

mekhanicheskogo teplogeneratora v avtonomnykh sistemakh teplosnabzheniia [The Use of mechanical heat generator in standalone heating systems]. *Inzhenerno-stroitel'nyi vestnik Prikaspiia* [Civil Engineering Bulletin of the Caspian], 2013, T. 1, № 3 (6), pp. 46–48.

3. Tsymbaliuk Iu.V. Avtonomnye sistemy teplosnabzheniia odnokvartirnykh i blokirovannykh zhilykh domov s primeneniem fazoperekhodnykh teploakkumulatorov [Autonomous system of heating of one-family and blocked houses with the use of heat storage phase-transitive]. *Perspektivy razvitiia stroitel'nogo kompleksa: Materialy VIII Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii professorsko-prepodavatel'skogo sostava, molodykh uchenykh i studentov* [Prospects of development of construction complex. Materials of the VIII International scientific and practical conference of teaching staff, young scientists and students], 2014, pp. 59–63.

4. Tsymbaliuk Iu.V. Analiticheskoe issledovanie teploobmena v sloiakh teploakkumuliruiushchego materiala fazoperekhodnykh teplovykh akkumulatorov [Analytical study of heat transfer in the heat storage layer of phase-transitive material of heat accumulators]. *Inzhenerno-stroitel'nyi vestnik*

Prikaspiia [Construction engineering Caspian journal of], 2015, № 1 (11), pp. 56–62.

5. Tsymbaliuk Iu.V., Geras'kin M.V. Osnovy rascheta fazoperekhodnykh teplovykh akkumulatorov dlia avtonomnoi sistemy teplosnabzheniia odnokvartirnykh i blokirovannykh zhilykh domov [Fundamentals of calculation of phase-transitive heat accumulators for Autonomous systems of a heat supply of single-family and blocked houses]. *Inzhenernye sistemy i sooruzheniia* [Engineering systems and facilities], 2014, T. 2, № 4 (17), pp. 71–75.

6. Tsymbaliuk Iu.V., Plotnikov V.V. Skhemnye resheniia primeneniia fazoperekhodnykh teplovykh akkumulatorov v avtonomnykh sistemakh teplosnabzheniia [Schematics of the phase-transitive use of heat accumulators in Autonomous heat supply systems]. *Fundamental'nye nauchnye osnovy sistem zhiznedeiatel'nosti i informatsionno-stroitel'nogo inzhiniringa v usloviakh pribrezhnykh zon: Materialy IV Mezhdunarodnogo nauchnogo foruma molodykh uchenykh, studentov i shkol'nikov* [Scientific basis of life systems and of information and construction engineering in the conditions of coastal zones. Materials of IV International scientific forum of young scientists, students and schoolchildren], 2015, pp. 107–110.

УДК 541.124

А.А. Чернов, П.А. Марьяндышев, Е.В. Панкратов, В.К. Любов
Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова
(г. Архангельск)

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТОПОЧНОГО ПРОЦЕССА НИЗКОЭМИССИОННОГО ВИХРЕВОГО КОТЛА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОГРАММНОГО ПАКЕТА ANSYS FLUENT

В работе представлены результаты моделирования топочного процесса низкоэмиссионного вихревого котельного агрегата E-220/100 (ПК-10), работающего на угольном топливе, с помощью программного пакета Ansys Fluent. Проведено сравнение данных, полученных в ходе промышленно-эксплуатационных испытаний низкоэмиссионных вихревых котлоагрегатов, с результатами их математического моделирования. Сравнение показало приемлемую сходимость для задач данного уровня.

Численное моделирование, математическая модель, котлоагрегат, аэросмесь, теплообмен, аэродинамика, уголь.

The work presents results of numerical simulation of the combustion process in low-emission vortical coal boiler with software package *Ansys Fluent*. The experimental data were compared with the data of mathematical modeling. The comparison showed an acceptable convergence of the objectives of this level which confirms the validity of a mathematical model.

Numerical simulation, mathematical model, boiler, air-fuel mixture, heat transfer, aerodynamics, coal.

Введение

В условиях резкого изменения ценовой политики продаж нефти и газа в развитых странах интерес к использованию твердого топлива как к основному мировому энергоносителю продолжает неуклонно повышаться. В России с окончанием «газовой паузы» и намечающимися тенденциями к более глубокой переработки нефти увеличивается доля потребления угля в теплоэнергетике. Тем не менее, вопрос развития новых энергоэффективных технологий сжигания углей в энергетике является наиболее актуальным на сегодняшний день.

Запасы угля в России достаточны, чтобы обеспечить всю тепловую и электрическую нагрузку в стране в ближайшие 50 лет. Но для того, чтобы угольное топливо было конкурентноспособным в сравнении с природным газом, ядерным и другими видами топлива, должны быть решены следующие

проблемы: уменьшение выбросов углекислого газа посредством повышения КПД, снижение выбросов оксидов азота и серы до безопасных уровней рассеивания в окружающей среде [1].

Одним из направлений комплексного повышения технико-экономических и экологических показателей работы котлов является их перевод на низкоэмиссионную вихревую технологию сжигания [2]–[4]. Основные принципы построения вихревого топочного процесса изложены в работах В.В. Померанцева и его школы [2]–[5] и были промышленно подтверждены при модернизации котлоагрегатов в РФ, Польше, США и Чехии.

Технология низкоэмиссионного вихревого сжигания открывает дополнительные возможности по организации совместного сжигания углей и биотоплив. Многократная принудительная циркуляция топливных частиц в вихревом потоке позволяет обеспе-

чить эффективное совместное сжигание угля и древесных опилок, при этом не требуется дополнительное измельчение биотоплива. Допустимая доля древесных опилок в топливной смеси составляет 20 % по тепловыделению. Также имеются исследования, при проведении которых в топочную камеру подавались размолотые пеллеты, произведенные из соломы, в пропорции по тепловыделению 6 и 12 % [7].

Для реализации совместного сжигания угольного топлива с древесным, в первую очередь, необходимо детально изучить топочный процесс котлоагрегата, работающего на угольном топливе и сделать сопоставление экспериментальных результатов и данных, полученных в процессе моделирования с помощью пакета Ansys Fluent.

В настоящее время существует много работ, посвященных численному моделированию котельных агрегатов, работающих на пилеугольном топливе [6], [8]. Однако большая часть авторов принимает результаты численного моделирования без должного подтверждения натурными экспериментами.

Основная часть

При разработке математической модели для анализа процессов, протекающих в топке низкоэмиссионного вихревого котлоагрегата, при помощи пакета программ для численного моделирования Ansys Fluent, в качестве объекта моделирования был выбран котел ПК-10 мощностью 157 МВт, предназначенный для сжигания пилеугольного топлива. Котельный агрегат установлен на местной теплоэлектроцентрали Северодвинской ТЭЦ-1 (СТЭЦ-1) в Архангельской области. Котельный агрегат с естественной циркуляцией, П-образной компоновки с призматической топкой размерами по осям труб 7,6×9,8 м, с сухим шлакоудалением. В топочной камере котлоагрегата установлены четыре горелочных устройства. Каждая горелка имеет четырехъярусный выход в топку. Причем нижний ярус наклонен вниз на 25°, а каждый следующий расположен на 5° более полого. Над соплами аэросмеси в верхней части расположены сопла трех ярусов вторичного воздуха. Верхний ярус – горизонтальный, два нижних наклонены вниз на 10°. Все элементы горелочного блока расположены на одной вертикальной оси и направлены тангенциально к воображаемой окружности в центре топки. В шлаковом бункере размещается устройство нижнего дутья, состоящее из сопла и дефлектора. Струя воздуха из сопла поступает на нижнюю кромку дефлектора, двигаясь вдоль которого меняет свое направление и выходит в одной полутопке вдоль фронтального, а в другой вдоль заднего ската холодной воронки (рис. 1).

Отбор угольной пыли для исследования теплотехнических характеристик и гранулометрического состава проводился из промежуточного бункера с помощью специальных устройств, в соответствии с требованиями ГОСТ 10742. Теплотехнические характеристики угольного топлива (уголь Интинского месторождения), подаваемого в топочную камеру котельного агрегата: влажность на рабочую массу $W^r = 11,5\%$; зольность на рабочую массу $A^r = 28,8\%$; выход летучих на горючую массу $V^{daf} = 40\%$; низ-

шая теплота сгорания на рабочую массу $Q_i^r = 16,87$ МДж/кг. Элементный состав топлива на рабочую массу: $C^r = 44,2\%$; $H^r = 2,9\%$; $O^r = 8,6\%$; $N^r = 1,5\%$; $S_{ор+к}^r = 2,6\%$.

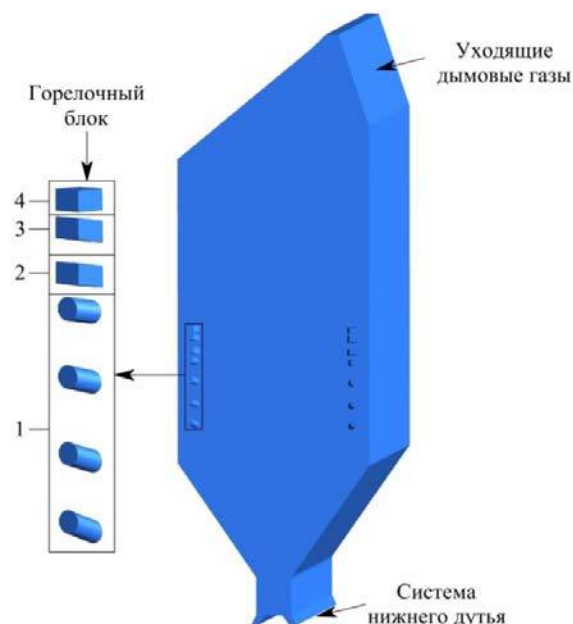


Рис. 1. Схема топочной камеры котельного агрегата: 1 – пилеугольные сопла; 2 – первый ярус вторичного воздуха; 3 – второй ярус вторичного воздуха; 4 – третий ярус вторичного воздуха

Гранулометрический состав, определенный ситовым методом, приведен в табл. 1.

Таблица 1

Гранулометрический состав интинского угля перед его подачей в топку

№ сита n	Размер ячейки, x , мкм	Количество остатка на сите g , г	Фракционный остаток на сите F , %	Полный остаток на сите (опыт) $R_{оп}$, %	Полный остаток на сите (расчет) R_p , %
1	1000	0,035	0,03	0,03	0
2	500	0,131	0,09	0,12	0,12
3	250	0,448	0,32	0,44	2,11
4	125	7,399	5,29	5,72	10,82
5	63	30,347	21,68	27,40	27,51
6	45	30,117	21,51	48,91	37,24
Дно	0	71,52	51,09	100	100

Коэффициенты полидисперсности и коэффициент, характеризующий тонкость гранулометрического состава, составили: $n = 0,794$; $b = 0,048$.

Результаты моделирования показали, что на выходе из горелочных устройств в топочной камере

наблюдаются высокие температуры и скорости потоков. Это можно объяснить тем, что гранулометрический состав угольной пыли преимущественно тонкодисперсный. При попадании в топочную камеру угольной пыли происходят процессы прогрева, выхода и воспламенения летучих веществ и сгорания коксовой основы. Тангенциальное расположение горелок приводит к формированию вихревого движения газов в топочной камере. В вихревом потоке происходит наиболее интенсивное выгорание топлива и формируется ядро горения. Максимальные температуры газов в топочной камере находятся на уровне четвертого яруса горелок и составляют 1676 °С, где происходит активное взаимодействие вторичного воздуха с горючими компонентами топлива (рис. 2 а).

В нижней части топочной камеры котельного агрегата и на уровне четвертого яруса горелок наблюдается избыток кислорода (рис. 2 б). Это объясняется

организацией схемы подачи воздуха: наличием нижнего дутья и вторичного воздуха.

В зоне активного горения (на уровне 2 яруса горелок) наблюдаются минимальные концентрации газообразных горючих компонентов (CO и H_2). Это связано с тем, что в этой зоне высокие температуры, порядка 1400 °С и большая часть летучих веществ при этой температуре уже выгорела. В то же время в области скатов холодной воронки концентрация летучих высокая, что связано с осаждением крупных частиц топлива и выделением из них газообразных горючих компонентов (рис. 2 г, д).

Тангенциальное расположение горелочных устройств приводит к образованию вихревого движения угольных частиц в объеме топочной камеры. Вылетающие из сопел с большой скоростью частицы движутся тангенциально с уклоном в область топочной воронки. За счет зоны пониженного давления в центральной части топки образуется обратный

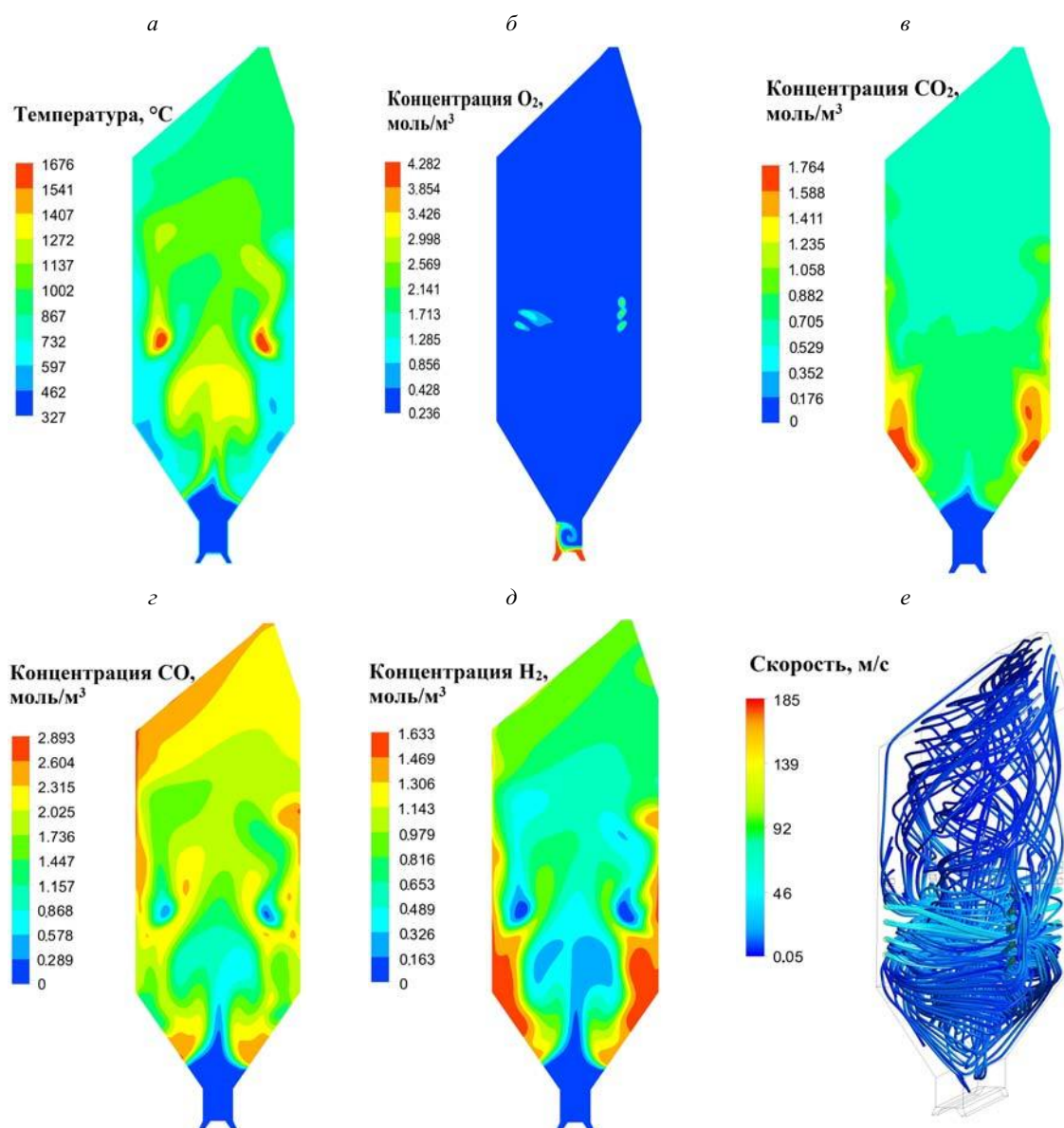


Рис. 2. Распределение температур (а), концентраций O_2 (б), CO_2 (в), CO (г), H_2 (д) по продольному сечению топочной камеры и траектории движения частиц в объеме топочной камеры (е)

вихрь, который затягивает мелкие частицы топлива вниз топки. Крупные частицы угольного топлива осаждаются на скатах топочной воронки, откуда за счет системы нижнего дутья вновь поступают в зоны активного горения, где происходит их дожигание (рис. 2 е).

Экспериментальное определение температур в топочной камере котлоагрегата, модернизированного на низкоэмиссионную вихревую технологию сжигания, проводилось с помощью пирометра (testo 830-T2) через смотровые лючки (рис. 3).

Анализ экспериментальных и расчетных данных по температурам внутри топочной камеры показал, что расхождения между ними в среднем составляют $\pm 10\%$ (табл. 2). Данное расхождение, в первую очередь, связано с погрешностями, возникающими при выполнении экспериментальных замеров.

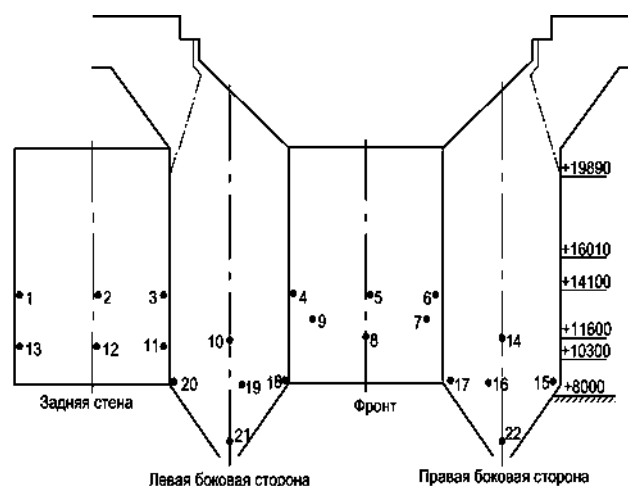


Рис. 3. Точки замеров температур

Таблица 2

Распределение температур на расстоянии 3 м от экранных поверхностей топочной камеры ПК-10

№ точки замера	Температура, °C	
	Экспериментальные данные	Данные численного моделирования
1	1000	1144
2	1180	937
3	1100	1051
4	870	1009
5	1090	839
6	1027	1216
7	940	1329
8	1239	1265
9	960	1145
10	1180	703
11	1095	663
12	1250	1373
13	-	647
14	965	885
15	940	619
16	1020	761
17	1032	623
18	980	599
19	-	927
20	950	622
21	890	1331
22	830	1397

Таблица 3

Сравнение результатов численного моделирования и экспериментальных данных

Показатель	Экспериментальные данные	Данные моделирования
Температура на выходе из топочной камеры (в плоскости 4-го ряда труб фестона), °C	980	947
Избыток воздуха в режимном сечении	1,214	1,230
Концентрация окислов азота, мг/м³	273	226
Потери тепла с механическим недожогом, %	1,21	1,08

Выводы

Сравнение результатов численного моделирования с экспериментальными данными, полученными при проведении промышленно-эксплуатационных испытаний котлоагрегата, показало приемлемую сходимость расчетных и опытных данных (табл. 2, 3), что подтверждает адекватность реализованной математической модели. Экспериментально полученное среднее значение потери тепла с механическим недожогом топлива за год эксплуатации для трех котлоагрегатов ПК-10 СТЭЦ-1, модернизированных на низкоэмиссионную вихревую схему сжигания, составило 1,21 %. По результатам моделирования получено значение данной тепловой потери 1,08 %. Расхождение составляет 10,7 %, что является приемлемым для задач данного уровня.

Литература

1. Гиль А.В., Старченко А.В., Заворин А.С. Применение численного моделирования топочных процессов для практики перевода котлов на непроектное топливо. Томск, 2011.
2. Любов В.К., Любова С.В. Повышение эффективности энергетического использования биотоплив. Архангельск, 2010.
3. Пат. 2067724 Российская Федерация. Низкоэмиссионная вихревая топка / Ф.З. Финкер, Д.Б. Ахмедов, И.Б. Кубышкин. – патентообладатель МГВП «Политехэнерго» № 94045164/06, заявл. 29.12.1994; опубл. 10.10.1996.
4. Пат. 2154234 Российская Федерация. Топка / Ф.З. Финкер, И.Б. Кубышкин, Ю.П. Бахтинов. – патентообладатель МГВП «Политехэнерго» № 99109062/06, заявл. 23.04.1999; опубл. 10.08.2000.
5. Померанцев В.В. Основы практической теории горения. Л., 1986.

6. Asotani T. Prediction of ignition behavior in a tangentially fired pulverized coal boiler using CFD // *Fuel*, 2008, Vol.87, pp. 482–490.

7. Backreedy R.I. Co-firing pulverized coal and biomass: a modelling approach // *Proceed Comb Inst*. 2005. Vol. 30. P. 2955–2964.

8. Mando M. Pulverized straw combustion in a low-NOx multifuel burner: modelling the transition from coal to straw // *Fuel*. 2010. Vol. 89. P. 3051–3062.

References

1. Gil' A.V., Starchenko A.V., Zavorin A.S. *Primenenie chislennogo modelirovaniia to-pochnykh protsessov dlia praktiki perevoda kotlov na neproektnoe toplivo* [The use of numerical simulation of combustion processes for the practice of translation in the non-project fuel boilers]. Tomsk, 2011.
2. Liubov V.K., Liubova S.V. *Povyshenie effektivnosti energeticheskogo ispol'zovaniia biotopliv* [Improving the energy efficiency of the use of biofuels]. Arkhangel'sk, 2010.
3. Finker F.Z., Akhmedov D.B., Kubyshkin I.B. *Nizkoemissionnaia vikhrevaia topka* [Low-emission swirl burner]. Patent RF, no. 2067724.
4. Finker F.Z., Kubyshkin I.B., Bakhtinov Iu.P. *Topka* [Furnace]. Patent RF, no. 2154234.
5. Pomerantsev V.V. *Osnovy prakticheskoi teorii gorenii* [Basics of practical combustion theory]. Leningrad, 1986.
6. Asotani T. Prediction of ignition behavior in a tangentially fired pulverized coal boiler using CFD. *Fuel*, 2008, Vol. 87, pp. 482–490.
7. Backreedy R.I. Co-firing pulverized coal and biomass: a modelling approach. *Proceed Comb Inst*, 2005, Vol. 30, pp. 2955–2964.
8. Mando M. Pulverized straw combustion in a low-NOx multifuel burner: modelling the transition from coal to straw. *Fuel*, 2010, Vol. 89, pp. 3051–3062.