

УДК 519.6, 621.1.016, 621.18

Вариантный анализ показателей сжигания бурого угля в усовершенствованной вихревой топке*

Д.В. Красинский

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск

E-mail: dkr@itp.nsc.ru

На основе вариантного численного трехмерного моделирования аэродинамики и топочных процессов при факельном сжигании бурого угля Канско-Ачинского бассейна в усовершенствованной вихревой топке с дополнительным нижним дутьем проведен анализ интегральных показателей этой топки для ряда режимов в зависимости от тонины помола и от расхода угля, установлен предпочтительный режим работы топки.

Ключевые слова: вихревая топка парового котла, численное моделирование, горение угля.

Одной из актуальных задач угольной энергетики является разработка топочных устройств с характеристиками, обеспечивающими высокоэффективное и экологически безопасное сжигание угольного топлива в котельных агрегатах ТЭС, в том числе при использовании низкосортных и бурых углей. Одним из перспективных направлений является использование технологии форсированного высокотемпературного режима сжигания распыленного угля в вихревом потоке компактной камеры горения [1, 2]. Применение вихревой технологии сжигания позволяет решать задачи уменьшения размера и повышения теплонапряженности топочного устройства, улучшения экономических и экологических показателей. Топочное устройство, созданное на основе этой технологии и состоящее из футерованной вихревой камеры горения с тангенциальным подводом струи аэросмеси, создающей вихревой факел с горизонтально расположенной осью вращения, диффузорной части и камеры охлаждения, насыщенной двухсветными экранами и ширмами, известно как вихревая топка [1–5]. Конструкция вихревой топки с жидким шлакоудалением (ЖШУ) была разработана Н.В. Головановым в НПО ЦКТИ [1, 2]. В дальнейшем в ИТ СО РАН была предложена модифицированная схема вихревой топки, обозначаемая далее как «ВТ2Н» [5], представленная на рис. 1. Ее отличительной особенностью является дополнительное тангенциальное дутье вторичным воздухом через горелку в нижней точке периметра камеры горения. В ряде работ были экспериментально и численно исследованы особенности аэродинамики [3] и топочных процессов при сжигании распыленного угля [5] в модификации «ВТ2Н» вихревой топки. Там же отмечалось, что благодаря наличию в усовершенствованной схеме «ВТ2Н» вихревой топки дополнительного нижнерасположенного тангенциального дутья обеспечивается расширение способов управления аэродинамической структурой потока и режимными параметрами, включая использование принципа стадийного сжигания путем обеспечения условий недостатка окислителя в вихревом факеле камеры горения с последующим дожиганием топлива за счет нижнего дутья. Как следствие, появляется возможность повышения показателей этой топки. Вместе с тем в работе [5] рассматривался

* Работа выполнена за счет гранта Российского научного фонда (проект № 14-19-00137).

только один из возможных рабочих режимов сжигания распыленного бурого угля в вихревой топке «ВТ2Н». В развитие предыдущих исследований и в целях расчетного определения режимных параметров усовершенствованной вихревой топки «ВТ2Н», в наибольшей степени отвечающих требованиям энергоэффективного и экологически безопасного сжигания бурых углей, в настоящей работе представлен анализ изменения основных теплотехнических и экологических характеристик этой топки для ряда режимов ее работы в зависимости от тонины помола и расхода угля. Анализ проведен на основе результатов вариантного численного трехмерного моделирования всей совокупности аэротермохимических процессов при факельном сжигании бурого угля марки «2Б» Березовского месторождения Канско-Ачинского бассейна (КАБ) в исследуемой вихревой топке «ВТ2Н».

Применяемая для численного исследования физико-математическая модель пространственного турбулентного течения, процессов теплопереноса и горения твердого распыленного топлива в топочных устройствах ТЭС основана на смешанном эйлерово-лагранжевом описании двухфазной среды. Турбулентное движение несущей газовой фазы описывается осредненными по Фавру определяющими уравнениями, для замыкания которых привлекается реализуемая $k-\varepsilon$ модель турбулентности [6]. Газовая фаза полагается состоящей из следующих компонент: $\{O_2, CH_nO_m, CO, CO_2, H_2O, N_2\}$, здесь CH_nO_m представляет собой обобщенную формулу углеводородов, выделяющихся из летучих веществ угля. Скорость газовой реакции горения этих углеводородов описывается на основе известной модели дробления турбулентных вихрей [5, 7]. Для моделирования лучистого теплообмена используется P_1 -приближение метода сферических гармоник для серой двухфазной среды [7]. В рамках лагранжева описания движения, теплообмена и гетерогенного реагирования дисперсной фазы, с учетом выхода летучих и горения коксового остатка согласно диффузионно-кинетической теории (см. [7]), рассчитываются термодинамические состояния «представительных» частиц-кластеров угольного топлива, распределенных примерно на 100 фракций по размерам для учета полидисперсности, вдоль их траекторий. Следует отметить, что ввиду наличия в схеме «ВТ2Н» плоскости симметрии, обозначенной штриховой линией на рис. 1, с целью экономии вычислительных ресурсов рассчитывалась только половина объема топки — полусекция, содержащая одну верхнюю горелку для подачи аэросмеси и одну нижнюю горелку для дополнительной подачи вторичного воздуха. Для такой вычислительной области использовалась расчетная неструктурированная сетка, состоящая из 390552 гексаэдрических ячеек. Подробное изложение применяемых моделей, численного алгоритма и граничных условий приведено в работе [5]. Расчеты выполнялись с использованием CFD-пакета FLUENT.

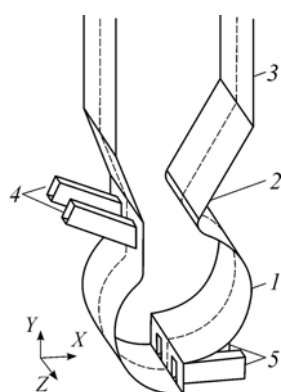


Рис. 1. Схема вихревой топки «ВТ2Н». 1 — вихревая камера горения, 2 — диффузор, 3 — камера охлаждения (верхняя часть камеры охлаждения не показана), 4 — верхние (основные) горелки, 5 — нижние (дополнительные) горелки.

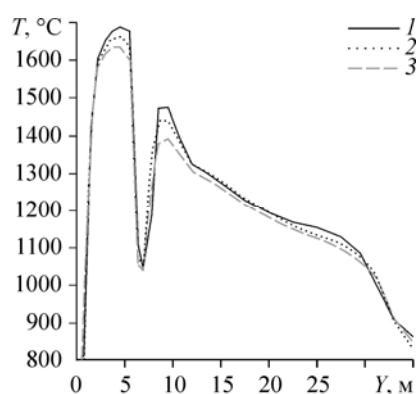


Рис. 2. Распределения по высоте топки температуры ($^{\circ}C$), осредненной по горизонтальным сечениям, в зависимости от тонины помола угля для режима нагрузки I.

Тонина помола $R_{90} = 15$ (1), 30 (2), 45 % (3).

В проведенной серии расчетов рассматривались два варианта номинальной тепловой нагрузки котла за счет изменения расхода G_{coal} подсушенного угля, величина которого на объем полусекции топки (т.е. на одну верхнюю горелку) была принята равной 3,75 кг/с для варианта нагрузки I и 5 кг/с для варианта нагрузки II. Соответствующая мощность тепловыделения в объеме полусекции топки «ВТ2НФ» составляет ~ 87,6 МВт при нагрузке I и ~ 116,9 МВт при нагрузке II. Фракционный состав распыленного угля задавался по формуле Розина–Рамллера [7] через параметр R_{90} (массовая доля остатка на сите 90 мкм). Во всех вариантах расчетов неизменными были следующие параметры: коэффициент полидисперсности помола принят равным 1,2; коэффициент избытка воздуха в топке — равным 1,15; отношение расходов газовой фазы через верхнюю и нижнюю горелки $G_{\text{верх}}/G_{\text{ниж}} = 3$. Таким образом, для каждого варианта нагрузки выполнялись расчеты для трех вариантов тонины помола березовского бурого угля: $R_{90} = 15, 30$ и 45 %.

Результаты вариантного численного моделирования представлены на рис. 2 и 3. На рис. 2 приведены профили температуры по высоте топки, осредненной по горизонтальным XZ сечениям, для трех вариантов тонины помола при нагрузке I. Видно, что для более тонкого помола $R_{90} = 15$ % (линия 1) температура T_1 оказывается выше, чем для более грубого (линии 2, 3), почти на всем протяжении высоты топки: $T_1 > T_2 > T_3$, причем в вихревой камере горения при $Y \approx 4,5$ м разница средних температур между вариантами $R_{90} = 15$ и 45 % составляет $T_1 - T_3 \approx 50$ °С, что обусловлено интенсивным и полным выгоранием более мелких коксовых частиц. Следует отметить, что температура в камере охлаждения топки «ВТ2Н» в целом превышает температуру начала шлакования зольного остатка (950 °С для бурых углей КАБ). Однако благодаря режиму ЖШУ обеспечивается высокий коэффициент шлакоулавливания в вихревой камере горения — унос до 50 % золовых частиц жидким шлаком [1]. Этот фактор, с учетом низкой зольности березовского бурого угля, способствует минимизации эффекта зашлаковывания тепловоспринимающих поверхностей

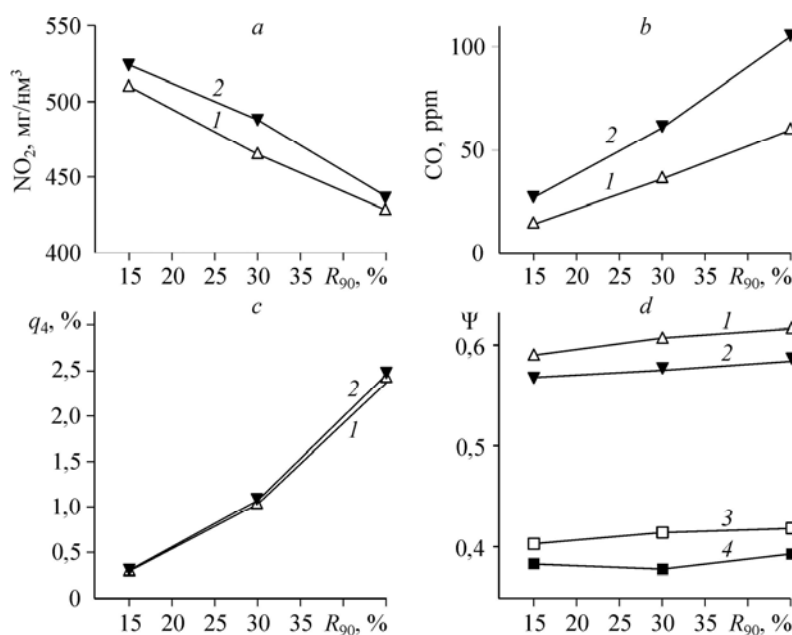


Рис. 3. Режимная карта интегральных показателей усовершенствованной вихревой топки «ВТ2Н» в зависимости от тонины помола угля и от нагрузки котла.

a — концентрация оксидов азота NO_2 (мг/м³, в пересчете на 6 % содержание O_2) на выходе из топки,

b — концентрация монооксида углерода CO (ppm) на выходе из топки,

c — коэффициент q_4 (%) потерь тепла от механической неполноты сгорания кокса,

d — коэффициент Ψ тепловой эффективности экранных поверхностей в камере охлаждения; нагрузка I (1), II (2), боковые экраны: нагрузка I (3), II (4).

для рассмотренных условий топки. Экологические характеристики в выходном сечении (перед выпускным газоходом) вихревой топки «ВТ2Н» и ее интегральные теплотехнические показатели, полученные для шести вариантов расчета, представлены на рис. 3 в виде карты режимов работы топки в зависимости от тонины помола угля R_{90} и от нагрузки (расхода угля G_{coal}). Видно, что при загрузлении помола угля эмиссия оксидов азота NO_x (рис. 3а) снижается в соответствии с вышеуказанным (рис. 2) снижением средней температуры. Вместе с тем, в случае более грубого помола процесс догорания коксовых частиц продолжается еще и в камере охлаждения топки из-за снижения скорости выгорания углеорода кокса (на единицу массы топлива), поэтому концентрация монооксида углерода СО на выходе из топки (рис. 3б) и коэффициент q_4 механического недожога кокса (рис. 3с) возрастают с ростом параметра R_{90} . При этом значения механического недожога кокса $q_4 < 1,1 \%$, полученные в расчетах для более тонкого помола ($R_{90} = 30$ и 15%), находятся в пределах, приемлемых для практики эксплуатации на ТЭС, поэтому значение $R_{90} = 30 \%$ можно рассматривать в качестве варианта помола, оптимального с точки зрения как снижения эмиссии NO_x , так и ограничения механического недожога q_4 . На рис. 3д приведены значения коэффициентов Ψ тепловой эффективности тепловоспринимающих поверхностей в камере охлаждения, осредненные по площади каждой поверхности (для ширмы и для боковых экранов, постановка граничных условий на них описана в [5]), откуда видно, что полученные значения Ψ в топке «ВТ2Н» при нагрузке I в целом выше, чем типичный уровень $\Psi \sim 0,4$ для большинства топочных устройств, что свидетельствует об улучшенной энергоэффективности вихревой топки «ВТ2Н». Кроме того, из рис. 3 видно, что повышение нагрузки приводит к увеличению эмиссии как NO_x , так и СО. Максимальные значения температуры в выходном сечении топки «ВТ2Н» лежат в диапазоне 1048–1066 °С при нагрузке I, и в диапазоне 1149–1175 °С при нагрузке II, что на ≈ 100 °С выше и близко к предельно допустимому уровню температуры на выходе из топки. Отсюда следует, что увеличение тепловой нагрузки приводит к ухудшению показателей топки во всех случаях.

Таким образом, из вышеприведенного вариантного анализа рассчитанных показателей вихревой топки «ВТ2Н» можно заключить, что предпочтительным режимом ее работы является вариант с нагрузкой I ($G_{\text{coal}} = 3,75$ кг/с) и тониной помола $R_{90} = 30 \%$ (либо близко к этому значению), интегральные показатели которого демонстрируют соответствие принятым в теплоэнергетике требованиям. Полученные результаты вариантного численного трехмерного моделирования топочных процессов при факельном сжигании бурого угля создают научную основу для дальнейшей оптимизации конструктивных и режимных параметров усовершенствованной вихревой топки.

Список литературы

1. Саломатов В.В. Природоохранные технологии на тепловых и атомных электростанциях. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2006. 853 с.
2. Котлер В.Р. Специальные топки энергетических котлов. М.: Энергоатомиздат, 1990. 104 с.
3. Ануфриев И.С., Шарыпов О.В., Шадрин Е.Ю. Диагностика течения в вихревой топке нового типа методом цифровой трассерной визуализации // Письма в ЖТФ. 2013. Т. 39, вып. 10. С. 36–43.
4. Аникин Ю.А., Ануфриев И.С., Шадрин Е.Ю., Шарыпов О.В. Диагностика пространственной структуры закрученного потока в модели вихревой топки // Теплофизика и аэромеханика. 2014. Т. 21, № 6. С. 807–810.
5. Красинский Д.В., Саломатов В.В., Ануфриев И.С., Шарыпов О.В., Шадрин Е.Ю., Аникин Ю.А. Моделирование топочных процессов при сжигании распыленного угля в вихревой топке усовершенствованной конструкции. Ч. 2. Горение бурого угля КАБ в вихревой топке // Теплоэнергетика. 2015. № 3. С. 54–61.
6. Shih T.-H., Liou W.W., Shabbir A., Yang Z., Zhu J. A new $k-\varepsilon$ eddy-viscosity model for high Reynolds number turbulent flows – model development and validation // Computers & Fluids. 1995. Vol. 24, No. 3. P. 227–238.
7. Волков Э.П., Зайчик Л.И., Першуков В.А. Моделирование горения твердого топлива. М.: Наука, 1994. 320 с.

*Статья поступила в редакцию 6 апреля 2016 г.,
после доработки — 5 мая 2016 г.*