

NEWS

OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES OF THE REPUBLIC OF KAZAKHSTAN

PHYSICO-MATHEMATICAL SERIES

ISSN 1991-346X

Volume 1, Number 299 (2015), 32 – 38

FORMATION OF HARMFUL DUST AND GAS EMISSIONS COMPONENTS IN THE COMBUSTION PROCESSES

A. Askarova, S. Bolegenova, S. Bolegenova,
Z. Gabitova, A. Ergalieva, M. Beketayeva, Sh. Ospanova

Al-Farabi Kazakh national university, Almaty, Kazakhstan.
E-mail: gabitova.zarina@mail.ru

Key words: combustion, combustion chamber, burners, pulverized state, dust and gas emissions, nitrogen and carbon oxides, computer simulation

Abstract. The main purpose of this work is to study the concentration fields of harmful dust and gas emissions components of the combustion products of high-ash Ekibastuz coal. In this regard, the object of research is real boiler BKZ-160, located on the Almaty CHP-3 (Kazakhstan). The studies were conducted using the FLOREAN software package, based on the use of numerical methods for computer simulation. Basic research method is the method of control volume, that helps to solve complex differential equations of heat and mass transfer and receipt of numerical values in the vicinity of the nodes of the computational grid.

The study of concentration fields of carbon and nitrogen oxides during combustion of polydispersed coal flame in the furnace chamber of real boiler was conducted. Particle size distribution was $d_p = 10$ microns - 10%; $d_p = 30$ microns - 20%; $d_p = 60$ microns - 40%; $d_p = 100$ microns - 20%; $d_p = 120$ micron - 10%. The results of computational experiments allow to know the character of the processes, as well as maximum, minimum and average concentrations of combustion products.

It is shown that the basic chemical reactions occur in the region of the burners, where the concentration of the fuel and oxidizer reactants is the greatest. This is evidenced by the maximum on the distribution of CO and NO_x, which corresponds to the real picture of the process in the combustion chamber. The distribution pattern of carbon dioxide does not match the field CO, which shows the differences in the formation of CO₂ and CO. Basic education of carbon dioxide CO₂ occurs to the exit of the furnace, which is connected with afterburning CO.

УДК 536.46.:532.517.4

ФОРМИРОВАНИЕ ВРЕДНЫХ ПЫЛЕГАЗОВЫХ КОМПОНЕНТОВ В ПРОЦЕССЕ ГОРЕНИЯ

А. С. Аскарова, С. А. Болегенова, С. А. Болегенова,
З. Х. Габитова, А. Б. Ергалиева, М. Т. Бекетаева, Ш. С. Оспанова

Казахский национальный университет им. аль-Фараби, Алматы, Казахстан

Ключевые слова: горение, топочная камера, горелки, пылевидное состояние, пылегазовые компоненты, оксиды азота и углерода, компьютерное моделирование.

Аннотация. Целью настоящей работы является исследование концентрационных полей вредных пылегазовых компонентов продуктов сгорания высокозольного Экибастузского угля. В связи с этим, в качестве объекта исследований был выбран реальный котел БКЗ-160, расположенный на Алматинской ТЭЦ-3 (Казахстан). Исследования проводились с помощью программного комплекса FLOREAN, основанного на использовании численных методов компьютерного моделирования. Основной метод исследований – метод контрольного объема – заключается в решении сложных дифференциальных уравнений тепломассопереноса и получении численного значения в окрестностях узлов расчетной сетки.

Было проведено исследование концентраций оксидов углерода и азота при горении полидисперсного пылеугольного факела в камере сгорания котла. Распределение частиц по размерам $d_p=10$ мкм – 10%; $d_p=30$ мкм – 20%; $d_p=60$ мкм – 40%; $d_p=100$ мкм – 20%; $d_p=120$ мкм – 10%. Полученные в результате вычислительных экспериментов данные позволяют узнать характер происходящих процессов, а также максимальные, минимальные и средние значения концентраций продуктов горения.

Показано, что основные химические реакции происходят в области расположения горелок, где концентрации реагирующих топлива и окислителя наибольшее. Об этом свидетельствуют максимумы на кривых распределения CO и NO_x, что соответствует реальной картине процесса в камере сгорания. Характер распределения диоксида углерода CO₂ не соответствует полю CO, что говорит об отличиях в процессе образования CO₂ и CO. Основное образование диоксида углерода CO₂ происходит по мере удаления от центра топки, что связано с догоранием CO.

Казахстан обладает богатыми энергетическими ресурсами, такими как нефть, газ, уголь и уран. Однако добыча и использование этих ресурсов вызывают многочисленные экологические проблемы. Сжигание энергетических топлив для получения тепла, электроэнергии вызывает выбросы частиц оксидов углерода, серы и азота. [1]

На производство тепла и электроэнергии в Казахстане приходится около 50% потребляемого топлива. Общая мощность электрогенерирующих источников в Республике Казахстан составляет более 18 тыс. МВт, около 87% основы которых составляют ТЭС. Около 38% всей генерирующей мощности (6,7 тыс. МВт) составляют теплоэлектроцентрали (ТЭЦ) с совместной выработкой тепла и электроэнергии. [2]

В связи с этим, исследования в области прогрессивных технологий по совершенствованию энергетических установок по сжиганию пылеугольного топлива и использования альтернативных методов организации процесса горения являются в настоящее время наиболее актуальными для всего энергетического комплекса Республики Казахстан.

В данной работе вычислительные эксперименты проводились на основе решения трехмерных уравнений конвективного теплопереноса с учетом распространения тепла, теплового излучения, химических реакций и многофазности среды. Для описания трехмерного движения реагирующих течений в камере используется система дифференциальных уравнений:

1. Закон сохранения массы или уравнение неразрывности

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = - \frac{\partial(\rho u_j)}{\partial x_j} \quad (1)$$

2. Закон сохранения импульса или уравнение движения

Баланс импульса основывается на втором законе Ньютона – изменение импульса жидкости в контрольном объеме равно сумме всех внешних (поверхностных и эффективных объемных) сил, приложенных к данному контрольному объему.

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

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

3. Закон сохранения энергии

Уравнение энергии базируется на первом начале термодинамики

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

где h – энтальпия;

4. Закон сохранения для компоненты вещества

В изотропной среде, состоящей из β компонент, компоненты могут двигаться с различными скоростями $u_{i,\beta}$. Для баланса массы β – компоненты среды можно запишем:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho c_\beta) = - \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho c_\beta u_i) - \frac{\partial j_i}{\partial x_i} + R_\beta, \quad (4)$$

где c_β – массовая концентрация; j_i – диффузионный поток; R_β – источник вещества.

Для моделирования турбулентной вязкости и замыкания системы использовалась стандартная k-ε модель турбулентности. Модель включает в себя:

- уравнение переноса турбулентной кинетической энергии k:

$$\frac{\partial(\bar{\rho}k)}{\partial t} = \frac{\partial(\bar{\rho}u_j k)}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\frac{\mu_{eff}}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + P - \bar{\rho} \cdot \varepsilon, \quad (5)$$

Здесь P – производство кинетической энергии турбулентности:

$$P = \left[\mu_{turb} \cdot \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \cdot \bar{\rho} \cdot k \cdot \delta_{ij} \right] \cdot \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j}. \quad (6)$$

- уравнение диссипации турбулентной кинетической энергии ε:

$$\frac{\partial(\bar{\rho}\varepsilon)}{\partial t} = \frac{\partial(\bar{\rho}u_j \varepsilon)}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\frac{\mu_{eff}}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{\varepsilon,1} \cdot \frac{\varepsilon}{k} \cdot P - C_{\varepsilon,2} \cdot \frac{\varepsilon^2}{k} \cdot \bar{\rho}, \quad (7)$$

где $\rho\varepsilon$ – преобразование кинетической энергии пульсационного движения во внутреннюю энергию (диссипация); $\sigma_k, \sigma_\varepsilon$ - соответствующие турбулентные числа Прандтля.

Турбулентная вязкость μ_{turb} определяется с помощью соотношения Прандтля-Колмогорова

$$\mu_{turb} = c_\mu \bar{\rho} \frac{k^2}{\varepsilon}, \quad (8)$$

где c_μ – эмпирическая константа. [3]

В качестве объекта исследования в данной работе был выбран реальный промышленный энергетический котел БКЗ-160 Алматинской ТЭЦ-3 (рисунок 1). На ТЭЦ-3 установлено 6 котельных агрегатов БКЗ-160, паропроизводительность каждого из которых 160 т/час.

По боковым сторонам топочной камеры расположены 4 блока прямоточных щелевых горелок (по 2 горелки в блоке), направленных по касательной к внутренней окружности. Каждая горелка имеет один канал аэросмеси и два канала вторичного воздуха, расположенные сверху и снизу канала аэросмеси и разделенные футерованными простенками. Верхняя и нижняя горелки также разделены простенком, в центре которого смонтирована мазутная форсунка для растопки и подсветки факела.

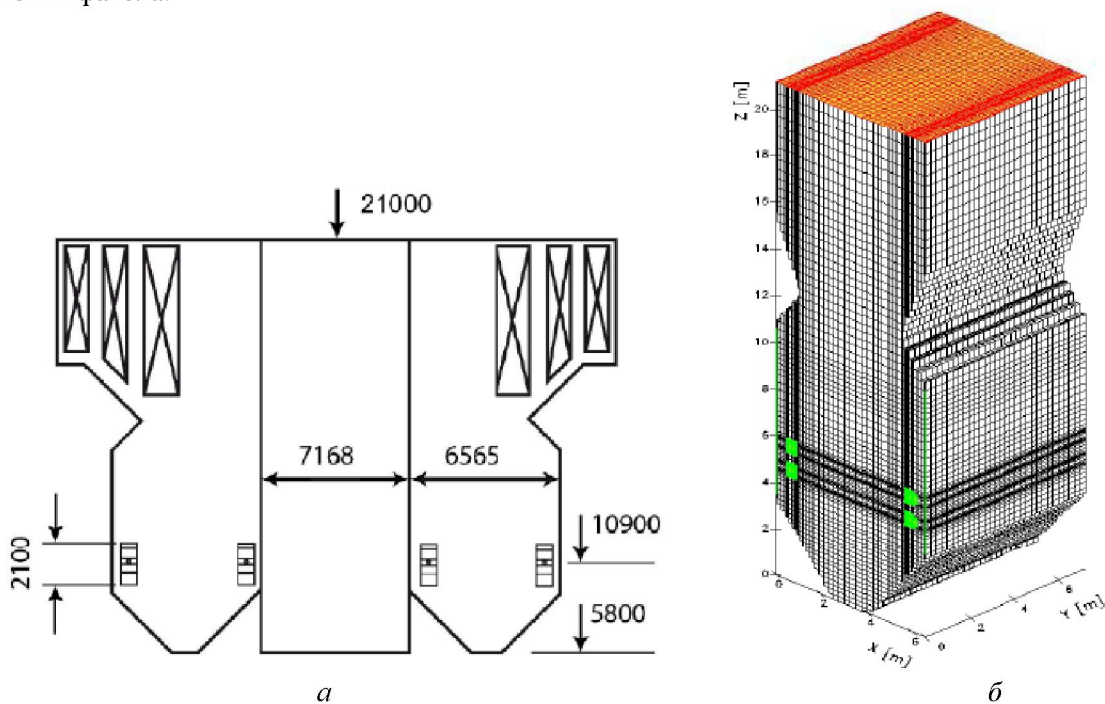


Рисунок 1 – Схема топочной камеры котла БКЗ-160 (а) и разбивка ее на контрольные объемы (б)

Влияние летучих веществ существенно на начальной стадии горения топлива: чем выше выход летучих веществ, тем быстрее воспламеняется топливо и тем глубже оно выгорает. Но выброс летучих веществ не должен превышать определенных норм, принятых в каждом регионе. Кроме основных компонентов, образующихся в результате сжигания органического топлива (углекислого газа и воды), выбросы ТЭС содержат пылевые частицы различного состава, оксиды серы, оксиды азота, фтористые соединения, оксиды металлов, газообразные продукты неполного сгорания топлива.

В целях оптимизации более эффективной технологии «чистого» сжигания топлива, необходимо смоделировать этот процесс. Численное моделирование проведено при помощи компьютерного пакета программ, проверенного в результате вычислительных экспериментов на ряде ТЭС РК [2-3]. Ниже приведены картины распределения концентрации оксидов углерода и азота (CO , CO_2 , NO_x) (рисунки 2-5) для полидисперсного факела.

Механизм горения угля сложен и выяснен еще недостаточно. В результате сгорания образуются CO и CO_2 , причем каждый из этих газов может быть первичным или вторичным продуктом:

- Первичный: $\text{C} + \text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2$ и $2\text{C} + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{CO}$
- Вторичный: $\text{CO}_2 + \text{C} \rightarrow 2\text{CO}$ и $2\text{CO} + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{CO}_2$

Оксид углерода (CO) – бесцветный газ, не имеющий запаха, известен также под названием «угарный газ» – образуется в результате неполного сгорания ископаемого топлива (угля, газа, нефти) в условиях недостатка кислорода и при низкой температуре. При вдыхании угарный газ за счёт имеющейся в его молекуле двойной связи образует прочные комплексные соединения с гемоглобином крови человека и тем самым блокирует поступление кислорода в кровь. График распределения минимальных, средних и максимальных значений концентрации окиси углерода представлен на рисунке 2.

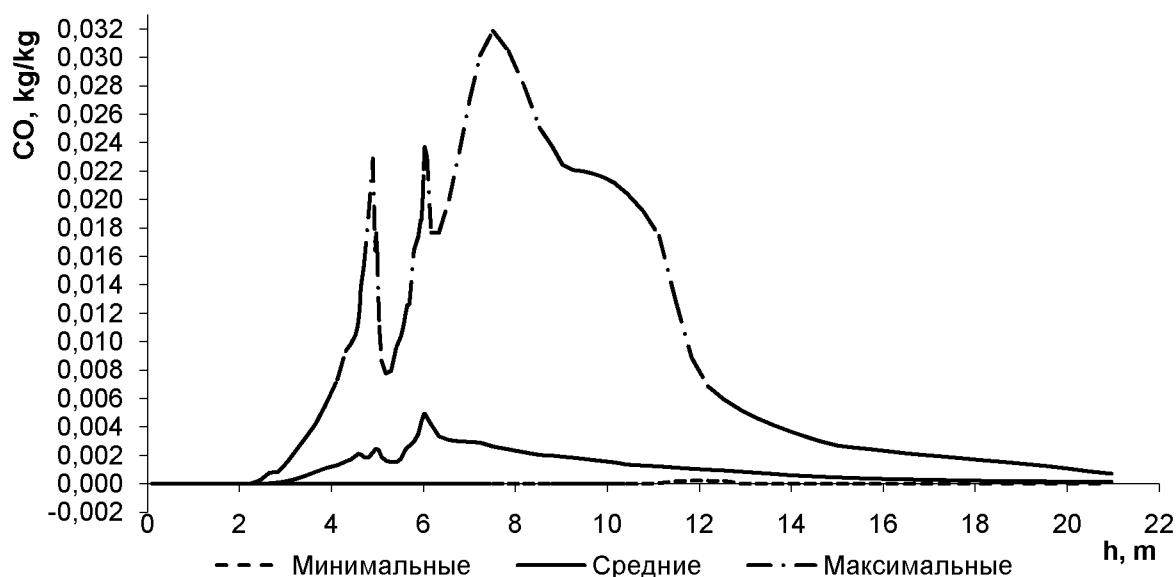


Рисунок 2 – График распределения концентрации CO для полидисперсного факела по высоте топочной камеры

Двуокись углерода (CO_2), или углекислый газ, – бесцветный газ с кисловатым запахом и вкусом относят к удушающим газам. Является одним из парниковых газов, вследствие чего принимает участие в процессе глобального потепления. Постоянный рост уровня содержания этого газа в атмосфере наблюдается с начала индустриальной эпохи. На рисунке 3 представлено распределение концентрации диоксида углерода.

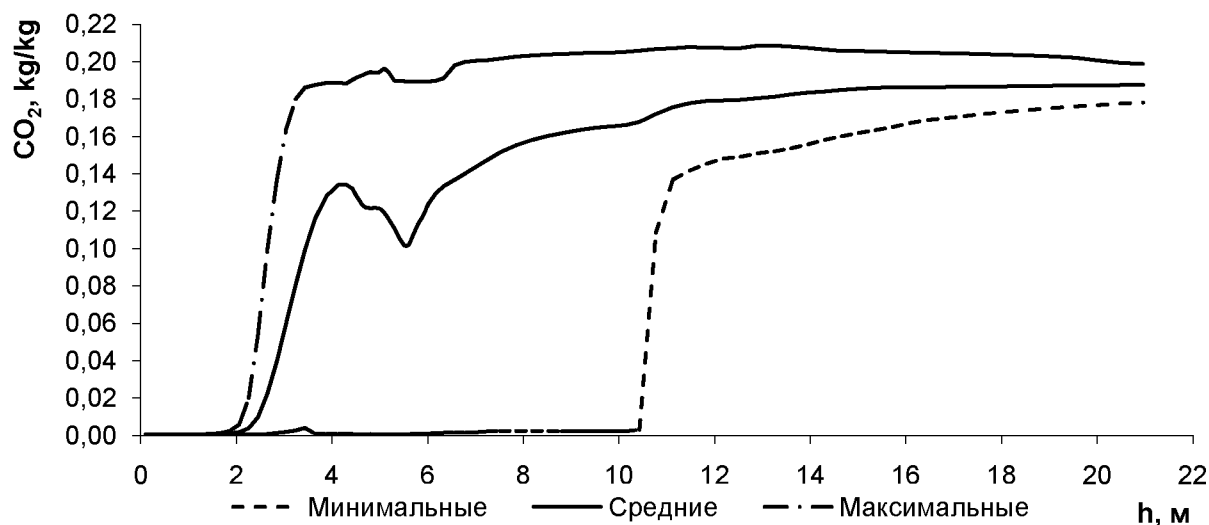


Рисунок 3 – График распределения концентрации CO₂ для полидисперсного факела по высоте топочной камеры

Оксиды углерода являются одними из самых токсичных загрязнителей атмосферного воздуха, которые являются продуктами неполного сгорания. Оксиды углерода составляют около половины от общего количества всех вредных веществ, которые попадают в атмосферный воздух. Немалая часть их поступает с дымовыми газами.

При проектировании топочных камер всегда нужно учитывать, что углерод может реагировать с кислородом разными способами. Любые технологии сжигания должны обеспечивать полное смешивание топлива с кислородом до полного сгорания с образованием CO₂, а не CO. В противном случае тепловыделение резко снизится, поскольку при образовании CO выделяется лишь 28% той энергии, которая выделяется при образовании CO₂.

Анализ рисунков 2-3 показывает, что характер и картина образования двуокиси углерода CO₂ и окиси углерода CO различна. Пик максимальных значений для концентрации CO приходится на область расположения горелочных устройств. Это связано с интенсивным физико-химическим взаимодействием между углеродом топлива, кислородом окислителя и повышенными значениями температуры в этой области. Значения концентраций оксида углерода CO для полидисперсного факела меняются на всей протяженности топочного пространства в зависимости от высоты топки (рисунок 2). На выходе из камеры сгорания топочное пространство обеднено кислородом, химические процессы образования оксида углерода CO затухают, но именно в этой области происходит восстановление CO₂ из CO, соответственно концентрация CO₂ увеличивается (рисунок 3).

На выходе из топочной камеры средние и максимальные значения концентрации двуокиси углерода для полидисперсного факела составляют 0,1876 и 0,1988 кг/кг, а значения оксида углерода $1,35 \cdot 10^{-4}$ кг/кг и $7,07 \cdot 10^{-4}$ кг/кг соответственно.

Оксиды азота: NO, NO₂, N₂O₃, N₂O₄, N₂O₅ – результат взаимодействия азота с кислородом. Эти оксиды относятся к вредным веществам. Около 40% от общего количества выбрасываемых в атмосферу оксидов азота приходится на долю тепловых электростанций. В топках при горении топлива образуется 95-99% монооксида азота NO и 1-5% более токсичного диоксида азота NO₂.

Картина распределения минимальных, средних и максимальных значений концентрации NO и NO₂ полидисперсного факела по высоте топочного пространства представлена на рисунках 4, 5. Как видно из представленных графиков наиболее интенсивное газообразование основных азотосодержащих компонентов происходит в области распространения потоков из горелок, т.е. там, где в максимальном объеме присутствуют топливо и окислитель, что соответствует реальной картине процесса в камере сгорания. При этом характер распределения концентраций в этих плоскостях неоднозначен, что говорит о сложном, нелинейном характере процесса образования указанных веществ в этой области.

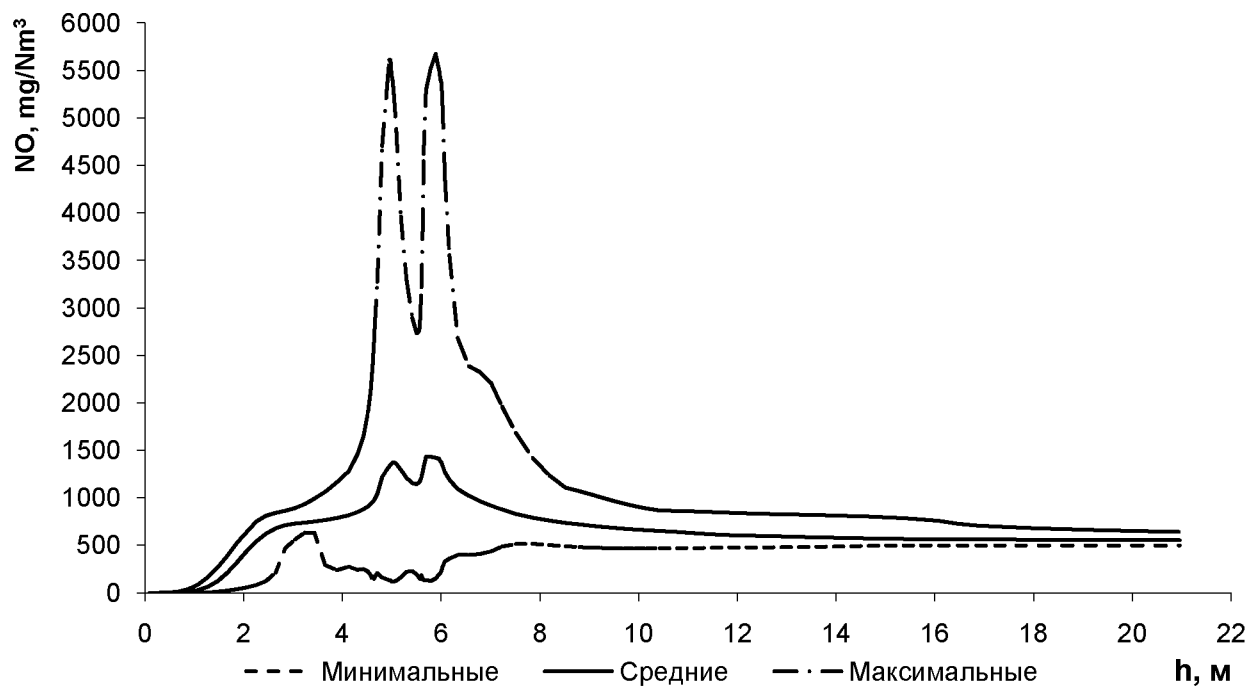


Рисунок 4 – График распределения концентрации NO для полидисперсного факела по высоте топочной камеры

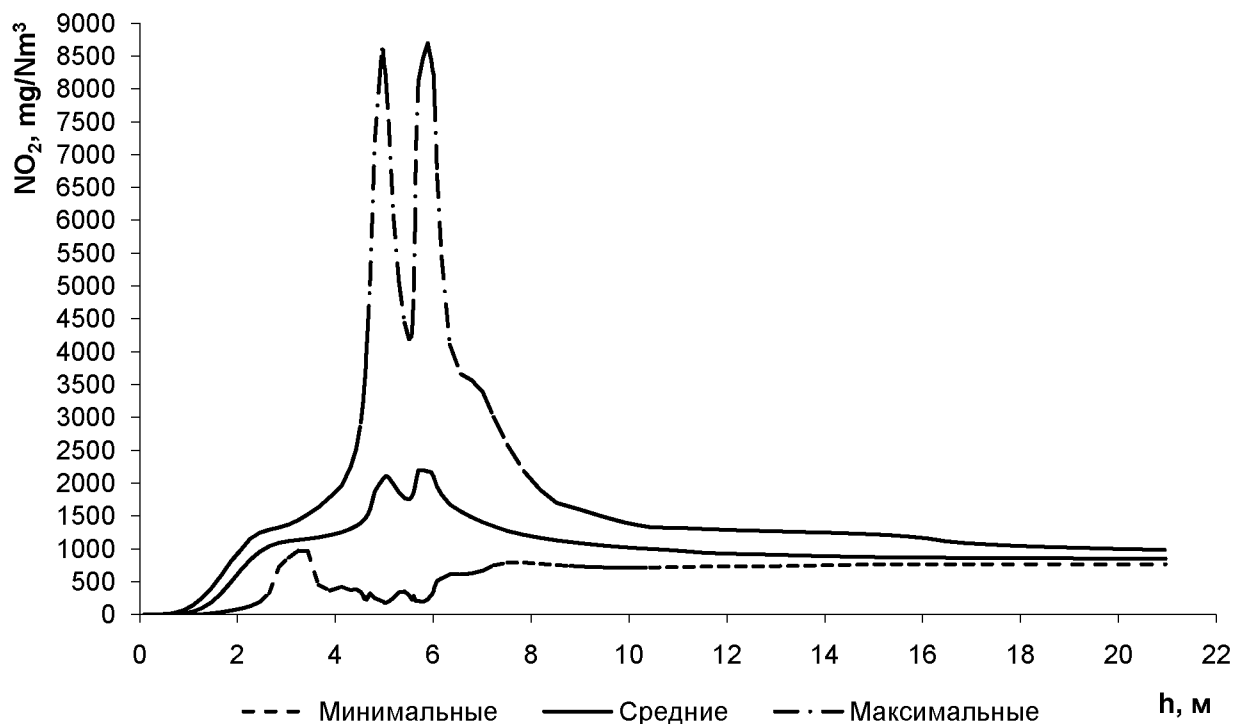


Рисунок 5 – График распределения концентрации NO₂ для полидисперсного факела по высоте топочной камеры

Выводы. Исследованы поля концентраций продуктов реакции CO, CO₂, NO и NO₂ при горении полидисперсного пылеугольного факела, имеющего следующее распределение угольных частиц по фракциям: d_p=10 мкм – 10%; d_p=30 мкм – 20%; d_p=60 мкм – 40%; d_p=100 мкм – 20%; d_p=120 мкм – 10%. Показано, что в области расположения горелок происходят основные реакции реагирования углерода с образованием окиси углерода, о чем свидетельствуют максимумы на кривых распределения CO и NO_x, что соответствует реальной картине процесса в камере сгорания. Картина распределения окиси углерода CO₂ не соответствует полю CO, что говорит об отличиях в процессе образования CO₂ и CO. Основное образование диоксида углерода CO₂ происходит по мере удаления от центра топки, что связано с догоранием CO.

На выходе из топочной камеры средние и максимальные значения концентрации двуокиси углерода для полидисперсного факела составляют 0,1876 и 0,1988 кг/кг, а значения оксида углерода 1,35·10⁻⁴ кг/кг и 7,07·10⁻⁴ кг/кг соответственно.

Средние значения оксида азота на выходе составляет 554,65 мг/Нм³, в то время как для диоксида азота – 850,39 мг/Нм³.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Carol Dahla, Karlygash Kuralbayeva. Energy and the environment in Kazakhstan // *Energy Policy*. – May 2001. – Vol. 29. – Issue 6. – P. 429-440.
- [2] Умбетова Ш.М. Техногенные отходы предприятий энергетики и пути их вторичной переработки // *Вестник КазНТУ*. – 2009. – № 4. – С. 72-75. [Электронный ресурс] – Режим доступа. – URL: <http://vestnik.kazntu.kz/?q=kk/node/189>
- [3] Askarova A., Bolegenova S., Bekmukhamet A., Maximov V., Beketayeva M., Ospanova Sh. Gabbitova Z.K. Investigation of turbulence characteristics of burning process of the solid fuel in BKZ 420 combustion chamber // *WSEAS Transactions on Heat and Mass Transfer*. – 2014. – Vol. 9. – P. 39-50.

REFERENCES

- [1] Carol Dahla, Karlygash Kuralbayeva. Energy and the environment in Kazakhstan. *Energy Policy*, **2001**, Vol. 29, Issue 6, p. 429–440 (in Eng.)
- [2] Umbetova Sh.M. Man-made waste of energy enterprises and ways of their recycling. *Vestnik KazNTU*, **2009**, № 4(74), p. 72–75. [Elektronnyi resurs] Rezhim dostupa. URL: <http://vestnik.kazntu.kz/?q=kk/node/189> (in Russ.)
- [3] Askarova A., Bolegenova S., Bekmukhamet A., Maximov V., Beketayeva M., Ospanova Sh. Gabbitova Z.K. Investigation of turbulence characteristics of burning process of the solid fuel in BKZ 420 combustion chamber. *WSEAS Transactions on Heat and Mass Transfer*, **2014**, Volume 9, p. 39-50 (in Eng.)

ЖАНУ ПРОЦЕССИ ҮДЕРІСІНДЕ ЗИЯНДЫ ШАҢГАЗДЫ ҚАЛДЫҚТАР КОМПОНЕНТТЕРІНІҢ ҚАЛЫПТАСУЫ

А. С. Аскарова, С. А. Болегенова, С. А. Болегенова,
З. Х. Габитова, А. Б. Ергалиева, М. Т. Бекетаева, Ш. С. Оспанова
Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы, Қазақстан

Тірек сөздер: жану, жану камерасы, жанарғылар, тозанды күй, шаңгазды қалдықтар, азот және көміртегі тотықтары, компьютерлік модельдеу

Аннотация. Осы жұмыстың мақсаты - күдділігі жоғары Екібастұз көмірінің жану кезіндегі зиянды шаң мен газтекті жану өнімдерінің концентрациялық өрістерін зерттеу. Осыған орай, зерттеу объектісі ретінде Алматы ЖЭО-3 (Қазақстан) орналасқан, жылжымайтын БКЗ-160 қазандығы таңдалды. Зерттеулер компьютерлік моделдеуде сандық әдістерді қолданатын FLOREAN программалық комплексі арқылы жүргізілді. Зерттеудің негізгі әдісі – бақылаушы көлем әдісі – жылу масса тасымалдаудың күрделі дифференциалдық теңдеулерін шешуге және есептік тордың түйіндерінде сандық мәліметтер алуға негізделген.

Қазандықтың жану камерасында полидисперстік көмірдің жануы барысында азот пен көміртек оксидтерінің концентрациясына зерттеу жүргізілді. Бөлшектердің мөлшері бойынша таралуы: d_p = 10 мкм - 10%; d_p = 30 мкм - 20%; d_p = 60 мкм - 40%; d_p = 100 мкм - 20%; d_p = 120 мкм - 10%. Есептік эксперименттер нәтижелері өтіп жатқан процестің сипатын, сонымен қатар минимал, максимал және орташа мәндерін анықтауға мүмкіндік берді. Негізгі химиялық реакциялар отын концентрациясы мен тотықтырғыш реагенттерінің әсерлесуші аймағында ең жоғары екендігі көрсетілді. Бұл жану камерасында процестің нақты сипатына сәйкес максимум CO және NO_x мәндеріне дәлел. Көміртегі диоксидінің бөліну үлгісі CO₂ және CO-нің қалыптасуында айырмашылықтарды көрсетеді, ол өріс CO бөлінуіне сәйкес келмейді. Көміртегі диоксиді CO₂ көміртегі тотығының қазандықтың центрінен қашықтай бере толық жануына байланысты түзіледі.

Поступила 27.01.2015 г.