

NEWS

OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES OF THE REPUBLIC OF KAZAKHSTAN
PHYSICO-MATHEMATICAL SERIES

ISSN 1991-346X

<https://doi.org/10.32014/2020.2518-1726.19>

Volume 2, Number 330 (2020), 88 – 95

UDC 536.46:532.517.4

IRSTI 29.03.77; 29.03.85

**P. Safarik¹, S.A. Bolegenova²⁻³, A.A. Tuyakbaev², V.Yu. Maximov²,
A.O. Nugymanova², Zh.K. Shortanbaeva², S.A. Bolegenova^{3*}**

¹Czech Technical University in Prague, Prague, Czech Republic;

²al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan;

³Scientific Research Institute of Experimental and Theoretical Physics
of al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan.

E-mail: bolegenova.symbat@kaznu.kz

RESEARCH OF CHARACTERISTICS OF HEAT AND MASS TRANSFER AT THE INTRODUCTION OF TECHNOLOGY OF STEPS FUEL BURNING ON THE BKZ-75 BOILER OF THE SHAKHTINSKAYA TPP

Abstract. This article presents computational experiments on the introduction of step-by-step fuel combustion (OFA) technology using the example of the combustion chamber of the BKZ-75 boiler at the Shakhtinskaya TPP. OFA technologies are based on the separation of the supplied oxidizing agent into the combustion space in such a way as to reduce the amount of fuel NO_x in the area of the burners by reducing excess air, and the amount of thermal NO_x by reducing the temperature of the flame in the area of the OFA injectors. Using computer simulation methods, various modes of supplying additional air to the combustion chamber of the BKZ-75 boiler through OFA injectors were studied: OFA=0% (basic version), OFA=10%, OFA=18%. As a result of computational experiments, the distributions of the concentrations of carbon monoxide CO and nitrogen dioxide NO₂ were obtained over the entire volume of the combustion chamber. The most important result of the introduction of staged fuel combustion (OFA=18%) is a decrease in the concentration of nitrogen dioxide NO₂ at the outlet of the combustion chamber by 25% and carbon monoxide CO by 36%. The results allow us to conclude that the introduction of Overfire Air (OFA) technology has a positive effect on the heat and mass transfer in the combustion chamber and minimizes emissions of harmful substances.

Key words. heat and mass transfer, fuel combustion, numerical simulation, computational experiment, OFA technologies (Overfire Air), carbon oxides, nitrogen dioxides, ecology.

Introduction

Modern environmental problems that have arisen as a result of anthropogenic overload and irrational use of natural resources have undoubtedly affected the economic and environmental status of the Republic of Kazakhstan. For heat power engineering and other related industries, the task of reducing the cost of obtaining the required products and emissions of harmful substances is paramount.

In this regard, the issue of choice, operation, and, first of all, the creation of new, highly efficient energy and resource-saving and “clean” technologies of energy processes becomes relevant. This requires the implementation of a whole range of measures, the most important of which is the use of modern technologies, as well as world achievements in the field of development to optimize the combustion of solid pulverized coal fuel at thermal power plants (TPP) of Kazakhstan [1-9]. OFA technology (“Over Fire Air”) is currently successfully used all over the world, and especially in Europe, since the introduction of such technology at existing thermal power plants requires low investment and contributes to a significant reduction in NO_x emissions. When used in combination with other measures to control and suppress the formation of NO_x, it is possible to reduce their emissions to 85%.

The OFA method, or as it is also called the “step-by-step method of burning fuel”, includes the supply of the entire volume of combustion air (primary and secondary) in two stages: 70-90% of the air is

supplied to the burners, and the rest is supplied to the combustion device over the burner "sharp blast". By mixing fuel with a controlled air flow in the burner, a relatively low-temperature, oxygen-depleted and fuel-rich combustion zone is created in the lower part of the combustion burner, which helps to reduce the formation of NO_x from the nitrogen contained in the fuel (fuel NO_x) [10].

The remaining part of the air is supplied above the main combustion zone to several air channels located on the front and rear walls of the combustion chamber above the upper level of the burners, in order to achieve the most complete combustion of the fuel. The relatively low temperature in the oxygen-enriched afterburning zone leads to reduced formation of NO_x from the air (thermal NO_x).

To model heat and mass transfer in the presence of physicochemical processes, the fundamental laws of conservation of such quantities as mass, momentum, energy are used. Since heat and mass transfer in the presence of physico-chemical transformations is an interaction of turbulent movements and chemical processes, we must also take into account the law of conservation of the components of the reacting mixture, turbulence, multiphase environment, heat generation due to radiation from a heated medium and chemical reactions [11-16].

Object of research

The combustion chamber of the BKZ-75 boiler of the Shakhtinskaya TPP (Shakhtinsk, Kazakhstan) was selected for numerical experiments to suppress nitrogen and carbon oxides using OFA technologies [17-24]. Figure 1 shows a general view of the combustion chamber of the BKZ-75 boiler (Figure 1a) and the layout of burner devices and injectors for the introduction of OFA technology (Figure 1b). The finite difference grid for numerical modeling has steps along the X, Y, Z axes: $90 \times 32 \times 158$, which is 455 040 control volumes. Dust of Karaganda coal is burned in the boiler, with an ash content of 35.1%, a volatile yield of 22%, a moisture content of 10.6% and a heat of combustion of 18.55 MJ/kg. The main structural characteristics of the combustion chamber of the boiler BKZ-75 are presented in table. 1.

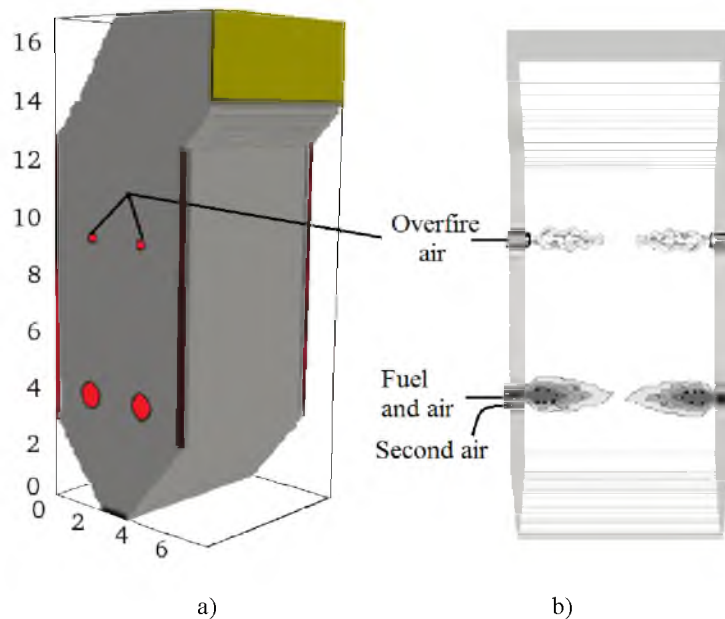


Figure 1 - General view of the combustion chamber of the boiler BKZ-75 of the Shakhtinskaya TPP (a) and the layout of the burner devices and OFA injectors (b)

Table 1 - Structural characteristics of the boiler BKZ-75 of the Shakhtinskaya TPP during the organization of staged fuel combustion

Characteristic	Value
Number of OFA injectors	4
The height of the burner, m	4
The height of the tier of OFA injectors, m	9
Diameter of OFA injectors, m	0.325

Various modes of supplying additional air to the combustion chamber of the BKZ-75 boiler through OFA injectors were studied: OFA=0% (basic version), OFA=10% and OFA=18%. As a result of the computational experiments, the distributions of the concentrations of carbon monoxide CO and nitrogen dioxide NO₂ were obtained over the entire volume of the combustion chamber; at the exit from it, a comparative analysis was carried out for all the studied modes.

Results of computational experiments

Figure 2 shows the 3-D distribution of carbon monoxide concentrations CO at the outlet of the combustion chamber of the BKZ-75 boiler for three options for supplying additional air through OFA injectors: a) OFA=0% (basic version), b) OFA=10%, c) OFA=18%. Analysis of Figure 2 shows that an increase in the volume of air supplied through OFA injectors reduces the concentration of carbon monoxide CO at the outlet of the combustion chamber from $7.3 \cdot 10^{-4}$ kg/kg to $4.6 \cdot 10^{-4}$ kg/kg, which makes up about 36%.

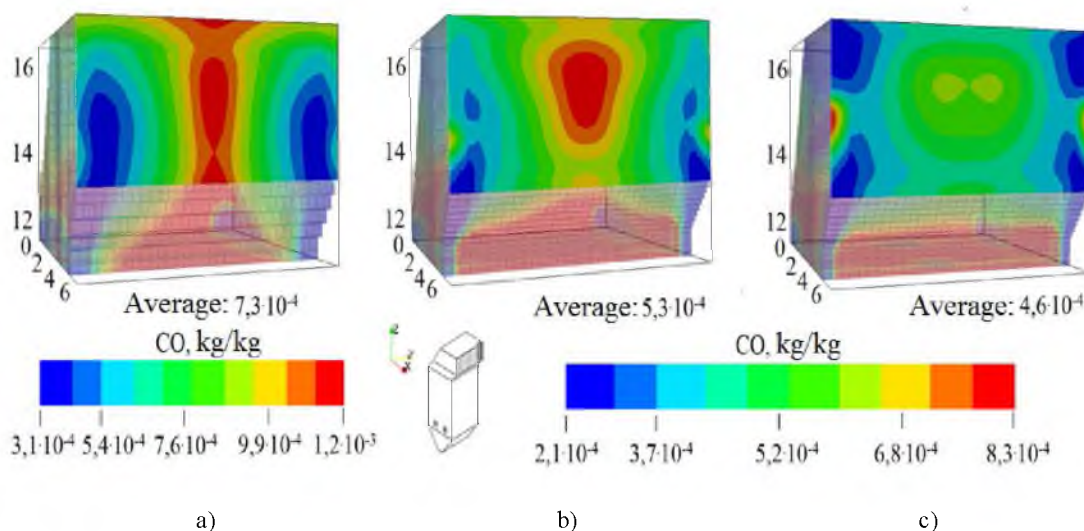


Figure 2 - The distribution of the concentration of carbon monoxide CO at the outlet of the combustion chamber of the boiler BKZ-75 at various values of air supplied through OFA nozzles: OFA = 0% (a), OFA = 10% (b), OFA = 18% (c)

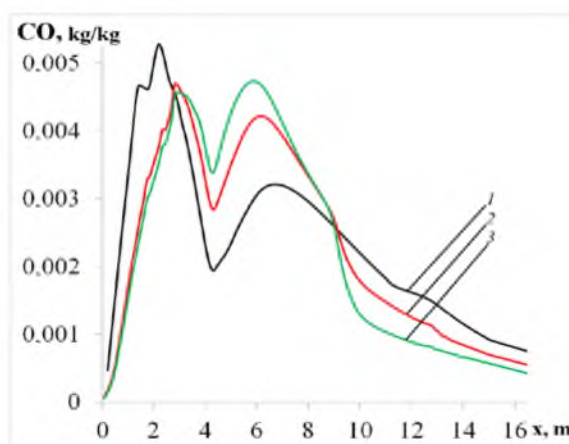


Figure 3 - Distribution of the concentration of carbon monoxide CO over the height of the combustion chamber of the BKZ-75 boiler at various values of air supplied through OFA nozzles: 1 - OFA = 0%, 2 - OFA = 10%, 3 - OFA = 18%

Figure 3 shows the distribution of carbon monoxide concentrations over the height of the combustion chamber of the BKZ-75 boiler for various values of air supplied through OFA nozzles: 1 - OFA= 0%,

2 - OFA=10%, 3 - OFA=18%. It can be noted that carbon monoxide is concentrated mainly in the zone of the main distribution of the fuel flow and oxidizer (air) from the burners, i.e. where there is a large amount of carbon fuel. With an increase in the volume of air supplied through OFA nozzles, further oxidation of carbon monoxide CO to carbon dioxide CO₂ occurs, which leads to a decrease in CO in the exhaust gases and at the exit from the combustion space (as shown in figure 2).

Distributions of NO₂ concentrations at the outlet of the combustion chamber of the BKZ-75 boiler for three options for supplying additional air through OFA injectors: a) OFA=0% (basic version), b) OFA=10%, c) OFA=18% are shown in figure 4. Analysis of the concentration field of nitrogen dioxide NO₂ at the exit from the combustion space indicates a significant effect of stepwise combustion technology on the distribution of the concentration of this component. It can be seen that with an increase in the volume of air supplied through OFA nozzles, there is a significant decrease in the concentration of NO₂ at the outlet of the combustion chamber compared to the basic mode: at OFA=0% - 564.4 mg/nm³, at OFA=10% - 509.44 mg/nm³, at OFA=18% - 424.88 mg/nm³. This is primarily due to the relatively low temperature in the oxygen enriched zone of OFA injectors, which leads to a decrease in the formation of NO_x from the air (thermal NO_x). The maximum permissible concentration (MPC) for nitrogen oxides NO_x, adopted in Kazakhstan, is about 850 mg/nm³.

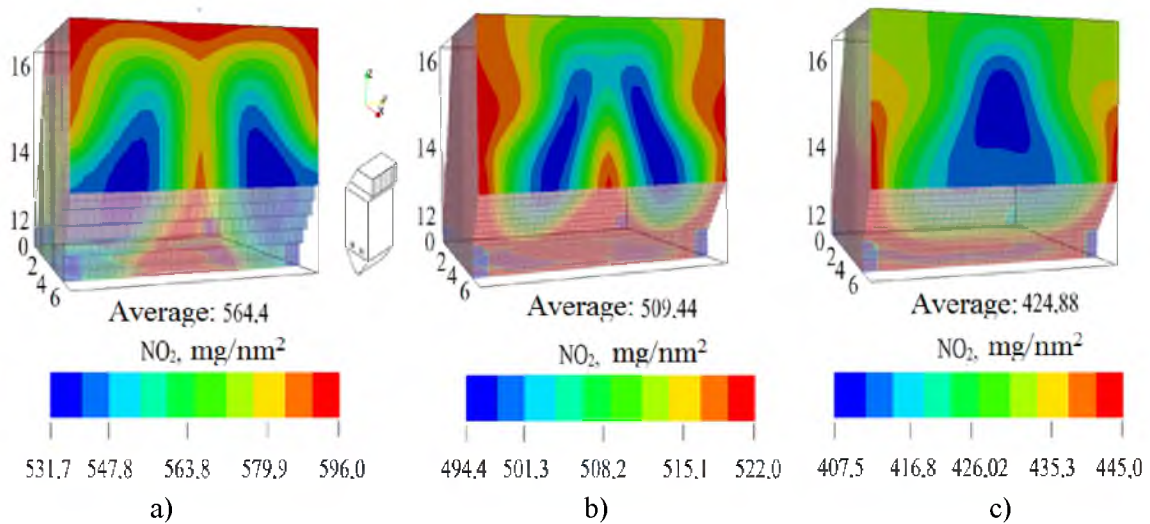


Figure 4 - Distribution of the concentration of nitrogen dioxide NO₂ at the outlet of the combustion chamber of the BKZ-75 boiler at various values of air supplied through OFA nozzles: OFA = 0% (a); OFA = 10% (b); OFA = 18% (c)

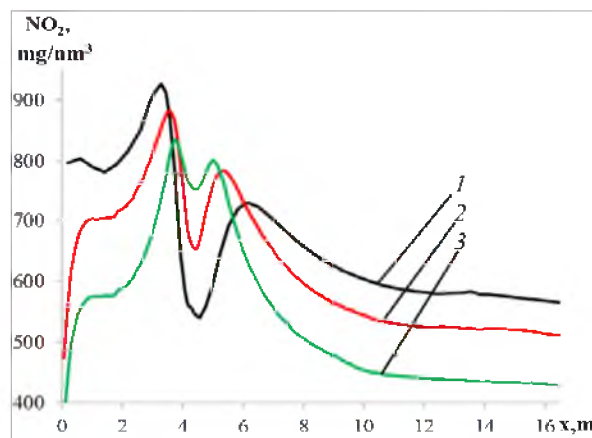


Figure 5 - Distribution of the concentration of nitrogen dioxide NO₂ along the height of the combustion chamber of the BKZ-75 boiler at various values of air supplied through OFA nozzles: 1 - OFA = 0%, 2 - OFA = 10%, 3 - OFA = 18%

This pattern of NO₂ behavior is confirmed by figure 5, which shows the distribution of NO₂ concentration over the height of the combustion chamber of the BKZ-75 boiler for the cases: OFA=0%, OFA=10%, OFA=18%. An analysis of this figure shows that the main gas generation of NO_x occurs in the region of propagation of the mixtures of air from the burners. The nature of the distribution of the curves in this region is ambiguous, which indicates a complex process of the formation of nitrogen dioxide NO₂ in this region. Like figure 4, figure 5 talks about the effect of step-by-step combustion technology on the formation and suppression of nitrogen oxides (at OFA=18%, the NO₂ concentration at the outlet decreases by almost 25%).

Conclusion

The results of a study on the introduction of OFA technology for heat and mass transfer processes occurring in areas of real geometry, which are the combustion chambers of TPPs, when burning energy fuel in them are presented. Numerical experiments were carried out using 3-D computer simulation methods. A comparison was made for different modes of supplying additional air through OFA injectors into the combustion chamber of the BKZ-75 boiler: OFA=0% (basic version), OFA=10%, OFA=18%. It has been shown that the introduction of OFA technology at the BKZ-75 boiler of the Shakhtinskaya TPP can significantly reduce emissions of harmful substances, such as carbon monoxide CO and nitrogen dioxide NO₂, which will improve the environmental situation at coal-burning thermal power plants in the republic.

Acknowledge

This work was supported by Ministry of Education and Science of the Republic of Kazakhstan (grants AP05132988 and AP05133590 and BR05236730).

The author, P.Safarik, expresses thanks for support by the Project No. CZ.2.16/3.1.00/21569 Centre 3D Volumetric Anemometry.

**П. Шафаржик¹, С.Ә. Бөлегенова^{2,3}, А.А. Туякбаев²,
В.Ю. Максимов², А.О. Нұғманова², Ж.К. Шортанбаева², С.Ә. Бөлегенова³**

¹ Прага қ. Чех Техникалық университеті, Прага, Чех Республикасы;

² әл-Фараби атындағы ҚазҰУ, Алматы, Қазақстан;

³ Эксперименталдық және теориялық физиканың ғылыми-зерттеу институты, Алматы, Қазақстан

ШАХТИНСК ЖЭО БКЗ-75 ҚАЗАНДЫГЫНДА ОТЫННЫҢ САТЫЛЫ ЖАНУ ТЕХНОЛОГИЯСЫН ЕНГІЗУ КЕЗІНДЕГІ ЖЫЛУ МАССА АЛМАСУ СИПАТТАМАЛАРЫН ЗЕРТТЕУ

Аннотация. Табиғи энергия ресурстарының сарқылуы және қоршаған ортаның ластануы жағдайында энергетикалық және экологиялық қауіпсіздік проблемасын шешу жаңа энергетикалық стратегияның маңызды міндеттері болып табылады. Қазақстан өзінің қажеттіліктерін қанағаттандыру үшін ғана емес, басқа өңірлерге экспорттау үшін де жеткілікті энергетикалық ресурстардың үлкен қорына ие. Республиканың энергетикалық ресурстарының теңгерімінде тас және аз дәрежеде қоңыр көмір басым. Бүгінде әлемде көмір ЖЭС-да электр және жылу энергиясының 50%-дан астамы, ал Қазақстанда – 85%-ға жуығы өндіріледі. Қазақстанда зиянды заттарды шығарудың қатаң нормаларын сақтай отырып, энергия өндіруге байланысты процестердің тиімділігін арттыру туралы мәселе өте өткір тұр. Осыған байланысты зиянды Шаң-газ шығарындыларын қалыптастырудың негізгі процестерін бақылауға мүмкіндік беретін энергиялық тиімді технологияларды құру және оларды төмендету жөніндегі ұсыныстарды әзірлеу жылу энергетикасының өзекті міндеті болып табылады. Шаңкөмірлі отынын жағудың энергетикалық қондырғыларын жетілдіру жөніндегі прогрессивті технологиялық процестер саласындағы зерттеулер және отынның әр түрлерін жағудың баламалы әдістерін пайдалану қазіргі уақытта Қазақстан Республикасының барлық энергетикалық кешені үшін неғұрлым өзекті болып табылады.

Азот оксидтерінің шығарындыларын азайтудың әртүрлі әдістері бар, олардың ішінде отындық камерада отынды жағу сатысында азот оксидтерін басу технологиясын енгізу неғұрлым орынды болып табылады. Отынды сатылы жағу - "Overfire Air" (OFA) технологиясы NO_x азот оксиді концентрациясын төмендетудің тиімді әдістерінің бірі болып табылады. Сатылы ауаны оттық кеңістік кезінде OFA технологиялар жасалады

беруде қажетті ауа көлемі үшін көмірді жағу былайша: 70-90% ауа беріледі оттықтары және 10-30% – арқылы OFA-инжекторы орналасқан үстінен жанаргы құрылғылары. Бұл жағдайда отындық құрылғының төменгі бөлігінде оттегімен аздаған төмен температуралы және отынмен байытылған жану аймағы құрылады, бұл отын азотынан NOx түзілуін төмендетуге мүмкіндік береді (отындық NOx). Сонымен қатар, OFA-инжекторлардың оттегімен байытылған аймағындағы төмен температура ауадан NOx түзілуін азайтуға әкеледі (термиялық NOx).

Бұл мақалада Шахтинск ЖЭО БКЗ-75 қазандығының оттық камерасы мысалында "Overfire Air" (OFA) технологиясын енгізу бойынша есептеу эксперименттері ұсынылған. БКЗ-75 қазандығы майданнан және тылдан бір қабатқа екі жанаргы орнатылған төрт шаң бұрышымен жабдықталған. Қазандықта Қарағанды қатардағы көмірдің (КР-200) шаңы жағылады, күлдігі 35,1%, ұшқыштың шығымы 22%, ылғалдылығы 10,6% және жану жылуы 18,55 Мдж/кг. Газдар мен сұйықтықтардың ағымын сипаттайтын математикалық модель масса мен импульсты сақтау теңдеулеріне негізделген. Жылу беру процестері болатын ағындар үшін, сондай-ақ қысылған орталар үшін энергияны сақтау теңдеуін қосымша шешу қажет. Әртүрлі құрамдастарды араластыру процестерімен, жану реакцияларымен және т.б. ағымдарда қоспа компоненттерінің сақталу теңдеуін қосу қажет. Турбуленттік ағыстар үшін теңдеулер жүйесі турбуленттік сипаттамаларға арналған көліктік теңдеулермен толықтырылады. Отын мен ауаның айналмалы ағындары үшін жалпы жағдайда күрделі үшөлшемді есепті шешу талап етіледі.

Компьютерлік модельдеу әдістерімен зерттелді әр түрлі режимдері беру оттық камераны БКЗ-75 қосымша ауа арқылы OFA-инжекторы: OFA=0% (базальк-нұсқа), OFA=10%, OFA=18%. Жүргізілген есептеу эксперименттерінің нәтижесінде оттық камераның барлық көлемі бойынша CO көміртегі оксидтерінің және NO₂ азот диоксиді концентрацияларының бөлінуі алынды. OFSA-технологиясын енгізудің ең маңызды нәтижесі оның көмегімен OFA=18%-ға 25%-ға және CO көміртегі оксиді 36%-ға пайдалану кезінде оттық камерасынан шығуда NO₂ азот диоксиді концентрациясының төмендеуі болып табылады. Алынған нәтижелер "Overfire Air" (OFA) технологиясын енгізу жылу масса алмасу процесіне оң әсер етеді және зиянды заттардың шығарылуын азайтуға мүмкіндік береді деген қорытынды жасауға мүмкіндік береді.

**П. Шафаржик¹, С.А.Болегенова^{2,3}, А.А. Туякбаев², В.Ю. Максимов²,
А.О. Нугыманова², Ж.К. Шортанбаева², С.А. Болегенова³**

¹Чешский технический университет в Праге, Прага, Чешская Республика;

²Казахский национальный университет имени аль-Фараби, Алматы, Казахстан;

³Научно-исследовательский институт экспериментальной и теоретической физики,
Алматы, Казахстан

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА ПРИ ВНЕДРЕНИИ ТЕХНОЛОГИИ СТУПЕНЧАТОГО ГОРЕНИЯ ТОПЛИВА НА КОТЛЕ БКЗ-75 ШАХТИНСКОЙ ТЭЦ

Аннотация. В условиях истощения природных энергоресурсов и загрязнения окружающей среды решение проблемы энергетической и экологической безопасности являются важнейшими задачами новой энергетической стратегии. Казахстан располагает огромными запасами энергетических ресурсов, достаточными для удовлетворения не только своих потребностей, но и для экспорта в другие регионы. В балансе энергетических ресурсов республики преобладают каменные и, в меньшей степени, бурые угли. В мире на угольных ТЭС вырабатывается более 50% электрической и тепловой энергии, а в Казахстане – почти 85%. В Казахстане очень остро встает вопрос о повышении эффективности процессов, связанных с производством энергии, при соблюдении строгих норм выброса вредных веществ. В этой связи создание энергоэффективных технологий, позволяющих контролировать основные процессы формирования вредных пылегазовых выбросов, и разработка рекомендаций по их снижению является актуальной задачей теплоэнергетики. Исследования в области прогрессивных технологических процессов по совершенствованию энергетических установок сжигания пылеугольного топлива и использованию альтернативных методов сжигания различных видов топлива являются в настоящее время наиболее актуальными для всего энергетического комплекса Республики Казахстан.

Имеются различные методы сокращения выбросов вредных веществ, наиболее целесообразным из которых является внедрение технологии подавления оксидов азота на стадии сжигания топлива в топочной камере. Ступенчатое сжигание топлива – технология «Overfire Air» (OFA) является одним из эффективных методов снижения концентрации оксидов азота NO_x. Ступенчатая подача воздуха в топочное пространство при OFA-технологии заключается в подаче необходимого объема воздуха для сжигания угля следующим

образом: 70-90% воздуха подается в горелки и 10-30% – через OFA-инжекторы, которые расположены над горелочными устройствами. В этом случае в нижней части топочного устройства создается низкотемпературная обедненная кислородом и обогащенная топливом зона горения, что позволяет снизить образование NO_x из азота топлива (топливные NO_x). В то же время низкая температура в обогащенной кислородом зоне OFA-инжекторов приводит к минимизации образования NO_x из воздуха (термические NO_x).

В данной статье представлены результаты вычислительных экспериментов по внедрению технологии «Overfire Air» (OFA) на примере топочной камеры котла БКЗ-75 Шахтинской ТЭЦ. Котел БКЗ-75 оборудован четырьмя пылеугольными горелками, установленными по две горелки с фронта и с тыла в один ярус. В котле сжигается пыль Карагандинского рядового (КР-200) угля, зольностью 35,1%, выходом летучих 22%, влажностью 10,6% и теплотой сгорания 18,55 MJ/kg. Течение газов и жидкостей описывается математической моделью, основанной на уравнениях сохранения массы и импульса. Для потоков, в которых происходят процессы теплопередачи, а также для сжимаемых сред необходимо дополнительно решать уравнение сохранения энергии. В течениях с процессами смешивания различных составляющих, с реакциями горения и др. необходимо добавить уравнение сохранения компонентов смеси. Для турбулентных течений система уравнений дополняется транспортными уравнениями для турбулентных характеристик. Для вращающихся потоков топлива и воздуха требуется в общем случае решение сложной трехмерной задачи.

Методами 3-D компьютерного моделирования исследованы различные режимы подачи в топочную камеру котла БКЗ-75 дополнительного воздуха через OFA-инжекторы: OFA=0% (базовый вариант), OFA=10%, OFA=18%. В результате проведенных вычислительных экспериментов были получены распределения концентраций оксидов углерода CO и диоксида азота NO₂ по всему объему топочной камеры. Наиболее важным результатом внедрения ступенчатого сжигания топлива (OFA=18%) является снижение концентраций диоксида азота NO₂ на выходе из топочной камеры на 25% и оксида углерода CO на 36%. Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что внедрение технологии ступенчатого сжигания топлива (OFA) положительно влияет на процесс теплообмена в камере сгорания и позволяет минимизировать выбросы вредных веществ на казахстанских ТЭЦ.

Information about authors:

Safarik Pavel – Doctor of Physics and Mathematics, Professor at the Czech Technical University in Prague, Prague, Czech Republic. <https://orcid.org/0000-0001-5376-9604>;

Bolegenova Saltanat – Doctor of Physics and Mathematics, Professor, Head of the Department of Thermophysics and Technical Physics, al-Farabi Kazakh National University. <https://orcid.org/0000-0001-5001-7773>;

Tuyakbaev Altai - Doctor of Physical and Mathematical Sciences, al-Farabi Kazakh National University. The author made a significant contribution to the concept and design of the research, data acquisition or their analysis and interpretation;

Maximov Valeriy – PhD, Senior Lecturer, Department of Thermal Physics and Technical Physics, al-Farabi Kazakh National University. <https://orcid.org/0000-0003-4120-1071>;

Nugymanova Aizhan – PhD student, Senior Lecturer, Department of Thermal Physics and Technical Physics, al-Farabi Kazakh National University. <https://orcid.org/0000-0003-0393-5672>;

Shortanbaeva Zhanar – Vice-head of the Department of Thermophysics and Technical Physics, al-Farabi Kazakh National University. <https://orcid.org/0000-0002-1148-6865>;

Bolegenova Symbat – PhD, deputy dean for educational, methodical and educational work Al-Farabi Kazakh National University. Symbat.bolegenova@kaznu.kz, <https://orcid.org/0000-0003-1061-6733>

REFERENCES

- [1] Climate change. United Nations. <https://www.un.org/en/sections/issues-depth/climate-change/index.html>.
- [2] Leithner R., Schiller A. etc (1999) Firing technique measures for increased efficiency and minimization of toxic emissions in Kasakh coal firing. Proceedings of 19th German Conference on Flames, Dresden, Germany 1492:93-97 (in Eng).
- [3] Askarova A., Shortanbaeva Zh.K., Bolegenova S. etc (2017) Numerical modeling of burning pulverized coal in the combustion chamber of the boiler PK 39. News of the national academy of sciences of the Republic of Kazakhstan-series physico-mathematical, 2(312):58-63.
- [4] Askarova A., Beketayeva M., Ergaliev A. etc (2016) 3D modeling of heat and mass transfer during combustion of solid fuel in BKZ-420-140-7C combustion chamber of Kazakhstan. Journal of Applied Fluid Mechanics, 9(2):699-709.
- [5] Ospanova Sh.S., Askarova A., Bolegenova S.A., etc (2017) Investigation of aerodynamics and heat and mass transfer in the combustion chambers of the boilers PK-39 and BKZ-160. News of the national academy of sciences of the Republic of Kazakhstan-series physico-mathematical, 2(312):27-38.
- [6] Askarova A., Buchmann M. (1997) Structure of the flame of fluidized-bed burners and combustion processes of high-ash coal. Proceedings of 18th Dutch-German Conference on Flames, VDI Berichte, 1313:241-244.
- [7] Bekmukhamet A., Beketayeva M., Gabitova Z. etc (2014) Control harmful emissions concentration into the atmosphere of megacities of Kazakhstan Republic. International conference on Future Information Engineering, Beijing, Peoples China, 10:252-258. DOI: 10.1016/j.ieri.2014.09.085.

- [8] Ustimenko A.B., Askarova A.S., Messerle V.E. etc (2016) Reduction of noxious substance emissions at the pulverized fuel combustion in the combustor of the BKZ-160 boiler of the Almaty heat electro power station using the “Overfire Air” technology. *Journal Thermophysics and Aeromechanics*, 23(1):125-134. DOI: 10.1134/S0869864316010133.
- [9] Askarova A., Bolegenova S.A., Beketayeva M.T., etc (2018) Modeling of heat and mass transfer in high-temperature reacting flows with combustion. *Journal High Temperature*, 56(5):738-743. DOI: 10.1134/S0018151X1805005X.
- [10] Safarik P., Askarova A., Nugymanova A., etc (2019) Optimization of the solid fuel combustion process in combustion chambers in order to reduce harmful emissions. *News of the national academy of sciences of the Republic of Kazakhstan-series Physico-mathematical*, 6(328): 34-42 DOI: 10.32014/2019.2518-1726.71.
- [11] Ospanova Sh., Mazhrenova N., Manatbayev R., etc (2016) 3D modelling of heat and mass transfer processes during the combustion of liquid fuel, *Proceedings of 15th International Scientific Conference on Renewable Energy and Innovative Technologies*, Tech Coll Smolyan, Smolyan, Bulgaria, *Bulgarian Chemical Communications*, 48(E):229-235.
- [12] Messerle V.E., Karpenko E.I., Ustimenko A.B. etc (2007) Mathematical modeling of the processes of solid fuel ignition and combustion at combustors of the power boilers. *Proceedings of the 7th International Fall Seminar on Propellants, Explosives and Pyrotechnics*, Xian, 7:672-683.
- [13] Chtab-Desportes A., Gorokhovski M., Voloshina I. (2010) Stochastic simulation of the spray formation assisted by a high pressure. *AIP Conference Proceedings*, 1207:66-73.
- [14] Leithner R., Gabitova Z., Ergalieva A. etc (2016) Computational modeling of heat and mass transfer processes in combustion chamber at power plant of Kazakhstan. *Proceedings of MATEC Web of Conferences*, 76:UNSP06001 DOI:10.1051/mateconf/20167606001.
- [15] Heierle E.I., Yergaliyeva A.B., Manatbayev R.K. etc (2016) CFD study of harmful substances production in coal-fired power plant of Kazakhstan. *Bulgarian Chemical Communications*, 48(E2):260-265.
- [16] Maxutkhanova AM, Turbekova AG, Beisenov KhI, etc (2017) A computational experiment for studying the combustion of thermochemically-gasified coal in the combustion chamber of the boiler BKZ-160. *News of the national academy of sciences of the Republic of Kazakhstan-series physico-mathematical*, 2(312):75-80 DOI: 10.1515/eng-2018-0020
- [17] Safarik P, Askarova AS, Nugymanova AO, etc (2019) Simulation of low-grade coal combustion in real chambers of energy objects. *Journal Acta Polytechnica*, 59(2):98-108. doi.org/10.14311/AP.2019.59.0098
- [18] Maximov VYu, Safarik P, Bolegenova SA, etc (2019) 3D modeling of combustion thermochemical activated fuel. *News of the national academy of sciences of the Republic of Kazakhstan-series physico-mathematical*, 2(324):9-16. DOI: 10.32014/2019.2518-1726.7.
- [19] Safarik P, Askarova A, etc (2019) 3D modeling of heat and mass transfer processes during the combustion of solid fuel in a swirl furnace. *Journal Acta Polytechnica*, 59(6):543-553. DOI:10.14311/AP.2019.59.0543.Bolegenova SA, Askarova A, Maximov VYu, etc (2019) 3D modeling of heat transfer processes in the combustion chamber of a TPP boiler. *News of the national academy of sciences of the Republic of Kazakhstan-series physico-mathematical*, 6(328):5-13 DOI: 10.32014/2019.2518-1726.68.
- [20] Beketayeva MT, Askarova AS, Safarik P, etc (2018) Modern computing experiments on pulverized coal combustion processes in boiler furnaces, *News of the national academy of sciences of the Republic of Kazakhstan-series Physico-mathematical*, 6(322):5-14 DOI: 10.32014/2018.2518-1726.11.
- [21] Shortanbayeva Zh, Gabitova Z, Yergaliyeva A, etc (2017) Simulation of the aerodynamics and combustion of a turbulent pulverized-coal flame. *Proceedings of 4th International Conference on Mathematics and Computers in Sciences and in Industry (MCSI 2017)*. Corfu Island, Greece. P.92-97. DOI: 10.1109/MCSI.2017.23.
- [22] Maximov VYu, Askarova A, etc (2012) Mathematical simulation of pulverized coal in combustion chamber. *Proceedings of 20th International Congress of Chemical and Process Engineering*, Prague, Czech Republic. 42:1150-1156.
- [23] Bolegenova SA, Mazhrenova NR, Mamedova MR, etc (2019) Computational experiments for research of flow aerodynamics and turbulent characteristics of solid fuel combustion process. *News of the national academy of sciences of the Republic of Kazakhstan-series physico-mathematical*, 2(324):46-52. DOI: 10.32014/2019.2518-1726.11.
- [24] Bekmuhamet A, Askarova A, Ospanova ShS., etc (2012) Numerical research of aerodynamic characteristics of combustion chamber BKZ-75 mining thermal power station. *Procedia Engineering*, 42:1250-1259. DOI: 10.1016/j.proeng.2012.07.517.