УДК 662.76

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ МОДЕЛЕЙ ТУРБУЛЕНТНОСТИ И ВЫХОДА ЛЕТУЧИХ ВЕЩЕСТВ НА ПРОЦЕССЫ ВОСПЛАМЕНЕНИЯ И ГОРЕНИЯ ПЫЛЕУГОЛЬНОГО ТОПЛИВА

Кузнецов В.А.[1], Чернецкий М.Ю.[1,2], Дектерев А.А.[1,2]

[1] *Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия*
[2] *Институт теплофизики им.С.С.Кутателадзе СО РАН, Новосибирск, Россия*

Исследования выполнены при частичной поддержке РФФИ (грант № 15-38-20969 - а)*

АННОТАЦИЯ

Приведены результаты расчётных исследований влияния моделей турбулентности и моделей выхода летучих веществ на процессы воспламенения и горения пылеугольного топлива при закрутке потока на огневом стенде мощностью 2.4 МВт. Сравнение результатов математического моделирования с экспериментальными данными по горению пылеугольного факела показало, что модель турбулентности k-ε удовлетворительно описывает распределение основных характеристик потока при наличии процессов горения угольного топлива. Рассмотрение нескольких моделей выхода летучих веществ: одностадийное и двух стадийное приближение и модели основанной на структурных особенностей строения угольного вещества показало, что при выборе правильных значений кинетических констант, а также параметров, характеризующих структуру угольного вещества результаты расчетов согласуются с экспериментальными данными по горению угольной пыли при закрутке потока.

ВВЕДЕНИЕ

Математическое моделирование топочных устройств является на сегодняшний день одним из важнейших способов получения наиболее представительной информации об аэродинамике, локальном и суммарном теплообмене. Несмотря на большие успехи, достигнутые в развитии численного эксперимента, большое разнообразие, до конца не изученная структура угля и сложные химические процессы, происходящие при горении и газификации угольного топлива, не позволяют создать универсальных моделей. Поэтому остается актуальной задача поиска математических моделей с использованием существующих экспериментальных данных и создания на их основе комплексной модели для расчета топочных камер и поточных реакторов термохимической конверсии углей, что позволит более точно описать процессы горения и газификации пылеугольного топлива в топочно-горелочных устройствах.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Для верификации математической модели использованы экспериментальные данные по горению пылеугольного факела при наличии закрутки потока на огневом стенде мощностью 2.4 МВт [1]. Схема огневого стенда представлена на рисунке 1. Расходные характеристики при проведении экспериментальных исследований и использованные в расчетах составляли: первичный воздух (сухой) - 0.117 кг/с, температура - 343.15 К, средняя аксиальная скорость - 23.02 м/с, расход угля (сухого) - 0.073 кг/с.

Расход вторичного воздуха (сухого) - 0.745 кг/с, температура - 573.15 К, средняя аксиальная скорость - 43.83 м/с, средняя тангенциальная скорость - 49.42 м/с.

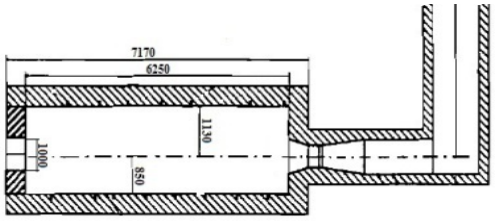


Рис. 1 Огневой стенд

Технический состав угля (мас. %, сухой): летучие вещества - 37.4, связанный углерод (fixed carbon) - 54.3, A^c - 8.3. Химический состав угля (мас. %, рабо-

© Кузнецов В.А., Чернецкий М.Ю., Дектерев А.А.

чая): $C^г$ - 80.36, $H^г$ - 5.08, $N^г$- 1.45, $S^г$ - 0.94, $O^г$ - 12.17. $Q_н$ = 32.32 МДж/кг.

Для численного моделирования турбулентного течения несжимаемой жидкости использовались уравнения Рейнольдса с учетом межфазного взаимодействия. Уравнения Рейнольдса замыкались с помощью следующих двухпараметрических моделей турбулентности: стандартной $k-\varepsilon$ модели турбулентности [2], $k-\omega$ SST модели Ментера [3].Модель k $k-\omega$ SST позволяет более корректно описать поведение потока в пристеночной области. В данных моделях напряжения Рейнольдса выражаются через тензор скоростей деформации и турбулентную вязкость. Также для описания турбулентого потока была рассмотрена модель переноса рейнольдсовых напряжений.

В настоящей работе для описания процессов движения частицы используется метод Лагранжа. Движение частицы описывается уравнениями динамики материальной точки с учетом силы сопротивления и силы тяжести. Учет турбулентности потока при движении частицы производится введением случайных флуктуаций скорости газа в уравнение движения для частиц. Решение уравнения переноса лучистой энергии базируется на P1 аппроксимации метода сферических гармоник для серой двухфазной двухтемпературной среды.

Процесс горения угольной частицы рассматривается в виде следующих последовательных этапов: испарение влаги из топлива, выход и горение летучих компонент и горение коксового остатка. Испарение влаги из топлива рассчитывается на основе значения количества водяного пара на поверхности частицы и в объеме.

Выбор модели выхода летучих веществ играет основную роль для правильной оценки процесса воспламенения угольной частицы. Существует достаточно много подходов к описанию данного процесса. В данной работе рассмотрены наиболее широко используемые модели выхода летучих веществ. Это одностадийное и двухстадийное приближение данного процесса, а также модель, основанная на структурных особенностей строения угольного вещества.

При одностадийном приближении, скорость выхода летучих веществ определятся по закону Аррениуса с эффективными кинетическими константами:

$$k_v = k_{v,0} e^{-(E_v / RT_p)}$$

где $k_{v,0}$ – предэкспоненциальный множитель процесса выхода летучих веществ, E_v – энергия активации процесса выхода летучих веществ. Значения констант взяты из работы [1] $k_{v,0} = 1.3 \cdot 10^7$ (1/с), $E_v = 1.67 \cdot 10^8$ (Дж/Кмоль).

При рассмотрении двухстадийного механизма, на основе модели Кобайаши [4], предполагается наличие двух разных по степени связанности с органической массой компонент летучих веществ, характеризующихся разными кинетическими параметрами:

$$\frac{m_v(t)}{(1-f_{w,0})m_{p,0} - m_a} = \int_0^t (\alpha_1 k_1 + \alpha_2 k_2) \exp(-\int_0^t (k_1 + k_2) dt) dt$$

Рассматривались следующие наборы констант:

- Kobayashi et al. [4]: α1 - 0.3, A1 - 2·105 (1/c), E1 - 1.05·108 (Дж/Кмоль), α2 – 1, A2 - 1.3·107 (1/c), E2 - 1.67·108 (Дж/Кмоль)
- Cho et al. [5]: α1 - 0.38, A1 - 3.7·105 (1/c), E1 - 7.4·107 (Дж/Кмоль), α2 – 0.8, A2 - 1.46·1013 (1/c), E2 - 2.5·108 (Дж/Кмоль)
- Ubhayakar et al. [6]: α1 - 0.292, A1 - 3.7·105 (1/c), E1 - 7.4·107 (Дж/Кмоль), α2 – 0.438, A2 - 1.46·1013 (1/c), E2 - 2.5·108 (Дж/Кмоль),

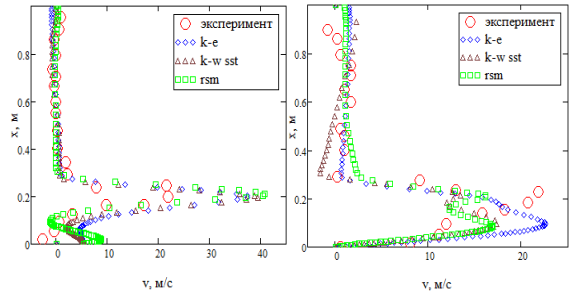
где α_1 и α_2 – коэффициенты, определяющие долю «низкотемпературных» и «высокотемпературных» летучих веществ.

При рассмотрении модели с учетом структуры угольного вещества органическая масса угля представляется в виде фрагментов разной степени ароматизированности соединённых «мостиками», которые представляют собой алифатические цепи, эфирные, тиоэфирные или их комбинации. В данной работе используется CPD (chemical percolation devolatilization) модель [7]. В данной модели, в так называемой подвижной фазе, под действием температуры происходит разрушение «мостиков», часть фрагментов отщепляются от ядерной части и в виде низкомолекулярных паро- и газообразных соединений переходят в летучие вещества. Часть фрагментов имеющая более тяжелый молекулярный вес переходит в плавкое состояние (смолистые вещества), рекомбинируют, частично образуются летучие вещества, а также образуют с ядерной частью коксовый остаток. Параметры, используемые для данной модели, были взяты на основе корреляций, предложенных в работе [8]. На основе данных корреляций, в модели, в качестве исходных параметров задавалось общее количество «мостиков» в структуре угля в виде их доли, количество «мостиков» - углеродных связей, которые возникают при рекомбинации смолистых веществ с ядерной частью, координационное число, определяющее структуру угля, а также масса кластера и масса боковых цепей.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ МОДЕЛИ ТУРБУЛЕНТНОСТИ

На рисунке 2 представлено распределение аксиальной и тангенциальной компонент скорости при использовании нескольких моделей турбулентности при наличии процесса горения угольной пыли. Модель рей-

нольдсовых напряжений и модель $k–\omega$ SST Ментера дают схожие результаты, но при этом незначительно отличаются от результатов расчета при использовании стандартной $k–\varepsilon$ модели турбулентности. Из сравнения экспериментальных и расчетных данных видно, что толщина зоны рециркуляции хорошо предсказывается по результатам расчета, тогда как ее длина значительно короче, чем в эксперименте. Аналогичные результаты были получены и в работе [1]. Это можно объяснить сложностью измерения скорости газового потока при наличии дисперсной фазы.



а) б)

Рис. 2 Распределение аксиальной (а) и тангенциальной (б) компонент скорости z=0.25

На рисунке 3 представлено распределение пульсационной составляющей скорости в трех сечениях. Для моделей турбулентности $k–\varepsilon$, $k–\omega$ SST Ментера пульсационная составляющая, общая для аксиальной и тангенциальной скорости, рассчитывалась из выражения $(2k/3)^{0.5}$. Из результатов видно, модель RSM дает более низкий уровень пульсаций скорости и лучше согласуется с экспериментальными данными. На рисунке 4 представлено распределение температуры. Наибольшие отличия в результатах расчета при разных моделях турбулентности наблюдаются в первом сечении (z=0 м) Распределение аксиальной и тангенциальной скорости в данном сечении для всех трех моделей имеют одинаковое значения, но имеются различия в пульсационной составляющей скорости. В дальнейшем, по длине топочной камеры значения температур выравниваются при использовании разных моделей.

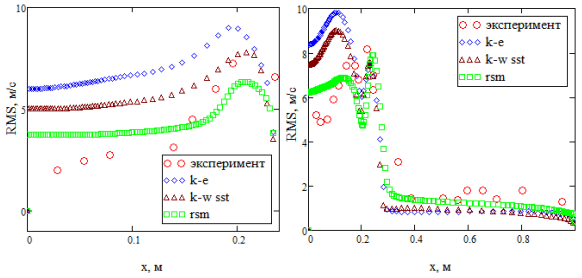
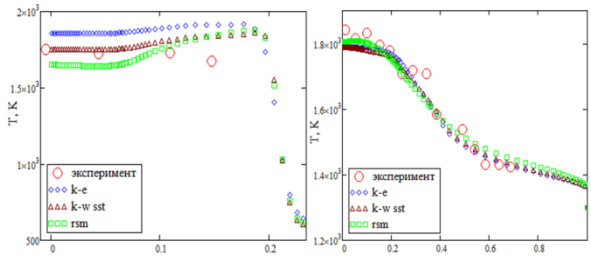


Рис. 3 Распределение пульсационной составляющей скорости



а) б)

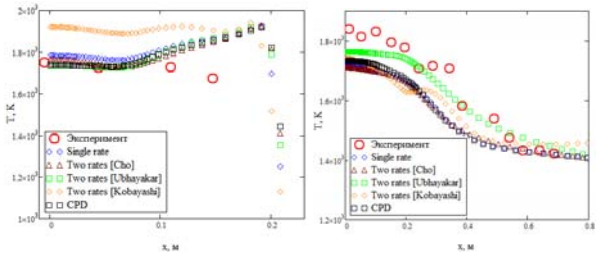
Рис. 4 Распределение температуры а) z=0, б) z=0.85.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ МОДЕЛИ ВЫХОДА ЛЕТУЧИХ ВЕЩЕСТВ

На основе полученных выше результатов, для дальнейших расчетов была выбрана двухпараметрическая модель турбулентности $k–\varepsilon$. Результаты расчета с использованием разных моделей выхода летучих веществ представлены на рис .5, 6. Можно видеть, что в общем случае одностадийный, двухстадийный механизм описания летучих веществ, а также многостадийная модель CPD дают схожие результаты. Это объясняется прежде всего характером течения вблизи горелочного устройства, где существует обратное течение горячих газов, которое и является основным инициатором воспламенения угольной пыли. Вместе с тем, имеются и отличия в результатах расчетов. Так двухстадийная модель с кинетическими константами, предлагаемая в работе [5] показала худшее соответствие с экспериментальными данными, как по распределению температур (рис. 5), так и по концентрации кислорода (рис. 6). При этом результаты расчетов по двухстадиной модели с кинетическими константами из работы [7] хорошо согласуется с экспериментальными данными.

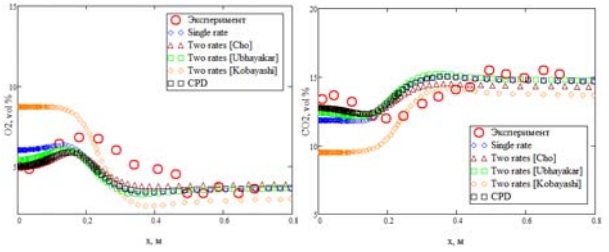
График распределения температуры представлен на рисунке 5. В целом, результаты расчётов с разными моделями выхода летучих похожи, за исключением двухстадийной модели с кинетическими константами [5].

Скорость выхода летучих веществ с использованием параметров [5] для двухстадийной модели значительно отличается от других моделей, что связанно, в первую очередь, с распределением между низкотемпературным выходом летучих веществ и термической деструкцией угольного вещества, имеющей место при более высоких температурах. Это отражается в более интенсивном выходе летучих веществ на начальном участке факела и снижением общего количества вышедших летучих веществ, что демонстрирует большее количество неизрасходованного кислорода по длине факела (рис. 5, 6).



а) б)

Рис. 5 Распределение температуры а) z=0, б) z=0.85



а) б)

Рис. 6 Концентрации газов: а) O_2 (z=0.85), б) CO_2 (z=85)

ВЫВОДЫ

Сравнительный анализ влияния моделей турбулентности k-ε и k-w SST и модели рейнольдсовых напряжений на результаты математического моделирования процесса горения угольной пыли в закрученном потоке в рамках RANS подхода показал незначительное влияние на распределение аксиальной и тангенциальной скоростей, температур и концентрации газов. При использовании любой из рассматриваемых моделей турбулентности достаточно хорошо предсказываются процессы, связанные с выгоранием угольной пыли. Учитывая, что модель турбулентности k-ε требует меньше вычислительных затрат, для решения подобных задач она является предпочтительней для решения описанного выше ряда задач. Установлено, что выбор модели турбулентности оказывает влияние на значение пульсационных составляющих скорости и это может привести к различию распределения некоторых параметров процесса. Одним из наиболее значительных влияний это может оказать на образования ряда вредных веществ, таких как оксиды азота.

Несмотря на то, что закрутка потока создает зону обратного тока в центре факела, в результате чего происходит подсос горячих горючих газов и создается устойчивое воспламенение угольной пыли, выбор модели выхода летучих веществ также влияет на процессы воспламенения и горения пылеугольного топлива.

ЛИТЕРАТУРА

1. Peters A.A.F., Weber R. Mathematical Modeling of a 2.4 MW Swirling Pulverized Coal Flame // Combustion Science and Technology. 1997. V. 122. I. 1-6. P. 131-182.
2. Launder B.E., Spalding D.B. Lectures in mathematical models of turbulence. London: Academic Press, 1972. 236 p.
3. Smirnov P.E., Menter F.R. Sensitization of the SST turbulence model to rotation and curvature by applying the Spalart-Shur correction term // Journal of Turbomachinery. 2009. V. 131. I. 4. P. 1-8.
4. H. Kobayashi, J.B. Howard, A.F. Sarofim, Proc. Combust. Inst. 16 (1977) 411–425.
5. C.P. Cho, S. Jo, H.Y. Kim, S.S. Yoon, Numer. Heat Transfer, Part A: Appl. 52 (2007) 1101–1122.
6. S.K. Ubhayakar, D.B. Stickler, C.W. von Rosenberg, R.E. Gannon, Proc. Combust. Inst. 16 (1976) 427–436.
7. T.H. Fletcher, A.R. Kerstein, R.J. Pugmire, D.M. Grant, Energy Fuels 4 (1990) 54–60.
8. Genetti D, Fletcher TH. Predicting C NMR measurements of chemical structure based on the elemental composition and volatile matter content of coal. Utah: Brigham Young University, Department of Chemical Engineering; 1998

* Исследование в части влияния модели турбулентности k-ε на горение угольной пыли выполнено в УрФУ за счет гранта Российского научного фонда проект №14-19-00524 (Чернецкий М.Ю.)