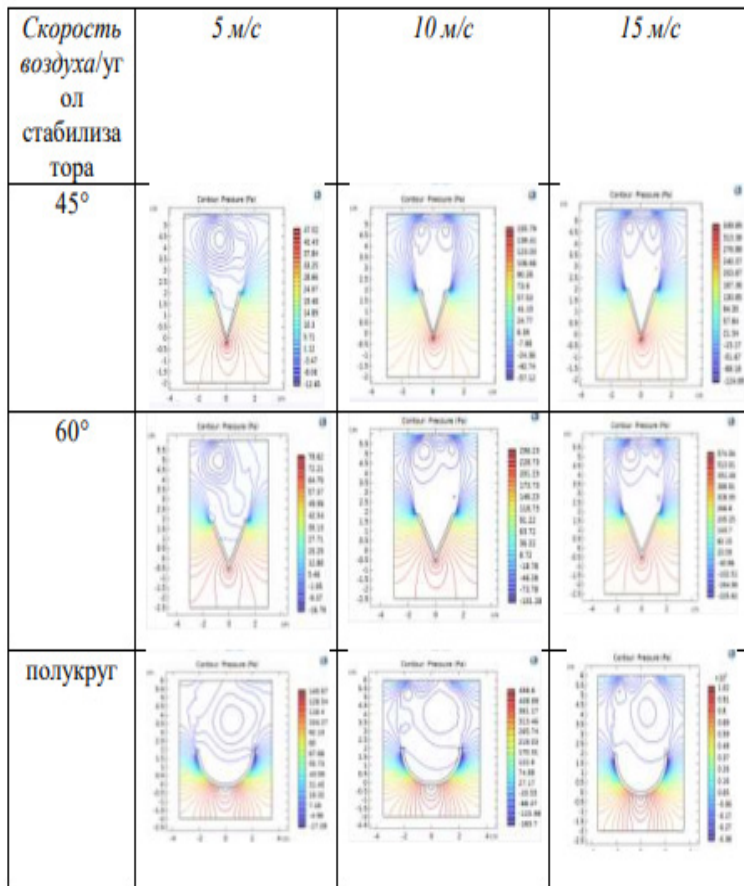
Можно заметить, что в конце расширяющейся части стенки стабилизатора наблюдаются хаотично расположенные изобары давлений, это объясняется турбулентным потоком воздуха (газообразного топлива).

Воздух, встречая походу своего движения, препятствие в виде стабилизатора, теряет скорость и уменьшает давление, тем самым поток



замедляется и увеличивается время для более полного перемешивания ТВС, вследствие чего происходит эффективное сжигание.

Таблица 2. Контуры давлений



**Выводы**

Проанализировав результаты численного моделирования уголковых стабилизаторов, авторы пришли к заключению, что размеры и угол стабилизаторов в значительной мере влияют на аэродинамику и профили скоростей. Изменение скоростей не показал заметного влияния на контуры скоростей 10-15 м/с, однако в целом было показано, что угол подачи и профиль

влияет на процессы перемешивания ТВС и как следствие на стабилизацию, недожог топлива и образование вредных выбросов оксидов азота.

Особое внимание следует уделить области внутри уголковых стабилизаторов, где расположена зона обратных токов. Наиболее оптимальные параметры контуров скоростей и давлений показал стабилизатор, выполненный в форме полукруга, в виду наличия обширной зоны рециркуляции малых скоростей за ним.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 **Достияров, А. М., Умышев, Д. Р., Катранова, Г. С., Яманбекова, А. К.** Камеры сгорания и горелки газотурбинных установок: монография, Астана : КАТУ им. С. Сейфуллина, 2017. – 205 с.

2 **Лефевр, А.** Процессы в камерах сгорания ГТД. – М. : Мир, 1986. – 566 с.

3 Евразийский патент №039073 от 30.11.2021 г.

4 **Ануарбеков, М. А., Достияров, А. М., Картджанов, Н. Р.** Патент на изобретение №35652. Микрофакельная горелка для сжигания синтетических газов // Республика Казахстан. Оpubл. 06.05.2022 г.

5 **Достияров, А. М., Макзумова, А. К.** Заявка на патент №2022/0193.1. Горелочное устройство камеры сгорания газотурбинной установки// Республика Казахстан. Заявка от 28.03.2022 г.

6 **Достияров, А. М., Ожикенова, Ж. Ф., Катранова, Г. С.** Патент на изобретение № 35168. Двухъярусная горелка // Республика Казахстан. Оpubл. 25.06.2021 г.

7 **Макзумова, А. К., Достияров, А. М., Ануарбеков, М. А., Верницкас, П. А., Саракешова, Н. Н., Биахметов, Б. А.** Заявка на патент на изобретение №169582. Двухъярусное микрофакельное горелочное устройство // Республика Казахстан. Заявка от 29.09.2022 г.

8 Руководство по пользованию. Введение в COMSOL Multiphysics, [Электронный ресурс] [www.comsol.ru](http://www.comsol.ru)

9 **Veynante, D., Vervisch, L.** Turbulent combustion modeling. Journal : Progress in Energy and Combustion Science. Volume 28, Issue 3, March 2002, 193-266 p. [https://doi.org/10.1016/S0360-1285\(01\)00017-X](https://doi.org/10.1016/S0360-1285(01)00017-X)

10 **Gonzalez-Jueza, E. D., Kersteinb, A. R., Ranjanc, R., Menonc, S.** Advances and challenges in modeling high-speed turbulent combustion in propulsion systems. // Journal : Progress in Energy and Combustion Science. Volume 60 – May 2017. – 26–67 p.

## REFERENCES

- 1 **Dostiyarov, A. M., Umyshev, D. R., Katranova, G. S., Yamanbekova, A. K.** Kamery sgoraniya i gorelki gazoturbinnnykh ustanovok [Combustion chambers and burners of gas turbine plants], Monograph, Astana : S. Seifullina KATU, 2017. - 205 p.
- 2 **Lefebvre, A.** Protsessy v kamerakh sgoraniya GTU [Working processes in the combustion chambers of the gas turbine engine]. – Moscow : Mir, 1986 – 530 p.
- 3 Eurasian patent №039073 dated November 30, 2021.
- 4 **Anuarbekov, M. A., Dostiyarov, A. M., Kartzhanov, N. R.** Patent na izobreteniyе №35652. Mikrofakel'naya gorelka dlya proizvodstva sinteticheskikh gazov [Patent for the invention №35652. Microtorch burner for burning synthetic gases] // Republic of Kazakhstan. Published 05.06.2022.
- 5 **Dostiyarov, A. M., Makzumova, A. K.** Zayavka na patent na izobreteniyе №2022/0193.1. Gorelochnoye ustroystvo kamery sgoraniya gazoturbinnoy ustanovki [Burner device of the combustion chamber of a gas turbine plant] // Republic of Kazakhstan. Application date 28.03.2022r
- 6 **Dostiyarov, A. M., Ozhikenova, Zh. F., Katranova, G. S.** Patent na izobreteniyе № 35168. Dvukh'yarusnaya gorelka [Patent for the invention № 35168. Two-tier burner] // Republic of Kazakhstan. Published. 25.06.2021 r.
- 7 **Makzumova, A. K., Dostiyarov, A. M., Anuarbekov, M. A., Vernitskas, P. A., Sarakeshova, N. N., Biakhmetov, B. A.** Zayavka na patent na izobreteniyе №169582. Dvukh'yarusnoye mikrofakel'noye gorelochnoye ustroystvo [Application for a patent for an invention №169582. Two-tier microtorch burner] // Republic of Kazakhstan. Application date 29.09.2022.
- 8 User Guide. Introduction to COMSOL Multiphysics, [Electronic resource] [www.comsol.ru](http://www.comsol.ru).
- 9 **Veynante, D., Vervisch, L.** Turbulent combustion modeling. Journal : Progress in Energy and Combustion Science. – V. 28 – Issue 3. – March 2002. –193–266 p. – [https://doi.org/10.1016/S0360-1285\(01\)00017-X](https://doi.org/10.1016/S0360-1285(01)00017-X)
- 10 **Gonzalez-Jueza, E. D., Kersteinb, A. R., Ranjanc, R., Menonc, S.** Advances and challenges in modeling high-speed turbulent combustion in propulsion systems // Journal : Progress in Energy and Combustion Science – V. 60. – May 2017. – 26–67 p.

Материал поступил в редакцию 13.03.23.

\**А. М. Достияров<sup>1</sup>, А. Қ. Мақзұмова<sup>2</sup>, П. А. Верницкас<sup>1</sup>,*

*<sup>1</sup>Г. Даукеев атындағы Алматы энергетика және байланыс университеті, Қазақстан Республикасы, Алматы қ.;*

*<sup>2</sup>Л. Н. Гумилев атындағы Еуразия Ұлттық университеті, Қазақстан Республикасы, Астана қ.*

*Материал баспаға 13.03.23 түсті.*

## **ГАЗ ТУРБИНАЛЫҚ ҚОНДЫРҒЫНЫҢ ЖАНУ КАМЕРАСЫНЫҢ ЖАНУ ҚҰРЫЛҒЫСЫ КОНСТРУКЦИЯСЫНЫҢ ТИІМДІЛІГІН ЗЕРТТЕУДЕ САНДЫҚ МОДЕЛЬДЕУДІ ҚОЛДАНУ**

*Зерттеу мәселелерін шешуде сандық модельдеу әдістері кеңінен таралуда. Газ турбиналық қондырғылардың жану камераларында болатын процестер турбулентті ағындарда жүреді, сондықтан олардың ағынын сипаттау өте қиын. Аэродинамикалық процестерді визуалды түрде көрсету үшін сандық модельдеуді қолдану өте ыңғайлы.*

*Газ турбиналық қондырғыларды жобалау кезінде негізгі мәселелердің бірі - оларда болып жатқан процестерді жақсарту үшін конструкциялары барған сайын жоғары талаптарға бағынатын аз улы жану камераларын құру.*

*Модельдеу мақсаты отын-ауа қоспасының тиімді жануы үшін тұрақтандырғыштардың еңістің оңтайлы бұрышы анықтау үшін оттықтағы ауаның (газ тәрізді отынның) аэродинамикалық ағынының физикалық модельдерін және сандық модельдеуін жасау болып табылады.*

*Келесі салыстырмалы көрсеткіштер: жану камерасына түсетін ауаның әртүрлі бастапқы жылдамдығы кезіндегі жылдамдық пен қысым контурлары және оттықтың алдыңғы жағынан шығатын жеріндегі тұрақтандырғыштардың әртүрлі көлбеу бұрыштары алынды.*

*Нәтижелер к-ε отбасының турбуленттілік модельдерін, COMSOL Multiphysics бағдарламалық пакетін пайдалану жану камераларының негізгі сипаттамаларына құрылымдық және режимдік факторлардың әсерін жеткілікті дәлдікпен терең және толық зерттеуге және нақты анықтауға мүмкіндік беретінін көрсетті. Бұл сондай-ақ эксперименттік зерттеулердің көлемін айтарлықтай қысқарта отырып, тұтастай алғанда бүкіл қондырғының тиімділігін арттыру тәсілі.*

*Кілтті сөздер: сандық модельдеу, тұрақтандырғыштар, жану құрылғысы, жану камерасы, газтурбиналық қондырғы, COMSOL Multiphysics.*

*\*A. M. Dostiyarov<sup>1</sup>, A. K. Makzumova<sup>2</sup>, P. A. Vernitskas<sup>1</sup>,*

*<sup>1</sup>G. Daukeev Almaty University of Energy and Communications,  
Republic of Kazakhstan, Almaty*

*<sup>2</sup>L. N. Gumilyov Eurasian National University,  
Republic of Kazakhstan, Astana*

*Material received on 13.03.23*

## **APPLICATION OF NUMERICAL MODELING IN STUDYING THE EFFICIENCY OF THE DESIGN OF THE BURNER DEVICE OF THE COMBUSTION CHAMBER OF A GAZ TURBINE INSTALLATION**

*Numerical modeling methods are becoming increasingly common in solving research problems. The processes occurring in the combustion chambers of gas turbine installations occur in turbulent flows, so it is quite difficult to describe their flow. For a visual representation of aerodynamic processes, it is quite convenient to use numerical modeling.*

*When designing gas turbine installations, one of the main problems is the creation of low-toxic combustion chambers, the designs of which are increasingly demanding to improve the processes taking place in them.*

*The purpose of the simulation is to develop physical models and numerical modeling of the aerodynamic flow of air (gaseous fuel) in the burner device to determine the optimal angle of stabilizers for efficient combustion of the fuel-air mixture.*

*The following comparative indicators were obtained: velocity and pressure contours at different initial velocities of the air entering the combustion chamber and different angles of the stabilizers at the outlet of the front part of the burner device.*

*The results showed that the use of turbulence models of the  $k-\varepsilon$  consolidation, the COMSOL Multiphysics software package, allows us to thoroughly and fully investigate the influence of design and operating factors on the main characteristics of combustion chambers with sufficient accuracy and to outline specific ways to improve the efficiency of the entire installation as a whole, while significantly reducing the volume of experimental studies.*

*Keywords: numerical modeling, stabilizers, burner device, combustion chamber, gas turbine installation, COMSOL Multiphysics.*

Теруге 13.03.2023 ж. жіберілді. Басуға 31.03.2023 ж. кол қойылды.

Электронды баспа

3,44 Мб RAM

Шартты баспа табағы 23.59. Таралымы 300 дана. Бағасы келісім бойынша.

Компьютерде беттеген: А. К. Мыржикова

Корректор: А. Р. Омарова

Тапсырыс № 4039

Сдано в набор 13.03.2023 г. Подписано в печать 31.03.2023 г.

Электронное издание

3,44 Мб RAM

Усл. печ. л. 23.59. Тираж 300 экз. Цена договорная.

Компьютерная верстка: А. К. Мыржикова

Корректор: А. Р. Омарова, Д. А. Кожас

Заказ № 4039

«Toraighyrov University» баспасынан басылып шығарылған

Торайғыров университеті

140008, Павлодар қ., Ломов к., 64, 137 каб.

«Toraighyrov University» баспасы

Торайғыров университеті

140008, Павлодар қ., Ломов к., 64, 137 каб.

67-36-69

E-mail: [kereku@tou.edu.kz](mailto:kereku@tou.edu.kz)

[www.vestnik-energy.tou.edu.kz](http://www.vestnik-energy.tou.edu.kz)