

ISSN 1563-034X
Индекс 75877; 25877

ӘЛ-ФАРАБИ атындағы ҚАЗАҚ ҰЛТТЫҚ УНИВЕРСИТЕТІ

ҚазҰУ ХАБАРШЫСЫ

Физика сериясы

КАЗАХСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ имени АЛЬ-ФАРАБИ

ВЕСТНИК КазНУ

Серия физическая

AL-FARABI KAZAKH NATIONAL UNIVERSITY

KazNU BULLETIN

Physics series

№2 (57)

Алматы
«Қазақ университеті»
2016

Аскарова А.А.,
Болегенова С.А.,
Максимов В.Ю.,
Алдиярова А.Н.

**Исследование процессов
сжигания угольной пыли
с учетом угла наклона
вихревых горелочных
устройств**

Исследование направлено на изучение тепловых процессов, обусловленных сжиганием пылеугольного топлива в камере сгорания промышленного котла действующей ТЭЦ. Необходимо получить новые результаты теоретического исследования, математического и компьютерного моделирования процессов турбулентного теплообмена при сжигании пылеугольного топлива в топочной камере котла БКЗ-75. На основе численного решения системы уравнений конвективного теплообмена, с учетом кинетики химических реакций, двухфазности течения, нелинейных эффектов конвективного и радиационного теплообмена и методов трехмерного моделирования, необходимо выявить концентрационные характеристики по всему объему топочной камеры, в ее основных сечениях и на выходе из нее; определение влияния закрутки пылеугольного потока в топочной камере котла БКЗ-75 Шахтинской ТЭЦ.

Ключевые слова: компоновка камеры сгорания, вихревые горелочные устройства, физико-технологический процесс.

Askarova A.S.,
Bolegenova S.A.,
Maximov V.V.,
Aitbaeva A.N.

**The study of combustion
processes of coal dust taking into
account the inclination angle of
vortex burners**

The study aims to examine thermal processes, caused by burning of pulverized coal in the combustion chamber of an industrial boiler existing CHP. It is necessary to receive new results of theoretical research, mathematical and computer modeling of processes of a turbulent heatmass transfer when burning coal-dust fuel in the furnace chambers of a copper of BKZ-75. On the basis of the numerical decision of system of the equations of a convective heatmass transfer, taking into account kinetics of chemical reactions, two-staging of a current, nonlinear effects of convective and radiation heat exchange and methods of three-dimensional modeling, it is necessary to reveal concentration characteristics on all volume of the furnace camera, in its main sections and at the exit from it; definition of influence to twist of a coal-dust stream in the furnace chamber of the boiler BKZ-75CHP Shakhtinskaya combined heat and power plant.

Key words: configuration of the combustion chamber, swirl burner, physico-technological process.

Аскарова Ә.С.,
Бөлегенова С.Ә.,
Максимов В.Ю.,
Алдиярова Ә.Н.

**Оттық құрылғылардың
құйынды көлбеу
бұрышын ескере отырып
шаңтозаңды көмірдің жану
процесін зерттеу**

Зерттеу жұмыстары қазіргі ЖЭО-ның өнеркәсіптік қазандығының жану камерасында шаңтозаңды отынды жағумен шартталған жылу процесстерін зерттеуге бағытталған. БКЗ-75 қазандығының жану камерасында шаңтозаңды отынды жағу кезіндегі турбулентті жылумассатасымалдау процесстерін теориялық зерттеу, математикалық модельдеу және компьютерлік модельдеудің жаңа нәтижелерін алу керек. Химиялық реакциялар кинетикасын, ағыстың екіфазалығын, конвективті және радиациялық жылуалмасудың, үш өлшемді модельдеу әдістерінің бейсызықтық әсерлерін ескере отырып, конвективті жылумассатасымалдау теңдеулері жүйесін сандық есептеу негізінде жану камерасының толық көлемі бойынша, оның негізгі кескіндеріндегі және шығысындағы шоғырлану сипаттамаларын анықтау; Шахтинск ЖЭО БКЗ-75 қазандығының жану камерасындағы шаңтозаңды ағыстың бұралуының әсерін анықтау қажет.

Түйін сөздер: жану камерасының құраушылары, құйынды жанарғылық құрылғылар, физика-технологиялық процесстер.

**ИССЛЕДОВАНИЕ
ПРОЦЕССОВ
СЖИГАНИЯ УГОЛЬНОЙ
ПЫЛИ С УЧЕТОМ УГЛА
НАКЛОНА ВИХРЕВЫХ
ГОРЕЛОЧНЫХ
УСТРОЙСТВ**

Введение

В настоящее время в мире складывается новая структура экономических взаимоотношений, основанная на качестве формирования выгодных связей со странами – обладателями энергетических ресурсов. В этой связи страны, имеющие необходимые ресурсы и способные разрабатывать перспективные планы их использования, получают неоспоримые конкурентные преимущества. В свою очередь интеграция Казахстана в мировой экономике обуславливает устойчивые тенденции роста цен на энергетические и материальные ресурсы.

Поэтому для теплоэнергетики и других смежных с ней отраслей промышленности задача снижения затрат на получение требуемой продукции является первостепенной. В связи с этим, становится актуальным вопрос выбора, эксплуатации, а в первую очередь, создания новых, высокоэффективных энерго- и ресурсосберегающих технологий энергетических процессов. Для этого необходима реализация целого комплекса мероприятий, важнейшим из которых является применение наиболее точных методик расчета теплоэнергетических процессов.

При освоении новых энергетических блоков, использующих пылеугольное топливо, исследования топочных процессов с целью их усовершенствования чрезвычайно затруднено. Для повышения надежности и улучшения качества проектирования большую актуальность приобретает разработка методов комплексного расчета топочных устройств с учетом аэродинамики топочной камеры, воспламенения, теплообмена и механизмов выгорания пылеугольного факела.

Экспериментальные исследования, проводимые на натуральных промышленных объектах, дают ценные сведения о работе энергетического объекта в целом, но при этом возможность исследовать влияние отдельных факторов на формирование и развитие топочных процессов отсутствует. Значительно больше возможностей открывают исследования, проводимые на стендовых установках. В работах, выполненных на таком оборудовании, была получена взаимосвязь между процессами горения, массо – и теплообмена в топочных камерах. Кроме того,

изучалось поведение минеральной части топлива и исследованы шлакующие свойства золы.

В настоящий момент единственным средством в реализации комплексного исследования процессов сжигания пылеугольного топлива в топочных камерах котлов промышленных объектов (ТЭС, ТЭЦ, и др.) являются численные методы и вычислительный эксперимент с использованием методов трехмерного моделирования и привлечением современного компьютерного оборудования вычислительной техники и пакета программ. Преимущество 3D-моделирования в том, что учитывается наибольшее количество явлений и факторов, влияющих на протекание реальных процессов.

При проведении вычислительного эксперимента для построения физико-технических моделей используются модельные представления о механизме реально протекающих процессов в топочных камерах энергетических объектов. Методологические принципы для создания таких моделей основаны на понимании протекания технологических процессов (стадии горения пылеугольного топлива, образование вредных пылегазовых выбросов, золы и т.д.). Такие процессы основаны на знании закономерностей, так называемых «элементарных процессов: аэродинамики, массо – и теплопереноса, химической кинетики, процессов фазовых переходов, нелинейных эффектов конвективного и радиационного теплообмена, диффузионных процессов и т.д.

Таким образом, сказанное выше говорит об актуальности поставленной задачи, а использование современных технологий численного метода исследования и методики трехмерного моделирования позволило провести комплексное исследование тепловых процессов и аэродинамических характеристик топочной камеры котла действующего казахстанского энергетического объекта.

На основе уравнений пограничного слоя для многокомпонентных химически реагирующих течений проведено исследование диффузионного пламени, образующегося при горении вдуваемого топлива у вертикальной пористой пластины. Найдено распределение концентраций топлива и окислителя, температуры и других параметров внутри пограничного слоя при естественной и смешанной конвекции.

В диффузионном горении, как утверждают авторы, произведение концентраций реагентов

в каждой точке равно нулю и имеется поверхность раздела, где концентрации всех реагентов равняются нулю. В соответствии с этим на этой поверхности появляются пики и асимметрия в профилях вероятности концентраций и температуры. Показано, что в этом случае задача может быть сведена к проблеме перемешивания пассивной смеси.

Для математического описания двухфазного течения монодисперсной газозвеси авторы используют Эйлеров двухскоростной и двухтемпературный подход. В представленной работе, авторами были использованы нестационарные уравнения движения (Навье-Стокса), энергии и переноса концентраций компонентов для обеих фаз, которые замыкаются к-ε моделью турбулентности, модифицированной для учета влияния дисперсной фазы. Уравнения математической модели авторы решают по конечно-разностному алгоритму SIMPLEC с постоянным шагом по времени, модифицированным для учета переменной плотности и источникового члена межфазного массообмена в уравнении неразрывности.

При сгорании 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.

Для создания трехмерного моделирования сжигания пылеугольного топлива в топочных камерах паровых котлов энергетических установок был использован стартовый компьютерный пакет программ FLOREAN [1]. Этот стартовый пакет программ был адаптирован к поставленной задаче о сжигании высокозольного казахстанского угля в топочной камере ТЭЦ РК (котел БКЗ-75 Шахтинской ТЭЦ).

Это позволило рассчитать концентрационные процессы сжигания карагандинского угля марки КР-200 по всему топочному пространству и на выходе из него.

Исследование концентрационных характеристик камеры сгорания котла БКЗ-75

Результаты вычислительных экспериментов с использованием прямооточных щелевых горелок были взяты из работы [1]. При проведении сравнительного анализа были исследованы основные закономерности распределения аэродинамических, концентрационных характеристик во всем объеме камеры сгорания котла БКЗ-75 Шахтинской ТЭЦ.

Проведен сравнительный анализ компоновки горелочных устройств для случая, когда установлены прямооточные горелки, и случая, когда установлены вихревые горелки с углом

закрутки 30 градусов. Кроме того в используемых горелках угол наклона к оси камеры сгорания составляет также 30 градусов.

При проведении вычислительных экспериментов, на начальном этапе необходимо построить геометрию исследуемого объекта, а также получить его конечно-разностную сетку (рисунок 1). Кроме того, в используемом программном комплексе нужно создать исходные файлы, в которых содержатся физические и геометрические данные исследуемого процесса, а также начальные и граничные условия для моделирования процесса тепломассопереноса в турбулентных высокотемпературных потоках.

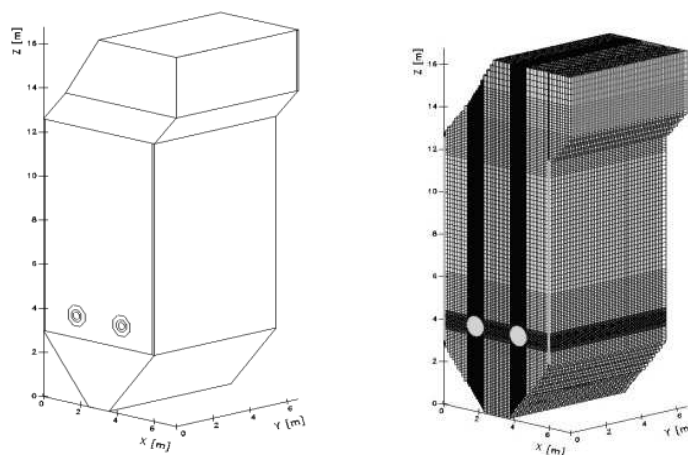


Рисунок 1 – Геометрия и конечно-разностная сетка топочной камеры котла БКЗ 75 Шахтинской ТЭЦ

К настоящему времени в результате многих исследований [2-4] среди многочисленных цепочек возможных реакций общепризнанны три механизма образования оксидов азота: тепловое окисление азота воздуха; окисление азота воздуха с участием реакций пиролиза углеводородов (образование так называемых «быстрых» оксидов азота); окисление азота, содержащегося в топливе (топливные оксиды азота).

На рисунках 2-5 представлены распределения концентраций оксида азота (NO) в различных сечениях камеры сгорания.

Анализ рисунков 2-5 показывает, что зоной максимального образования оксида азота, NO, является область высоких температур и интенсивного вихревого течения. Для исследуемой топочной камеры такая область находится в зоне

расположения вихревых горелочных устройств на высоте $z=4.0$ м. Интенсивное перемешивание топлива и окислителя, создаваемое турбулентными потоками впрыскиваемой аэросмеси вблизи горелок, а также высокая температура в ядре факела ($\sim 1200^\circ\text{C}$), создают благоприятные условия для образования оксидов азота. В этой области концентрация NO достигает максимальных значений для случая использования вихревых горелочных устройств 2195 мг/м^3 .

Максимальные значения концентраций окиси азота (NO) обусловлены наличием топлива, в котором содержание азота равно 1.21% и, подаваемого в зону горения, воздуха, с процентным содержанием в нем азота, равным 79%. Однако, в исследуемом случае горение угольной пыли происходит при температуре $< 1500^\circ\text{C}$,

поэтому основным источником образования NO будет азот, содержащийся в топливе [5]. В таком случае образование окиси азота из азота топлива

имеет особенности, связанные с присущими твердому топливу физическими стадиями горения.

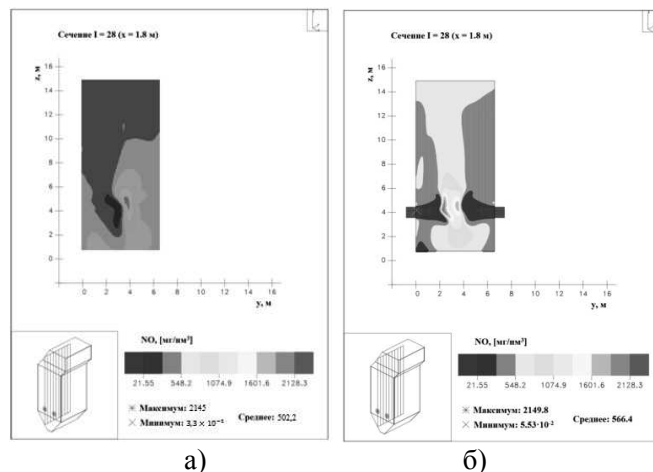


Рисунок 2 – Распределение концентрации NO в продольных сечениях при использовании: а) вихревых горелок; б) прямоточных щелевых горелок

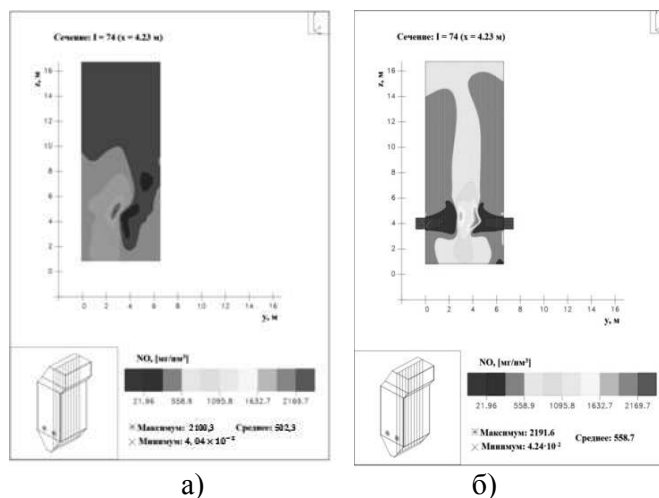


Рисунок 3 – Распределение концентрации NO в продольных сечениях: а) вихревых горелок; б) прямоточных щелевых горелок

Одна часть азота топлива выделяется с летучими веществами и преобразуется в окись азота в процессе горения летучих, а другая часть остается в коксовых частицах и преобразуется в окись азота в процессе выгорания частиц коксового остатка. Соотношение оксидов азота, образующихся при горении летучих и коксового остатка, зависит от марки топлива, в частности от выхода летучих и энергии активации процесса их возгонки [6-9].

Как видно из рисунков б, по мере прохождения пылеугольного факела к выходу из топочной камеры, наблюдается равномерное снижение концентрации NO, поскольку эта область содержит в себе меньше кислорода и компонент топлива. Кроме того, в случае использования вихревых горелочных устройств, монотонно снижается и температура по высоте топочной камеры, в результате чего уменьшается скорость образования оксида азота.

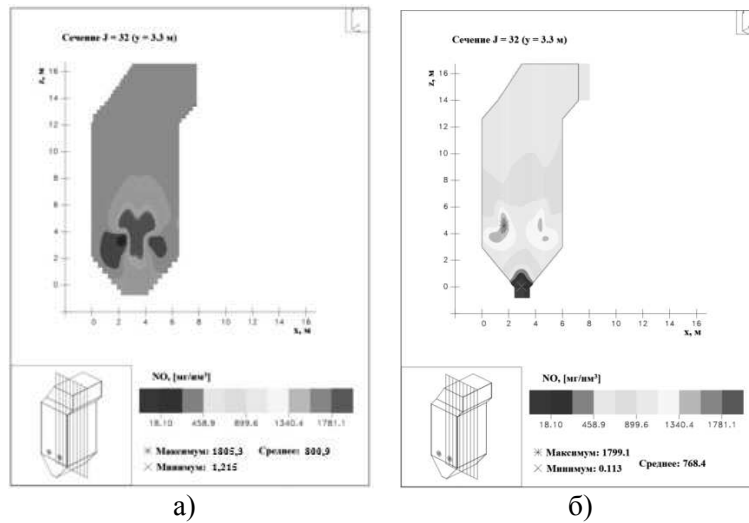


Рисунок 4 – Распределение концентрации NO в центральных продольных сечениях: а) вихревых горелок; б) прямооточных щелевых горелок

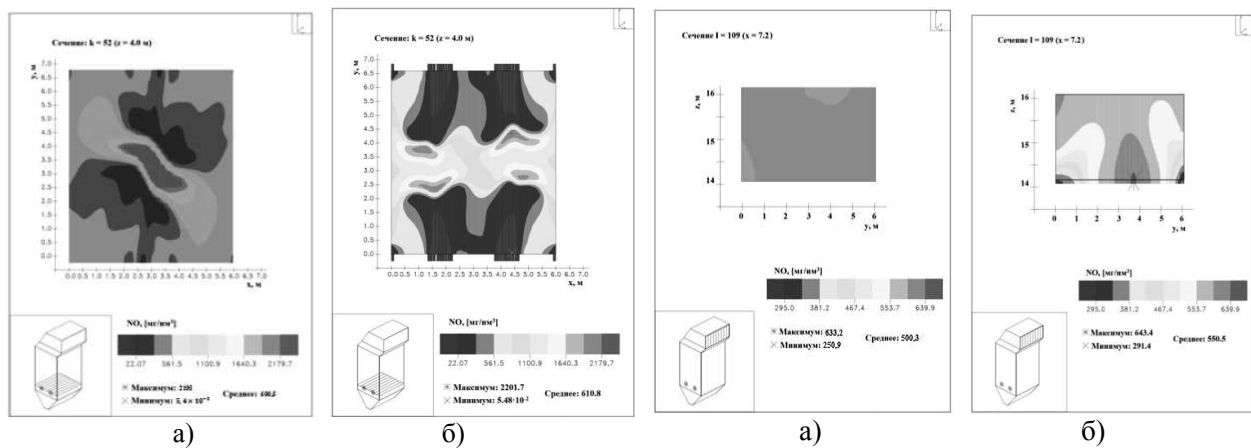


Рисунок 5 – Распределение концентрации NO в сечениях установки горелочных устройств: а) вихревой горелки; б) прямооточной щелевой горелки

Рисунок 6 – Распределение концентрации NO в поперечных сечениях на выходе из топочной камеры при использовании: а) вихревых горелок; б) прямооточных щелевых горелок

На выходе из топочной камеры среднее значение концентрации оксида азота NO при использовании вихревых горелочных устройств составляет $500,3 \text{ мг/м}^3$, что на 50 мг/м^3 меньше, чем при использовании прямооточных щелевых горелок.

Заключение

По результатам исследований можно сформулировать следующие выводы: химические реакции с наибольшим выделением тепла наблюдаются в области подачи топлива и окислителя, т.е. вблизи установки горелочных устройств.

Именно в этой области смесеобразование горючего вещества и кислорода воздуха достигает максимального уровня, благодаря интенсивному перемешиванию, посредством турбулентных пульсаций и вихревого характера течения. Это в свою очередь способствует увеличению скорости химической реакции окисления углерода с выделением максимального количества энергии ($Q_{\text{chem}} = 3470 \text{ кВт/м}^3$) в двух исследуемых случаях. По мере продвижения пылеугольного потока к выходу, интенсивность протекания химических реакций ослабевает, и на выходе энергия химических реакций составляет всего 15.64

kW/m^3 , по сравнению с 3470 kW/m^3 в области пояса горелок для двух исследуемых случаев. Это отражает реальную картину процессов теплообмена, происходящих при сжигании пылеугольного топлива в топочных камерах.

Зоной максимального образования оксида азота NO , является область высоких температур

и интенсивного вихревого течения. Для исследуемой топочной камеры такая область находится в зоне расположения вихревых горелочных устройств на высоте $z=4.0\text{м}$.

Значение концентрации вредных веществ на выходе из топочной камеры соответствуют нормам ПДК, принятых в теплоэнергетике.

Литература

- 1 Askarova A.S., Bolegenova S.A., Maximov V.Yu. et al. Computational method for investigation of solid fuel combustion in combustion chambers of a heat power plant // High Temperature. – 2015. – Vol. 53. – Issue 5. – P. 751-757.
- 2 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 // Thermophysics and aeromechanics. – 2014. – Vol 21, issue 6. – P. 747-754.
- 3 Askarova A.S., Bolegenova S.A., Maximov V.Y., Bekmukhamet A., Beketayeva M.T., Gabitova ZK., etc. Computational method for investigation of solid fuel combustion in combustion chambers of a heat power plant // High temperature. – 2015. – Vol. 5, issue 5. – P. 751-757.
- 4 Askarova A.S., Messerle V.E., Ustimenko A.B., Bolegenova S.A., Maximov V.Yu. Gabitova Z.Kh. Numerical simulation of pulverized coal combustion in a power boiler furnace // High temperature. – 2015. – Vol. 53, issue 3. – P. 445-452.
- 5 Askarova A.S., Messerle V. E., Ustimenko A.B. et. al. Numerical simulation of the coal combustion process initiated by a plasma source // Thermophysics and Aeromechanics. –2014. –Vol. 21.– Issue 6. – P. 747-754.
- 6 Messerle V.E., Ustimenko A.B. et al. Pulverized coal torch combustion in a furnace with plasma-coal system // Thermophysics and Aeromechanics. – 2010. – Vol. 17. – Issue 6. – P.435-444.
- 7 Karpenko E.I, Lavrishcheva Y.I., Messerle V.E. et al. Plasma-supported coal combustion in boiler furnace // IEEE Transactions on Plasma Science. – 2007. – Vol. 35. Issue 6. – P. 1607-1616.
- 8 Karpenko E.I., Messerle V.E., Ustimenko A.B. et al. Plasma enhancement of combustion of solid fuels // High energy chemistry. –2006. – Vol. 40.– Issue. – P. 111-118.
- 9 Leithner, R. Numerical Simulation. Computational Fluid Dynamics CFD: Course of Lecture. – Braunschweig, 2006. – 52 p.

References

- 1 Askarova A. S., Bolegenova S. A., Maximov V. Yu. et al. High Temperature. 53 (5). (2015). 751-757.
- 2 Askarova A.S., Messerle V.E., Ustimenko A.B., Bolegenova S.A., Maksimov V.Yu. Thermophysics and aeromechanics. 21 (6). (2014). 747-754.
- 3 Askarova A. S., Bolegenova S.A., Maximov V.Y., Bekmukhamet A., Beketayeva M.T., Gabitova ZK., etc. High temperature. 5 (5). 2015. 751-757.
- 4 Askarova A.S., Messerle V.E., Ustimenko A.B., Bolegenova S.A., Maximov V.Yu., Gabitova Z.Kh. High temperature. 2015. Vol. 53, is 3. – P. 445-452.
- 5 Askarova A. S., Messerle V. E., Ustimenko A.B. et. al. Thermophysics and Aeromechanics. 21(6). 2014. 747-754.
- 6 Messerle V. E., Ustimenko A. B. et al. Thermophysics and Aeromechanics. 17(6). (2010). 435-444.
- 7 Karpenko E I; Lavrishcheva Y. I., Messerle V.E. et al. IEEE Transactions on Plasma Science. 35(6).(2007). 1607-1616.
- 8 Karpenko E.I, Messerle V. E., Ustimenko A.B. et al. High energy chemistry. 2006. Vol. 40.– Is. P. 111-118.
- 9 Leithner R. Numerical Simulation. Computational Fluid Dynamics CFD: Course of Lecture. – Braunschweig, 2006. – 52 p.