

3. Прохоров В.Б. и др. Образование и методы снижения выбросов оксидов азота при сжигании топлив на ТЭС: Учебное пособие по курсу «Природоохранные технологии» / В.Б. Прохоров, Н.Д. Рогалев, М.Г. Лысков. – М.: Издательство МЭИ, 2001. – 32 с.
4. Зельдович Я.Б. Теория горения и детонации в газах. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 144 с.
5. Белоусов В.Н. и др. Топливо и теория горения. Ч.1. Топливо: учебное пособие / В.Н. Белоусов, С.Н. Смородин, О.С. Смирнова. – СПб.: СПбГТУРП, 2011. – 84 с.
6. Визгавлюст Н.В. Численное моделирование образования оксидов азота при ступенчатой подаче топлива в топку котла БКЗ-320-140 / А.А. Васильев, С.П. Дубровин, Н.В. Визгавлюст // Современные техника и технологии: труды XIX Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. – Томск: Изд-во ТПУ, 2013. – Т. 3. – С. 199–200.

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

## **ВЛИЯНИЕ ДОЛИ ДРЕВЕСНОЙ КОМПОНЕНТЫ НА ФОРМИРОВАНИЕ СА И S В ЗОЛЕ СМЕСЕВЫХ ТОПЛИВ НА ОСНОВЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО УГЛЯ**

А.Д. Мисюкова<sup>1</sup>, С.А. Янковский<sup>2</sup>  
Томский политехнический университет<sup>1,2</sup>  
ИШЭ, НОЦ И.Н. Бутакова<sup>1,2</sup>, группа 5Б8А<sup>1</sup>

### **Аннотация**

Приведены результаты экспериментальных исследований процессов термического разложения энергетического угля марки Д и древесины, выполненных с целью обоснования гипотезы о механизме секвестирования оксидов серы в продуктах сгорания таких смесей. Установлено, что при пиролизе двухкомпонентных топлив на основе каменного угля марки Д в смеси с диспергированной древесной биомассой достигается эффект снижения концентрации оксидов серы в газообразных продуктах термического разложения таких смесей за счет образования сульфатов кальция и алюминия в золе смесевых топлив вследствие комплекса реакций между продуктами пиролиза угля и древесины при концентрации древесной компоненты в смеси от 10 % до 50 %.

### **Введение**

Решение проблемы загрязнения атмосферы земли оксидами серы, азота и углерода образующимися при работе угольных тепловых электрических станций, является актуальной задачей современной энергетики всех развитых государств [1,2].

Наиболее привлекательным решением этой экологической проблемы энергетики является сжигание углей совместно с биомассой [5 – 6]. Установлено [6],

что добавление биомассы к углям приводит к снижению выбросов оксидов серы и азота из-за низкого содержания этих компонент в биомассе. Также эксперименты [7] показали, что биомасса при термическом разложении способствует секвестированию этих оксидов.

Кроме того, отходы лесопиления наиболее перспективны как вторая компонента смеси с углем [10, 11]. Исследования [11] показали, что при термическом разложении смесей двух бурых углей и опилок сосны существенно (более чем в два раза при концентрации древесины в смеси 25 %) снижается доля оксидов серы в газообразных

Цель настоящей работы – анализ закономерностей формирования кальция и серы в золе смесей длиннопламенного угля и древесины после полного завершения процессов термического разложения обеих компонент смесей этих двух твердых топлив.

### **Методика экспериментальных исследований и материалы**

Исходным углем для последующего формирования смесевых топлив был выбран уголь марки длиннопламенный (Д) (месторождение «Листвяжное» Кузбасс, Россия). К углю при подготовке смесевых топлив добавлялась мелкодисперсная древесина (опилки), остающаяся после пиления сосны.

На первой стадии подготовки уголь размалывался в шаровой барабанной до порошкообразного состояния. После размола через сита, соответствующие ISO 3310-1-90, угольная пыль просеивалась (средний размер частиц менее 80 мкм).

В экспериментах использовалась древесина одной смены лесопиления со средним размером частиц от 60 до 200 мкм.

После измельчения и фракционного отбора уголь и древесина смешивались. Объемные концентрации древесины и угля в смесях составляли 10% / 90%; 25% / 75%; 50% / 50%, соответственно. Затем определялись технические характеристики полученных смесей (калорийность, влажность, зольность, выход летучих)

Результаты технических характеристик приведены в табл. 1. В этой же таблице приведены элементные составы исследованного угля и древесины, установленные в анализаторе элементного состава Euro EA 3000 (на горючую массу).

Таблица 1. Технические характеристики топливных компонент и их элементный состав.

| Топливо<br>(Древесина<br>/ Уголь (Д),<br>%) | Теплота<br>сгорания,<br>$Q$ ,<br>МД<br>ж/кг |  | Влажность<br>$W^a$ | Зольность,<br>$A^d$ | Выход<br>летучих<br>$V^{daf}$ | Элементный состав |      |      |        |       |
|---------------------------------------------|---------------------------------------------|--|--------------------|---------------------|-------------------------------|-------------------|------|------|--------|-------|
|                                             |                                             |  |                    |                     |                               | $C$               | $H$  | $N$  | $S$    | $O$   |
|                                             |                                             |  |                    |                     |                               | $wt. \%$          |      |      |        |       |
| 0 % / 100 %                                 | 26,20                                       |  | 5,83               | 15,76               | 12,36                         | 74,20             | 3,60 | 1,60 | 0,1000 | 20,50 |
| 10 % / 90 %                                 | 24,92                                       |  | 5,42               | 14,00               | 14,55                         | 63,20             | 4,50 | 1,80 | 0,1034 | 30,40 |
| 25 % / 75 %                                 | 24,31                                       |  | 5,23               | 11,91               | 38,89                         | 60,60             | 4,70 | 1,50 | 0,1079 | 33,09 |
| 50 % / 50 %                                 | 23,84                                       |  | 5,35               | 10,44               | 40,96                         | 56,20             | 5,20 | 1    | 0,1179 | 37,48 |
| 100 % / 0 %                                 | 21,70                                       |  | 5,40               | 0,30                | 80,30                         | 58,90             | 6,90 | -    | -      | 34,20 |

### Результаты экспериментальных исследований

Навеска топливной смеси после смешения в определенной пропорции компонент помещалась в тигель, расположенный в продуваемой инертным газом специализированной камере. Камера с навеской продувалась непрерывно инертным газом при атмосферном давлении. Нагрев каждой навески топлива осуществлялся от температуры равной окружающей среды 20 °С до 400 °С. После достижения требуемой температуры выдержка по времени составляла 60 мин, после окончания выдержки при заданной температуре нагрев останавливался. Продувка инертным газом выполнялась до полного охлаждения (20 °С) исследуемой топливной навески.

Исследовались процессы термического разложения навесок массой 15 грамм. Смеси измельченного угля марки Д и мелкодисперсных сосновых отходов лесопиления исследовались при температурах 400 °С, 600 °С, 800 °С.

Проведен анализ содержания серы в золе угля марки Д и смесей угля Д и древесины при температурах 400 °С, 600 °С, 800 °С.

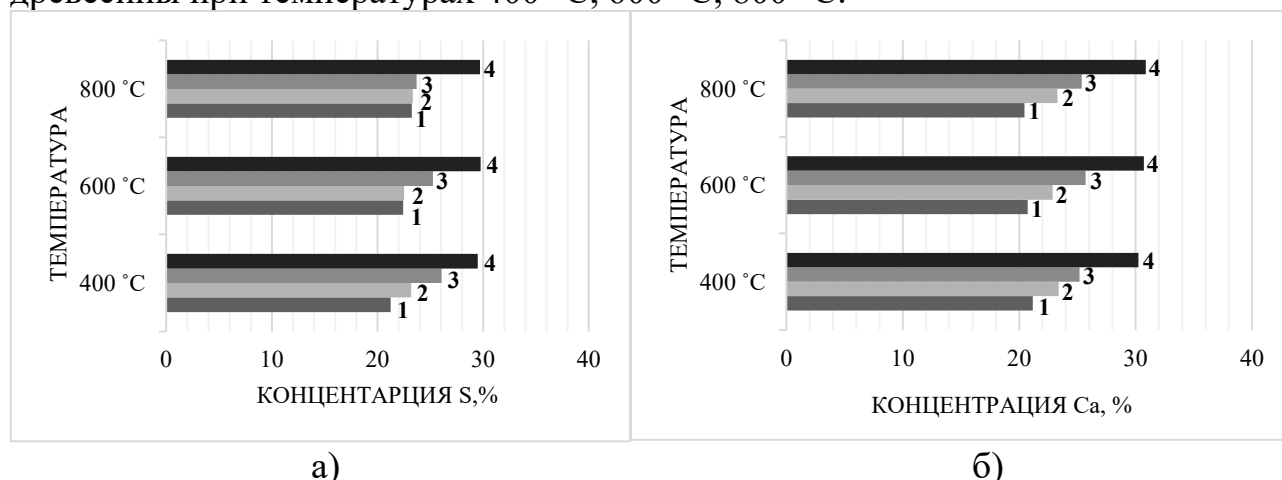


Рис. 1. Изменение формирования концентрации кальция и серы в золе угля марки Д и смесях из угля и древесины при термическом их разложении в широком диапазоне температур в инертной среде:

а) Концентрации серы в золе угля марки Д и смесях из угля и древесины при температурах 400, 600, 800 °С в среде аргона: 1. Уголь - 100%; 2. Уголь - 90% - Древесина - 10%; 3. Уголь - 75% - Древесина - 25%; 4. Уголь - 50% - Древесина - 50%. б) Концентрации кальция в золе угля марки Д и смесях угля и древесины при температурах 400, 600, 800 °С в среде аргона.

Из анализа рисунка 1а можно установить, что увеличение концентрации древесной компоненты до 50 % в смеси приводит к существенному росту содержания серы в золе по сравнению с содержанием последней в однородном угле, при температуре 400 °С на 27 %, при 800 °С на 22 %.

Анализ изменений доли Са в золе (рис. 1б) позволяет установить, что с увеличением концентрации древесной компоненты от 10 % до 50 % растет и концентрация Са в золе смесового топлива на 30 % при температуре до 400 °С, и на 34 % при температуре 800 °С по отношению к содержанию кальция в единице массы золы однородного угля марки Д. Содержание кальция в твердых продуктах термического разложения древесины значительно больше чем у угля, поэтому и при термическом разложении смесевых топлив с увеличением древесной компоненты соответственно увеличивается и доля кальция в золе.

На основании результатов выполненных экспериментальных исследований на примере смеси типичного энергетического угля и древесины можно сделать вывод об обоснованности гипотезы [11] по механизму секвестирования оксидов серы при совместном термическом разложении измельченных углей и древесины. При нагреве последней происходит интенсивное испарение поглощенной ею атмосферной влаги. Параллельно происходит процесс термического разложения органической части угля с образованием летучих, углерода кокса и выходом минеральной части. С ростом температуры летучих образуются оксиды серы, которые вступают в химическое взаимодействие с нагретыми до высоких температур парами воды – образуются пары серной кислоты.

### **Заключение**

Проведенные экспериментальные исследования позволили установить, что совместное термическое разложение смесей частиц достаточно типичного энергетического угля марки Д и древесины сосны приводит к увеличению концентрации серы, кальция и алюминия в золе смесей с увеличением доли древесной компоненты по отношению к однородному углю. Кроме того, установлено существенное увеличение (по сравнению с однородным углем Д) концентрации сульфатов кальция и алюминия (на 47 %) при совместном пиролизе угля и древесины в диапазоне температур от 400 °С до 800 °С. Результаты экспериментальных исследований позволяют обосновать высокую достоверность гипотезы о механизме секвестирования оксидов серы, образующихся при пиролизе углей, в результате взаимодействия с газообразными продуктами термического разложения древесины. Результаты исследований позволили выявить наиболее эффективную концентрацию древесной компоненты, которая соответствует 50 % по отношению к каменному углю.

### **Финансирование**

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ грант №18-29-24099\18.

## ЛИТЕРАТУРА:

1. International Energy Agency, Key World energy statistics <https://www.connaissancedesenergies.org/>; 2019 [accessed: December 6, 2019].
2. Nyashina, G.S., Vershinina, K.Y., Shlegel, N.E., Strizhak, P.A. Effective incineration of fuel-waste slurries from several related industries // Environmental Research, 2019, 176.
3. Munir, S., Nimmo, W., Gibbs, B.M., The effect of air staged, co-combustion of pulverised coal and biomass blends on NO<sub>x</sub> emissions and combustion efficiency // Fuel, 90 (2011) pp. 126 – 135.
4. Ren X, Sun R, Meng X, Vorobiev N, Schiemann M and Levendis A. Carbon, sulfur and nitrogen oxide emissions from combustion of pulverized raw and torrefied biomass // Fuel, 188 (2017), 310–323.
5. Coal Information: Overview (2017 edition), Energy Efficiency Indicators Highlights, <https://webstore.iea.org/energy-efficiency-indicators-2017-highlights>; 2017 [accessed: January 21, 2020].
6. Jan Ilavsky, Milan Oravec Utilization of biomass in Slovakia // Ecological Engineering, 16 (2000), pp. 83 – 89.
7. Kuznetsov, G.V., Yankovskii, S.A., Conditions and Characteristics in Ignition of Composite Fuels Based on Coal with the Addition of Wood Thermal Engineering, 66 (2) (2019), pp. 133 - 137.
8. J. Riaza, Oxy-fuel combustion of coal and biomass blends Energy, 41 (2012), pp. 429 – 435.
9. Z. Gogebakan, Y. Gogebakan, N. Selçuk, Co-Firing of Olive Residue with Lignite in Bubbling FBC, Combust Sci Technol, 180 (2008), pp. 854 – 868.
10. R.B. Tabakaev, I. Kanipa, A.V. Astafev, Y.V. Dubinin, N.A. Yazykov, A.S. Zavorin, V.A. Yakovlev, Thermal enrichment of different types of biomass by low-temperature pyrolysis // Fuel, 245 (2019), pp. 29–38.
11. S.A. Yankovsky, G.V. Kuznetsov, Physicochemical Transformations of Mixed Fuels Based on Typical Coals and Wood upon Heating, Solid Fuel Chem, 53 (2019), pp. 22-28, 10.1134/S0023117719010080.

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

## **ПРЕДПОСЫЛКИ ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ ПОФРАКЦИОННОГО СЖИГАНИЯ ПЫЛЕУГОЛЬНОГО ТОПЛИВА**

А.К. Пронин

Томский политехнический университет  
ИШЭ, НОЦ И.Н. Бутакова, группа А0-44

В настоящее время порядка 40% мировой электроэнергии вырабатывается за счет сжигания пылеугольного топлива. Общественные организации и ученые во всем мире уделяют большое внимание выбросам загрязняющих веществ от