

Аскарова А.С.,  
Болегенова С.А.,  
Максимов В.Ю.,  
Алдиярова А.Н.,  
Шортанбаева Ж.К.,  
Арыстан А.

**Создание трехмерных  
концентрационных и  
температурных поверхностей  
в топочной камере котла  
ПК-39 Аксуйской  
электростанции**

Askarova A.S.,  
Bolegenova S.A.,  
Maximov V.V.,  
Aitbaeva A.N.,  
Shortanbaeva Zh.K.,  
Arystan A.

**The creation of three-  
dimensional concentration and  
temperature surfaces in the  
combustion chamber of the  
boiler PK-39 of Aksu power plant**

Асқарова Ә.С.,  
Бөлегенова С.Ә.,  
Максимов В.Ю.,  
Алдиярова Ә.Н.,  
Шортанбаева Ж.Қ.,  
Арыстан А.

**Ақсу электрстанциясының  
ПК-39 қазандығының жану  
камерасында үш өлшемді  
концентрациялық және  
температуралық беттерді құру**

Исследование направлено на изучение образования вредных компонентов при сжигании пылеугольной пыли в объеме топочной камеры котла. На основе численного решения системы уравнений конвективного теплопереноса, с учетом кинетики химических реакций, двухфазности течения, нелинейных эффектов конвективного и радиационного теплообмена и методов трехмерного моделирования, необходимо выявить формирования угарного газа СО по всему объему топочной камеры, в ее основных сечениях и на выходе из нее. Результаты исследований будут использованы для выработки рекомендаций по оптимизации существующих технологий сжигания низкосортного угольного топлива казахстанских месторождений, с целью повышения эффективности процессов при сжигании топлива в реальных энергетических установках с максимально эффективным получением энергии и минимальным вредным воздействием на окружающую среду. Результаты вычислительных экспериментов, могут быть использованы для отыскания наилучших конструктивных и компоновочных решений при проектировании новых и доработке существующих топочных промышленных котлов, в которых в качестве энергетического топлива используется высокозольный уголь.

**Ключевые слова:** 3D-моделирование, геометрическое моделирование, моделирование процессов, твердое топливо, теплообмен, топочные устройства, физическая модель, вредные пылегазовые компоненты.

The study aims to examine the formation of harmful components during the combustion of pulverized coal dust in the volume of the combustion chamber of the boiler. Based on the numerical solution of the system of equations of convective heat and mass transfer, taking into account the kinetics of chemical reactions, two-phase flow, nonlinear effects of convection and radiation heat transfer methods and three-dimensional modeling, it is necessary to identify the formation of carbon monoxide gas throughout the volume of the combustion chamber, in its main sections and at the exit. The research results will be used to generate recommendations for optimization of existing technologies for burning low-grade coal fuel for Kazakhstani fields, with the aim of improving process efficiency by burning fuel in real power plants with the most efficient energy and minimal harmful impact on the environment. The results of computational experiments can be used to find the best design and layout solutions when designing new and redesigning the existing furnace industrial boiler, in which fuel energy is used high-ash coal.

**Key words:** 3D modeling, geometric modeling, process modeling, solid fuel, heatmass exchange, furnace, physical model, harmful dust and gas components.

Зерттеу жұмыстары қазіргі ЖЭО-ның өнеркәсіптік қазандығының жану камерасында шаңтозаңды отынды жағумен шартталған жылу процестерін зерттеуге бағытталған. Химиялық реакциялар кинетикасын, ағыстың екіфазалығын, конвективті және радиациялық жылуалмасудың, үш өлшемді модельдеу әдістерінің бейсызықтық әсерлерін ескере отырып, конвективті жылуассатасымалдау теңдеулері жүйесін сандық есептеу негізінде жану камерасының толық көлемі бойынша, оның негізгі кескіндеріндегі және шығысындағы аэродинамиалық сипаттамаларды анықтау; қазандығының жану камерасындағы шаңтозаңды ағыстың бұралуының әсерін анықтау қажет. Жанарғылық құрылғылардың орналасуына және құрылымына салыстырмалы талдау жүргізу мақсатында жаңартылған жану камерасының жаңа геометриялық және физикалық модельдерін қолдану.

**Түйін сөздер:** 3D-модельдеу, геометриялық модельдеу, процестерді модельдеу, қатты отын, жылуассатасымалдау, жанарғылық құрылғылар, физикалық модель.

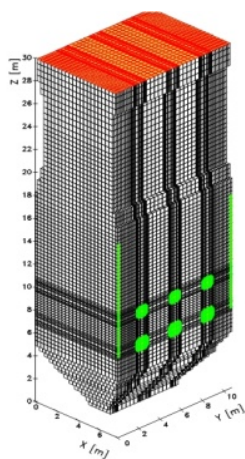
**СОЗДАНИЕ  
ТРЕХМЕРНЫХ  
КОНЦЕНТРАЦИОННЫХ  
И ТЕМПЕРАТУРНЫХ  
ПОВЕРХНОСТЕЙ  
В ТОПОЧНОЙ  
КАМЕРЕ КОТЛА  
ПК-39 АКСУЙСКОЙ  
ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ**

**Введение**

Исследования в области прогрессивных технологических процессов по совершенствованию установок сжигания пылеугольного топлива и использования альтернативных методов организации процесса горения для различных видов топлива является в настоящее время наиболее актуальным для всего энергетического комплекса Республики Казахстан. Основным направлением совершенствования пылеугольного горения и использования альтернативных видов топлива является выполнение жестких экологических требований по удельным выбросам вредных веществ с отработанными газами котельных установок. И на этом этапе создание технологий, позволяющих описать основные процессы формирования вредных пылегазовых выбросов и разработка рекомендаций по их снижению, является актуальной задачей исследователей.

Внедрение результатов проекта в промышленность Казахстана позволит вовлечь на перспективу до 2020 года в топливно-энергетический баланс Республики около 40 млрд. тонн низкосортных углей, что обеспечит энергетическую безопасность страны. В этой связи создание технологии по уменьшению вредных пылегазовых выбросов в атмосферу является приоритетным направлением для нашей Республики [1-15].

Применение математического моделирования при проведении фундаментальных исследований в области горения позволит успешно решать как фундаментальные задачи, так и прикладные, поскольку внесут вклад в решение актуальных проблем теплоэнергетики и экологии. Разработанные в рамках настоящего исследования технологии позволят дать рекомендации по повышению экономической эффективности промышленных предприятий и улучшению экологической обстановки в РК, разработанные технологии можно будет применять на реальных объектах, подготовка и обучение специалистов для работы в энергетической отрасли и на современных нефтегазовых комплексах является важной для Казахстана задачей. Перспективы, которые открывает решение этой важной проблемы, непосредственно связаны с перспективами развития высшего и послевузовского образования.



**Рисунок 1** – Общий вид топочной камеры котла ПК-39 и ее разбивка на контрольные объемы

### Вычислительные эксперименты

В качестве исследуемого объекта в данной работе выбрана топочная камера котла ПК-39 к блоку 300 МВт, паропроизводительностью 475т/ч. Котел установлен на Аксуиской электростанции (Казахстан). На рисунке 1 представлена общая схема камеры сгорания этого котла и разбивка ее на элементарные объемы для проведения вычислительных экспериментов.

В объеме топки потоки двухкомпонентного высокореакционного топлива, полученного с помощью плазменной активации, распространяются в соответствии с законами аэродинамики и являются тепловым источником для аэросмеси, подаваемой через горелки, не оснащенные системами плазменного воспламенения. Таким образом, используя одну и ту же угольную пыль в объеме топки, мы имеем два вида топлива: традиционное (аэросмесь) и электротермохимически подготовленное к интенсивному сжиганию.

Анализ полученных полей скорости (рисунок 2) показывает, что активация пылеугольного потока оказывает значительное влияние на поле течения: на распространение реагирующей струи в объеме топки, процессы подмешивания в струе, на размеры, форму пламени. Наглядно заметно различие в распределении пылеугольных потоков, поступающих в топку через обычные горелки и через плазменно-топливные системы (ПТС). Основной причиной изменения в распределении скоростей в топочном простран-

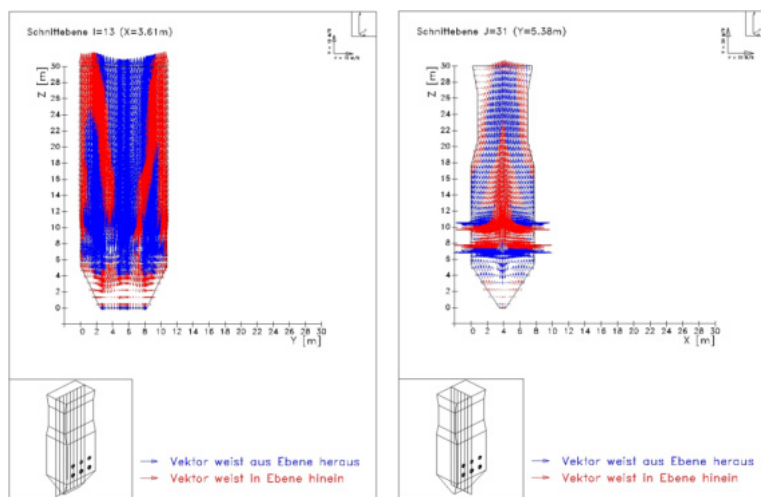
стве является увеличение скорости поступающей в камеру сжигания топливной смеси (высоко-реакционное топливо + вторичный воздух).

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.

Увеличение скорости вдоль оси факела повышает интенсивность подмешивания высокотемпературных топочных газов, что в свою очередь ведет к ускорению роста температуры частиц, а следовательно к улучшению воспламенения пылеугольного факела из горелок, не оснащенных плазматронами. Вследствие аэродинамических особенностей термохимически активированных потоков обеспечивается интенсивный подвод горячих топочных газов к корню факела, благодаря внешней и внутренней рециркуляции и регулированию их количества в широком диапазоне.

При термохимической активации пылеугольного потока до выхода в топочное пространство выделяются летучие и газифицируется углерод угля. 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).

В результате на выходе в топку мы имеем нагретый до высоких (1300 К и более) температур реагирующий поток частиц (основными составляющими которых являются зола и углерод) и газообразных продуктов плазменной термохимической подготовки аэросмеси. В состав последних входят: азот, водяной пар, оксид и диоксид углерода, водород, метан. При смешении с вторичным воздухом указанные продукты сгорания, нагретые до температуры воспламенения, интенсивно реагируют, выделяя тепло, и образуя конечные продукты реакций, (водяной пар и диоксид углерода). Такие особенности высокотемпературных термохимически активированных потоков оказывают существенное влияние на процесс теплообмена в топочном пространстве.



**Рисунок 2** – Поле вектора полной скорости  
в центральных сечениях  
топочной камеры котла ПК-39 Аксуйской ГРЭС

Рисунки 3-4 иллюстрируют температурные поля в области сечения горелок нижнего яруса и на выходе из топочного пространства. Мы видим существенное различие для четырех рассматриваемых случаев. По сравнению с использованием обычного пылеугольного потока среднее значение температуры в плоскости сечения горелок с увеличением числа термохимически активированных потоков увеличивается и составляет: без активации – 1117°C; 4 активированных потока – 1184 °C; 6 – 1211°C; 12 – 1488°C. Таким образом, можно сделать вывод о том, что плазменная активация горения аэросмеси приводит к быстрому нагреву и воспламенению аэросмеси. При этом наблюдается смещение фронта горения к месту расположения систем плазменной активации угольных потоков. Область высоких температур при увеличении числа активированных плазмой потоков смещается к центру симметрии топки, при этом у боковых поверхностей также наблюдается более высокий уровень температур.

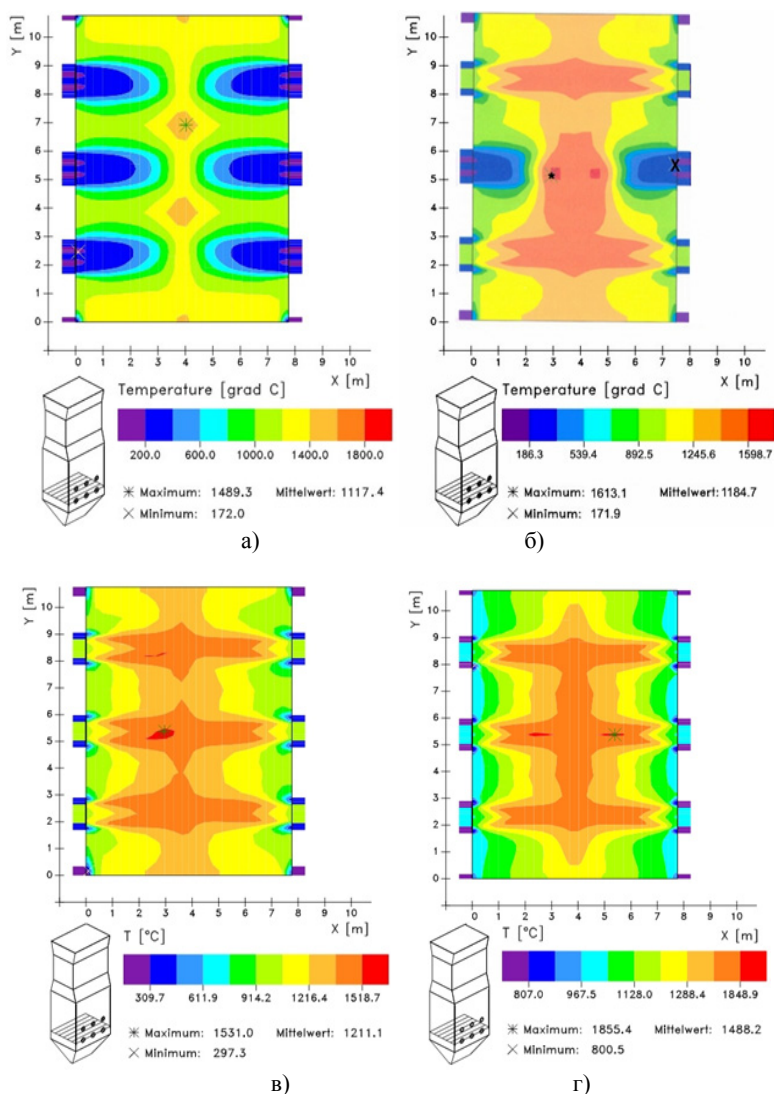
Поле температуры на выходе из топочного пространства (рисунок 4) также изменяется с увеличением числа плазменных систем. Однако это влияние не однозначно. Видно, что при 4 и 6 активированных плазмотроном потоках среднее значение температуры на выходе меньше, чем для обычного горения соответственно на 36°C и 110°C. А при 12 активированных потоках температура на выходе увеличивается на 28°C по сравнению с обычным горением, что очевид-

но связано с почти полной газификацией топлива, сильным возрастанием его температуры в области горелок и большим выделением тепла за счет химических реакций.

На рисунке 5 проведен сравнительный анализ распределения средней в сечении температуры для исследуемых режимов: когда в камеру сжигания поступает обычное топливо и топливо, прошедшее термохимическую плазменную подготовку. При этом при плазменной обработке топлива наблюдается смещение местоположения ядра факела и увеличение протяженности зоны максимальных температур. Возрастание температуры факела при горении 6 и 12 активированных потоков происходит быстрее. Значения температуры в большей степени отличаются в поясе горелок. Минимумы на кривых связаны с низкой температурой аэросмеси, поступающей в топочную камеру через горелки, неоснащенные плазменными системами. При полном оснащении камеры сгорания плазмотронами (кривая 6, рисунок 5) наблюдается отсутствие резких перепадов температуры по всей высоте топочной камеры, что свидетельствует об устойчивости процесса горения.

Увеличение температуры в ядре факела и снижение ее на выходе оказывает существенное влияние на химические процессы образования продуктов горения, поскольку температура является основным фактором при определении скорости реакции горения компонентов топливной смеси.





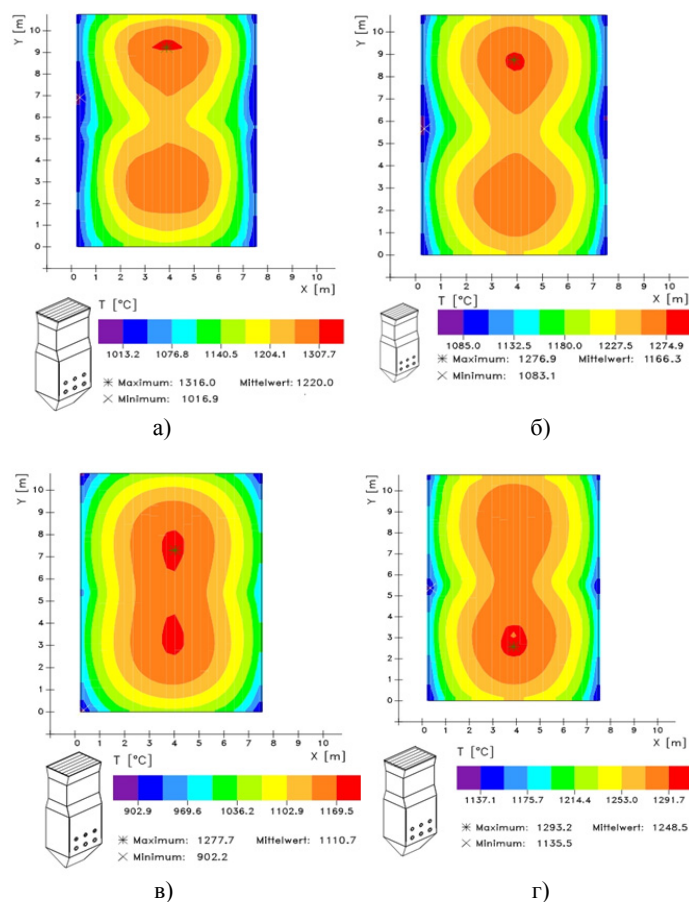
а) обычное горение; б) 4 плазменно-топливные системы; в) 6 плазменно-топливных систем;  
г) 12 плазменно-топливных систем

**Рисунок 3** – Поле температуры в сечении горелок нижнего яруса  $Z = 7,32$  м топочной камеры котла ПК-39 Аксуйской ГРЭС

## Заключение

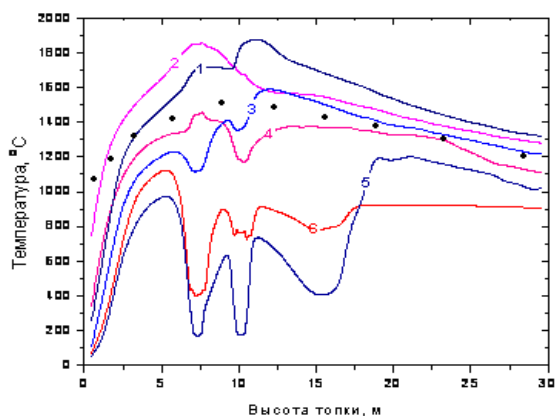
Проведены вычислительные эксперименты по исследованию влияния предварительной электро-термохимической активации топлива на процесс формирования пылегазовых выбросов при сжигании угля в топочной камере котла ПК-39 Аксуйской ГРЭС. Проведена графическая обработка и созданы трехмерные концентрационные и температурные поверхности по объему топочной камеры и на выходе из нее, а также проведен анализ полученных результатов.

Активация пылеугольного потока оказывает значительное влияние на поле течения: на распространение реагирующей струи в объеме топки, процессы подмешивания в струе, на размеры, форму пламени. Наглядно заметно различие в распределении пылеугольных потоков, поступающих в топку через обычные горелки и через плазменно-топливные системы (ПТС). Основной причиной изменения в распределении скоростей в топочном пространстве является увеличение скорости поступающей в камеру сжигания топливной смеси (высокореакционное топливо + вторичный воздух).



а) обычное горение; б) 4 плазменно-топливные системы; в) 6 плазменно-топливных систем; г) 12 плазменно-топливных систем

**Рисунок 4** – Поле температуры на выходе из топочной камеры котла ПК-39



1, 3, 5 – традиционный режим сжигания угля;  
2, 4, 6 – режим сжигания угля с плазменной активацией  
его в шести ПТС, максимальные, средние и минимальные значения соответственно, · – эксперимент [23]

**Рисунок 5** – Распределение температуры по высоте топочной камеры котла ПК-39

С увеличением числа термохимически активированных потоков (4, 6, 12 плазменных горелок) ядро факела смещается к центру симметрии топочной камеры и мы наблюдаем более четкую границу движения потоков из горелок, оснащенных плазматронами.

По сравнению с использованием обычного пылеугольного потока среднее значение температуры в плоскости сечения горелок с увеличением числа термохимически активированных потоков увеличивается и составляет: без активации – 1117 °С; 4 активированных потока – 1184 °С; 6 – 1211 °С; 12 – 1488 °С. Таким образом, можно сделать вывод о том, что плазменная активация горения аэросмеси приводит к быстрому нагреву и воспламенению аэросмеси. При этом наблюдается смещение фронта горения к месту расположения систем плазмен-

ной активации угольных потоков. Область высоких температур при увеличении числа активированных плазмой потоков смещается к центру

симметрии топки, при этом у боковых поверхностей также наблюдается более высокий уровень температур.

### Литература

- 1 Askarova A.S., Bolegenova S.A., Lavrisheva E.I., Loktionova I.V. Numerical Modelling of Furnace Processes At The Combustion of High- Ash Ekibastuz Coal // Thermophysics and aeromechanics. –Vol. 9. – №4. – 2002. – P. 559-569.
- 2 Askarova, A., Karpenko, E., Lavrishcheva, Ye., Messerle, V., Ustimenko, A. Plasma-supported coal combustion in boiler furnace // IEEE Transactions on Plasma Science. – Vol. 35, Issue 6, 2007. – P. 1607-1616.
- 3 Smoot L.D. Pulverized Coal Diffusion Flames: A perspective through the modeling // Works of 18<sup>th</sup> Symposium on Combustion. – Oxford, 1981. – P. 1185-1202.
- 4 Бухман С.В., Вулис Л.А. О температуре, скорости и времени сгорания угольных пылинок //Труды Института энергетики АН Каз. ССР. – Алма-Ата: Изд. АН КазССР, 1958.– С. 61-76.
- 5 Askarova A.S., Bolegenova S.A., Bolegenova S., Bekmukhamet A., Maximov V.Yu., Beketayeva M.T. Numerical experimenting of combustion in the real boiler of CHP // International Journal of Mechanics. – ISSN: 1998-4448. – Vol. 7, Issue 3, 2013. – P. 343-352.
- 6 Askarova A.S., Bekmukhamet A., Bolegenova S.A., Beketayeva M.T., Maximov Yu.V., Ospanova Sh.S., Gabitova Z.K. Numerical modeling of turbulence characteristics of burning process of the solid fuel in BKZ-420-140-7c combustion chamber // International Journal of Mechanics. – ISSN: 1998-4448. – Vol. 8, 2014. – P. 112-122.
- 7 Müller H. Numerische Berechnung dreidimensionaler turbulenter Strömungen in Dampferzeugern mit Wärmeübergang und chemischen Reaktionen am Beispiel des SNCR-Verfahrens und der Kohleverbrennung // Fortschritt-Berichte VDI-Verlag. – №268, 1992. – 158 s.
- 8 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.
- 9 Askarova, A.S., Messerle, V.E., Ustimenko, A.B., Bolegenova, S.A., Maksimov, V.Yu. Numerical Simulation of the Coal Combustion Process Initiated by a Plasma Source // Journal of Thermophysics and Aeromechanics. – Vol. 21, Issue 6, 2014. – P. 747-754.
- 10 Askarova, A., Bolegenova, S., Maximov V. et al. Numerical Modeling of Pulverized Coal Combustion at Thermal Power Plant Boilers // Journal of Thermal Science. –Vol. 24, Issue 3, 2015. – P. 275-282.
- 11 Askarova A.S., Karpenko E.I., Messerle V.E. et al. Plasma enhancement of combustion of solid fuels // Journal of High Energy Chemistry. – Vol. 40, Issue: 2, 2006. – P. 111-118.
- 12 Askarova A.S., Karpenko E.I., Karpenko Yu.E. et al. Mathematical modeling of the processes of solid fuel ignition and combustion at combustors of the power boilers // 7-th International Fall Seminar on Propellants, Explosives and Pyrotechnics. Theory and Practice of Energetic Materials. – China, 2007. – Vol. 7. – P. 672-683.
- 13 Launder B.E., Spalding D.B. Lectures in Mathematical Models of Turbulence. – London: Academic Press, 1972. – 470 p.
- 14 Lockwood F., Shah N. An improved flux model for calculation of radiation heat transfer in combustion chambers // ASME-AIChE Heat transfer Conf.: ASME-Paper. – Salt Lake City, 1976. – P. 2-7.
- 15 Askarova A., Messerle V., Ustimenko A., Nagibin A. Pulverized coal torch combustion in a furnace with plasma-coal system // Thermophysics and Aeromechanics. – Vol.7, Issue 3, 2010. – P. 435-444.
- 16 Алияров Б.К., Алиярова М.Б. Сжигание казахстанских углей на ТЭС и на крупных котельных: опыт и перспективы. – Алматы, 2011. – 306 с.

### References

- 1 A.S.Askarova, S.A.Bolegenova, E.I.Lavrisheva, I.V. Loktionova, Thermophysics and aeromechanics, 9(4), 559-569, (2002.).
- 2 A.Askarova, E.Karpenko, Ye.Lavrishcheva, V.Messerle, A. Ustimenko, IEEE Transactions on Plasma Science, 35(6),1607-1616, (2007).
- 3 L.D. Smoot, Works of 18th Symposium on Combustion, Oxford,1185-1202, (1981).
- 4 S.V. Bukhman, L.A. Vulis, Trudy Instituta energetiki AN Kaz. SSR, Alma-Ata: Izd. AN KazSSR, 61-76, (1958) (in russ).
- 5 A.S.Askarova, S.A.Bolegenova, S.Bolegenova, A.Bekmukhamet, V.Yu.Maximov, M.T. Beketayeva, International Journal of Mechanics, 7(3), 343-352, (2013).
- 6 A.S.Askarova, A.Bekmukhamet, S.A.Bolegenova, M.T.Beketayeva, Yu.V.Maximov, Sh.S.Ospanova, Z.K. Gabitova, International Journal of Mechanics, 8, 112-122,(2014).
- 7 H. Müller, Fortschritt-Berichte VDI-Verlag, 268, 158, (1992).
- 8 R. Leithner, Transactions of the Society for Mining, Metallurgy and Exploration, 18, 135-145, (2005).

- 9 A.S.Askarova, V.E.Messerle, A.B.Ustimenko, S.A.Bolegenova, V.Yu. Maksimov, *Journal of Thermophysics and Aeromechanics*, 21(6), 747-754, (2014).
- 10 A.Askarova, S.Bolegenova, V. Maximov et al., *Journal of Thermal Science*, 24(3), 275-282, (2015).
- 11 A.S.Askarova, E.I.Karpenko, V.E. Messerle et al., *Journal of High Energy Chemistry*, 40(2), 111-118, (2006).
- 12 A.S.Askarova, E.I.Karpenko, Yu.E.Karpenko et al., *7-th International Fall Seminar on Propellants, Explosives and Pyrotechnics. Theory and Practice of Energetic Materials, China, 2007*, 7, 672-683, (2007).
- 13 B.E.Lauder, D.B. Spalding, *Lectures in Mathematical Models of Turbulence*. London: Academic Press, 1972, 470p.
- 14 F.Lockwood, N. Shah, *ASME-AIChE Heat transfer Conf.: ASME-Paper*, Salt Lake City, 1976, 2-7, (1976).
- 15 A.Askarova, V.Messerle, A.Ustimenko, A. Nagibin, *Thermophysics and Aeromechanics*, 7(3), 435-444, (2010).
- 16 B.K. Aliyarov, M.B. Aliyarova, *Szhiganiye kazakhstanskikh ugley na TES i na krupnykh kotel'nykh: opyt i perspektivy*, Almaty, 2011, 306s. (in russ.).