

Максимов В.Ю., Айдабол С.К.,  
Отыншиева Н.А.

**Тепломассоперенос  
при горении угольной пыли  
в камере сгорания  
энергетического котла БКЗ-75  
Шахтинской ТЭЦ**

Представленная работа посвящена процессам тепло- и массопереноса, происходящим при сжигании угольной пыли в камере сгорания действующего энергетического котла БКЗ-75 Шахтинской ТЭЦ, а также применению к таким процессам методов 3D компьютерного моделирования. Проведенные в данной работе исследования позволяют определить основные закономерности распределения аэродинамических и теплообменных характеристик во всем объеме топочной камеры котла БКЗ-75 Шахтинской ТЭЦ и на выходе из нее. В данной работе проведено сравнение компоновок горелочными устройствами исследуемой топочной камеры в случаях, когда: 1) используются прямоточные щелевые (базовый режим); 2) используются вихревые горелки с углом закрутки потока аэросмеси и наклоном их к центру симметрии котла на 30 градусов. Кроме того, проведенные в данной работе исследования позволили определить влияние аварийной остановки подачи угольной пыли в горелочные устройства топки на основные характеристики исследуемой камеры сгорания.

**Ключевые слова:** численное моделирование, камера сгорания, пылеугольное топливо, тепловые характеристики, температура, аэродинамика, теплообмен.

Maximov V.Ju., Aidabol S.K.,  
Otyunshyeva N.A.

**Heat and mass transfer in  
combustion of coal dust into  
the combustion chamber of  
the power boiler BKZ-75 of  
Shahtinskaya TPP**

The presented work is devoted to the processes of heat and mass transfer, which occur when burning of pulverized coal in the combustion chamber of the existing energetic boiler BKZ-75 of the Shakhtynskaya TPP and applied to such processes methods of 3D-computer simulation. Research which was conducted in this paper, allow determining the basic patterns of distribution of aerodynamic and heat-exchanging characteristics in all volume of the combustion chamber of the boiler BKZ-75 of Shakhtynskaya TPP and on an output from it. In this paper has been compared of configurations by burner devices of the combustion chamber in the following cases: 1) are used direct-flow slot-hole torches (the basic mode); 2) vortex burner with a swirling of aero mix and their inclination to the center a symmetry of a boiler by 30 degrees. In addition, conducted in this paper the researches allowed determining the influence of emergency stopping of supply of a coal dust in burners on the main characteristics of the combustion chamber.

**Key words:** numerical simulation, combustion chambers, pulverized coal, thermal characteristics, temperature, aerodynamics, heat transfer.

Максимов В.Ю., Айдабол С.К.,  
Отыншиева Н.А.

**ЖЭО Шахтинскідегі БКЗ -75  
энергетикалық қазандықтың  
жану камерасындағы  
көмір тозаңының жануы  
барысындағы жылу және мас-  
са тасымалы**

Ұсынылып отырған жұмыс Шахтинскідегі ЖЭО-ның іске қосылған БКЗ-75 энергетикалық қазандығының жану камерасында көмір шаң-тозаңын жағу барысында жүретін жылу-массатасымал үрдістеріне және де мұндай үрдістерге 3D-компьютерлік модельдеу әдістерін қолдануды зерттеуге арналған. Берілген жұмыста жүргізілген зерттеулер Шахтинскідегі ЖЭО-ның БКЗ-75 қазандығының жану камерасының барлық көлемінде және оның шығысындағы аэродинамикалық және жылуалмасу сипаттамаларының тарауының негізгі заңдылықтарын анықтауға мүмкіндік береді. Осы жұмыста зерттелетін жану камерасын жанарғы құралдарымен қамтудың келесі жағдайларына салыстыру жүргізіледі: 1) тікнүктелі саңылаулар қолданылады (негізгі режим); 2) аэроқоспа ағынын айналдыру және оларды қазандық симметрия центріне 30 градусқа еңкейту бұрышы бар құйынды жанарғылар қолданылады. Сонымен қатар, орындалған зерттеу жұмыстары зерттелетін жану камерасының негізгі сипаттамаларына жағатын жанарғы қондырғыларға көмір шаң-тозаңының берілуінің апаттық тоқтауының әсерін анықтауға мүмкіндік береді.

**Түйін сөздер:** сандық модельдеу, жану камерасы, шаңкөмірлі алау, жылулық сипаттамалар, температура, аэродинамика, жылу алмасу.

**ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОС  
ПРИ ГОРЕНИИ  
УГОЛЬНОЙ ПЫЛИ  
В КАМЕРЕ СГОРАНИЯ  
ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО  
КОТЛА БКЗ-75  
ШАХТИНСКОЙ ТЭЦ**

**Введение**

Сектор энергетики Казахстана является одним из развитых секторов экономики. Первостепенной задачей теплоэнергетики является снижение затрат на получение необходимой продукции. Для создания, выбора и эксплуатации энергоресурсов, технологических энергетических процессов необходимо применение точных расчетных методик теплоэнергетических процессов. Темпы научно-технического прогресса, организация общественного производства, улучшение условий труда и решение многих социальных проблем в значительной мере определяются уровнем использования энергетических ресурсов. Развитие топливно-энергетического комплекса и энергетики является одной из важнейших основ развития всего современного материального производства [1-3].

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 [2].

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 [4].

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 заключается в том, что учитывается наибольшее количество явлений и факторов, влияющих на протекание реальных процессов.

В настоящее время наблюдается повышенный интерес к исследованию процессов тепломассопереноса в высокотемпературных средах при наличии в них горения. Эти процессы протекают в условиях сильной неизомерности и турбулентности течения, многофазности среды, существенного влияния нелинейных эффектов теплового излучения, межфазного взаимодействия и многостадийности протекающих при этом химических реакций [5-7]. Такие явления широко распространены, играют важную роль в теплофизических процессах, и их изучение является актуальной задачей макрокинетики, физики горения и взрыва и современной теплофизики.

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.

Результаты, проведенные в работе, позволили определить оптимальные технологические параметры исследуемого объекта, усовершенствовать методологию численного исследования процессов тепломассопереноса в высокотемпературных и химически реагирующих потоках при наличии турбулентности, а также выработать соответствующие технологические решения для аэродинамических характеристик исследуемой камеры сгорания.

### Численное моделирование

В данной работе, с использованием методов трехмерного моделирования были проведены вычислительные эксперименты по исследованию теплообменных характеристик топочной камеры БКЗ-75 Шахтинской ТЭЦ. Авторами разработаны и применены геометрическая, физико-математическая и химическая модели тепломассопереноса в неоднородных пылеугольных турбулентных потоках в процессе сжигания пылеугольного топлива в топочной камере энергетического котла.

При разработке вышеуказанных моделей были использованы начальные и граничные условия, отражающие реальные физические и технологические процессы, происходящие в камере сгорания котла БКЗ-75 Шахтинской ТЭЦ.

На рисунке 1 представлена конечно-разностная сетка топочной камеры котла БКЗ-75 Шахтинской ТЭЦ.

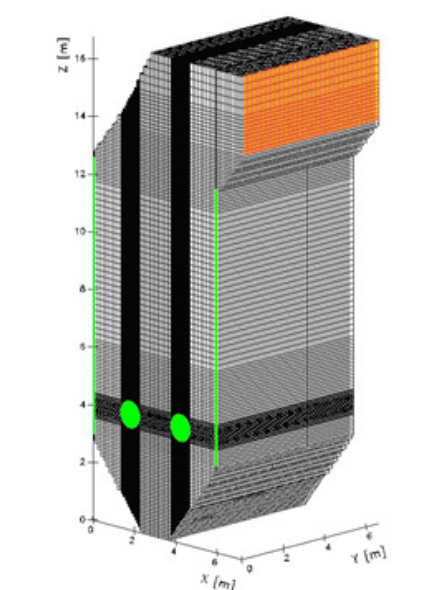


Рисунок 1 – Конечно-разностная сетка топочной камеры

Исследуемый в данной работе котельный агрегат блочной конструкции, предназначен для работы на бурых и каменных углях, торфе, антрацитовом штыбе и тощих углях, является однобарабанным, с естественной циркуляцией и выполнен по П-образной схеме. Топочная камера котла БКЗ-75 Шахтинской ТЭЦ полностью экранирована трубами диаметром 60 мм и толщиной стенки 3 мм. Трубы фронтного, заднего экранов и нижней части образуют холодную воронку.

Как было сказано ранее, в работе проведено сравнение компоновок горелочными устройствами исследуемой топочной камеры в случаях, когда: 1) используется прямоточные щелевые – базовый режим (Рис. 2, а); 2) используются вихревые горелки с углом закрутки потока аэро-смеси и наклоном их к центру симметрии котла на 30 градусов (Рис. 2, б).

Кроме того, проведенные в данной работе исследования позволили определить влияние аварийной остановки подачи угольной пыли в горелочные устройства топки (Рис. 2, в) на основные характеристики камеры сгорания исследуемого котла.

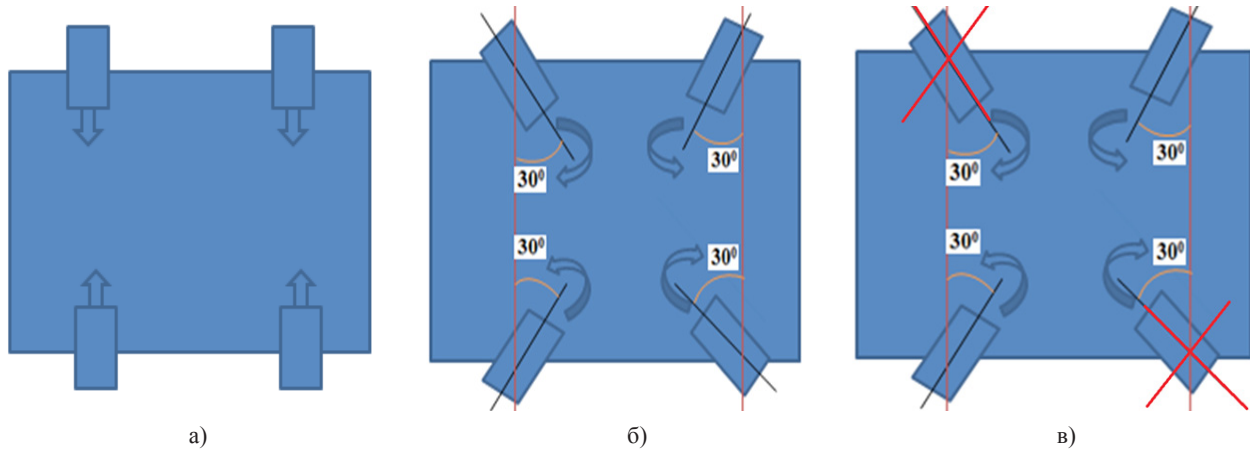
По результатам вычислительных экспериментов были построены распределения вектора полной скорости для указанных случаев (Рис. 3).

Как видно из Рис. 3, а, в области пояса горелочных устройств четыре закрученных потока, направляющиеся из вихревых горелок соударяются между собой в центральной части камеры

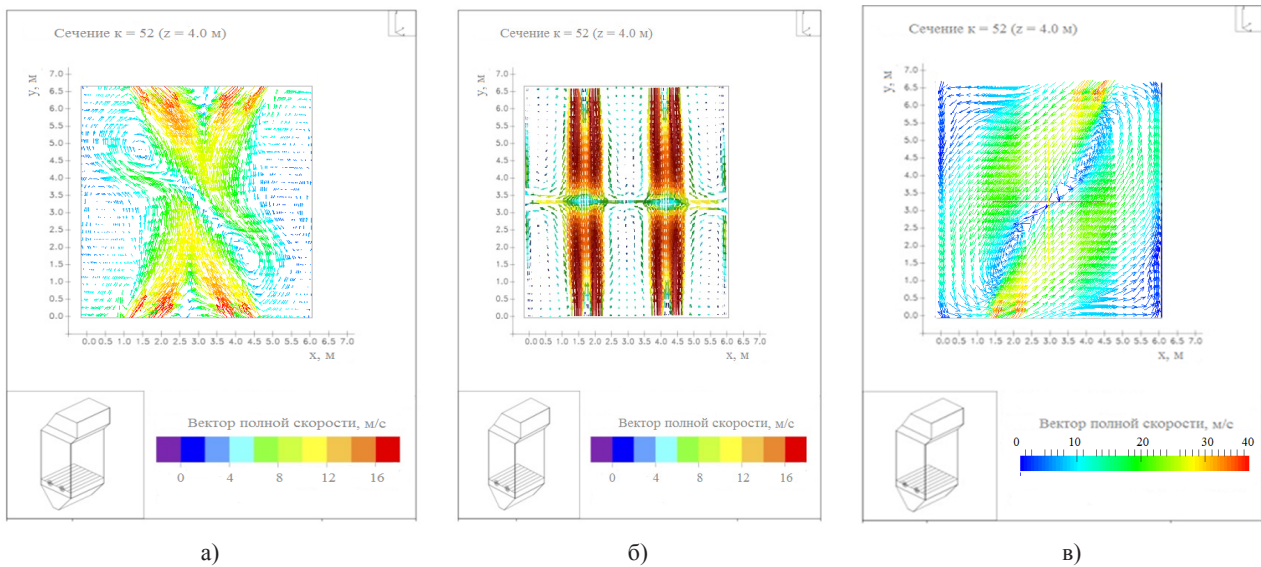
сгорания под углом 30 градусов. Далее, объединившись в два основных потока, они рассекаются, образуя вихревые области больше в горизонтальной области камеры сгорания.

Данная аэродинамическая картина кардинальным образом отличается от случая, когда

камера сгорания комплектуется прямоточными щелевыми горелками (Рис. 3, б), где потоки, соударяясь в центре под прямым углом, рассекаются в область холодной воронки и к выходу из камеры сгорания, с образованием вихревого течения меньшей интенсивности.



**Рисунок 2** – компоновка горелочными устройствами топочной камеры котла БКЗ-75: а) прямоточными горелками; б) вихревыми горелками; в) при аварийном режиме



**Рисунок 3** – Распределение вектора полной скорости в области установки горелочных устройств при: а) вихревом способе подачи аэросмеси; б) прямоточном способе подачи аэросмеси; в) аварийном режиме

Анализ рисунка 3, в показывает, что в области пояса горелочных устройств потоки, направляющиеся из горелок, соударяются в центре топочной камеры, образуя при этом течение, имеющее интенсивный вихревой характер. По-

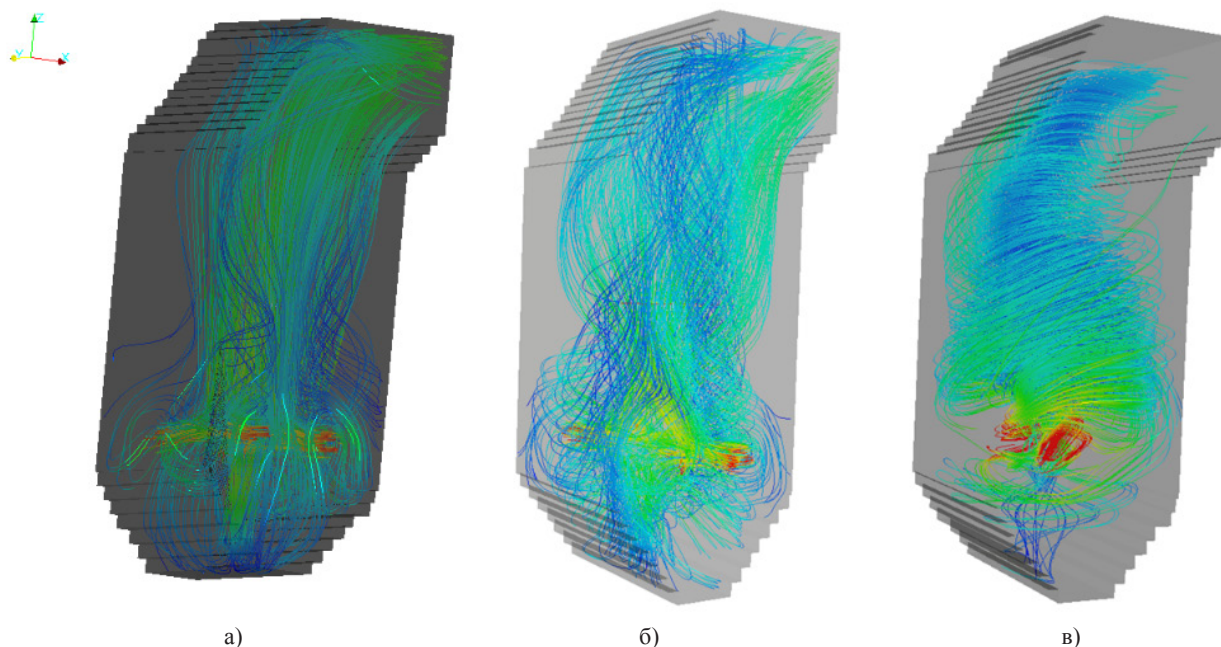
сле соударения потоки аэросмеси направляются вихревым образом к выходу из топочной камеры.

Также в ходе вычислительного эксперимента были построены распределения траекторий полета



угольных частиц и потока окислителя в топочной камере: а) с установленными прямооточными горелками; б) вихревыми горелками; в) в аварийном режиме (рисунок 4). Из рис. 4, а видно, что при организации процесса сжигания угольной пыли с по-

мощью прямооточных щелевых горелок в области холодной воронки образуется вертикальное вихревое течение, препятствующее распространению аэросмеси по всему объему топочной камеры, тем самым «задерживая» основной поток.



**Рисунок 4** – Распределение траекторий полета угольных частиц в топочной камере: а) с установленными прямооточными горелками; б) вихревыми горелками; в) при аварийном режиме

Данная проблема решается применением вихревых горелок и наклоном их к центру симметрии на 30 градусов. Так, из рисунка 4, б мы наблюдаем турбулентный поток аэросмеси, растекающийся по всему объему топочной камеры, без задержки его в области холодной воронки. Это благоприятно сказывается на распределении тепловых характеристик исследуемой камеры сгорания. Кроме того, на рисунке 4, в представлена аэродинамика потоков в исследуемой топочной камере при организации в ней аварийного режима.

Каждая химическая реакция, протекающая в топочной камере, сопровождается выделением или поглощением определенного количества энергии [8-10]. Распределение кинетической энергии турбулентности, выделяемой при горении пылеугольного топлива в топочном пространстве, представлено на рисунке 5.

Вихревой областью с наибольшими изменениями скоростей, их пульсаций и областью с наиболее интенсивно происходящими процес-

сами физико-химических превращений пылеугольного топлива, является центральная часть области установки горелочных устройств для всех исследуемых случаев. В этой части топочной камеры реакции окисления топливных компонент идут с наибольшей скоростью. В частности, кинетическая энергия турбулентности, достигает своих максимальных значений в области пояса горелочных устройств на высоте четырех метров, поскольку эта область является зоной столкновения пылеугольных потоков, которая обусловлена нестационарным возмущением закрученного течения и в которой наблюдается резкий скачок турбулентных пульсаций.

Профили температуры, характеризующие тепловое поведение пылеугольного потока в камере сгорания для трех случаев приведены на рисунке 6. Видно, что во всех случаях температура достигает своих максимальных значений в области, близкой к месту расположения горелочных устройств. Это связано с вихревым характером

течения, в результате чего наблюдается максимальный конвективный перенос и, как результат, увеличивается время пребывания угольных частиц, что приводит к росту температуры.

В случае использования щелевых горелочных устройств область максимальных значений температуры, вследствие аэродинамической картины, располагается вблизи экранов камеры

сгорания, что вызывает их дополнительную тепловую нагрузку. Иным образом наблюдается область максимальных значений температуры в случае использования вихревых горелок с углом закрутки 30 градусов. В данном случае ядро факела наблюдается в центре камеры сгорания, тем самым снижается тепловая нагрузка вблизи экранов.

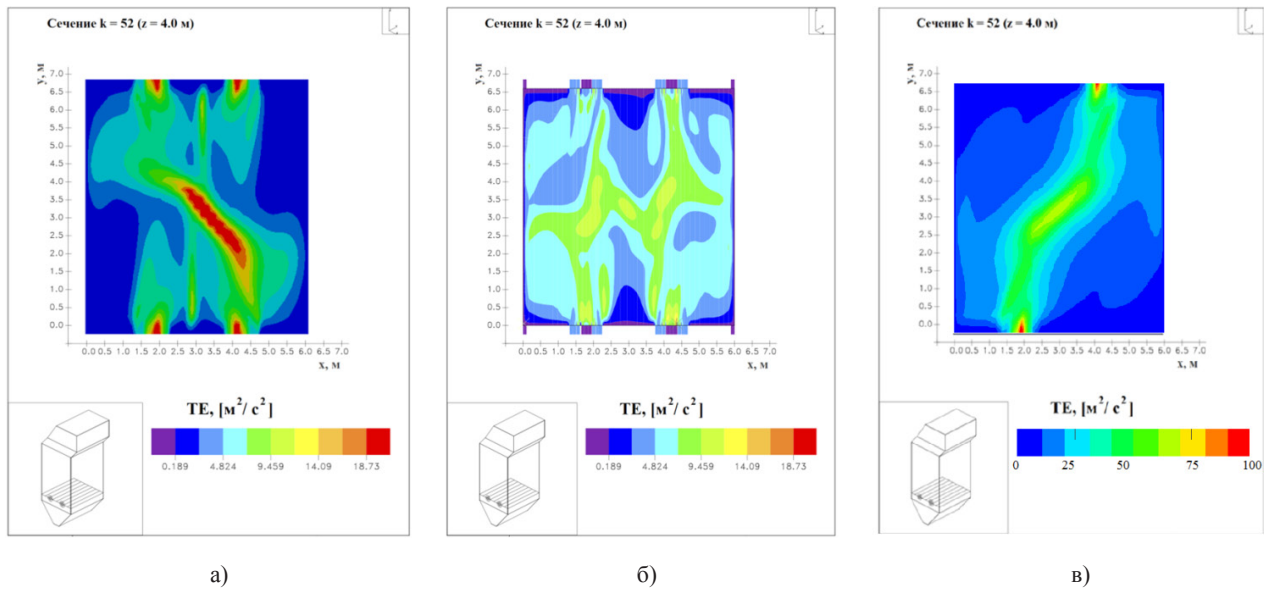


Рисунок 5 – Распределение кинетической энергии турбулентности в сечении установки: а) вихревых горелок; б) прямоточных горелок; в) при аварийном режиме

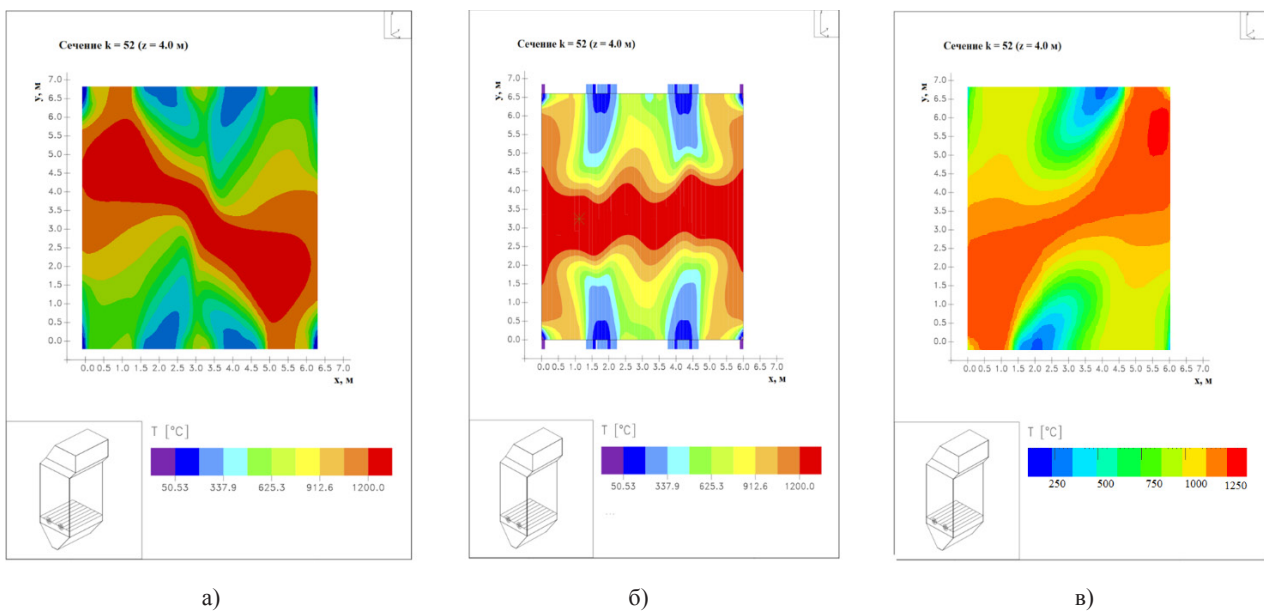
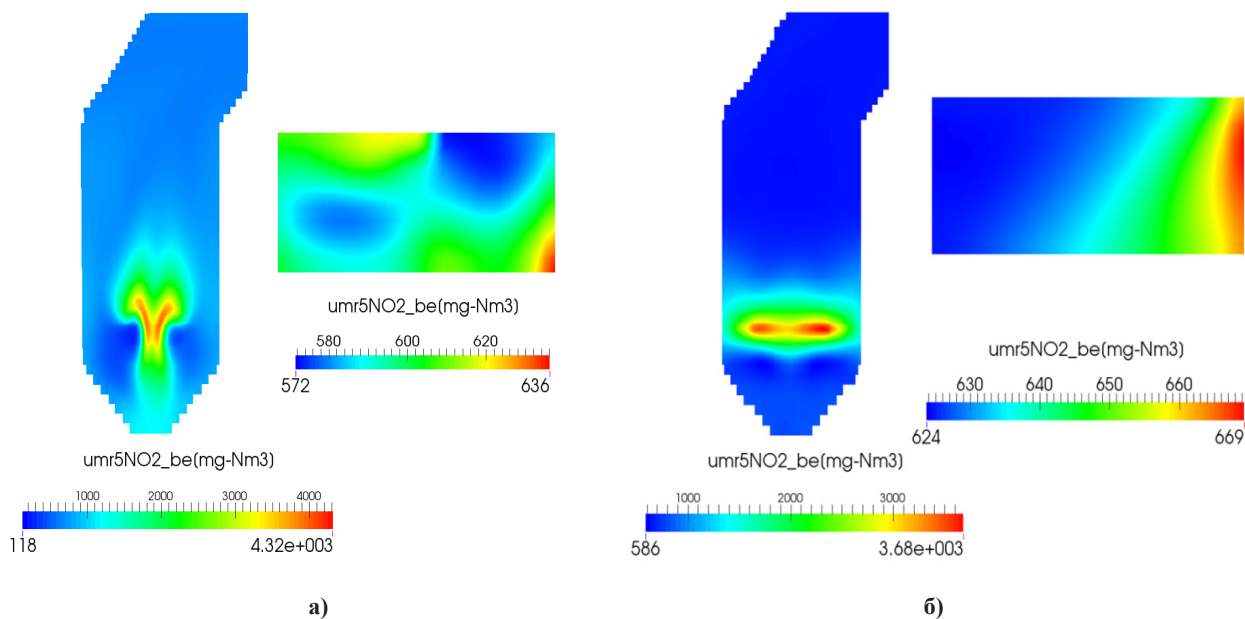


Рисунок 6 – Распределение температуры в сечениях установки: а) вихревых горелок; б) прямоточных горелок; в) при аварийном режиме

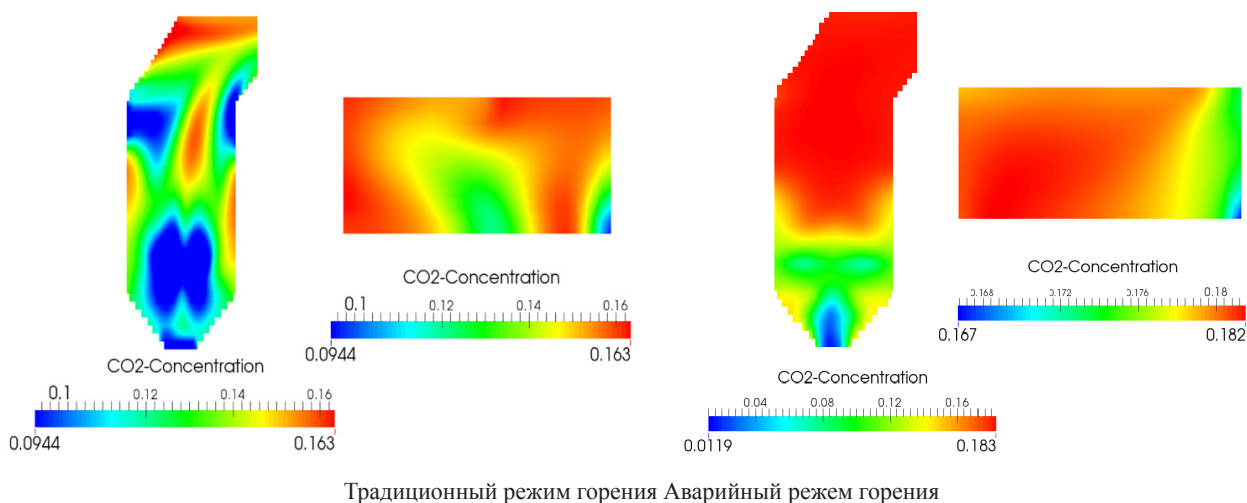
Горение энергетического топлива сопровождается образованием вредных для окружающей среды пылегазовых выбросов, количество которых в каждом конкретном случае зависит от технологии и режимов сжигания угольной пыли, а также от ее состава [11-12]. К наиболее важным, поступающим в атмосферу при сжигании в топочных камерах пылеугольного топлива, загрязнителям относятся газопыльные выбросы (оксиды азота, углерода).

Картина распределения концентрации вредных пылегазовых выбросов показана на ри-

сунках 7-8. Анализ показывает, что зоной максимального образования диоксида азота,  $NO_2$ , 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 аэрозоли вблизи горелок, а также высокая температура в ядре факела, создают благоприятные условия для образования диоксидов азота.



**Рисунок 7** – Распределение концентрации диоксида азота в топочной камере в случае а) традиционного горения; б) при организации аварийного режима



**Рисунок 8** – Распределение концентрации углекислого газа в топочной камере

По мере прохождения пылеугольного факела к выходу из топочной камеры, наблюдается равномерное снижение концентрации  $\text{NO}_x$ , поскольку эта область содержит в себе меньше кислорода и компонент топлива.

В области пояса горелочных устройств на высоте 4 метра концентрация углекислого газа  $\text{CO}_2$  минимальная. По мере продвижения к выходу из топочной камеры растет и на выходе принимает максимальное значение, равное: ~16% – при базовом режиме и 18% при аварийном.

### Заключение

При использовании прямооточных и вихревых горелок аэродинамика исследуемой топочной камеры меняется кардинальным образом. Так, при использовании прямооточных горелочных устройств в сечении их установки наблюдается течение потока аэрозольной смеси с образованием мелких вихрей. Тогда как с использованием вихревых горелок мы видим иную картину: 4 закрученных потока, направляющиеся из вихревых горелок соударяются между собой в центральной части камеры сгорания под углом 30 градусов. Далее, объединившись в два основных потока, они растекаются, образуя вихревые области больше в горизонтальной области камеры сгорания.

Существенно то, что в случае использования щелевых горелочных устройств, вихревое течение образуется вблизи стенок камеры сгорания. Это говорит о том, что в данных областях температура будет достигать своих максимальных значений. С течением времени, при такой организации процесса горения пылеугольного топлива, стенки камеры сгорания будут «перегорать», что вызовет дополнительные конструкционные расходы. В противовес этому, при использовании вихревых горелок, вихревой областью течения является центральная часть камеры сгорания. Таким образом, угольная пыль будет большее

время пребывать в этой области, вдали от экранов, обеспечивая меньшие температуры возле них, тем самым снижая риск перегрева.

Кроме того, в случае использования прямооточных щелевых горелок в сечении холодной воронки образуется вихревое течение в вертикальной плоскости, тем самым «задерживая» поток аэрозольной смеси в этой области. Однако, в реальности, этого не должно происходить, поскольку ядро факела формируется в центральной части камеры сгорания.

Вихревой областью с наибольшими изменениями скоростей, их пульсаций и областью с наиболее интенсивно происходящими процессами физико-химических превращений пылеугольного топлива, является центральная часть области установки горелочных устройств. В этой части камеры сгорания реакции окисления топливных компонент идут с наибольшей скоростью, о чем свидетельствуют максимумы в распределении турбулентных характеристик процесса массообмена во всех исследуемых случаях.

Таким образом, полученные в данной работе результаты позволяют в полной мере изучить и лучше понять влияние сложных нелинейных эффектов: теплового излучения, межфазного взаимодействия, турбулентности, многофазности среды, многостадийности химических реакций, силы тяжести на процессы теплопереноса.

Результаты проведенных численных экспериментов помогут оптимизировать способы сжигания низкосортного казахстанского угля, и в то же время, создать концепцию производства энергии с минимальным количеством вредных веществ. Полученные результаты помогут энергетикам Казахстана решить важные экологические проблемы и достичь экономического производства энергии.

*Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки Республики Казахстан, Грант № 3481/ГФ4.*

### Литература

- 1 Askarova A., Bolegenova S., Maximov V., Beketayeva M., Safarik P. Numerical modeling of pulverized coal combustion at thermal power plant boilers // J. of Thermal Science. 2015. Vol. 24, Issue 3. P. 275–282.
- 2 Askarova A.S., Karpenko E.I., Lavrishcheva Y.I., Messerle V.E. et al. Plasma-supported coal combustion in boiler furnace // IEEE Transactions on Plasma Sci. 2007. Vol. 35, No. 6. P. 1607-1616.
- 3 Lockwood F., Shah N. An improved flux model for calculation of radiation heat transfer in combustion chambers // ASME-Paper. Salt Lake City. 1976. P.2–7.
- 4 Askarova A.S., Buchmann M.A. Structure of the flame of fluidized-bed burners and combustion processes of high-ash coal // 18th Dutch-German Conf. on Flames, Germany, 1997. Vol. 1313. P. 241–244.



- 5 Leithner R. Energy conversion processes with intrinsic CO<sub>2</sub> separation // Transactions of the Society for Mining, Metallurgy and Exploration. 2005. Vol. 18. P. 135-145.
- 6 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. 1992. Vol. 6, No. 268. 158 p.
- 7 Bolegenova S.A., Bekmukhamet A., Maximov V. et al. Numerical experimenting of combustion in the real boiler of CHP // Intern. J. of Mechanics. 2013. Vol. 7. P. 343–352.
- 8 Bekmukhamet A., Bolegenova S.A., Beketayeva M.T. et al. Numerical modeling of turbulence characteristics of burning process of the solid fuel in BKZ-420-140-7c combustion chamber // Int. J. of Mechanics. 2014. Vol. 8. P. 112–122.
- 9 Gorokhovski M., Chtab-Desportes A., Voloshina I. et al. Stochastic simulation of the spray formation assisted by a high pressure // 6-th Intern. Symposium on Multiphase Flow, Heat Mass Transfer and Energy Conversion. Book Series: AIP Conference Proceedings. 2010. Vol. 1207. P. 66–73.
- 10 Vockrodt S., Leithner R., Schiller A., et al. Firing technique measures for increased efficiency and minimization of toxic emissions in Kasakh coal firing // 19th German Conf. on Flames, Germany, 1999. Vol. 1492. – P. 93-97.
- 11 De Marco A., Lockwood F. A new flux model for the calculation of radiation furnaces // Italian Flame Days. Sanremo. 1975. P.1–13.
- 12 Askarova A., Karpenko E., Messerle V. et al. Plasma enhancement of combustion of solid fuels // J. of High Energy Chemistry. 2006. Vol. 40, Issue 2. P. 111–118.

### References

- 1 A. Askarova, S. Bolegenova, V. Maximov, M. Beketayeva, P. Safarik, J. of Thermal Science, 24(3), 275–282, (2015).
- 2 A.S. Askarova, E.I. Karpenko, Y.I. Lavrishcheva, V.E. Messerle et al., IEEE Transactions on Plasma Sci, 35(6), 1607-1616, (2007).
- 3 F. Lockwood, N. Shah, ASME–Paper. Salt Lake City, 2–7, (1976).
- 4 A.S. Askarova, M.A. Buchmann, 18th Dutch-German Conf. on Flames, Germany, 1313, 241–244, (1997).
- 5 R. Leithner, Transactions of the Society for Mining, Metallurgy and Exploration, 18, 135-145, (2005).
- 6 H. Müller, Fortschritt-Berichte VDI-Verlag, 6(268), 158, (1992).
- 7 S.A. Bolegenova, A. Bekmukhamet, V. Maximov et al., Intern. J. of Mechanics, 7, 343–352, (2013).
- 8 A. Bekmukhamet, S.A. Bolegenova, M.T. Beketayeva et al., Int. J. of Mechanics, 8, 112–122, (2014).
- 9 M. Gorokhovski, A. Chtab-Desportes, I. Voloshina et al., 6-th Intern. Symposium on Multiphase Flow, Heat Mass Transfer and Energy Conversion. Book Series: AIP Conference Proceedings, 1207, 66–73, (2010).
- 10 S. Vockrodt, R. Leithner, A. Schiller, et al., 19th German Conf. on Flames, Germany, 1492, 93-97, (1999).
- 11 A. De Marco, F. Lockwood, Italian Flame Days. Sanremo, 1–13, (1975).
- 12 A. Askarova, E. Karpenko, V. Messerle et al., J. of High Energy Chemistry, 40(2), 111–118, (2006).