

УДК 536.46:532.517.4

**ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ ПО СЖИГАНИЮ  
ВЫСОКОЗОЛЬНОГО УГЛЯ В РЕАЛЬНЫХ КАМЕРАХ КОТЛА ДЛЯ  
КОНТРОЛЯ ВРЕДНЫХ ВЫБРОСОВ**

А.С. АСКАРОВА, С.А. БОЛЕГЕНОВА, А. БЕКМУХАМЕТ, М.Т. БЕКЕТАЕВА  
Казахский национальный университет имени аль-Фараби, г. Алматы (Казахстан)

*Аннотация.* На основе методов 3D компьютерного моделирования проведены исследования сложных процессов тепломассообмена, происходящие в областях реальной геометрии (топочной камеры энергетического котла ПК-39 Аксуйской ГРЭС) при сжигании в них энергетического твердого топлива. Проведены вычислительные компьютерные эксперименты и установлены основные закономерности и особенности формирования вредных пылегазовых выбросов оксидов углерода (СО и СО<sub>2</sub>), оксидов азота NO<sub>x</sub> (NO и NO<sub>2</sub>) и азотосодержащих веществ (HCN, и NH<sub>3</sub>) при сжигании низкосортного высокозольного топлива (Экибастузский уголь) на реальном энергетическом объекте Республики Казахстана. Проведена графическая интерпретация результатов и представлены 3D распределения концентрационных полей оксидов углерода (СО и СО<sub>2</sub>), оксидов азота NO<sub>x</sub> (NO и NO<sub>2</sub>) и азотосодержащих веществ (HCN, и NH<sub>3</sub>) по всему объему топочной камеры котла и на выходе из нее.

*Ключевые слова:* ТЭЦ, ГРЭС, топочная камера, пылевидное состояние, зольность, пылегазовые выбросы, компьютерное моделирование.

В современное время основным видом органического топлива, которое позволит увеличить производство электроэнергии и тепла, будет твердое топливо – уголь. Казахстан располагает огромными запасами энергетических ресурсов, достаточными для покрытия не только своих потребностей, но и для экспорта в другие регионы, как в натуральном виде, так и в виде электроэнергии. В настоящее время в Казахстане около 85% электроэнергии вырабатывается на тепловых электростанциях (ТЭС), основным топливом которых является уголь. Более 80% угля, сжигаемого на этих ТЭС, является низкосортным, зольность которого составляет около 50%.

Для расширения использования твердого угольного топлива в условиях ужесточения требований по охране окружающей среды необходимо создать и освоить новые экологически чистые угольные технологии обеспечивающие уменьшение выбросов вредных веществ в окружающую среду. Таким образом, исследования в области прогрессивных технологических процессов по совершенствованию установок сжигания пылеугольного топлива и использованию альтернативных методов сжигания

различных видов топлива являются в настоящее время наиболее актуальными для всего энергетического комплекса Республики Казахстан.

Таким образом, компьютерное моделирование становится все более важным элементом исследования процессов горения и проектирования различных устройств, использующих процесс сжигания энергетического топлива. На современном уровне развития энергетической отрасли во всем мире чистые угольные технологии становятся общедоступными и продолжают развиваться [1,2]. Основная цель развития таких технологий – преодолеть вредное воздействие предприятий, связанных с использованием угля.

Математическая модель данной задачи базируется на законах сохранения массы, импульса и энергии. Для описания трехмерного движения реагирующих течений в областях реальной геометрии использовалась система дифференциальных уравнений [1]:

уравнение баланса массы или уравнение неразрывности:

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

закон сохранения импульса:

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

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

уравнение энергии:

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

где:  $h$  – энтальпия;  $S_q$  – источник энергии, учитывается тепло за счет излучения, конвективного обмена между частицами и газовой фазой и тепло сгорания.

В качестве исследуемого объекта в данной работе была выбрана топочная камера котла ПК-39 к блоку 300 МВт, паропроизводительностью 475 т/ч, установленная на Аксуйской электростанции (Казахстан). На рисунке 1 представлена общая схема камеры сгорания этого котла.

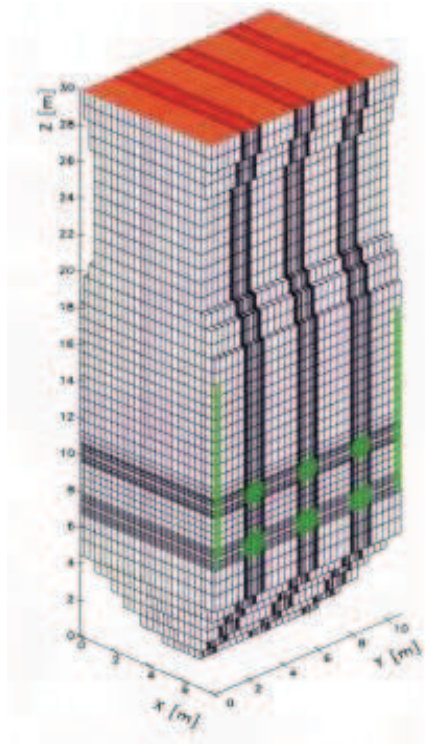


Рисунок 1. Общий вид топочной камеры энергетического котла ПК-39 Аксуйской ГРЭС

Результаты компьютерного моделирования позволяют оценить основные закономерности формирования продуктов сгорания [3]. На рисунке 2 представлено трехмерное распределение концентрации диоксида углерода в области расположения горелочных устройств. Видно, что наиболее интенсивное образование диоксида углерода  $\text{CO}_2$  происходит по мере удаления от входных отверстий, т.е. в области столкновения струй топлива и окислителя из противогорелок. Цветная шкала позволяет определить значения концентраций  $\text{CO}_2$  в любой точке топочного пространства и на выходе из него.

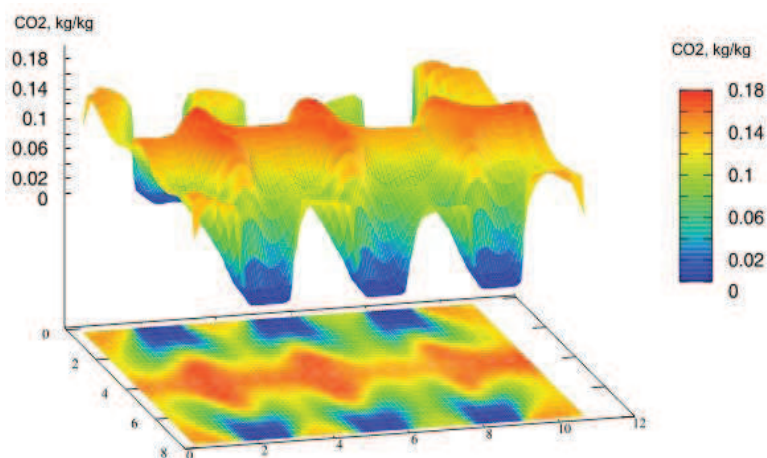


Рисунок 2. 3D распределение концентрации  $\text{CO}_2$  в камер сгорания ПК-39 в области горелок нижнего уровня

Тот факт, что углерод может реагировать с кислородом разными способами, чрезвычайно важен при проектировании топочных камер. Любые технологии сжигания должны обеспечивать полное смешивание топлива с кислородом до полного сгорания с образованием  $\text{CO}_2$ , а не  $\text{CO}$ . В противном случае тепловыделение резко снизится, поскольку при образовании  $\text{CO}$  выделяется лишь 28% той энергии, которая выделяется при образовании  $\text{CO}_2$ .

Картина распределения концентрации азотсодержащих компонентов, участвующих в процессе формирования оксидов азота представлена на рисунках 3-8 в виде трехмерных распределений концентраций аммиака  $\text{NH}_3$  (рисунок 3, 4), синильной кислоты  $\text{HCN}$  (рисунок 5, 6) и оксида азота  $\text{NO}$  (рисунок 7, 8). В качестве характерных плоскостей для топочной камеры выбраны горизонтальные плоскости на уровне горелочных устройств верхнего и нижнего ярусов топочной камеры исследуемого котла.

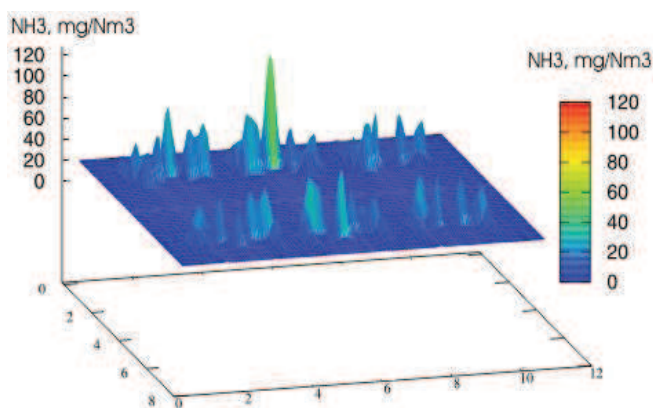


Рисунок 3. Распределение концентрации аммиака  $\text{NH}_3$  в топочной камере котла ПК-39 в области горелок нижнего уровня

Как видно из представленных графиков наиболее интенсивное газообразование основных азотсодержащих компонентов ( $\text{HCN}$ ,  $\text{NH}_3$ ,  $\text{NO}$ ) происходит в области распространения потоков из горелок. При этом характер распределения концентраций в этих плоскостях неоднозначен, что говорит о сложном нелинейном характере процесса образования указанных веществ в этой области. По цветной шкале можно определить количественные значения концентраций  $\text{HCN}$ ,  $\text{NH}_3$  и  $\text{NO}$  в любой точке топочной камеры и на выходе из нее.

В зоне реакции при высоких температурах образуется атомарный азот, количество которого в несколько раз превышает количество атомарного кислорода, образующегося в результате термической диссоциации атмосферного кислорода. При этом атомарный кислород образуется в значительном количестве в промежуточных стадиях протекания реакции горения углеводородов и диоксида углерода.

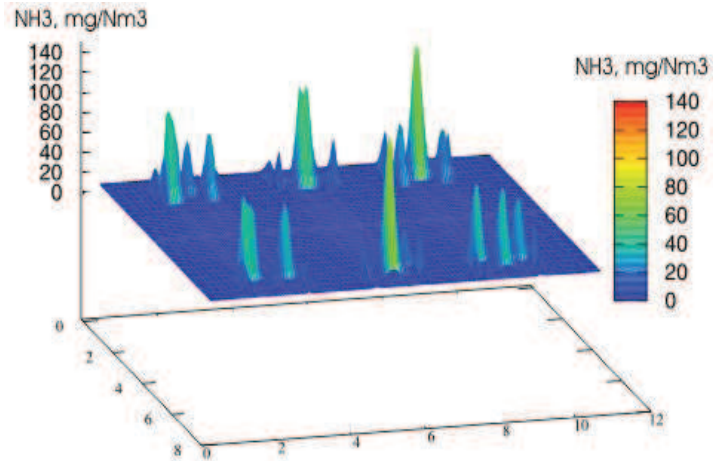


Рисунок 4. Распределение концентрации аммиака  $\text{NH}_3$  в топочной камере котла ПК-39 в области горелок верхнего уровня

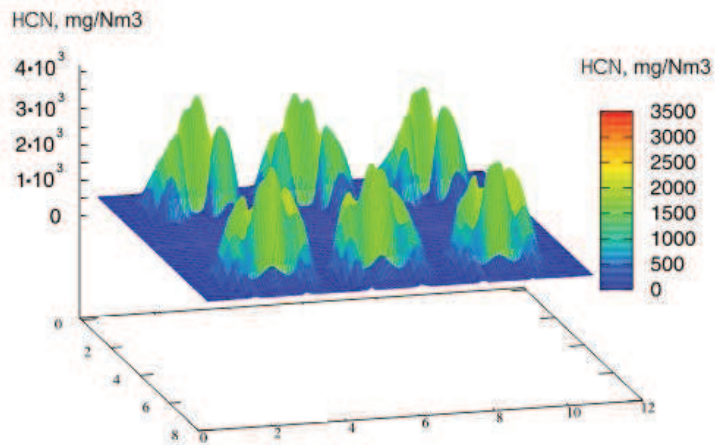


Рисунок 5. Распределение концентрации  $\text{HCN}$  в топочной камере котла ПК-39 в области горелок нижнего уровня

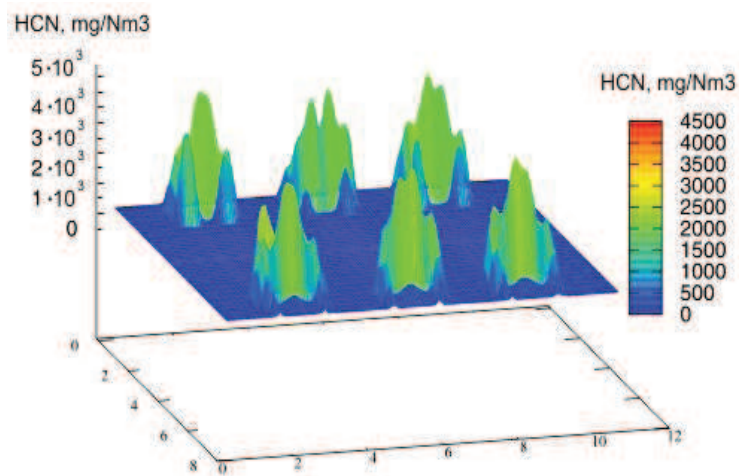


Рисунок 6. Распределение концентрации  $\text{HCN}$  в топочной камере котла ПК-39 в области горелок верхнего уровня



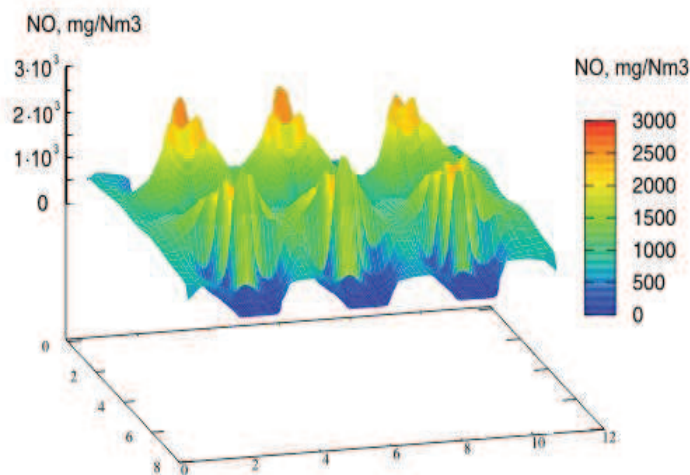


Рисунок 7. Распределение концентрации монооксида азота NO в топочной камере котла ПК-39 в области горелок нижнего уровня

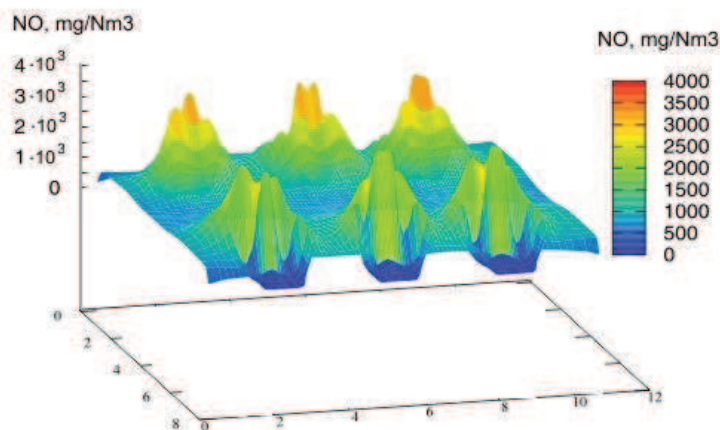


Рисунок 8. Распределение концентрации оксида азота NO в камере сгорания ПК-39 в области горелок верхнего уровня

На рисунке 9 представлено распределение максимальных, минимальных и средних по сечению значений концентраций азотсодержащих соединений (HCN, NH<sub>3</sub> и NO) на выходе из топочной камеры котла ПК-39 Аксуйской ГРЭС. Мы видим, что расчетные данные средних значений этих веществ на выходе отвечают принятым в РК предельно допустимым нормам (ПДК).

В заключение можно отметить, что в области пояса горелок, через которые происходит подача пылеугольной пыли и воздуха, физико-химические процессы протекают наиболее интенсивно. Именно здесь, в центре топочной камеры, напротив горелочных устройств, создаются благоприятные условия для интенсивного перемешивания и бурного протекания реакций горения. В этой области происходят основные реакции окисления, о чем свидетельствуют максимумы значений концентраций оксидов углерода (CO и CO<sub>2</sub>), оксидов азота NO<sub>x</sub> (NO и NO<sub>2</sub>) и азотсодержащих веществ

(HCN, и NH<sub>3</sub>). Анализ полученных распределений максимальных, минимальных и средних по сечению значений концентраций оксидов углерода (CO и CO<sub>2</sub>) и азота NO и азотсодержащих соединений (HCN, NH<sub>3</sub>) на выходе из топочной камеры котла ПК-39 Аксуйской ГРЭС показал, что расчетные данные средних значений этих веществ на выходе отвечают принятым в РК предельно допустимым нормам (ПДК).

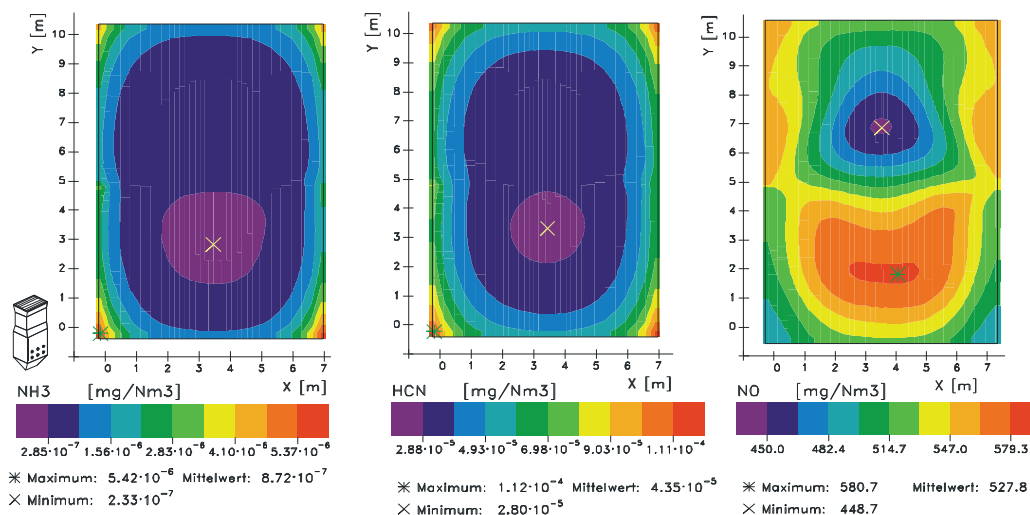


Рисунок 9. Распределение концентрации азотсодержащих веществ на выходе из топочной камеры котла ПК-39 Аксуйской ГРЭС

#### Список литературы

- 1 Askarova, A.S., Karpenko, E.I., Messerle, V.E., Ustimenko, A.B. Modeling of Coal Combustion Activated by Plasma Flame // Presentations Abstracts of 30<sup>th</sup> International Symposium on Combustion. Chicago, 2004. P.423.
- 2 Askarova, A., Karpenko, E., Messerle, V., Ustimenko, A. Plasmachemical activation of coal gasification and combustion //17th International Symposium on Plasma Chemistry. Toronto, 2005. ISPC–296.
- 3 Askarova A.S., Bolegenova S.A., Bolegenova S.A., Maximov V.Yu., Bekmukhamet A., Beketayeva M.T. Numerical experimenting of combustion in the real boiler of CHP // International Journal of Mechanics. ISSN: 1998-4448. Issue 3. Volume 7. 2013. P.343-352.

#### NUMERICAL EXPERIMENTS ON BURNING HIGH ASH CONTENT COAL IN THE REAL CHAMBER OF BOILER FOR EMISSION CONTROL

A.S. ASKAROVA, S.A. BOLEGENOVA, A. BEKMUKHAMET, M.T. BEKETAYEVA  
Al-Farabi Kazakh national University, Almaty (Kazakhstan)

*Annotation.* By the methods of 3D computer modeling conducted researches of complex processes of heat- mass transfer occurring in the areas of real geometry (combustion chamber of power boiler PK-39 Aksu TPP) during the burning of solid energy fuel. Held computational experiments and set

*the basic regularities and features of the formation of harmful dust and gas emissions of carbon oxides (CO and CO<sub>2</sub>), nitrogen oxides NO<sub>x</sub> (NO and NO<sub>2</sub>) and nitrogen compounds (HCN, and NH<sub>3</sub>) from the combustion of high ash content and low-grade fuel (Ekibastuz coal) on the real energy facility Republic of Kazakhstan. Graphic interpretation of the results conducted and presented 3D field distribution concentration of carbon oxides (CO and CO<sub>2</sub>), nitrogen oxide NO<sub>x</sub> (NO and NO<sub>2</sub>) and nitrogen compounds (HCN, and NH<sub>3</sub>) throughout the volume of the combustion chamber of the boiler and the outlet.*

*Keywords: CHP, TPP, combustion chamber, pulverized state, ash content, dust and gas emissions, computational modeling.*