

до нуля, расход электроэнергии возрастает на 1500 кВт·ч за счёт введения в эксплуатацию компрессионной установки. При внедрении АБТН, расход водяного пара снижается с 14,7 до 6,9 т/ч, энергопотребление возрастает на 600 кВт·ч за счёт введения в эксплуатацию насосного оборудования. Результаты преобразований представлены в таблице 1, экономическое обоснование представлено в таблице 2.

**Таблица 1**

**Результаты преобразований**

| Параметры                                                 | Схема |       |
|-----------------------------------------------------------|-------|-------|
|                                                           | ПКТН  | АБТН  |
| Экономия пара, т/ч                                        | 14,7  | 7,8   |
| Увеличение энергопотребления на новое оборудование, кВт·ч | 1500  | 600   |
| Экономия денежных средств, млн. руб./г                    | 63,7  | 38,3  |
| Сумма капитальных затрат, млн. руб.                       | 191,2 | 170,2 |

**Таблица 2**

**Экономическое обоснование проектов**

| Параметры                               | Схема |      | Единица измерения |
|-----------------------------------------|-------|------|-------------------|
|                                         | ПКТН  | АБТН |                   |
| Чистый дисконтированный доход (NPV)     | 164,1 | 43,2 | млн. руб.         |
| Срок окупаемости дисконтированный (DPP) | 4,4   | 8,4  | лет               |
| Внутренняя норма доходности (IRR)       | 32,8  | 21,2 | %                 |
| Индекс рентабельности (PI)              | 1,9   | 1,3  |                   |
| Ставка дисконтирования                  | 16    |      | %                 |
| Расчётный период                        | 15    |      | лет               |

Технико-экономическая оценка двух вариантов реконструкции показала, что наиболее экономически эффективным является первый вариант с периодом окупаемости 4,4 года и экономией 63,7 млн. руб./год. Таким образом, обоснована интеграция парокompрессионного теплового насоса, которая позволит повысить энергоэффективность установки.

#### **Литература**

1. Горшков В.Г. Тепловые насосы. Аналитический обзор // Справочник промышленного оборудования – 2008. – № 2.
2. Дзино А.А., Малинина О.С. Тепловые насосы и термотрансформаторы: Учебно-методическое пособие. СПб.: Университет ИТМО, 2015. – 68 с.
3. Захаров М.К. Энергоемкость и энергосбережение процессов ректификации, 1 часть // Энциклопедия инженера – химика, 2009. – №1. – С. 18 – 26.
4. Захаров М.К. Способы энергосбережения при проведении энергоемких технологических процессов // Технологии нефти и газа, 2006. – №1. – С. 63 – 72.
5. Захаров М.К., Аббаси М.К., Зверева Е.Н. Оценка качества разделения и затрат тепловой энергии в процессах ректификации // Вестник МИТХТ, 2013. – Т. 8. – №2. – С. 34 – 38.
6. Коновалов В.И., Гатапова Н.Ц. Основные пути энергосбережения и оптимизации в тепло- и массообменных процессах и оборудовании // Вестник ТГТУ, 2008. – Т. 14. – № 4. – С. 796 – 811.
7. Мартыновский В.С. Тепловые насосы. М. – СПб.: Государственное энергетическое издательство, 2005.
8. Трубаев П.А. Тепловые насосы: Учеб. пособие – Белгород: Изд-во БГТУ им. В.Г. Шухова, 2009. – 142 с.

### **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ВЫБРОСОВ CO<sub>2</sub> ПРИ СЖИГАНИИ ОТХОДОВ УГЛЕПЕРЕРАБОТКИ**

**М.А. Дмитриенко, А.Г. Косинцев**

**Научный руководитель П.А. Стрижак, д. ф.-м. н., профессор каф. АТП, ЭНИН, ТПУ  
Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск, Россия**

Парниковые газы – ключевая экологическая и социальная проблема мирового сообщества [1]. На протяжении многих лет лидерами [2] по этому показателю являются США, Китай, Индия, Евросоюз, Россия. Более половины выбросов CO<sub>2</sub> в атмосферу приходится на энергетические предприятия. Такая тенденция обусловлена активным сжиганием энергоресурсов (самым опасным является уголь). Но традиционно при разработке новых и совершенствовании существующих технологий сжигания топлив основное внимание уделяется не CO<sub>2</sub>, а более опасным выбросам, например, NO<sub>x</sub> и SO<sub>x</sub> [2, 3]. С выбросами NO<sub>x</sub> и SO<sub>x</sub> мировое научное сообщество пытается бороться за счет применения водоугольных (ВУ) и органомоугольных (ОВУТ) топливных композиций [4, 5]. Поэтому целесообразно провести экспериментальное определение концентраций выбросов CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> и SO<sub>x</sub> при сжигании типичных для России, Китая и Индии ископаемых.

В настоящей работе приводятся впервые полученные результаты непосредственного определения концентраций  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{NO}_x$  и  $\text{SO}_x$  при сжигании кеков [6, 7] типичных марок каменных углей («Д», «К», «СС», «Т», «Г»), обогащаемых на фабриках Кемеровской области, Россия.

Размеры твердых частиц кеков составляли 100–150 мкм. Увлажненные кеки по сути представляют из себя уже готовые суспензии ВУТ (так как в ВУТ, как правило, концентрация угля составляет от 40 % до 60 %). Как следствие, в настоящей работе аналогично методикам [6, 7] проводилось перемешивание каждого кека с добавлением пластификатора (относительная массовая концентрация 1 %).

Интерес представляет сравнение условий и экологических индикаторов сжигания кеков в составе ОВУТ. Для этого в смесь кеков с пластификатором добавлялась горючая жидкость. На основе экспериментов [6, 7] в качестве горючих компонентов были выбраны мазут и отработанное турбинное масло. В настоящей работе исследованы процессы и результаты сжигания двух групп суспензий ОВУТ: первая – «кек – 89 %, мазут – 10 %, пластификатор – 1 %»; вторая – «кек – 89 %, отработанное турбинное масло – 10 %, пластификатор – 1 %». Масса сжигаемой навески топлива во всех экспериментах составляла 1 грамм.

Использовалась камера сгорания [7] в виде цилиндра из кварцевого стекла. Температура в камере варьировалась в диапазоне от 500 °C до 1000 °C. Специализированным газоанализатором Testo 340 проводилась регистрация концентраций основных продуктов сгорания исследуемых топлив.

На рис. 1 и 2 приведены основные результаты проведенных измерений.

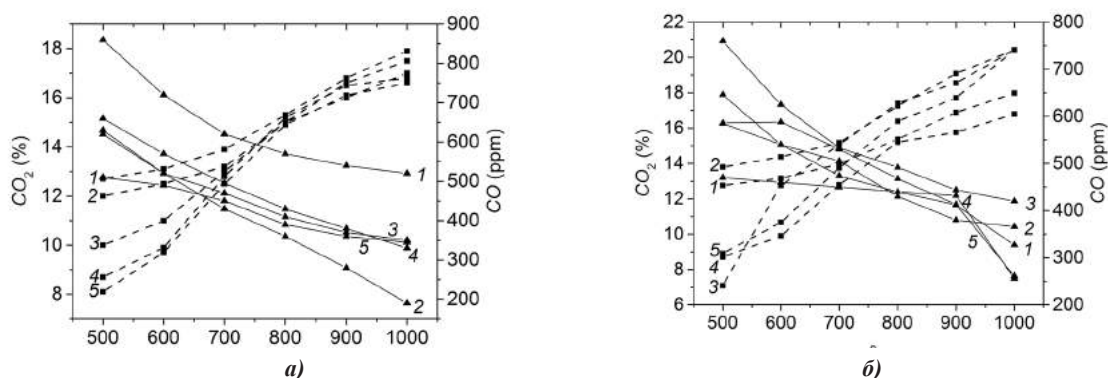


Рис. 1. Зависимости максимальных концентраций  $\text{CO}$  и  $\text{CO}_2$  от температуры при сжигании кеков (а) и ОВУТ (фильтр-кек в исходном железном состоянии, 10 % мазута) (б): 1 – фильтр-кек «СС»; 2 – фильтр-кек «К»; 3 – фильтр-кек «Г»; 4 – фильтр-кек «Т»; 5 – фильтр-кек «Д»

Анализ полученных экспериментальных данных позволяет сделать несколько ключевых выводов. Во-первых, на рис. 1, а хорошо видно, что с ростом температуры сжигания концентрации  $\text{CO}_2$  для всех исследованных кеков становятся практически идентичными. Это говорит о том, что разные свойства угольных компонентов практически не влияют на выбросы основного парникового газа  $\text{CO}_2$  при высоких температурах горения. Во-вторых, на рис. 1, а можно отметить три характерных участка: 500–750 °C, 750–850 °C, 850–1000 °C. На всех зависимостях  $\text{CO}_2$  (рис. 1) в диапазоне температур 750–850 °C хорошо видна точка перегиба. До этой точки концентрации  $\text{CO}_2$  нелинейно растут (500–750 °C), а после (850–1000 °C) переходят к стадии насыщения. Аналогичные заключения по перегибу кривых можно сделать для  $\text{CO}$  на рис. 1. Установленные точки перегиба на рис. 1, а и б чрезвычайно важны для последующего анализа и развития экологически чистых технологий сжигания твердых топлив или суспензий, приготовленных с применением твердых топлив и продуктов их переработки.

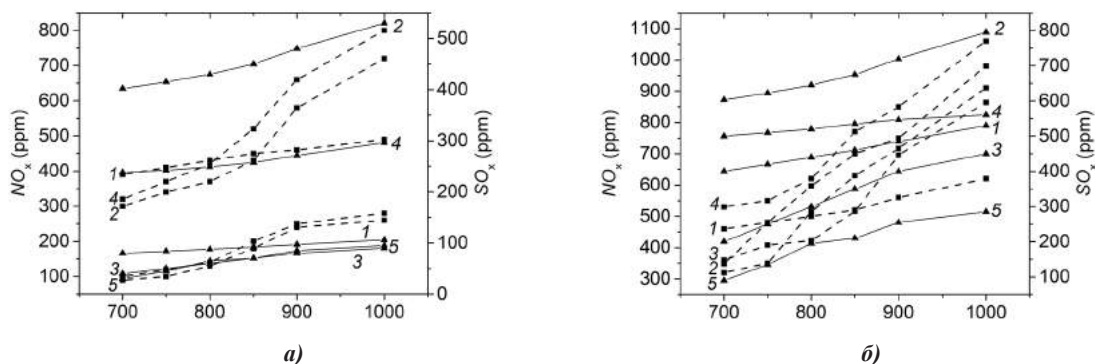


Рис. 2. Зависимости максимальных концентраций  $\text{SO}_x$  и  $\text{NO}_x$  от температуры при сжигании кеков (а) и ОВУТ (фильтр-кек в исходном железном состоянии, 10 % мазута) (б): 1 – фильтр-кек «СС»; 2 – фильтр-кек «К»; 3 – фильтр-кек «Г»; 4 – фильтр-кек «Т»; 5 – фильтр-кек «Д»

В-третьих, для условий относительно низких температур сжигания (до точек перегиба на рис. 1, а) свойства кеков играют существенную роль при определении концентрацией  $\text{CO}_2$ , а также других вредных выбросов. В частности, установлено (рис. 2, а и б), что отходы углерепереработки с малыми влажностью и содержанием летучих [7] приводят к росту  $\text{NO}_x$  и  $\text{SO}_x$ . Этот результат позволяет сделать заключение о том, что для кеков, содержащих больше органической части углеродного остатка, особенно важен низкотемпературный режим сжигания, т.е. смещение температуры горения в область до точки перегиба на рис. 1, а. В случае большого содержания летучих (например, для кека Г [7]). Температуры сжигания можно несколько повышать относительно остальных кеков, так как этот фактор не изменит существенно объемы  $\text{CO}$  и  $\text{CO}_2$ . В-четвертых, применение технологий ВУТ и ОВУТ не снижает выбросы  $\text{CO}$  и  $\text{CO}_2$  по сравнению с пылеугольным сжиганием. Основное преимущество таких технологий заключается только в том, что снижаются (в несколько раз) выбросы оксидов серы и азота. В тоже время из рис. 2, а и б можно сделать вывод о том, что концентрации  $\text{NO}_x$  и  $\text{SO}_x$  для ВУТ (на примере кеков) меньше, чем ОВУТ. Это обусловлено тем, что при добавлении в состав топливной суспензии жидкого горючего компонента (например, мазута или турбинного масла) даже в небольшом количестве (10 % по относительной массовой концентрации) возрастает доля горючего в топливной смеси. Как следствие, рост концентраций вредных выбросов для суспензий ОВУТ по сравнению с ВУТ неизбежен.

*Исследования выполнены за счет средств программы развития Национального исследовательского Томского политехнического университета в числе ведущих университетов мира (проект ВИУ\_ЭНИН\_25\_2016).*

#### Литература

1. Key World Energy Statistics. International Energy Agency, 2015. 81 p.  
[Abas N., Khan N.](#) Carbon conundrum, climate change,  $\text{CO}_2$  capture and consumptions // *Journal of  $\text{CO}_2$  Utilization*, 2014. – V. 8. – P. 39–48.
2. Bilgen S. Structure and environmental impact of global energy consumption // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2014. – V. 38. – P. 890–902.
3. Shen Y., Sun T., Jia J. A novel desulphurization process of coal water slurry via sodium metaborate electroreduction in the alkaline system // *Fuel*, 2012. – V. 96. – P. 250–256.
4. Jianzhong L., Ruikun W., Jianfei X., Junhu Z., Kefa C. Pilot-scale investigation on slurring, combustion, and slagging characteristics of coal slurry fuel prepared using industrial waste liquid // *Applied Energy*, 2014. – V. 115. – P. 309–319.
5. Glushkov D.O., Strizhak P.A., Chernetskii M.Yu. Organic Coal-Water Fuel: Problems and Advances (Review) // *Thermal Engineering*, 2016. – V. 63. – № 10. – P. 707–717.
6. Glushkov D.O., Lyrschikov S.Yu., Shevyrev S.A., Strizhak P.A. Burning Properties of Slurry Based on Coal and Oil Processing Waste // *Energy&Fuels*, 2016. – V. 30. – № 4. – P. 3441–3450.

### АНАЛИЗ СХЕМ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ ПОДСТАНЦИИ «БЕЛОЗЕРНАЯ»

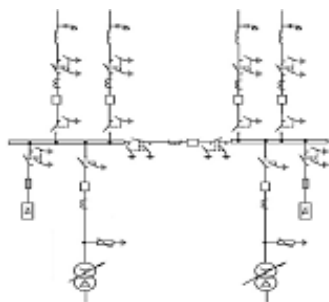
**В.А. Душечкин, Н.М. Космынина**

*Научный руководитель доцент Н. М. Космынина*

**Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск, Россия**

Белозёрная группа подстанций (ГПС) состоит из четырех подстанций: Белозёрная, Мирная, Надежда и Космос, - находящихся в подчинении магистральных электрических сетей Западной Сибири (МЭС Западной Сибири) [1]. Территориально подстанции расположены в Нижневарттовском районе. По выполняемым функциям являются транзитными, передают энергию для нефтеперерабатывающих и газоперерабатывающих заводов, а также в населённые пункты.

На подстанции «Белозерная» имеется три открытых распределительных устройства (ОРУ): ОРУ -500; ОРУ – 220 кВ; ОРУ – 110 кВ. С ОРУ – 500 кВ электроэнергия поступают из энергосистемы (с Нижневарттовской ГРЭС) и далее на напряжениях 220 кВ и 110 кВ передается в другие отдаленные



центры электропотребления. Закрытое распределительное устройство ЗРУ - 6 кВ служит для электроснабжения внутренних и ближних внешних потребителей.

Каждое распределительное устройство имеет свою схему электрических соединений, обладающих рядом свойств.

ЗРУ – 6 кВ выполнено по схеме, состоящей из двух стандартных схем: одна рабочая секционированная система сборных шин (рис.1).

**Рис. 1. Схема электрических соединений ЗРУ-6 кВ**