

УДК: 536.46:532.517.4

**Аскарова А. С., Болегенова С.А., Максимов В.Ю.,  
Максутханова А.М., Шортанбаева Ж.К., Оспанова Ш.С.**  
Казахский национальный университет имени аль-Фараби, Казахстан, г. Алматы  
*Saltanat.Bolegenova@kaznu.kz*

### **3D-моделирование процессов при сжигании низкосортных углей в камерах сгорания**

**Аннотация.** В данной статье описана применение методов 3-D моделирования к исследованию процессов тепломассопереноса, происходящих при сжигании энергетического топлива в топочных камерах действующих ТЭС. Были проведены исследование на основе 3<sup>x</sup>-мерных уравнений Навье-Стокса, переноса энергии и массы с учетом теплопередачи, теплового излучения, химических реакций и многофазности среды. Построены геометрия камеры сгорания с учетом всех технических характеристик котла БКЗ-75 Шахтинской ТЭЦ. Разработаны алгоритм поставленной задачи, созданы численный метод для проведения исследований. Получены основные характеристики процесса турбулентного тепломассопереноса в высокотемпературных средах при наличии физико-химических превращений.

**Ключевые слова:** горение, камера сгорания, пылеугольное топливо, реагирующая смесь, многофазность, угольные частицы, аэродинамические характеристики, тепловые характеристики, численное моделирование, турбулентность, химическая кинетика.

#### **Введение**

Проблемы теплофизики и теплоэнергетики вызывают огромный интерес и имеют ценность для практики. Актуальность данной проблемы и растущее внимание к ней связаны с повышением эффективности использования энергии и с решением экологических проблем, с работой действующих энергетических установок, с созданием новых камер сгорания, с увеличением количества загрязняющих веществ, поступающих в атмосферу.

Участие энергетических предприятий в загрязнении окружающей среды продуктами сгорания топлива, твердыми отходами велико. Это, прежде всего, электростанции, работающие на твердом топливе и являющиеся основным источником загрязнения воздуха, воды и почвы. В атмосферу Казахстана выбрасываются такие вещества как оксид углерода, оксид азота, диоксид азота, пыль, свинец, диоксид серы и т.д., которые наносят существенный вред человеческому организму.

Эта проблема может быть решена только на основе физического, математического и химического моделирования. В этой связи численный эксперимент становится одним из наиболее экономичных и удобных способов для детального анализа сложных физических и химических явлений, происходящих в топочной камере. Использование современных супер-ЭВМ (SUN) позволяет решать эти задачи для конкретных энергетических установок (ТЭС, ГРЭС и т.д.) и для любого энергетического топлива.

Проведение численных экспериментов по сжиганию пылеугольного топлива в топочных камерах реальных энергетических устройств позволяют:

- получить большой и достаточно полный набор характеристик процесса конвективного тепломассопереноса в реагирующих многофазных потоках,
- гибко вмешиваться в сам процесс на любой его стадии,

- проводить широкий анализ всех параметров будущего котла, что обеспечит экономию времени и средств в отличие от строительства действующей уменьшенной модели,
- перераспределять топливно-воздушные потоки в камере сгорания, используя различную компоновку горелок,
- решать вопросы эффективности использования энергии и экологические проблемы выбросов вредных продуктов сгорания.

В данной статье мы будем говорить о применении методов 3-D моделирования к исследованию процессов теплопереноса, происходящих при сжигании энергетического топлива в топочных камерах действующих ТЭС. Это исследование будем проводить на основе 3<sup>x</sup>-мерных уравнений Навье-Стокса, переноса энергии и массы с учетом теплопередачи, теплового излучения, химических реакций и многофазности среды.

### **Модели турбулентности**

Пылеугольный факел в современных камерах сгорания в газодинамическом отношении представляет собой трехмерную (криволинейную) турбулентную струю сжимаемого газа, движущуюся в условиях горения и интенсивного теплообмена с окружающими поверхностями. При построении расчетных схем применительно к реагирующим течениям в топочных устройствах приходится иметь дело со сложной системой нелинейных уравнений в частных производных, состоящей из уравнений неразрывности, движения вязкой среды, распространения тепла и диффузии для компонент реагирующей смеси и продуктов реакции. Кроме того, данная система содержит уравнение состояния и уравнения химической кинетики, определяющих интенсивность нелинейных источников энергии и вещества. Эта проблема осложняется еще и слабой изученностью кинетики химических реакций, а также сложным описанием турбулентности.

Турбулентные течения характеризуются пульсациями скоростей. Эти пульсации способствуют смешиванию транспортируемых характеристик, таких как импульс, энергия и концентрация компонент, и вызывают также колебания этих характеристик. Так как эти пульсации могут быть малых масштабов, но иметь высокую частоту, поэтому, непосредственно в практических технических расчетах их вычисление является очень сложной задачей. Вместо этого мгновенные (точные) определяющие уравнения могут быть усреднены по времени, представлены в виде среднего по ансамблю, что приводит к модифицированным системам уравнений, которые в вычислительном отношении требуют меньше затрат для решения. Однако модифицированные уравнения содержат дополнительные неизвестные переменные. Поэтому, для их определения необходимы дополнительные модели турбулентности.

Существует ряд различных моделей турбулентности. Наиболее часто используемые модели можно назвать:

- модель Spalart-Allmaras;
- стандартная k-ε модель;
- RNG ренормированная k-ε модель;
- стандартная k-w модель;
- модель напряжений Рейнольдса (RSM);
- модель больших вихревых структур (LES).

Универсальной модели турбулентности, которая бы могла использоваться для всех классов течений и задач, не существует. Выбор турбулентной модели зависит от таких параметров, как физические явления, происходящие в потоке, уровень требуемой точности, доступные вычислительные ресурсы, и количество времени, доступное для моделирования. Чтобы сделать самый правильный выбор необходимо оценить возможности и ограничения различных моделей на более простом случае.

Были проведены вычислительные эксперименты на примере турбулентного течения вязкой несжимаемой жидкости в канале и турбулентного течения вязкой несжимаемой

жидкости в канале с дополнительным источником массы, в которых сравнивались две модели турбулентности: стандартная  $k$ - $\epsilon$  модель турбулентности и RNG ренормированная  $k$ - $\epsilon$  модель турбулентности.

Исходя из сравнения численных расчетов с экспериментальными данными (рисунок 1), можно сделать следующий вывод: если при моделировании турбулентных потоков, без дополнительных источников и стоков, нет необходимости в высокой точности в пристенной зоне, то целесообразнее использовать стандартную  $k$ - $\epsilon$  модель турбулентности, так как ее использование требует меньше временных и вычислительных затрат. Это в свою очередь дает возможность использовать менее мощные компьютеры и экономить на времени проведения численного эксперимента. Что же касается численного исследования турбулентного течения в канале с дополнительным источником массы (рисунок 2), то результаты, полученные для стандартной  $k$ - $\epsilon$  модели турбулентности, показали лучшую сходимость к экспериментальным данным, по сравнению с ренормированной RNG  $k$ - $\epsilon$  моделью турбулентности.

Это позволило использовать стандартную  $k$ - $\epsilon$  модель турбулентности для моделирования более сложной в техническом и математическом плане задачи, где помимо точности полученных результатов высокая роль отводится вычислительным затратам, а также времени проведения численного эксперимента.

### Вычислительные эксперименты

Были проведены вычислительные эксперименты на примере высокозольного Карагандинского рядового угля КР200 в топочной камере действующего котла БКЗ-75 Шахтинской ТЭЦ (рисунок 1). Метод исследования, предложенный нами, позволяет проводить такие численные эксперименты с любым твердым топливом на любых действующих электростанциях.

Полученные результаты имеют фундаментальное и практическое значение и могут быть использованы для развития теории горения твердых топлив, а также при проектировании камер сгорания различных ТЭС.

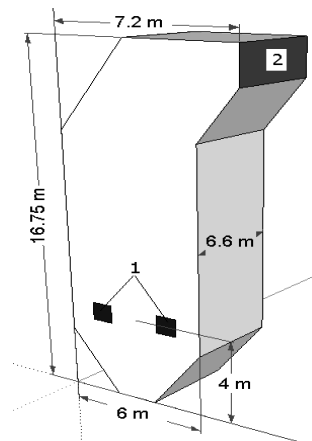


Рисунок 1- Общий вид камеры сгорания

Котел БКЗ-75 оборудован четырьмя вихревыми 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 18550 кДж/кг. Тонина помола угля составляет  $R=20\%$ .

Были получены распределения концентраций реагирующих веществ, таких как  $\text{NO}$ ,  $\text{HCN}$  и  $\text{NO}_2$ .

Картина распределения концентрации азотосодержащих компонентов представлена на рисунках 2-4.

Как видно из представленных графиков наиболее интенсивное газообразование основных азотосодержащих компонентов происходит в области распространения потоков из горелок, что соответствует реальной картине процесса в камере сгорания. Характер распределения концентраций в этих плоскостях неоднозначен, что говорит о сложном, нелинейном характере процесса образования указанных веществ в этой области.

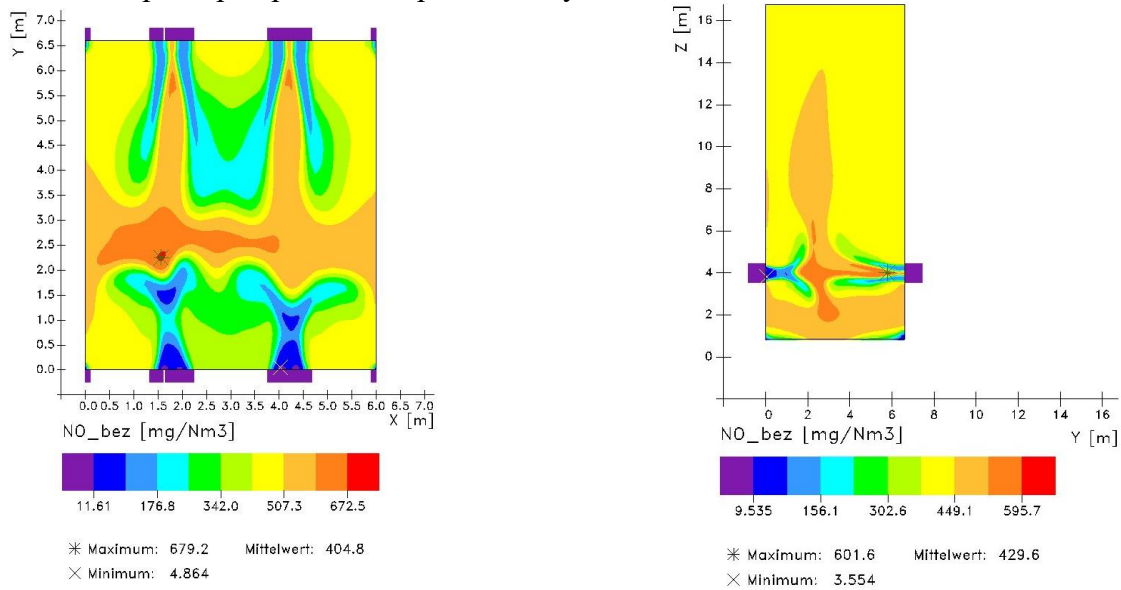


Рисунок 2 - Распределение концентрации NO в камере сгорания BK3-75 в центральном сечении

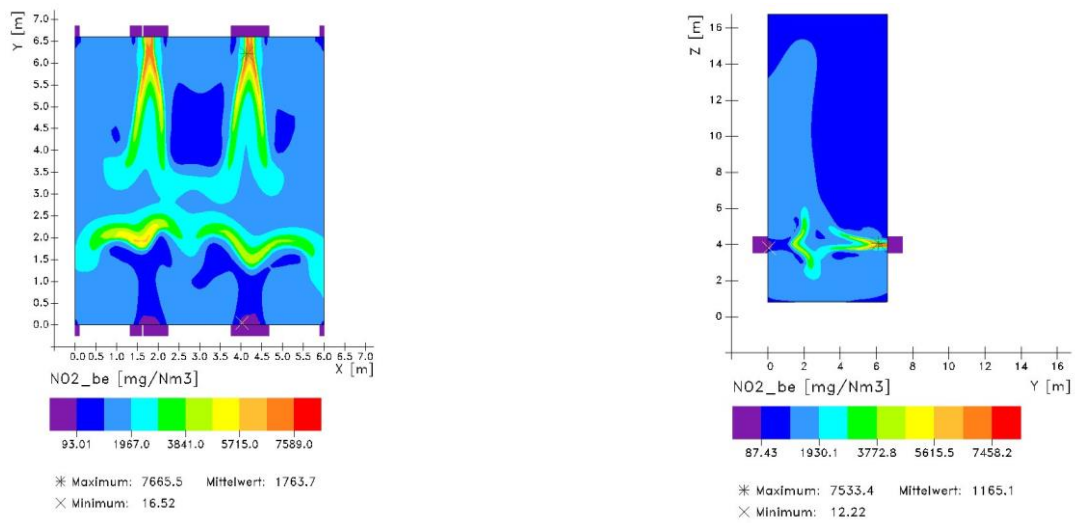


Рисунок 3 - Распределение концентрации NO<sub>2</sub> в камере сгорания BK3-75 в области горелок

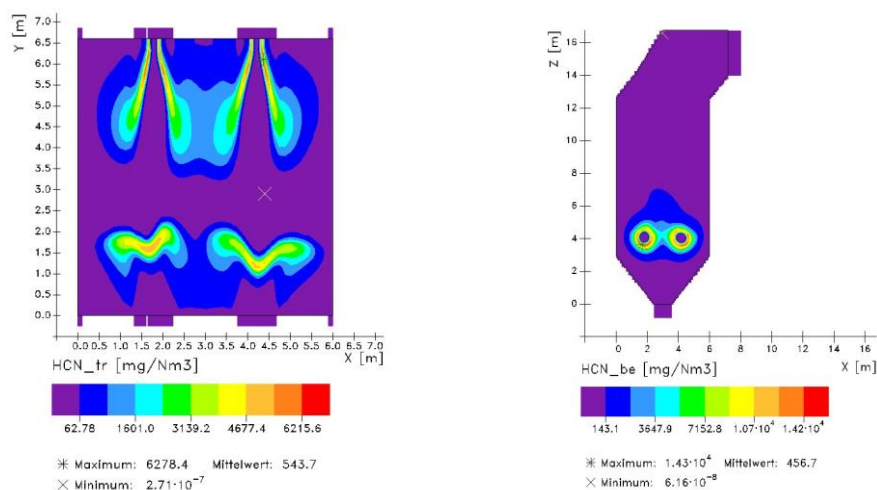


Рисунок 4 - Распределение концентрации синильной кислоты HCN в камере сгорания БКЗ-75 в области горелок

### Заключение

Полученные в работе результаты могут быть положены в основу разработки конкретных рекомендаций по организации процесса "чистого" сжигания твердого топлива.

Это в свою очередь позволит в значительной степени снизить вредные пылегазовые выбросы в атмосферу с целью эффективного развития топливно-энергетических предприятий и снижения до минимума вредного антропогенного воздействия ТЭС на окружающую среду.

### References

1 Askarova A.S., Heierle Ye., Leithner R., Müller H. CFD simulationen der NO<sub>x</sub> production in Kohlenstaub-befeuerten Brennkammern. VDI-Berichte 2056, VDI Verlag GmbH, Düsseldorf, 2009, S.575-579.

2 Askarova A.S. Teplomassoperenos pri szhiganii tverdogo topliva v promyshlennykh kotlakh na primere pavlodarskoy TETS. // Teplofizika i aeromekhanika, Novosibirsk; 2001.-tom 7, № 2. S.293-300.

3 Laufer J. Investigation of turbulent flow in two-dimimensional chanel // NASA Rept. 1053, 1951.

**Асқарова Ә.С., Бөлегенова С.А., Максимов В.Ю.,  
Мақсұтханова А.М., Шортанбаева Ж.К., Оспанова Ш.С.**

### ЖАНУ КАМЕРАЛАРЫНДА ТӨМЕНІГ СҰРЫПТЫ КӨМІРЛЕРДІ ЖАҒУ БАРЫСЫНДАҒЫ ПРОЦЕСТЕРДІ 3-D МОДЕЛЬДЕУ

Аталған мақалада ағымдағы ЖЭС жану камераларындағы энергетикалық отынды жағу кезінде өтетін жылу масса тасымалы процестерін зерттеуге 3-D модельдеу әдістерін қолдану баяндалған. 3-өлшемді Навье-Стокс теңдеулері, жылу беруді, жылулық сәулеленуді, химиялық реакциялар мен ортаның көпфазалығын ескергендегі энергия мен масса тасымалы процестерін негізінде зерттеулер жүргізілді. Шахтинск ЖЭО БКЗ-75 қазандығының барлық техникалық сипаттамаларын ескергенде жану камерасының геометриясы тұрғызылды. Алға қойылған есептің алгоритмі жасалынды, зерттеулер жүргізу үшін сандық әдістер қалыптастырылды. Физика-химиялық ауысулар болған кездегі жоғары температуралы орталардағы турбуленттік жылу масса тасымалы процестерінің негізгі сипатталары алынды.

**Түйін сөздер:** жану, жану камерасы, шаңкөмірлі алау, әсерлесетін қоспа, көпфазалық, көмір бөлшектері, аэродинамикалық сипаттамалар, жылулық сипаттамалар, сандық модельдеу, турбуленттілік, химиялық кинетика.

**Askarova A.S., Bolegenova S.A., Maksimov V.Yu., Maksutkhanova A.M., Shortanbayeva Zh.K., Ospanova Sh.S.**

### **3D-SIMULATION OF LOW-GRADE COAL COMBUSTION IN THE COMBUSTION CHAMBER**

This paper describes the application of 3-D modeling to the study of heat and mass transfer processes occurring during combustion of energy fuels in existing power plants combustion chambers. Studies have been conducted on the basis of 3-dimensional Navier-Stokes equations, the energy and mass transfer with the heat, radiant heat, chemical reactions and multiphase environment. There had been built the geometry of the combustion chamber with all the technical characteristics of the BKZ-75 Shakhtinskaya CHP. The algorithm of the task, a numerical method for research was taken. Main characteristics of the turbulent heat transfer process in high-temperature environments in the presence of physical and chemical transformations was obtained.

**Keywords:** burning, combustion, pulverized coal, which reacts mixture multi phase, coal particles, aerodynamic characteristics, thermal characteristics, numerical modeling, turbulence, chemical kinetics.