

2. Bulysova L.A. Computational Studies of the Operating Conditions of a Combustor with Staged Combustion of Fuel-Air Mixture / L.A. Bulysova // Power Technol. Eng. – 2020. – № 5. – С. 574-580.
3. Aleksandrov Y.B. Optimal design of a combustion chamber of gas turbine engine by a Combustion chamber 1D-2D computer program / Y.B. Aleksandrov // Materials Science and Engineering. – 2017. – № 1. – P. 220-241.
4. Зубрилин И.А. Влияние процесса горения на структуру закрученного потока за горелочным устройством камеры сгорания газотурбинной установки / И.А. Зубрилин // Вестник Московского авиационного института. – 2019. – № 3 – С. 124-136.

Научный руководитель: к.т.н. Гиль А.В., доцент НОЦ И.Н. Бутакова ИШЭ ТПУ.

МНОГОФАКТОРНАЯ ОЦЕНКА ПРОЦЕССА ГОРЕНИЯ УГЛЕЙ И ШЛАМОВ В ПАРОВОЗДУШНОЙ СРЕДЕ

В.В. Дорохов

Томский политехнический университет
ИШЭ, НОЦ И.Н. Бутакова, группа А1-44

Введение. В связи с ежегодно увеличивающимся антропогенным давлением на окружающую среду, актуальным направлением исследований в области энергетики является разработка экологически эффективных технологий сжигания угольных топлив. Одним из способов решения данной задачи является замена традиционных схем подачи угольной пыли в топочные камеры энергетических установок на впрыск водосодержащих суспензионных топлив. Присутствие воды в камерах сгорания позволяет существенно снизить концентрации газовых выбросов. Однако возможно несколько технологических решений по концентрациям компонентов и схемам подачи воды в топочные камеры энергетических установок. Представляет интерес изучение влияния схемы подачи воды в камеру сгорания на характеристики процессов зажигания и горения угольных топлив. В рамках настоящего исследования реализованы три наиболее перспективные схемы сжигания топлива: (i) отдельный ввод частиц угля и капель воды в камеру сгорания; (ii) впрыск водяного пара в зону горения частиц угля; (iii) подача в топку ввод в топку водоугольных суспензий.

Целью данной работы является изучение влияния способа подачи воды в камеру сгорания на характеристики горения угольных топлив. Выполнена сравнительная оценка трех способов подачи воды (вода в составе суспензии, параллельная подача воды и угольного компонента, создание паровоздушной среды) в камеру сгорания с использованием методики многофакторного анализа (MCDM). В качестве критериев сравнения были выбраны времена задержки газофазного (τ_{d1}) и гетерогенного (τ_{d2}) зажигания, максимальные (T_g^{\max}) и минимальные (T_g^{\min}) температуры горения, полнота выгорания, концентрации основных антропогенных выбросов (CO_2 , NO , SO_2).

Экспериментальное исследование.

В качестве угольных компонентов выбирались каменный уголь марки «К» (коксуемый) Березовского месторождения Кемеровской области и угольный шлак, полученный при обогащении угля аналогичной марки.

На рисунке 1 представлена схема стенда, используемого для определения состава дымовых газов при варьировании способа подачи воды и угольного компонента в камеру сгорания. Сжигание исследуемых топлив проводилось в электрической трубчатой муфельной печи Nabertherm R 50/250/13 (внутренний диаметр керамической трубки 0,04 м, длина 0,45 м; диапазон варьирования температуры 20–1200 °С; температура регулируется по сигналу встроенной термопары типа S). Для анализа состава газа применялся газоанализатор Test 1, в который установлены электрохимические сенсоры O_2 (диапазон 0–25 %, абсолютная погрешность $\pm 0,2$ %),

CO (диапазон 0–40000 ppm, относительная погрешность $\pm 5\%$), SO₂ (диапазон 0–1000 ppm, относительная погрешность $\pm 5\%$), NO (диапазон 0–2000 ppm, относительная погрешность $\pm 5\%$), NO₂ (диапазон 0–500 ppm, относительная погрешность $\pm 7\%$), H₂S (диапазон 0–500 ppm, относительная погрешность $\pm 5\%$), HCl (диапазон 0–2000 ppm, относительная погрешность $\pm 5\%$). Дополнительно газоанализатор оснащен оптическими сенсорами CO₂ (диапазон 0–30 %, приведенная погрешность $\pm 2\%$), CH₄ (диапазон 0–30 %, приведенная погрешность $\pm 5\%$), CO (диапазон 0–30 %, приведенная погрешность $\pm 5\%$) и полярографическим сенсором H₂ (диапазон 0–5 %, абсолютная погрешность $\pm 5\%$). В состав прибора входят модульный зонд, конденсатосборник и система фильтрации для осушения и очищения газовой пробы. Для подачи топлива в камеру сгорания использовался координатный механизм, управление которым осуществлялось через компьютер. На него устанавливалось программное обеспечение Test 1, которое позволяло в режиме реального времени отслеживать изменение концентраций антропогенных газов в процессе горения.

При проведении экспериментов на панели управления муфельной печью устанавливалась требуемая температура в рабочей зоне камеры сгорания: 700, 800 или 900 °C. После нагрева печи до заданной температуры топливо при помощи координатного механизма подавалось в камеру сгорания. Для реализации разных способов подачи топлива использовались несколько типов держателей (выносные элементы на рисунке 1). Одновременная подача воды и угольного компонента осуществлялась на горизонтальных подложках. Для создания паровой среды применялся специализированный генератор пара. Впрыск пара осуществлялся через отверстие, которое использовалось для ввода топлива в печь. Суспензия подавалась на держателе, выполненном в виде совокупности тонких стержней, на которые подвешивались капли. Масса топлива для каждого из перечисленных вариантов подачи поддерживалась на постоянном уровне и составляла 0,2 грамма (следовательно, масса угольного компонента – 0,1 грамма, масса воды/пара также 0,1 грамма). Таким образом, количество капель суспензий и их масса выбирались из условий равенства общей массы топлива, сжигаемого в печи. После ввода топлива в печь отверстие закрывалось плотным слоем теплоизолирующего материала. С обратной стороны в аналогичное по размерам отверстие встраивался модульный зонд газоанализатора, и также закрывалось материалом. В ходе зажигания и горения дымовые газы через модульный зонд поступали в корпус газоанализатора (проходя стадии осушения и фильтрации), где происходило измерение концентраций компонентов газовой смеси. После окончания каждого эксперимента газовые каналы и пространство муфельной печи продувались свежим воздухом для удаления остатков пробы. В рамках одной серии выполнялись от 5 до 10 экспериментов, после чего данные анализировались, исключались грубые ошибки, оценивались погрешности. Определение средних по времени концентраций газов осуществлялось с помощью метода трапеций.

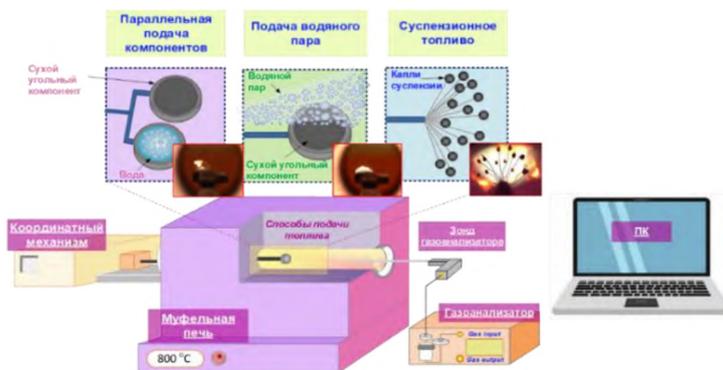


Рис. 1. Схема экспериментального стенда

Характеристики процессов зажигания и горения регистрировались с помощью высокоскоростной видеокамеры Phantom Miro C110 (запись велась со скоростью 1000 кадров в секунду и разрешением 800x600 пикселей), а также тепловизора (Testo 885-2). Данное оборудование устанавливалось на месте газоанализатора. При обработке полученных видеозаписей

определялись следующие характеристики горения: времена задержки газофазного и гетерогенного зажиганий, а также длительности горения топлива. Тепловизионная съемка использовалась для определения максимальных температур горения твердого коксового остатка топлива. Подробное описание данной методики представлено в [1].

Результаты и обсуждение. Для определения наиболее эффективного топлива с учетом полученных энергетических и экологических характеристик вычислены значения относительных показателей эффективности. Использовался метод взвешенных сумм, состоящий из нескольких этапов [2]. Выбралось наилучшее значение по каждому из регистрируемых параметров. Затем значения всех параметров нормировались относительно наилучшего значения, показатель эффективности которого в результате равнялся 1. Для задержки газофазного и гетерогенного зажигания, температуры зажигания и концентраций антропогенных выбросов наилучшим значением являлось минимальное в серии. Для коэффициента выгорания и максимальной температуры горения в качестве наилучшего выбиралась максимальная величина в серии. На заключительном этапе относительный показатель эффективности рассчитывался с применением выражения:

$$A_n = \sum w_j \cdot x_{ij}, \quad (1)$$

где w_j – весовой коэффициент каждого параметра, x_{ij} – нормализованное значение параметра.

Сумма всех весовых коэффициентов составляла 1. В рамках настоящего исследования все весовые коэффициенты принимались равными. Наилучшим при таком подходе является топливо, показатель эффективности которого (A_n) максимален. Результаты вычислений представлены на рисунке 2. Показано изменение комплексного показателя эффективности для трех исследуемых способов сжигания угольных компонентов и воды при варьировании температуры в камере сгорания. Во всем исследованном диапазоне температуры в печи значения полученных коэффициентов для суспензии превышали аналогичные значения для топлив, сжигаемых в паровой и воздушной среде, на 7–35 % и 34–47 %, соответственно. Данный результат обосновывает высокую перспективность сжигания топливных суспензий, особенно на основе угольных шламов, вследствие возможности существенного снижения времени газофазного и гетерогенного зажигания, минимальных температур зажигания, концентраций антропогенных газов, а также потерь из-за неполного выгорания.

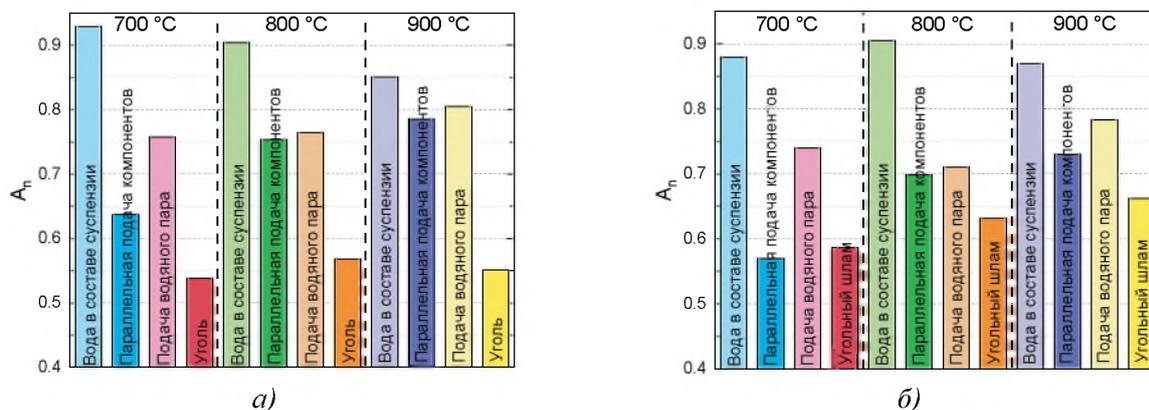


Рис. 2. Показатели эффективности исследуемых топлив:
а) на основе угля; б) угольного шлама

С целью иллюстрации вклада каждой составляющей в коэффициент A_n на рисунке 3 приведена векторная диаграмма для топлив на основе шлама, так как при сравнении двух угольных компонентов (рисунок 2) при температуре 800 °C и 900 °C именно суспензии на основе шлама характеризовались наибольшими показателями эффективности. Согласно полученным данным (рисунок 2) видно, что шесть из восьми рассмотренных относительных показателей для суспензии характеризуются максимальными значениями. Площадь поверхности на векторной диаграмме для суспензии больше, чем для двух других рассмотренных способов сжи-

гания шлама и воды. Наибольший вклад в отмеченное увеличение вносят показатели по задержкам гетерогенного зажигания (τ_{d2}), показатель выгорания (\bar{m}) и выбросам оксидов углерода.

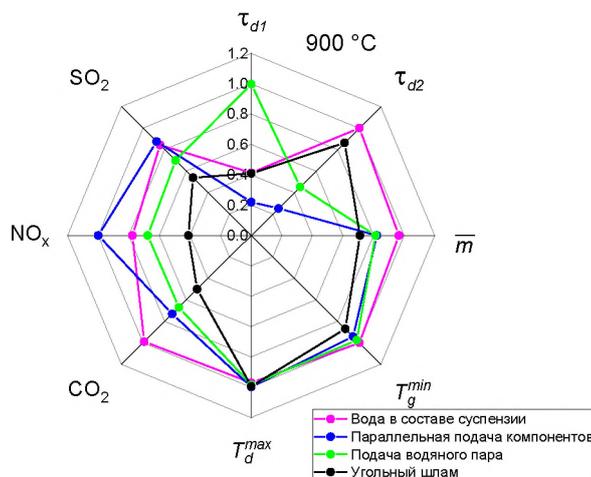


Рис. 3. Показатели эффективности исследуемых способов сжигания угольного шлама и воды (при температуре в камере сгорания 900 °С)

Заключение. Вычисленные значения комплексных показателей эффективности показали, что наиболее предпочтительной схемой сжигания угольных топлив является создание водосодержащих суспензий на их основе. Совокупный показатель, объединяющий энергетические и экологические характеристики сжигания для суспензии на 7–47 % выше, чем для других рассмотренных вариантов. Наибольшая эффективность зафиксирована для суспензий на основе шлама в диапазоне температуры от 800 до 900 °С. Поэтому использование низкосортных угольных отходов для распыления водных суспензий может быть очень перспективной технологией. Парогазовая среда в камере сгорания, содержащая высокие концентрации H_2O , улучшает характеристики процесса инициирования горения, общую реакционную способность и снижает антропогенные выбросы при горении угольных топлив. Имеются достаточно большие основания для развития технологий сжигания спреев из топливных суспензий на основе углей и угольных шламов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Akhmetshin M.R., Nyashina G.S. and Strizhak P.A. Normalizing anthropogenic gas emissions from the combustion of industrial waste as part of fuel slurries // Fuel. Elsevier, 2021. P. 122653.
2. Vershinina K., Dorokhov V., Romanov D., et al. Multi-Criteria Efficiency Analysis of Using Waste-Based Fuel Mixtures in the Power Industries of China, Japan, and Russia // Appl. Sci. Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 2020. Vol. 10, No. 7. P. 2460.

Научный руководитель: д.ф.-м.н. П.А. Стрижак, профессор НОЦ И.Н. Бутакова ИШЭ ТПУ.