Теплофізичні основи енергетичних процесів

УДК 662.93

DOI: 10.33070/etars.3.2020.03

Нехамин М.М., канд. техн. наук, ORCID: 0000-0003-3679-321X
Інститут угільних енерготехнологій НАН України, Київ
ул. Андреевская, 19, 04070 Київ, Україна, e-mail: ceti@i.kiev.ua

Моделирование программой ANSYS FLUENT процессов в топке котла ТПП-210А

При помощи программы ANSYS FLUENT выполнено трехмерное численное моделирование процессов сжигания антрацита в топке котла ТПП-210А с жидким шлакоудалением. Исходные данные для расчета (расходы компонентов, состав и теплота сгорания угля) взяты из паспорта котла для номинального режима работы. Учтены присосы воздуха в топку. В качестве граничных условий на стенках топки заданы их термические сопротивления, значения которых определены по результатам позонного расчета топки нормативным методом. Использованы $k-\epsilon$ -модель турбулентности в модификации *realizable*, *non-premixed combustion* модель горения частиц в *single mixture fractions* формулировке, *discrete phase model* движения угольных частиц, *P-1*-модель излучения, *two-competing-rates* модель выхода летучих, *kinetics/diffusion-limited* модель горения угля. Полученные распределения плотностей теплового потока и температур поверхности стенок («загрязнений») в пределах каждой из зон существенно неравномерны, что подтверждает оправданность использованного типа граничного условия на стенках. Изменение по высоте топки среднemasовой температуры потока, плотностей теплового потока у стенки, распределение механического недожога топлива по высоте топки по результатам моделирования сравниваются с данными известного экспериментального исследования Шагаловой С.Л. и Шницера И.Н. процессов в рассматриваемом котле, а также с данными позонного расчета котла нормативным методом. На этом основании сделан вывод об удовлетворительных результатах моделирования. Библ. 12, рис. 7, табл. 3.

Ключевые слова: ANSYS FLUENT, моделирование, горение, уголь, топка котла.

Енергетические котлы для сжигания ископаемого топлива, прежде всего угольного, выработки водяного пара и последующего преобразования его энергии в электрическую относятся к основному оборудованию существующих тепловых электростанций. В них реализуется комплекс процессов распыления топлива, его перемешивания с воздушным окислителем, сжигания горючей массы, эвакуации зольной части топлива, утилизации тепла. Обеспечение достаточной эффективности этих процессов и их совершенствование с соблюдением экологических нормативов возможно только на основе глубокого понимания многочисленных взаимосвязей, описываемых системами уравнений теп-

ло- и массообмена, физических и химических превращений в топливе и окислителе. Достижение более высокого уровня такого описания стало возможным благодаря развитию электронно-вычислительной техники и соответствующего программного обеспечения. Поэтому дальнейшее развитие, освоение и применение численного моделирования теплоэнергетических процессов в топках котлов чрезвычайно актуально.

В известных работах применительно к процессам в топках пылеугольных котлов изучаются и уточняются модели выхода летучих угля [1], отложения дисперсных частиц на стенках топки [2], особенности моделей турбулентности [3], выполняется комплексное изучение процессов [4,

5]. В некоторых случаях при этом используется известная программа ANSYS FLUENT для моделирования процессов тепло- и массообмена, включая горение твердого топлива [1, 2, 5].

Применение численного моделирования к процессам в различных котлах, работающих на других видах топлива или при иных условиях, остается актуальным, поскольку любые предполагаемые конструктивные или режимные изменения, без которых не может развиваться энергетика, проще и дешевле предварительно апробировать на моделях. Разумеется, для этого необходимо располагать подтверждениями достаточной точности результатов использования таких моделей. С этой целью в данной работе выполнен расчет в программе ANSYS FLUENT процессов в двухкамерной топке котла ТПП-210А с жидким шлакоудалением, работающей на пыли антрацита (АШ). Ниже изложены исходные данные, отдельные методические вопросы и приведены основные результаты расчета, выполнено их сопоставление с известными экспериментальными или независимыми расчетными данными.

Исходные данные для расчета базируются на паспортных данных котла ТПП-210А Трипольской ТЭС и нормативном методе расчета [6]. Геометрия расчетной области топки двухкамерного котла с жидким шлакоудалением (один корпус) приведена на рис.1.

Для построения геометрии расчетной области и расчетной сетки использована программа Gambit. Расчетная область, ограниченная стенками и поверхностями входов компонентов топлива и выхода, разбита на 5 зон. 1-я зона (предтопок) с ошпорованными стенками оснащена шестью горелками, в которые подаются аэросмесь и вторичный воздух, 5-я зона оканчивается выходом, совпадающим, в соответствии с рекомендациями [6], с поверхностями ширм. К поверхности стенок 1-й зоны отнесены и отверстия выхода шлака. Моделируемые части горелок выполнены короткими для сокращения объема расчетов. Для учета присосов наружного воздуха в топку геометрия расчетной области включает также места входа этого воздуха (на рис.1 не показаны). В 1-й зоне они смоделированы как кольцевые щели шириной 0,1 м вокруг горелок, в начале 2-й и 3-й зон — как щели высотой 0,15 м во фронтальной и тыльной стенках, в начале 5-й зоны — в тыльной стенке. В качестве граничных условий на входах задавались параметры воздуха и угольной пыли (табл.1), на выходе — атмосферное давление.

Здесь углы крутки указаны относительно осевых направлений горелок. На-

Рис.1. Схема расчетной области топки котла ТПП-210А.

правление крутки для горелок 1-й и 4-й — левое, для остальных — правое. Расход угля принят по паспорту котла при номинальной нагрузке, по этим же данным принята температура вторичного воздуха. Суммарный расход воздуха, согласно рекомендациям [6], соответствует значению коэффициента избытка окислителя на выходе топки $\alpha_T = 1,2$, в том числе по присосам $\alpha_{пр} = 0,05$. При распределении расходов между аэросмесью и вторичным воздухом использованы рекомендации [7] для рассматриваемого котла. Расходы присосов воздуха распределены по зонам поровну.

Определенную проблему представляла формулировка граничных условий на стенках топки. Выполненный (Рохманом Б.Б.) позонный расчет топки нормативным методом дал, в частности, значения степени черноты стенок (0,68 и 0,75 для ошпорованной и неошпорованных зон), осредненных по поверхностям зон температур поверхностей стенок (точнее, поверхностей загрязнений на стенках) $T_{ст.ср}$ и плотностей теплового потока $q_{ст.ср}$ у стенки. Однако попытки выполнить расчет топки с использованием граничных условий на стенках в виде температур поверхности зон не давали достаточно удовлетвори-

Таблица 1. Параметры на входах

Воздух, угольная пыль	Расход воздуха, кг/с	Расход угля, кг/с	T, К	Крутка, град.
Аэросмесь	6,642/39,852	2,82/16,917	387	45
Центральный воздух	0,750/4,500	0/0	303	0
Сбросный горячий	—/34,186	0/0	303	0
Вторичный воздух	21,466/128,68	0/0	663	60
Присосы	0/7,022	0/0	303	0
Итого	28,088/175,538	2,82/16,917	—	—

Примечание. В числителе — на горелку, в знаменателе — на топку.

тельных результатов. Мы объясняли это большой (подтверждаемой результатами последующих расчетов) неравномерностью фактического распределения плотности теплового потока по поверхностям стенок зон и соответствующей неравномерностью температуры поверхности стенок. Видимо, более адекватным граничным условием может служить не температура поверхностей стенок, а их тепловое сопротивление.

Программа ANSYS FLUENT предусматривает возможность такого задания граничного условия, причем даже не требует корректировки сеточной модели (то есть выделения стенок определенной толщины и создания в них расчетной сетки). Эта возможность реализуется заданием при формулировке задачи толщины стенки и теплопроводности ее материала, а также температуры на наружной стороне стенки, что учитывается в программе дополнительным аналитическим решением одномерного (по нормали к стенке) уравнения.

В качестве температуры внешней поверхности стенки использована температура теплоносителя (пара или воды) $T_{\text{пар.ср}}$, протекающего в экранях. Тем самым в значения эффективного теплового сопротивления стенок включено сопротивление пограничного слоя теплоносителя. При этом мы оперировали средней температурой теплоносителя в различных участках стенок (экранов), которую оценивали по данным паспорта котла и его гидравлической схеме.

Эффективные тепловые сопротивления $R_T = (T_{\text{ст.ср}} - T_{\text{пар.ср}}) / q_{\text{ст.ср}}$ для разных стенок зон составили от 0,0031 до 0,0064 ($\text{м}^2 \cdot \text{К}$)/Вт. Лучшее соответствие опытным данным получено при уменьшенных на 20 % значениях для неошпированных зон. Параметры граничных условий приведены в табл.2.

Процесс горения угольных частиц в программе ANSYS FLUENT моделируется с учетом состава рабочей массы угля, элементного состава, теплоты сгорания и распределения частиц по размерам. В наших расчетах на основании данных [7] для рассматриваемого котла принято значение показателя полидисперсности в распределении Розин-Роммлера, равное 1,09, а также остатки на ситах R_{90} и R_{200} — 8 и 0,2 %. При этом значение «среднего» размера частиц $d_{\text{ср}}$ составляет 40 мкм. Состав АШ, принятый в соответствии с [6], приведен в табл.3.

Таблица 2. Параметры тепловых граничных условий на стенках зон

Параметр	Зона 1	Зона 2	Зона 3	Зона 4	Зона 5
$T_{\text{пар.ср.}}, \text{К}$	615	655	679	702	714
$R_T, (\text{м}^2 \cdot \text{К})/\text{Вт}$	0,00635	0,00250	0,00278	0,00310	0,00354

Таблица 3. Состав и свойства угля АШ

Рабочая масса, %				Элементный состав DAF, %				
VP	AP	WP	C(s)	C	H	N	S	O
4	19	7,5	69,5	92,52	1,97	0,79	2,13	2,59

Примечание. Q_p — 24,78 МДж/кг.

Программа предусматривает возможность учета отличия полного количества летучих в угле, включающего высокотемпературный выход летучих, от значения VP, даваемого стандартным анализом. В расчетах для АШ принималось соотношение этих количеств летучих, равное 2,4 [8].

В расчете использованы k - ϵ -модель турбулентности в модификации *realizable, non-premixed combustion* модель горения частиц в *1 mixture fractions* формулировке, *discrete phase model* движения угольных частиц, P-1-модель излучения, *two-competing-rates* модель выхода летучих, *kinetics/diffusion-limited* модель горения угля.

Поскольку в программе ANSYS FLUENT модель горения частиц [9] несколько отличается от используемой в отечественных источниках [10], задание констант скорости горения (диффузионной константы C_1 и предэкспоненциального фактора C_2), соответствующих значениям, приводимым в отечественной литературе коэффициенту скорости диффузии и предэкспоненциальному множителю k_0 , потребовало отдельного рассмотрения [11]. Правда, и значение k_0 тоже не вполне однозначно: автор [12] связывает его величину с энергией активации, но, по данным исследований разных авторов, вид такой связи существенно различается. Например, для антрацита при $E = 140$ МДж/кмоль значение k_0 изменяется почти на 2 порядка (от $5,2 \cdot 10^3$ до $2,2 \cdot 10^5$).

Рис.2. Поля температур (слева) и интенсивности выгорания угля (справа) в вертикальном сечении топки по осям 2-й и 5-й горелок. Белое поле на правом рисунке — область превышения верхнего предела шкалы.

м/с). Это определило необходимость варьировать при моделировании значения k_0 ; наиболее удовлетворительный в целом результат соответствует значению k_0 , среднему между данными Померанцева В.В. и Шестакова С.М., то есть определяемому соотношением $\lg k_0 = 1,614 + 0,0201 E$ ($k_0 = 2,69 \text{ e}^4 \text{ м/с}$, $C_2 = 0,0292 \text{ с/м}$).

Результаты моделирования

Основные результаты расчета процессов в топке котла ТПП-210А в номинальном нагрузочном режиме приведены на рис.2–4.

Результаты моделирования подтверждают большие (отмеченные выше) неравномерности распределения параметров не только по высоте топки, но и в горизонтальных сечениях, а также по поверхностям стенок даже в пределах каждой из зон.

Результаты моделирования сравниваются с результатами нормативного расчета и данными экспериментального исследования Шагаловой С.Л. и Шнигера И.Н. [7] процессов в топке котла ТПП-210А при его работе на антраците с 90 %-й

Рис.3. То же в горизонтальном сечении топки на высоте осей горелок.

Рис.4. Температура поверхности стенок (слева) и плотности теплового потока у стенки (справа).

Рис.5. Сопоставление изменения по высоте топки среднemasовых температур газовой фазы по результатам моделирования и по экспериментальным данным [7]

Рис.6. Сопоставление изменения по высоте топки осредненных по поверхностям стенок зон плотностей теплового потока у стенки с экспериментальными данными [7] и данными расчета нормативным методом.

Рис.7. Сопоставление изменения по высоте топки механического недожога топлива по результатам моделирования и по экспериментальным данным [7].

нагрузкой. Приведенные в [7] экспериментальные результаты при нагрузках 77 и 65 % не очень отличаются от параметров при 90 %-й нагрузке. Это позволяет предполагать, что изменение нагрузки от 90 до 100 % тоже мало повлияло бы на результаты. Поэтому в данном сопоставлении игнорируется различие по нагрузке для условий моделирования и рассматриваемого эксперимента. Оценивая представленное на рис.5–7 сравнение, можно отметить удовлетворительное соответствие результатов моделирования независимым данным.

Выводы

Подводя итог изложенному, представляется возможным оценить результаты выполненного моделирования процессов в топке котла ТПП210А при помощи программы ANSYS FLUENT как достаточно удовлетворительные.

Список литературы

1. Alvarez, L., Gharebaghi, M., Jones, J.M. et al. (2013). CFD modeling of oxy-coal combustion: Prediction of burnout, volatile and NO precursors release. Applied Energy, Elsevier, 104 (C), 653–665.
2. Riccio, C., Simms, N.J., Oakey, J.E. (2019). Deposition prediction in a pilot scale pulverized fuel-fired combustor. Fuel, 253, 1204–1213.
3. Ryoichi Kurose. (2009). Numerical Simulations of Pulverized Coal Combustion KONA Powder and Particle Journal, 27, 144–156.
4. Troy Holland, Thomas H. Fletcher. (2017). A Comprehensive Model of Single Particle Pulverized Coal Combustion Extended to Oxy-coal Conditions. Energy Fuels, 31 (3), 2722–2739.
5. Madejski, P., Modlicski, N. (2018). Numerical investigation using two different CFD codes of pulverized- coal combustion process characteristic in an industrial power plant boiler. 13th International

Conference on Boiler Technology, Szcztyrk, Poland, 82, id. 01009.

6. Тепловой расчет котельных агрегатов (нормативный метод). Под ред. Н.В. Кузнецова. М. : Энергия. 1973. 295 с.

7. Шагалова С.Л., Шницер И.Н. (1976). Сжигание твердого топлива в топках парогенераторов. Л. : Энергия, 1976. 220 с.

8. Bin-Hang Yan, Chen-Xi Cao, Yan Cheng, Yong Jin, Yi Cheng (2014). Experimental investigation on coal devolatilization at high temperatures with different heating rates. Fuel, Vol. 117. Part B. pp. 1215–1222.

9. ANSYS FLUENT 14.5. Theory Guide, (2012) ANSYS Inc.

10. Хзмалян Д.М., Коган Я.А. Теория горения и топочные устройства. М. : Энергия, 1976. 488 с.

11. Нехамин М.М., Бондзик Д.Л. Параметры скорости горения при моделировании программой AN- SYS FLUENT процесса сжигания твердого топлива. Енерготехнології та ресурсозбереження. 2020. № 1. С. 41–45. DOI: 10.33070/etars.1.2020.05.

12. Основы практической теории горения. Под ред. В.В.Померанцева. Л. : Энергоатомиздат. 1986. 313 с.

Поступила в редакцию 30.06.20

Нехамін М.М., канд. техн. наук, ORCID: 0000-0003-3679-321X

Інститут вугільних енерготехнологій НАН України, Київ вул. Андріївська, 19, 04070 Київ, Україна, e-mail: ceti@i.kiev.ua

Модельовання програмою ANSYS FLUENT процесів у топці котла ТПП-210А

За допомогою програми ANSYS FLUENT виконано тривимірне числове моделювання процесів спалювання антрациту в топці котла ТПП-210А з рідким шлаковидаленням. Вихідні дані для розрахунку (витрати компонентів, склад та теплота згорання вугілля) взяті з паспорта котла для номінального режиму роботи. Враховано присоси повітря у топку. Як граничні умови на стінках топки задані їх термічні опори, значення яких отримані за результатами позонного розрахунку топки за нормативним методом. Використано $k-\epsilon$ -модель турбулентності у модифікації *realizable, non-premixed combustion* модель горіння частинок у *single mixture fractions* формулюванні, *discrete phase model* руху вугільних частинок, $P-1$ -модель випромінювання, *two-competing-rates* модель виходу летючих, *kinetics/diffusion-limited* модель горіння вугілля. Отримані результати розподілу щільності теплового потоку та температур поверхні стінок («забруднень») у межах кожної із зон істотно нерівномірні, що підтверджує виправданість використаного типу граничної умови на стінках. Зміна за висотою топки середньомасової температури потоку, щільності теплового потоку у стінки, розподілу механічного недопалу палива за висотою топки за результатами моделювання порівнюються з даними відомого експериментального дослідження процесів у розглянутому котлі, виконаних Шагаловою С.Л. та Шніцером І.Н., а також з даними позонного розрахунку котла за нормативним методом. На цій підставі зроблено висновок про задовільні результати моделювання. *Бібл. 12, рис. 7, табл. 3.*

Ключові слова: ANSYS FLUENT, моделювання, горіння, вугілля, топка котла.

Nekhamin M.M., *Candidate of Technical Sciences, ORCID: 0000-0003-3679-321X Coal Energy Technology Institute of NAS of Ukraine, Kiev*

19, Andriivska Str., 04070 Kiev, Ukraine, e-mail: ceti@i.kiev.ua

Design by Program ANSYS FLUENT Processes in Heating of Caldron of TPP-210A

Numerical modeling of processes in the furnaces of power boilers serves as a tool for assessing the impact of the proposed structural or operational changes on the ongoing processes and characteristics of the boiler. Using the ANSYS FLUENT program, three-dimensional numerical simulation of anthracite combustion processes in the furnace of a TPP-210A boiler with liquid slag removal was performed. The initial data for the calculation – component costs, composition and calorific value of coal – are taken from the boiler passport for the nominal operating mode. Air suction into the furnace has been taken into account. As the boundary conditions on the walls of the furnace, their thermal resistances are set, the values of which are determined by the results of the zone calculation of the furnace by the normative method. The turbulence model was used in the modification of a *realizable, non-premixed combustion* model of particle combustion in a *single mixture fractions* formulation, *discrete phase model* of the movement of coal particles, *P-1* emission model, *two-competing-rates* model of volatile output, *kinetics/diffusion-limited* model of coal combustion. Obtained as a result of the distribution of heat flux densities and wall surface temperatures («contaminants») within each of the zones is substantially uneven, which confirms the validity of the type of boundary condition used on the walls. The change in the height of the furnace of the mass-average temperature of the flow, the heat flux densities into the walls, the distribution of the mechanical underburning of the fuel along the height of the furnace according to the simulation results are compared with the data of a well-known experimental study of S.L.Shagalova and I.N.Shnitser processes in the boiler under consideration, as well as with the data of the zone calculation of the boiler by the normative method. On this basis, a conclusion was made about satisfactory simulation results. *Ref. 12, Fig. 7, Tab. 3.*

Keywords: ANSYS FLUENT, modeling, solid fuel, combustion, coal, boiler furnace.

References

1. Alvarez, L., Gharebaghi, M., Jones, J.M., Pour-kashanian, M., Williams, A., Riaza, J., Pevida, C., Pis, J.J., Rubiera, F. (2013). CFD modeling of oxy-coal combustion: Prediction of burnout, volatile and NO precursors release. *Applied Energy*, 104 (C), pp. 653–665.
2. Riccio, C., Simms, N.J., Oakey, J.E. (2019). Deposition prediction in a pilot scale pulverized fuel-fired combustor. *Fuel*, 253, pp. 1204–1213.
3. Ryoichi Kurose. (2009). Numerical Simulations of Pulverized Coal Combustion KONA Powder and Particle Journal, 27, pp. 144–156.
4. Troy Holland, Thomas H. Fletcher. (2017). A Comprehensive Model of Single Particle Pulverized Coal Combustion Extended to Oxy-coal Conditions. *Energy Fuels*, 31 (3), pp. 2722–2739.
5. Madejski, P., Modlicski, N. (2018). Numerical investigation using two different CFD codes of pulverized-coal combustion process characteristic in an industrial power plant boiler. 13th International Conference on Boiler Technology, Szczyrk, Poland, 82, id. 01009.
6. Teplovoi raschet kotel'nykh agregatov (normativnyi metod). Izdanie 2-e. Ed. N.V. Kuznetsov. Moscow : Energiya, 1973. 295 p.(Rus.).
7. Shagalova, S.L., Shnitser, I.N. Szhiganie tverdogo topliva v topkakh parogeneratorov. Leningrad : Energiya, 1976. 220 p. (Rus.).
8. Bin-Hang Yan, Chen-Xi Cao, Yan Cheng, Yong Jin, Yi Cheng (2014). Experimental investigation on coal devolatilization at high temperatures with different heating rates. *Fuel*, Vol. 117. Part B. pp. 1215–1222.
9. ANSYS FLUENT 14.5 Theory Guide, (2012) ANSYS Inc.
10. Khzmalyan, D.M., Kogan, Ya.A. (1976) Teoriya gorennya i topochnye ustroystva. Moscow : Energiya. 488 p. (Rus.).
11. Nekhamin M.M., Bondzyk D.L. (2020). Parametri skorosti gorennya pri modelirovanii programoi ANSYS FLUENT procesa sjigsnia tverdogo topliva. [Combustion Speed Parameters when Simulating by ANSYS FLUENT Program of Solid Fuel Combustion]. *Energotekhnologii ta resursoberezhennia*. [Energy Technologies and Resource Saving]. No.1. pp. 41–45. DOI: 10.33070/etars.1.2020.05. (Rus.).
12. Osnovy prakticheskoi teorii gorennya. Ed. V.V.Pomerantsev. Leningrad : Energoatomizdat, 1986. 313 p. (Rus.).

Received June 30, 2020