

17. D. W. Crunkleton, R. Narayanan, and T. J. Anderson, Numerical simulations of periodic flow oscillations in low Prandtl number fluids, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 49. 2006. N. 1-2, P. 427–438.
18. G.B. Kim, J.M. Hyun, and H.S. Kwak, Enclosed Buoyant convection with internal heat generation under oscillating sidewall temperature, *ASME Journal of Heat Transfer* 124. 2002. N. 3, P. 577–580.
19. Кузнецов Г.В., Шеремет М. А. Математическое моделирование сложного теплопереноса в замкнутой прямоугольной области // 2009. стр. 123–133.
20. E. K. Lakhal, M. Hasnaoui, and P. Vasseur, Numerical study of transient natural convection in a cavity heated periodically with different types of excitations, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 42. 1999. N. 21. P. 3927–3941.
21. N.H. Saeid and A.A. Mohamad, Periodic free convection from a vertical plate in a saturated porous medium, non-equilibrium model, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 48. 2005. N. 18. P. 3855–3863.

Научный руководитель: С.В. Шидловский, д.т.н., профессор каф. АТП ЭНИН ТПУ.

## **ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПОСЛЕДСТВИЯ СЖИГАНИЯ СУСПЕНЗИОННЫХ ТОПЛИВ НА ОСНОВЕ УГЛЕЙ, ОТХОДОВ И ПРОДУКТОВ ИХ ПЕРЕРАБОТКИ**

М.А. Курганкина, А.Г. Косинцев  
Томский политехнический университет  
ЭНИН, АТП

### **Введение**

В течение последнего десятилетия потребление угля в мире растет высокими темпами [1, 2]. В настоящее время доля угля в мировом производстве электроэнергии высока и составляет около 45 % [1, 2]. Устойчивый рост добычи угля в последние годы наблюдается во многих странах, например, Китай, Индия, Индонезия, Австралия, Россия. Этот рост закономерен и обусловлен активным увеличением производственных мощностей. Поэтому увеличивается спрос и на энергоносители.

Сжигание топлива – процесс не только получения энергии, но и загрязнения окружающей среды антропогенными выбросами (летучая зола, частицы негоревшего топлива, сернистый и серный ангидриды, окислы азота, фтористые соединения) [3]. На долю угля приходится более 50 % мировых выбросов оксидов серы ( $SO_x$ ) и 20 % выбросов оксидов азота ( $NO_x$ ) [4]. Следует отметить, что большая часть добываемого угля обогащается. В результате чего образуется большое количество высокозольных отходов (фильтр-кеков), масса которых на сегодняшний день оценивается десятками миллионов тонн [5]. Поэтому становится актуальной масштабная утилизация отсевов, шламов, отходов углеобогат-

щения путем их сжигания в составе топливных суспензий. Горючие отходы обогащения угля являются наиболее перспективными компонентами для приготовления водоугольных (ВУТ) и органоводоугольных топлив (ОВУТ) [6]. В последние годы определены [7] интегральные характеристики зажигания и горения наиболее перспективных суспензий ВУТ и ОВУТ, приготовленных на основе различных компонентов (от низкосортных углей до отходов угле- и нефтепереработки). Однако исследования экологических индикаторов сжигания органоводоугольных топлив освещены не в полной мере, мало обоснованных данных о приемлемых интервалах антропогенных выбросов оксидов серы, азота и углерода.

Цель настоящей работы – экспериментальное определение экологических последствий сжигания суспензионных топлив на основе углей, отходов и продуктов их переработки.

### **Изучение экологических индикаторов сжигания углей, ВУТ и ОВУТ**

Исследования проводились для трех наиболее распространенных в России и за рубежом марок каменных углей (слабоспекающийся – СС, коксующийся – К, длиннопламенный – Д), а также фильтр-кеков на основе рассматриваемых каменных углей соответствующих марок. Для предотвращения расслоения топливных композиций применялся пластификатор «Неолас» [8]. В качестве жидких горючих компонентов применялись наиболее распространенные и существенно влияющие на свойства суспензий ОВУТ [7]: мазут и отработанное турбинное масло (ОВУТ 1 – фильтр-кек СС 89 %, мазут 10 %, пластификатор 1%; ОВУТ 2 – фильтр-кек К 89 %, мазут 10 %, пластификатор 1%; ОВУТ 3 – фильтр-кек Д 89 %, мазут 10 %, пластификатор 1 %; ОВУТ 4 – фильтр-кек СС 89 %, отработанное турбинное масло 10 %, пластификатор 1%; ОВУТ 5 – фильтр-кек К 89 %, СС 89 %, отработанное турбинное масло 10 %, пластификатор 1%; ОВУТ 6 – фильтр-кек Д 89 %, СС 89 %, отработанное турбинное масло 10 %, пластификатор 1 %). Приготовление суспензий ОВУТ осуществлялось в соответствии с методикой [7]. Результаты элементного и технического анализа углей, продуктов их переработки и жидких горючих компонентов представлены в работах [7, 8]. Для измерения газообразных выбросов при сжигании составов ОВУТ использовался экспериментальный стенд [8] с применением муфельной печи (диапазон температур 700–1000 °С) и газоанализирующей системы. Газообразные продукты, выделяемые в процессе нагрева, зажигания и горения топлива в муфельной печи, регистрировались и вычислялись газоанализатором [8]. В таблицах 1–4 представлены измеренные значения концентраций выбросов  $SO_x$  и  $NO_x$  от температуры в печи при сжигании рассматриваемых топливных образцов.

Табл. 1. Концентрации выбросов NO<sub>x</sub> и SO<sub>x</sub> от сжигания углей.

T <sub>г</sub> , °C	Уголь СС		Уголь К		Уголь Д	
	NO <sub>x</sub> (ppm)*	SO <sub>x</sub> (ppm)	NO <sub>x</sub> (ppm)	SO <sub>x</sub> (ppm)	NO <sub>x</sub> (ppm)	SO <sub>x</sub> (ppm)
700	300	8	220	5	100	1
800	370	10	300	12	250	6
900	450	22	400	28	300	18
1000	550	40	500	50	450	30

\* ppm – единица измерения концентрации, 1 ppm=0,0001 %.

Табл. 2. Концентрации выбросов NO<sub>x</sub> и SO<sub>x</sub> от сжигания фильтр-кеков.

T <sub>г</sub> , °C	Фильтр-кек СС		Фильтр-кек К		Фильтр-кек Д	
	NO <sub>x</sub> (ppm)	SO <sub>x</sub> (ppm)	NO <sub>x</sub> (ppm)	SO <sub>x</sub> (ppm)	NO <sub>x</sub> (ppm)	SO <sub>x</sub> (ppm)
700	30	8,8	100	6	10	6,5
800	120	9,2	220	12	100	7
900	200	10,6	300	15	150	8,5
1000	380	12,5	420	19	350	9,5

Табл. 3. Концентрации выбросов NO<sub>x</sub> и SO<sub>x</sub> от сжигания ОБУТ 1–3.

T <sub>г</sub> , °C	ОБУТ 1		ОБУТ 2		ОБУТ 3	
	NO <sub>x</sub> (ppm)	SO <sub>x</sub> (ppm)	NO <sub>x</sub> (ppm)	SO <sub>x</sub> (ppm)	NO <sub>x</sub> (ppm)	SO <sub>x</sub> (ppm)
700	282	30	180	21	105	6
800	411	66	280	45	214	40
900	450	83	320	78	274	62
1000	520	118	480	100	300	87

Табл. 4. Концентрации выбросов NO<sub>x</sub> и SO<sub>x</sub> от сжигания ОБУТ 4–6.

T <sub>г</sub> , °C	ОБУТ 4		ОБУТ 5		ОБУТ 6	
	NO <sub>x</sub> (ppm)	SO <sub>x</sub> (ppm)	NO <sub>x</sub> (ppm)	SO <sub>x</sub> (ppm)	NO <sub>x</sub> (ppm)	SO <sub>x</sub> (ppm)
700	453	29	189	18	70	5
800	601	50	420	47	186	14
900	650	70	540	64	250	32
1000	753	88	669	72	301	48

Анализ полученных концентраций (табл. 1–4) показал, что с ростом температуры в печи концентрации SO<sub>x</sub> и NO<sub>x</sub> возрастают. Процессы образования SO<sub>2</sub> при сжигании угольного топлива в большей мере зависят от содержания органических соединений серы [8] в разных образцах. Высокое содержание серы приводит к сильному загрязнению продуктов сгорания сернистым ангидридом SO<sub>2</sub> [9]. В частности, серосодержание угля марки С (0.868 %) выше, чем у других каменных углей (0.526–0.326 %) [8], что, в свою очередь, и определяет максимальные выбросы SO<sub>x</sub> при его сжигании (табл.1). Низкие концентрации SO<sub>x</sub> соответствуют углю марки Д, в котором достаточно мало серы и много влаги [8]. Установлено, что интенсивное образование оксидов азота начинается при температурах выше 700 °С, обеспечивающих устойчивое зажигание и последующее горение топлива. Обработка экспериментальных данных показала, что выход NO<sub>x</sub> зависит от содержания в исходном топливе азота и влаги, которая способствует снижению выхода NO<sub>x</sub> [8, 9]. Высоким содержанием азота и невысоким содержанием влаги характеризуется уголь

марки СС, которому соответствуют наибольшие концентрации  $\text{NO}_x$ . Наименьшие выбросы  $\text{NO}_x$  характерны для угля марки Д с высоким содержанием влаги (5.17%) [8], что обуславливает нижнее расположение кривой. Снижение выбросов  $\text{NO}_x$  и  $\text{SO}_x$  при сжигании фильтр-кеков обусловлено соответствующими химическими реакциями, протекающих при горении топлива, в которых участвует вода, как несущая среда суспензий [8]. Следует отметить, что максимальные концентрации выбросов  $\text{NO}_x$  для ВУТ на основе отходов углепереработки (фильтр-кеков) на 25 % меньше, чем для углей (табл. 2). Также установлено, что диапазон выбросов  $\text{SO}_x$  для суспензий ОВУТ (5–120 ppm) несколько шире, чем для каменных углей (0–50 ppm) соответствующих марок. Это обусловлено химическим составом жидких горючих компонентов ОВУТ [8]. В частности, содержание серы в рабочей части мазутов находится в диапазоне 0,3–3,5 %, турбинных масел – не более 1,1 %. Наличие дополнительной серы приводят к повышению показателей выбросов ОВУТ. Добавление продуктов нефтепереработки в целом не приводит к снижению выбросов  $\text{NO}_x$  (диапазоны изменения выбросов от сжигания ОВУТ и каменных углей сопоставимы между собой). Лишь в отдельном случае концентрации  $\text{NO}_x$  для ОВУТ на основе фильтр-кека Д ниже, чем для каменных углей.

#### **Заключение**

Выполненные эксперименты позволили выделить значимые экологические преимущества суспензий ВУТ и ОВУТ на основе фильтр-кеков в сравнении с каменными углями разных марок. В частности, при сжигании ВУТ выбросы  $\text{NO}_x$  и  $\text{SO}_x$  могут быть снижены на 25–50 %. Применение ОВУТ не способствует существенному снижению выбросов  $\text{NO}_x$  и  $\text{SO}_x$ , однако, значения концентраций при сжигании ОВУТ и углей сопоставимы между собой, а в некоторых случаях могут быть несколько ниже. Эти результаты еще раз подчеркивают большие экологические перспективы широкого применения отходов углепереработки в теплоэнергетике. Так же было установлено, что с точки зрения экологии, возможно использование всех рассмотренных горючих жидкостей (в качестве компонентов ОВУТ) с равным вкладом в окружающую среду. Выбор той или иной жидкой горючей составляющей для ОВУТ обусловлен в большей степени характеристиками процесса горения (температурой зажигания, теплотой сгорания, инерционностью зажигания и стабильностью суспензий), а также стоимостью и объемами (запасами) сырья для приготовления ОВУТ.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект 15–19–10003).*

#### **ЛИТЕРАТУРА:**

1. Feng Liu, Tao Lyu, Li Pan, Fei Wang. Influencing factors of public support for modern coal-fired power plant projects: An empirical study from China / Energy Policy, 2017, V. 105, P. 398-406.
2. BP Statistical Review of World Energy, 2016, 48 p.

3. Aijun L., Zhang A., Zhou Y., Yao X. Decomposition analysis of factors affecting carbon dioxide emissions across provinces in China / Journal Cleaner Production, 2017, V. 141, P. 1428-1444.
4. International Energy Agency. Emissions of Air Pollutants for the World Energy Outlook 2011 Energy Scenarios, 2011, 666 p.
5. International Energy Outlook with projections to 2040. Washington: U.S. Energy Information Administration, 2013. 234 p.
6. Glushkov D.O., Strizhak P.A., Chernetskii M.Yu. Organic Coal-Water Fuel: Problems and Advances (Review) / Thermal Engineering, 2016. V. 63, No. 10, P. 707-717.
7. D.O. Glushkov, S.V. Syrodoy, A.V. Zakharevich, P.A. Strizhak, Ignition of promising coal-water slurry containing petrochemicals: Analysis of key aspects / Fuel Processing Technology, 2016, V. 148, P. 224-235.
8. Margarita A. Dmitrienko, Galina S. Nyashina, Pavel A. Strizhak. Environmental indicators of the combustion of prospective coal water slurry containing petrochemicals / Journal of Hazardous Materials, 2017, V. 338, P. 148-159.
9. Y. Hu, S. Naito, N. Kobayashi, M. Hasatani, CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> and SO<sub>2</sub> emissions from the combustion of coal with high oxygen concentration gases / Fuel, 2000, V. 79, P. 1925-1932.

Научный руководитель: П.А. Стрижак, д. ф.-м.н., профессор, зав. каф. АТП ЭНИН ТПУ.

## **АСР ПРОЦЕССА ГОРЕНИЯ В ТОПКЕ КОТЛА ПРИ РЕАЛИЗАЦИИ БЕЗМАЗУТНОЙ РАСТОПКИ**

Д.А. Чебочакова  
Томский политехнический университет  
ЭНИН, АТП, группа 5БМ6Д

Как правило, растопка пылеугольных котлов реализуется с использованием природного газа или мазута. Стоимость этих энергоресурсов выше стоимости угля. Такая разница в силу разных причин будет возрастать. В настоящее время на тепловых электростанциях широко используются топочный мазут с высоким содержанием серы, при сжигании которого в дымовых газах образуется большое количество токсичных веществ (оксид серы, пятиокись ванадия), оказывающих негативное воздействие на окружающую среду [1]. Указанные негативные факторы и высокая стоимость мазута приводят к необходимости снижения объемов его потребления на объектах теплоэнергетики и обеспечения максимально возможного использования твердого натурального топлива.

Наиболее перспективной технологией для решения сформулированной проблемы является плазменная технология безмазутной растопки котла, которая обеспечивает повышение экономических и экологических показателей ТЭС [2]. Плазменный розжиг низкосортных углей проводят после предвари-