Теплофізичні основи енергетичних процесів

УДК 662.93

DOI: 10.33070/etars.1.2020.05

Нехамин М.М., канд. техн. наук, **Бондзик Д.Л.**, канд. техн. наук
Институт угольных энерготехнологий НАН Украины, Киев
ул. Андреевская, 19, 04070 Киев, Украина, e-mail: ceti@i.kiev.ua

Параметры скорости горения при моделировании программой ANSYS FLUENT процесса сжигания твердого топлива

Существующее различие моделей, используемых для описания скорости горения частиц твердого топлива и, соответственно, различие фигурирующих в них констант, определяет актуальность формулировки связи констант, известных из литературы, с параметрами, которые необходимо задавать в программах для CFD-моделирования теплоэнергетических процессов. Это, в частности, относится к моделированию горения твердого топлива в известной программе ANSYS FLUENT. На основе принятых допущений была разработана методика пересчета констант скорости реакции углерода коксового остатка угля с кислородом окислителя в параметры, необходимые для расчета горения частиц твердого топлива в пакете ANSYS FLUENT. Результаты расчетов показали, что выбранный подход дает небольшую погрешность скорости горения (~ 1 %), которую можно считать приемлемой. *Библ. 5, рис. 3.*

Ключевые слова: программа ANSYS FLUENT, моделирование, твердое топливо, горение, уголь, константы скорости.

При расчете процессов в топке котлоагрегата учитывается скорость выгорания твердых частиц. Этот параметр описывается в литературе разными моделями даже при одинаковом диффузионно-кинетическом подходе и для одной и той же реакции окисления частицы углерода кислородом воздуха. Соответственно различаются и критерии, характеризующие скорость горения. Поэтому для использования значений констант скорости горения, известных из отечественных источников, необходимо найти их связь с константами, используемыми в программах для CFD-моделирования. В работах [1–3] по моделированию сжигания твердого топлива в программе ANSYS FLUENT, к сожалению, вопрос нахождения констант скорости го-

рения не затрагивается. Данная работа направлена на восполнение этого пробела.

В программе ANSYS FLUENT используется кинетически-диффузионная модель Баума-Стрита, с помощью которой определяется скорость горения частицы угля [4]:

$$dm_p/dt = - (A_p \rho RT_0 Y_{ox} / \mu_{O_2}) (D_0^{-1} + \Re^{-1})^{-1}, \quad (1)$$

где m_p — масса частицы; A_p — площадь ее поверхности, m^2 ; ρ — плотность газовой фазы, kg/m^3 ; R — универсальная газовая постоянная, $J/(kmol \cdot K)$; T_0 — температура газовой фазы, K ; Y_{ox} — массовая доля кислорода в

потоке; μ_{O_2} — молекулярный вес кислорода, кг/кмоль; D_0 — коэффициент скорости диффузии, с/м; $\mathfrak{R}$ — коэффициент кинетической скорости, с/м;

$$D_0 = \{C_1 [(T_p + T_0)/2]^{0,75}\} / d_p, \quad (2)$$

где T_p — температура частиц; d_p — их размер.

$$\mathfrak{R} = C_2 e^{-(E/RT_0)}, \quad (3)$$

C_1 , C_2 , E — параметры, задаваемые для расчета.

Значения энергии активации E и предэкспоненциального фактора C_2 уравнения Аррениуса характеризуют конкретную марку угля или другого твердого топлива.

Из расчетов применительно к предтопку пылеугольного котла следует, что температура частиц обычно превышает локальную температуру газовой фазы на величину ΔT , составляющую несколько сот градусов. С учетом этого выражение (2) представим так:

$$D_0 = [C_1 (T_0 + \Delta T/2)]^{0,75} / d_p,$$

Выразив также в выражении (1) плотность газовой фазы из уравнения состояния совершенного газа, вместо (1) имеем:

$$\frac{dm_p}{dt} = - A_p p Y_{ox} (\mu / \mu_{O_2}) / (D_0^{-1} + \mathfrak{R}^{-1}), \quad (4)$$

где p — статическое давление в потоке; μ — молекулярная масса газовой фазы.

В отечественной литературе (см., напр., [5]) в кинетически диффузионном режиме скорость горения частицы выражается похожей на (4) зависимостью, но оперирующей иными параметрами:

$$\frac{dm_p}{dt} = - \beta A_p C_0 / (\alpha_k^{-1} + \alpha_d^{-1}), \quad (5)$$

где β — стехиометрический коэффициент (изменяющийся от 0,375 при образовании в реакции только CO_2 до 0,75 при реакции до CO); C_0 — объемная концентрация кислорода, кг/м³; α_k — кинетический коэффициент, м/с, может быть найден как $\alpha_k = k_0 e^{-(E/RT_0)}$ (здесь k_0 — предэкспоненциальный множитель); α_d — диффузионный коэффициент переноса, м/с

$$\alpha_d = Nu_d D / d_p.$$

где критерий Nu_d близок к 2; D — коэффициент диффузии кислорода к поверхности частицы, м²/с, $D = 0,18 \cdot 10^{-4} (T_0/273)^n$ (параметр $n = 1,5-2$, обычно принимают $n = 1,75$).

Выражая в (5) C_0 через массовую долю кислорода как $C_0 = \rho Y_{ox}$, где плотность ρ найдем из уравнения состояния совершенного газа, вместо (5) получим

$$\frac{dm_p}{dt} = - (\beta A_p \rho \mu Y_{ox}) / RT_0 (\alpha_k^{-1} + \alpha_d^{-1}). \quad (6)$$

Кинетику горения отечественных топлив характеризуют парой значений k_0 и E . Для нахождения параметров C_1 и C_2 модели [4] естественно принять подход, при котором кинетические и диффузионные составляющие обеих моделей взаимно приравняются, а значения E считаются одинаковыми.

Таким образом, находим

$$C_1 = [0,18 \cdot 10^{-4} \mu \beta Nu_d] / (R \cdot 273^{1,75}) \times [(1 + \Delta T/2 T_0)^{-1}]^{0,75}, \quad (7)$$

$$C_2 = \mu \beta k_0 / (R T_0). \quad (8)$$

Размерности этих параметров составляют: C_1 [с/К^{0,75}], C_2 [с/м], что совпадает с размерностями, найденными непосредственно из выражений (2), (3).

Для оценки влияния различных факторов на степень различия скоростей горения угольного кокса по моделям [4] и [5] выполнены вычисления по соотношениям (4) и (6) с использованием (7), (8) при вариации исходных параметров: $T_0 = 750-2500$ К, $d_p = 10-300$ мкм; $\beta = 0,375$ и $0,75$, $Y_{ox} = 0,05$ и $0,01$, $E = 140$ МДж/кмоль,

Рис.1. Сопоставление скоростей горения частиц угольных по моделям [4] и [5] при температуре частиц, превышающей температуру газовой фазы на 10 % и при их равенстве.

Рис.2. Корреляция скоростей горения частиц по моделям Хзмаяна и Ansys Fluent при трех значениях определяющей температуры и $\Delta T/T_0 = 0,1$.

$k_0 = 6,3 \cdot 10^4$ м/с, $E = 80$ МДж/кмоль, $k_0 = 4 \cdot 10^3$ м/с. Предполагалось, что $\Delta T/T_0 = 0,1$ или $0,0$. Из сопоставления скоростей горения частиц по рассматриваемым моделям (см. рис.1) следует, что без учета различия температур частиц и газовой фазы модели дают одинаковые результаты, а с учетом отличия T_p от T_0 скорость горения по модели ANSYS FLUENT снижается, при этом для принятого значения $\Delta T/T_0 = 0,1$ разброс относительно линейной аппроксимирующей зависимости невелик. Как следует из выражений (2) и (1), при пренебрежении отличием T_p от T_0 снижение скорости горения dm_p/dt обусловлено уменьшением расчетного коэффициента скорости диффузии D_0 .

При использовании выражений (7), (8) для вычисления значений C_1 и C_2 по значениям

кинетических констант модели [2] возникает то затруднение, что в (7) и (8) наряду с параметрами, которые можно считать постоянными в расчетной области, входят переменные: температуры газовой фазы T_0 и частиц T_p (или разность температур ΔT). Сохранение этих параметров в процессе преобразований обусловлено неполной идентичностью температурных зависимостей скоростей горения в моделях [4] и [5]. Чтобы обойти эту трудность, мы вводим постоянную температуру, которую можно назвать «определяющей», для использования вместо T_0 при вычислении C_1 и C_2 , а отношение $\Delta T/T_0$ также считаем неизменным. При расчете скорости горения, приведенной на рис.1, при вариации значений T_0 одна и та же температура использовалась в (2) и (3) и для вычисления C_1 и C_2 . Это возможно при расчете вручную, но неприемлемо при программном расчете, так как C_1 и C_2 должны быть заданы как числовые константы.

Корреляция скоростей горения по моделям [4] и [5] при нескольких значениях $T_{\text{опр}}$ показана на рис.2.

Как следует из этих результатов, удовлетворительное совпадение скоростей горения по этим моделям имеет место при $T_{\text{опр}}$, близком к 2000 К. Изменение среднего квадратичного значения отношения скоростей горения по рассматриваемым моделям

$$K = \{[(dm_p/dt) - \text{Флуент}] / [(dm_p/dt) - \text{Хзмаян}]\}_{\text{ср}}$$

от используемой определяющей температуры показано на рис.3.

Как следует из (7), (8), увеличение $T_{\text{опр}}$ по сравнению с T_0 вызывает увеличение параметра C_1 и уменьшение C_2 , что соответствует, как следует из (2), (3), росту D_0 и снижению $\mathcal{R}$. Это означает смещение режима горения частиц в диффузионную область.

Поскольку значение $\Delta T/T_0 = 0,1$ было использовано фактически произвольно, представляет интерес влияние принятого отклонения T_p от T_0 на различие результатов расчета по рассматриваемым моделям. Такая проверка при $T_{\text{опр}} = 2000$ К для $\Delta T/T_0 = 0,05$ и $0,15$ не дала заметного отличия от данных, показанных на рис.2. Это позволяет предполагать, что значения $T_{\text{опр}} = 2000$ К и $\Delta T/T_0 = 0,1$ могут использоваться как достаточно универсальные. Разумеется, в случаях, когда условия расчета резко отличаются от приведенных выше, такое допущение нуждается в дополнительной проверке и возможной корректировке.

Рис.3. Влияние принятого значения определяющей температуры на среднее отношение скоростей горения по моделям [4] и [5].

Выводы

На основе принятых допущений разработана методика пересчета констант скорости реакции углерода коксового остатка угля с кислородом окислителя, широко представленных в отечественной литературе, в параметры, необходимые для расчета горения частиц твердого топлива в пакете ANSYS FLUENT. Результаты расчетов показали, что выбранный подход дает небольшую погрешность скорости горения ($\sim 1\%$), которую можно считать приемлемой.

Список литературы

1. Жильцов Ю.В., Улшин В.В. Моделирование сжигания пылеугольного топлива в энергетическом котле БКЗ-500 с использованием программного комплекса ANSYS FLUENT. *Современные технологии. Системный анализ. Моделирование*. 2016. № 4. С. 150–154.
2. Фомичев А.С., Корецкий Д.А., Заворин А.С., Коняшкин В.Ф., Харченко В.В. Применение программных комплексов ANSYS Inc. в области разработки новых технологий для решения задач угольной энергетики. *VIII Всероссийская конференция с международным участием «Горение твердого топлива»*, 13–16 ноября 2012 г. Новосибирск (РФ), Новосибирск : Институт теплофизики им. С.С.Кутателадзе СО РАН. 2012. С. 100.1–100.6.
3. Мурко В.И., Риестерер А., Цецорина С.А., Федяев В.И., Карпенко В.И. Результаты численного моделирования процесса сжигания водоугольного топлива. *Ползуновский вестник*. 2011. № 2/1. С. 230–234.
4. ANSYS FLUENT 14.5. Theory Guide, ANSYS Inc. ANSYS Inc., 2012. 754 p.
5. Хзмалян Д.М., Коган Я.А. Теория горения и топочные устройства. М. : Энергия, 1976. 487 с.

Поступила в редакцию 09.12 19

Нехамін М.М., канд. техн. наук, **Бондзик Д.Л.**, канд. техн. наук
Інститут вугільних енерготехнологій НАН України, Київ
 вул. Андріївська, 19, 04070 Київ, Україна, e-mail: ceti@i.kiev.ua

Параметри швидкості горіння при моделюванні програмою ANSYS FLUENT процесу спалювання твердого палива

Існуюче відмінність моделей, що використовуються для опису швидкості горіння частинок твердого палива і, відповідно, відмінність констант, які у них фігурують, визначає актуальність формулювання зв'язку констант, відомих з літератури, з параметрами, які необхідно ставити у програмах для CFD-моделювання теплоенергетичних процесів. Це, зокрема, стосується моделювання горіння твердого палива за допомогою відомої програми ANSYS FLUENT. На основі прийнятих припущень було розроблено методику перерахунку констант швидкості реакції вуглецю коксового залишку вугілля з киснем окислювача на параметри, необхідні для розрахунку горіння частинок твердого палива у пакеті ANSYS FLUENT. Результати розрахунків показали, що вибраний підхід дає невелику похибку швидкості горіння ($\sim 1\%$), яку можна вважати прийнятною. *Бібл. 5, рис.3.*

Ключові слова: програма ANSYS FLUENT, моделювання, тверде паливо, горіння, вугілля, константи швидкості.

Nekhamin M.M., Candidate of Technical Sciences,
Bondzyk D.L., Candidate of Technical Sciences
Coal Energy Technology Institute of NAS of Ukraine, Kiev
19, Andriivska Str., 04070 Kiev, Ukraine, e-mail: ceti@i.kiev.ua

Combustion Speed Parameters when Simulating by ANSYS FLUENT Program of Solid Fuel Combustion

The existing difference in the models used to describe the burning rate of solid fuel particles, and, accordingly, the difference in the constants appearing in them, determines the relevance of the formulation of the relation between the constants known from the literature and the parameters that must be set in programs for CFD modeling of heat and power processes. This, in particular, relates to modeling the combustion of solid fuels in the well-known program ANSYS FLUENT. The paper outlines a possible approach to solving this problem. *Bibl. 5, Fig. 3.*

Keywords: program ANSYS FLUENT, modeling, solid fuel, combustion, coal, rate constants.

References

1. Zhiltsov Yu.V., Ulshin V.V. [Simulation of pulverized coal combustion in a BKZ-500 power boiler using the ANSYS FLUENT software package]. *Sovremennyye tehnologii. Sistemnyy analiz. Modelirovanie*. 2016. No. 4 (52), p. 150–154. (Rus.)
2. Fomichev A.S., Koretsky D.A., Zavorin A.S., Konyashkin V.F., Kharchenko V.V. [Application of software systems ANSYS Inc. in the field of developing new technologies for solving the problems of coal energy]. *VIII Vserossiyskaya konferentsiya s mezhdunarodnym uchastiem «Gorenie tverdogo topliva»*. 13–16 Nov. 2012. Novosibirsk : Institut teplofiziki im. S.S. Kutateladze SO RAN, 2012. pp. 100.1–100.6 (Rus.)
3. Murko V.I., Riesterer A., Tsetsorina S.A., Fedyaev V.I., Karpenok V.I. [Results of numerical modeling of the process of burning coal-water fuel]. *Polzunovsky Bulletin*. 2011. No. 2/1, pp. 230–234. (Rus.)
4. ANSYS FLUENT 14.5 Theory Guide, ANSYS Inc. ANSYS Inc. 2012. 754 p.
5. Khzmalyan D.M., Kogan Ya.A. [Theory of combustion and combustion devices]. Moscow : Energiya, 1976. 487 p. (Rus.)

Received December 9, 2019