

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

ISSN 1991-346X

Volume 2, Number 312 (2017), 27 – 38

UDC 536.46:532.517.4

**A.S. Askarova, S.A. Bolegenova,  
S.A. Bolegenova, V.Yu. Maximov, Sh.S. Ospanova**

Al-Farabi Kazakh national university, Almaty  
[Bolegenova.symbat@kaznu.kz](mailto:Bolegenova.symbat@kaznu.kz)

**INVESTIGATION OF AERODYNAMICS AND HEAT  
AND MASS TRANSFER IN THE COMBUSTION CHAMBERS  
OF THE BOILERS PK-39 AND BKZ-160**

**Annotation.** Scientific researches in the field of development of new and improvement of existing technologies to improve the combustion of low grade fuels that reduce emissions of pollutants and at the same time improve the main indicators of energy complexes represent considerable interest for thermal power industry in the Republic of Kazakhstan. The development of such methods and improving coal combustion processes, along with alternative ways of organizing its combustion process (plasma thermochemical preparation, with the use of technology overfire air and the technology mechanism of selective and non-catalytic reduction of nitrogen oxide emissions) is currently the most urgent for the entire energy complex.

**Keywords:** combustion, combustion chamber, plasma-fuel systems, numerical modeling.

Many experimental and analytical studies are carried out under simplified conditions, which differ from the real heating conditions of the process flow. For example, many of them are carried out under the conditions of combustion of large particles when they are incinerated in a medium with large excess of air. Some researchers have assumed that the temperature of the medium does not change during combustion, and combustion takes place in one of the limiting regimes: kinetic or diffuse. This simplification of the combustion process distorts its essence and does not allow us to clarify the aerodynamics and heat exchange occurring in a real combustion chamber [1].

When the solid fuel burns in a pulverized state, turbulent heat transfer processes, masses of reacting components and their interaction products take place in the combustion chamber. Such processes are described by equations based on the laws of conservation of mass and momentum. For reactive flows, in which heat transfer processes and chemical reactions occur, it is necessary to further solve the energy conservation equation and add the equation of conservation of the mixture components or the conservation equation for the mixture fractions and their variations. Turbulence is described by transport equations for turbulent characteristics [2-5].

This system of basic equations of the mathematical model used in the present work to describe the processes of turbulent heat and mass transfer during the combustion of solid fuel in the pulverized state (pulverized-coal torch), is as follows [2]:

The equation of continuity or the law of conservation of mass in a differential form is written in the form:

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

where the first term describes the flow nonstationarity, the second term represents convective transfer.

Law of conservation of momentum:

$$\frac{\partial}{\partial \tau}(\rho u_i) = -\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\tau_{i,j}) - \frac{\partial p}{\partial x_j} + \rho f_i, \quad (2)$$

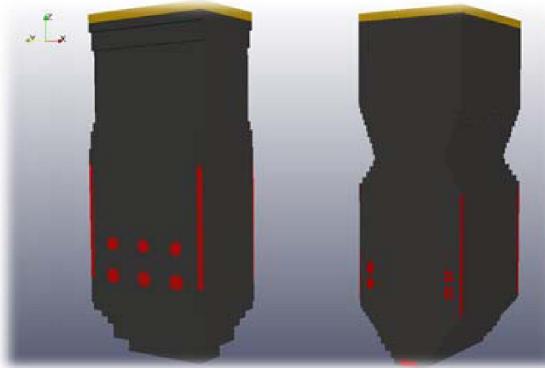
where  $f_i$ - mass force;  $\tau_{i,j}$ - stress tensor.

Energy equation:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho h) = -\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i h) - \frac{\partial q^{res}}{\partial x_j} + \frac{\partial P}{\partial t} + u_i \frac{\partial P}{\partial x_i} + \tau_{ij} \frac{\partial u_j}{\partial x_i} + S_h \quad (3)$$

Plasma thermochemical preparation of coal for combustion consists in heating by a plasma torch with an oxygen deficit of the flow of the pulverized coal mixture in a special chamber to the temperature higher than the autoignition temperature of this coal. In this case, there is an almost complete release of volatile substances and partial combustion and gasification of coal carbon. As a result, the obtained fuel mixture or the highly reactive two-component fuel, consisting of combustible gas and coke residue, is ignited when mixed with secondary air and steadily burns without the use of a reserve high-reaction fuel (fuel oil or natural gas) to stabilize the pulverized-coal flare even in a cold furnace. The use of different types of burners does not cause differences in the mechanism of plasma thermochemical preparation of coal for combustion. The use of PTS makes it possible to exclude fuel oil from the fuel balance of CHP, traditionally used to kindle boilers [6-8].

The process of plasma thermochemical preparation of fuel for combustion is carried out in PTS. The plasma torch is installed on the lined channel of the air mixture of the burner, which is converted into PTS and installed directly into the combustion chamber [7-8]. Figure 1 presents a general view of the furnace chambers of the PK-39 boilers of the Aksuiskaya SDPP and BKZ-160 of Almaty CHP-3 equipped with plasma-fuel systems.



a) PK-39 of the Aksuiskaya SDPP; b) BKZ-160 of Almaty CHP-3

Figure 1 - General view of furnace chambers of boilers equipped with plasmatrons

Figures 2 and 3 show the field of the full-velocity vector in the combustion chamber in the cross section of the burners for each of the investigated cases, for the boilers PK-39 and BKZ-160.

Analysis of figure 2 shows that with increasing number of thermochemically activated flows (4, 6, 12 plasma torches), the core of the flame is shifted to the center of symmetry of the combustion chamber. At the point of collision of opposing flows, the dynamic head is transformed into static pressure as a result of braking. Under the action of the resulting pressure drop, the total flow spreads up and down with increased velocities. When impact opposite torches and the turbulence of the streams, mass and heat transfer is accelerated to a large extent, while the mixture-forming and heating amplification intensify the combustion process.

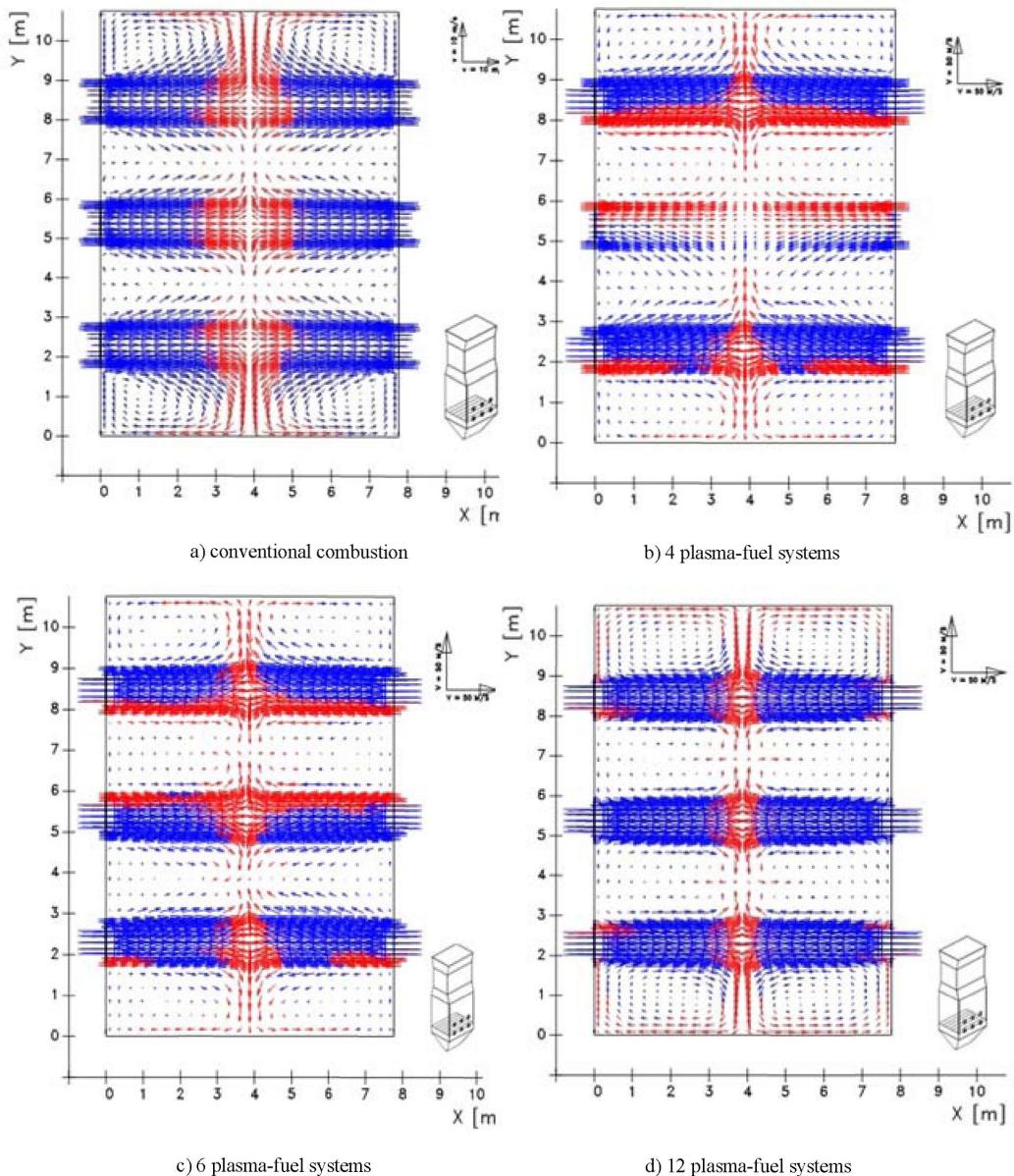


Figure 2 - The field of the full-velocity vector in the section of burners of the combustion chamber of the boiler PK-39 of Aksuyskaya SDPP

Figure 3 indicates a significant difference between the two investigated cases. In Fig. 3b, the pulverized coal streams, flowing into the furnace through conventional burners and through plasma-fuel systems, are clearly visible. Thus, in the furnace chamber, the flows of the two-component high-reaction fuel gasified by plasma activation are propagated in accordance with the laws of aerodynamics and are the thermal source for the air mixture delivered through burners not equipped with plasma ignition systems.

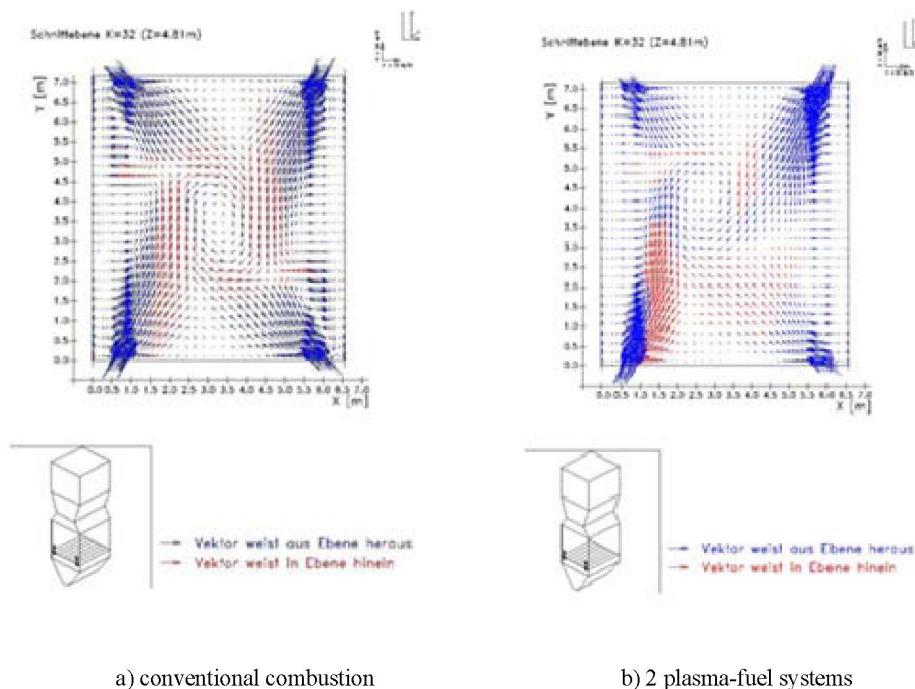
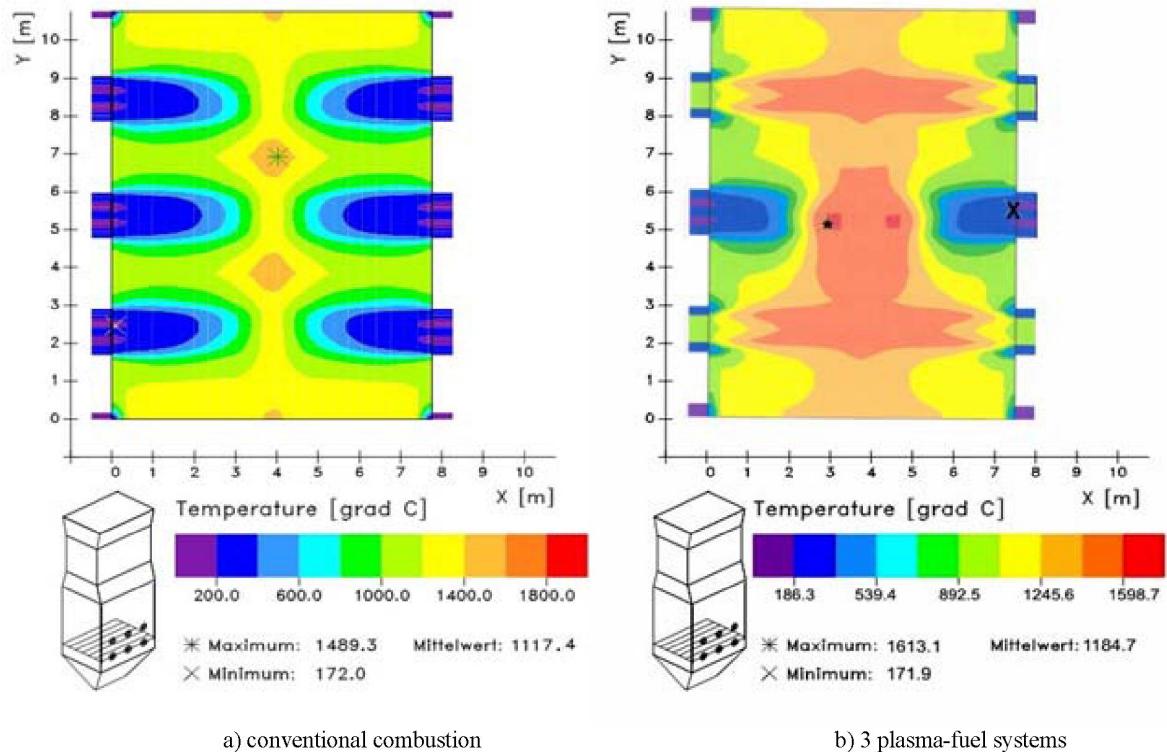


Figure 3 - Distribution of the full-velocity vector in the location of the burners of the combustion chamber of the boiler BKZ-160 of Almaty CHP-3

It can be noted (Fig. 4) that, compared with the conventional pulverized coal flow, the average temperature in the plane of the burner cross-section for the PK-39 boiler increases with the number of thermochemically activated streams and amounts to: 1117 °C - without activation; 4 activated streams - 1185 °C; 6 - 1211 °C; 12 - 1488 °C.



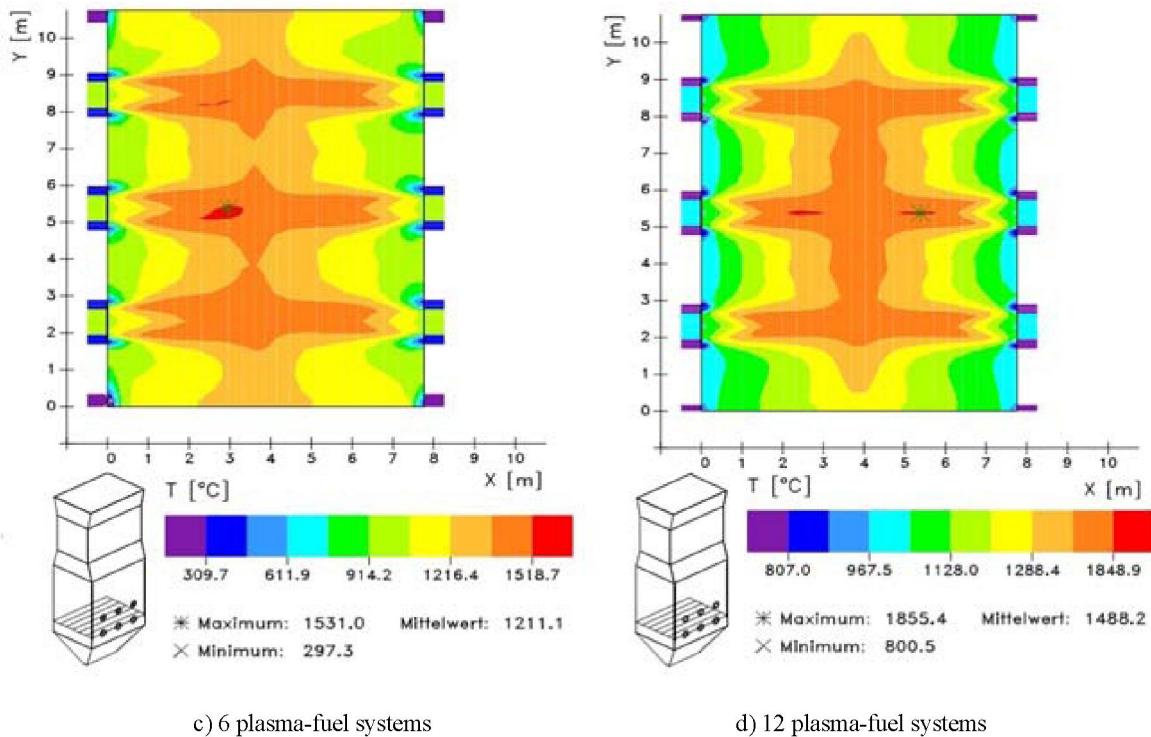


Figure 4 - Temperature field in the plane of the burner section of the lower stage of the furnace chamber of PK-39 boiler of Aksuiskaya SDPP

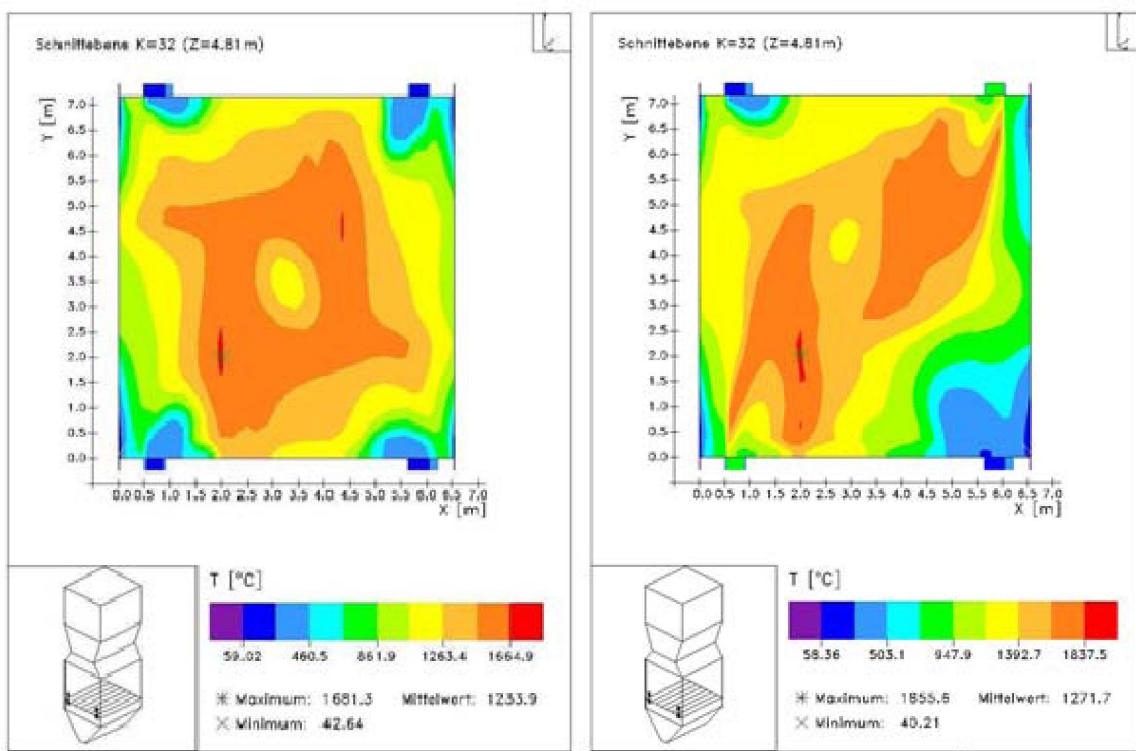


Figure 5 - Temperature distribution in the area of the burner devices arrangement in the lower stage of the furnace chamber of the BKZ-160 boiler of Almaty CHP -3

Analysis of figure 5 shows that, in comparison with the use of conventional pulverized coal flow, the average temperature in the plane of the section of burners with thermochemically activated flows increases and amounts to: 1234 °C - without activation, and 1272 °C - for two activated flows in the lower stage of the burners.

On the basis of the foregoing, it can be concluded that for all boilers under study the process of plasma activation of the combustion of the air mixture leads to an increase in the temperature in the area of installation of burners. At the same time, with an increase in the number of installed plasma-fuel systems, the combustion front is shifted to the location of plasma activation systems of coal flows.

This can be explained, first of all, by the fact that during the plasma activation of the pulverized coal stream, volatile substances are released before entering the combustion chamber, carbon is oxidized, which leads to partial gasification of the fuel. The released volatile and gasification products begin to react with the oxygen present in the primary air, in turn, further releasing heat and further heating the reacting stream of pulverized coal particles, the products of combustion of volatile and gasification of the coke residue (carbon).

#### REFERENCES

- [1] Müller H. Numerical calculation of three-dimensional turbulent flows in steam generators with heat transfer and chemical reactions using the example of the SNCR method. *Progress reports VDI-Verlag*. 1992. 268. 158 p. (in Ger.).
- [2] Leithner R., Müller H. CFD studies for boilers. *Second M.I.T. Conference on Computational Fluid and Solid Mechanics*. Cambridge, 2003, 172-185( in Eng).
- [3] Leithner R. Energy conversion processes with intrinsic CO<sub>2</sub> separation. *Transactions of the Society for Mining, Metallurgy and Exploration*, 2005, 18, 135-145 ( in Eng).
- [4] Leithner R. Numerical Simulation. Computational Fluid Dynamics CFD: Course of Lecture. Braunschweig, 2006. 52 p. ( in Eng).
- [5] Askarova A.S., Messerle V.E., Ustimenko A.B., Bolegenova S.A., Maximov V.Yu. Numerical simulation of pulverized coal combustion in a power boiler furnace. *Journal of High Temperature*. 2015. 53. 3. 467-474.
- [6] Askarova A., Bolegenova S., Maximov V., Beketayeva M., Safarik P. Numerical modeling of pulverized coal combustion at thermal power plant boilers. *Journal of Thermal Science*. 2015. 24(3). 275-282 ( in Eng).
- [7] Askarova A., Messerle V., Bolegenova S., Ustimenko A. Simulation of Coal Plasma Ignition and Combustion in a Furnace Chamber. *The 31<sup>st</sup> European Physical Society Conference on Plasma Physics Imperial College*. London: UK, 2004. 251-264 ( in Eng).
- [8] Askarova A., Messerle V., Karpenko V., Ustimenko A. Plasma-chemical activation of the combustion of solid fuels. *High Energy Chemistry*. 2006.40. 141-148.

**NEWS**

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

ISSN 1991-346X

Volume 2, Number 312 (2017), 33 – 38

УДК 536.46:532.517.4

**А.С. Аскарова, С.А. Болегенова,  
 С.А. Болегенова, В.Ю. Максимов, Ш.С. Оспанова**

Казахский национальный университет имени аль-Фараби, г. Алматы  
 Bolegenova.symbat@kaznu.kz

## **ИССЛЕДОВАНИЕ АЭРОДИНАМИКИ И ТЕПЛОМАССООБМЕНА В ТОПОЧНЫХ КАМЕРАХ КОТЛОВ ПК-39 И БКЗ-160**

**Аннотация.** Научные исследования в области разработки новых и совершенствования существующих технологий по улучшению горения низкосортных топлив, которые обеспечивают снижение выбросов в атмосферу загрязняющих веществ и одновременно улучшают основные показатели энергетических комплексов, представляют значительный интерес для теплоэнергетической отрасли Республики Казахстан. Разработка таких методов и совершенствование процессов горения угля наряду с использованием альтернативных способов организации процесса его сжигания (плазменная термохимическая подготовка, с применением технологий острого дутья и технологии использования механизма селективного и некаталитического снижения выбросов оксидов азота) является в настоящее время наиболее актуальным для всего энергетического комплекса.

**Ключевые слова:** Горение, топочная камера, плазменно-топливные системы, численное моделирование.

Многие экспериментальные и аналитические исследования проводятся в упрощенных условиях, которые отличаются от реальных топочных условий протекания процесса. Так, например, многие из них проводятся в условиях горения крупных частиц при их сжигании в среде с большими избытками воздуха. Некоторые исследователи принимали, что температура среды в процессе горения не изменяется, а горение протекает в одном из предельных режимов: кинетическом или диффузном. Такое упрощение процесса горения искажает его суть и не позволяет выяснить аэродинамику и теплообмен, происходящие в реальной топочной камере [1].

При горении твердого топлива в пылевидном состоянии в топочной камере происходят турбулентные процессы переноса тепла, массы реагирующих компонентов и продуктов их взаимодействия. Такие процессы описываются уравнениями, основанными на законах сохранения массы и импульса. Для реагирующих потоков, в которых происходят процессы теплопередачи и химические реакции необходимо дополнительно решать уравнение сохранения энергии и добавлять уравнение сохранения компонентов смеси или уравнения сохранения для фракций смеси и их изменений. Турбулентность описывается транспортными уравнениями для турбулентных характеристик [2-5].

Указанная система основных уравнений математической модели, используемой в настоящем работе для описания процессов турбулентного тепломассопереноса при сжигании твердого топлива в пылевидном состоянии (пылеугольный факел) выглядит следующим образом [2]:

Уравнение неразрывности или закон сохранения массы в дифференциальной форме записывается в виде:

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

где первый член описывает нестационарность потока, второй член представляет собой конвективный перенос.

Закон сохранения импульса:

$$\frac{\partial}{\partial \tau} (\rho u_i) = - \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_i u_j) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\tau_{i,j}) - \frac{\partial p}{\partial x_j} + \rho f_i, \quad (2)$$

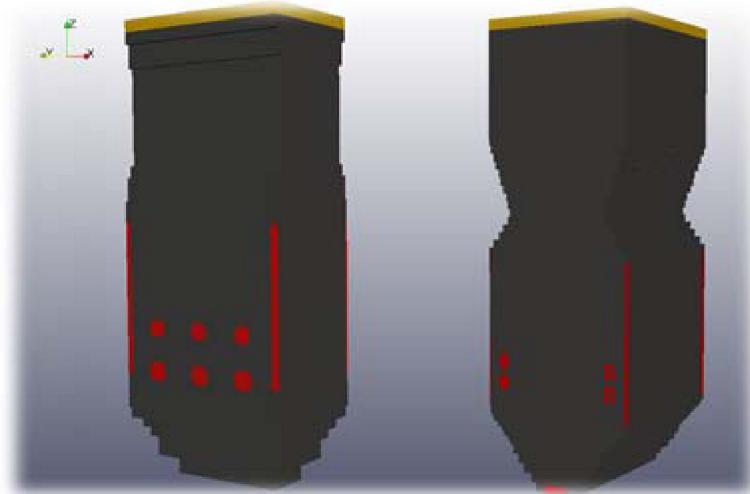
где  $f_i$ - объемные силы;  $\tau_{i,j}$ -тензор напряжений.

Уравнение энергии:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho h) = - \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i h) - \frac{\partial q_i^{res}}{\partial x_j} + \frac{\partial P}{\partial t} + u_i \frac{\partial P}{\partial x_i} + \tau_{ij} \frac{\partial u_j}{\partial x_i} + S_h \quad (3)$$

Плазменная термохимическая подготовка угля к сжиганию заключается в нагреве плазменным факелом при дефиците кислорода потока пылеугольной смеси в специальной камере до температуры, превышающей температуру самовоспламенения данного угля. При этом происходит практически полный выход летучих веществ и частичное сгорание и газификация углерода угля. В результате полученная топливная смесь или высокореакционное двухкомпонентное топливо, состоящее из горючего газа и коксового остатка, воспламеняется при смешении с вторичным воздухом и устойчиво горит без использования для стабилизации пылеугольного факела даже в холодной топке резервного высокореакционного топлива (мазута или природного газа). Использование различных типов горелок не вызывает отличий в механизме процесса плазменной термохимической подготовки угля к сжиганию. Применение ПТС позволяет исключить из топливного баланса ТЭС мазут, традиционно используемый для растопки котлов [6-8].

Процесс плазменной термохимической подготовки топлива к сжиганию осуществляется в ПТС. Плазмотрон устанавливается на футерованный канал аэросмеси горелки, которая тем самым преобразуется в ПТС и устанавливается непосредственно в топочную камеру [7-8]. На рисунке 1 представлен общий вид топочных камер котлов ПК-39 Аксуской ГРЭС и БКЗ-160 Алматинской ТЭЦ-3, оборудованных плазменно-топливными системами.



а) ПК-39 Аксуской ГРЭС; б) БКЗ-160 Алматинской ТЭЦ-3

Рисунок 1 - Общий вид топочных камер котлов, оборудованных плазмотронами

На рисунках 2 – 3 представлено поле вектора полной скорости в камере сгорания в сечении горелок для каждого из исследуемых случаев, для котлов ПК-39 и БКЗ-160.

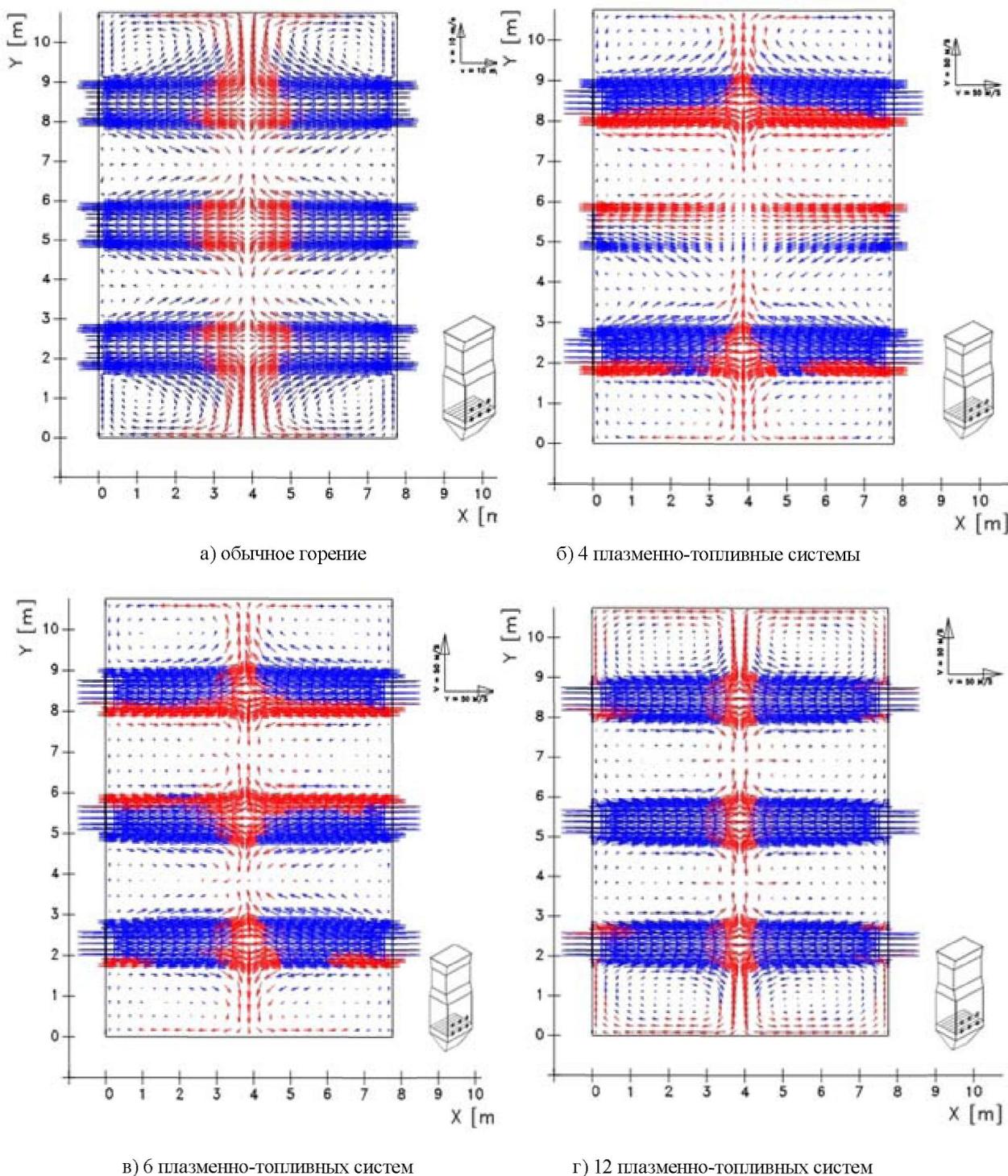


Рисунок 2 – Поле вектора полной скорости в сечении горелок топочной камеры котла ПК-39 Аксуской ГРЭС

Анализ рисунка 2 показывает, что с увеличением числа термохимически активированных потоков (4, 6, 12 плазменных горелок) ядро факела смещается к центру симметрии топочной камеры. В месте соударения встречных потоков в результате торможения динамический напор трансформируется в статическое давление. Под действием образовавшегося перепада давления общий поток растекается вверх и вниз с повышенными скоростями. При соударении встречных факелов и турбулизации потоков в значительной степени ускоряется массо- и теплообмен, а усиливающееся при этом смесеобразование и нагрев интенсифицируют процесс горения.

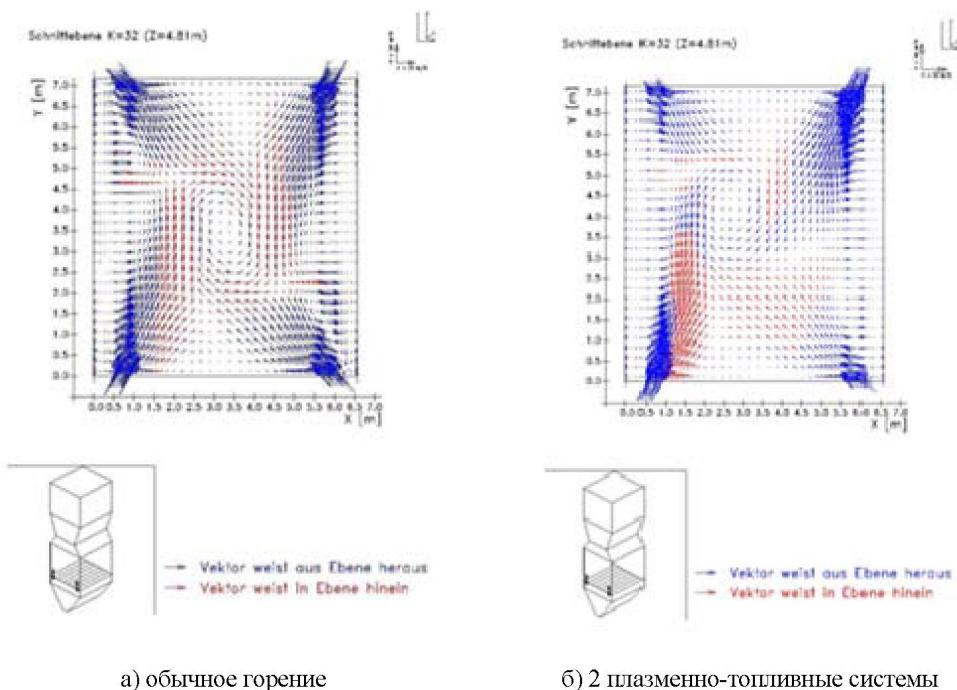
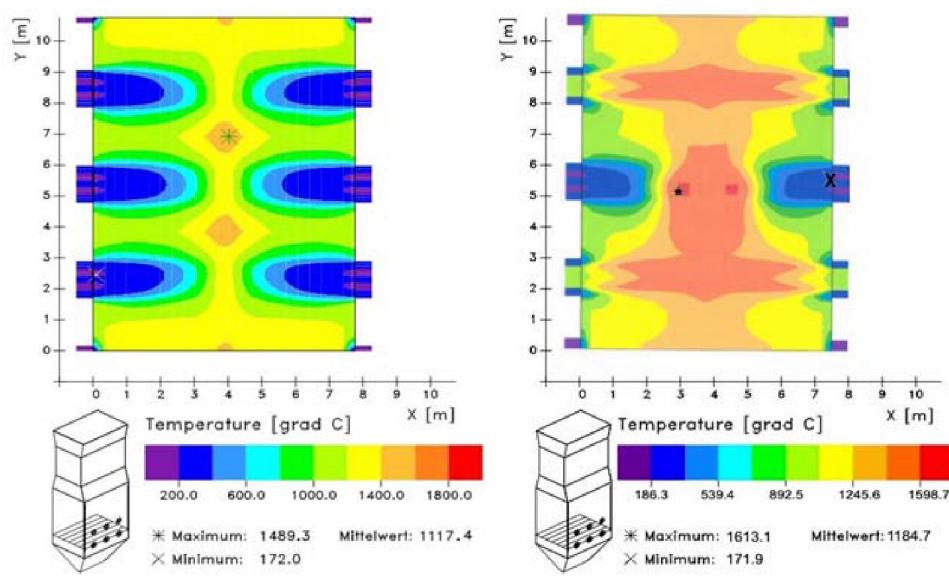
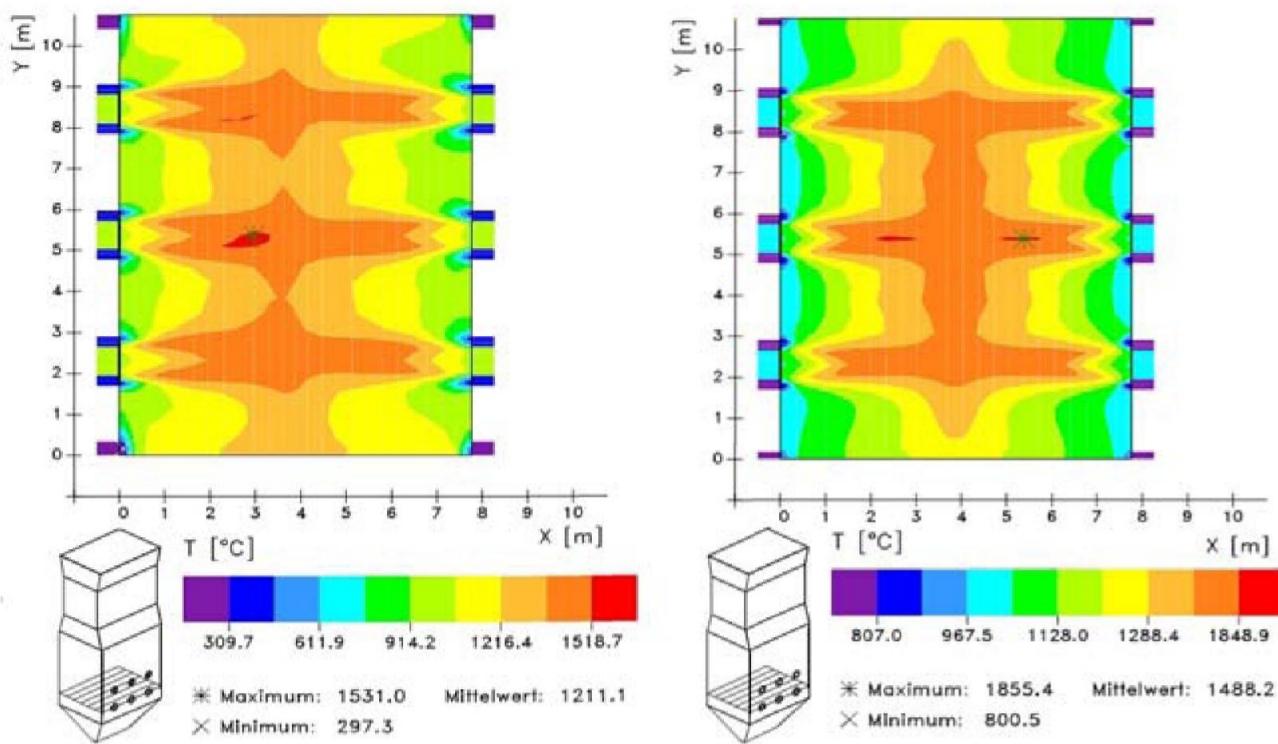


Рисунок 3 - Распределение вектора полной скорости  
в области расположения горелок топочной камеры котла БКЗ-160 Алматинской ТЭЦ-3

Рисунок 3 указывает на существенное различие между двумя исследуемыми случаями. На рисунке 3, б отчетливо видны потоки пылеугольной смеси, поступающие в топку через обычные горелки и через плазменно-топливные системы. Таким образом, в объеме топочной камеры потоки двухкомпонентного высокореакционного топлива, газифицированные с помощью плазменной активации, распространяются в соответствии с законами аэродинамики и являются тепловым источником для аэросмеси, подаваемой через горелки, не оснащенные системами плазменного воспламенения.

Можно заметить (рисунок 4), что по сравнению с использованием обычного пылеугольного потока среднее значение температуры в плоскости сечения горелок для котла ПК-39 с увеличением числа термохимически активированных потоков увеличивается и составляет: без активации – 1117 °C; четыре активированных потока – 1185 °C; 6 – 1211 °C; 12 – 1488 °C.

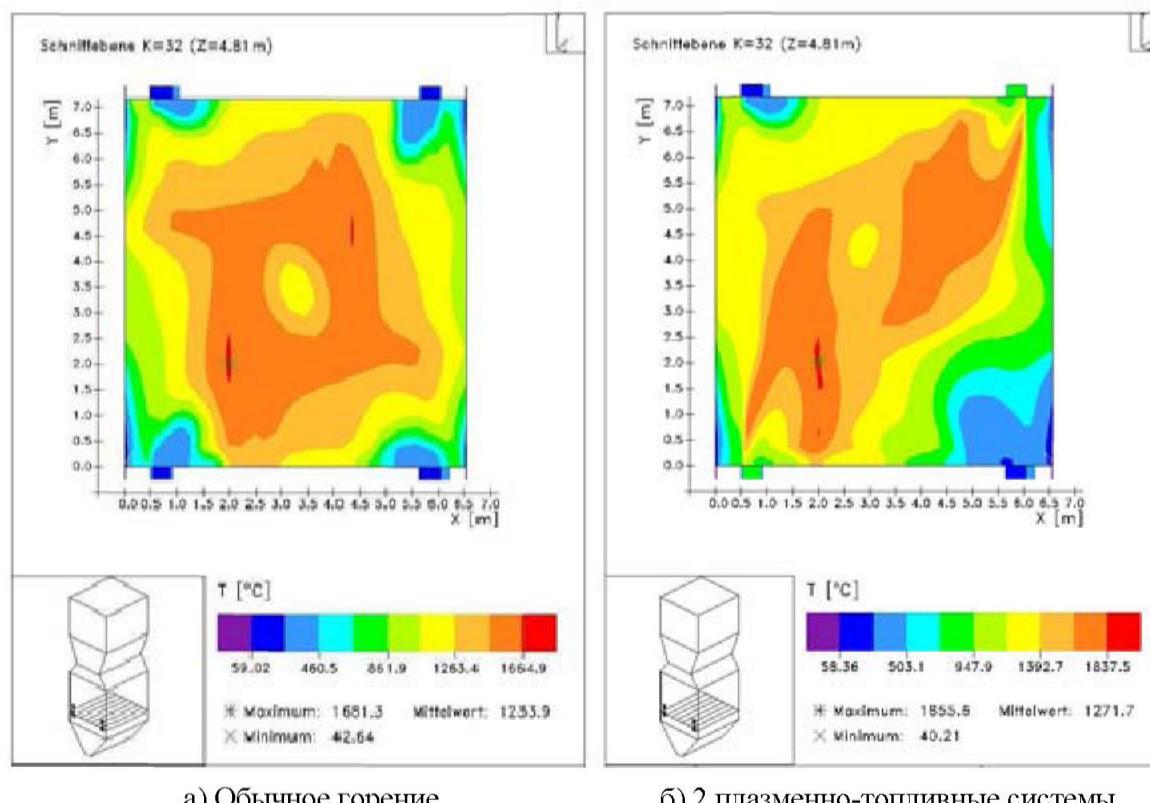




в) 6 плазменно-топливных систем

г) 12 плазменно-топливных систем

Рисунок 4 - Поле температуры в плоскости сечения горелок нижнего яруса топочной камеры котла ПК-39 Аксуской ГРЭС



а) Обычное горение

б) 2 плазменно-топливные системы

Рисунок 5 – Распределение температуры в области расположения горелочных устройств нижнего яруса топочной камеры котла БКЗ-160 Алматинской ТЭЦ-3

Анализ рисунка 5 показывает, что по сравнению с использованием обычного пылеугольного потока среднее значение температуры в плоскости сечения горелок с термохимически активированными потоками увеличивается и составляет: без активации – 1234 °C, а при двух активированных потоках в области нижнего яруса горелок - 1272 °C.

На основании вышесказанного, можно сделать вывод о том, что для всех исследуемых котлов процесс плазменной активации горения аэросмеси приводит к увеличению температуры в области установки горелочных устройств. При этом с увеличением числа установленных плазменно-

топливных систем наблюдается смещение фронта горения к месту расположения систем плазменной активации угольных потоков.

Это можно объяснить, прежде всего, тем, что при плазменной активации пылеугольного потока до выхода в топочное пространство выделяются летучие вещества, окисляется углерод, что и приводит к частичной газификации топлива. Выделившиеся летучие и продукты газификации начинают реагировать с присутствующим в первичном воздухе кислородом, в свою очередь, дополнительно выделяя тепло и еще больше нагревая реагирующий поток пылеугольных частиц, продуктов сгорания летучих и газификации коксового остатка (углерода).

#### **ЛИТЕРАТУРА**

- [1] Müller H. Numerische Berechnung dreidimensionaler turbulenter Strömungen in Dampferzeugern mit Wärmeübergang und chemischen Reaktionen am Beispiel des SNCR-Verfahrens // Fortschritt-Berichte VDI-Verlag. - № 268, 1992. - 158 p.
- [2] Leithner R., Müller H. CFD studies for boilers // Second M.I.T. Conference on Computational Fluid and Solid Mechanics. - Cambridge, 2003. - P.172-185.
- [3] Leithner R. Energy conversion processes with intrinsic CO<sub>2</sub> separation // Transactions of the Society for Mining, Metallurgy and Exploration. - Vol.18, 2005. - P. 135-145.
- [4] Leithner R. Numerical Simulation. Computational Fluid Dynamics CFD: Course of Lecture. Braunschweig, 2006. 52 p.
- [5] Аскарова А.С., Мессерле В.Е., Устименко А.Б., Болегенова С.А., Максимов В.Ю. Численное моделирование горения пылеугольного топлива в камере сгорания энергетического котла // Журнал «Химия высоких энергий» - переводной Journal of High Temperature. - Т.53, №3, 2015. - С.467-474.
- [6] Askarova A., Bolegenova S., Maximov V., Beketayeva M., Safarik P. Numerical modeling of pulverized coal combustion at thermal power plant boilers // Journal of Thermal Science. - Vol.24. - Issue 3, 2015. - P.275-282.
- [7] Askarova A., Messerle V., Bolegenova S., Ustimenko A. Simulation of Coal Plasma Ignition and Combustion in a Furnace Chamber // The 31<sup>st</sup> European Physical Society Conference on Plasma Physics Imperial College. - London: UK, 2004. - P.251-264.
- [8] Аскарова А., Мессерле В., Карпенко В., Устименко А. Плазмохимическая активация горения твердых топлив // Химия высоких энергий. - 2006. - Т.40. - С.141-148.

**Ә.С. Аскарова, С.Ә. Болегенова, С.Ә. Болегенова, В.Ю. Максимов, Ш.С. Оспанова**

Әл-Фараби атындағы қазақ ұлттық университеті, Алматы қаласы

#### **ПК-39 ЖӘНЕ БКЗ-160 ҚАЗАНДЫҚТАРЫНЫң ЖАНУ КАМЕРАЛАРЫНЫң АЭРОДИНАМИКАСЫ МЕН ЖЫЛУ МАССА АЛМАСУЫН ЗЕРТТЕУ**

**Аннотация.** Атмосфераға бөлінетін зиянды қалдықтардың мөлшерін кемітетін және энергетикалық кешендердің негізгі көрсеткіштерін бірmezgілде жоғарылататын төмengі сұрыпты отындардың жануын жақсартуға қатысты жана технологияларды жасау және ағымдағы түрлерін жетілдіру облысындағы ғылыми зерттеулер Қазақстан Республикасының жылуэнергетика саласы үшін айтарлықтай қызығушылық тудырып отыр. Осылай эдістерді жобалау және жану процесін ұйымдастырудың баlama түрлерін қолдана отырып, көмірді жағу процесін жетілдіру (өткір үрлеу технологиясы мен азот тотықтарының қалдықтарын селективті каталитикалық емес кеміту механизмы технологиясын қолдана отырып, плазмалық термохимиялық өзірлеу) казіргі уақытта барша энергетикалық кешен үшін өзекті болып отыр.

**Тірек сөздер:** Жану, жану камерасы, плазма-отын жүйелері, сандық модельдеу.