

УДК 536.46

*В. А. Кузьмин, И. А. Заграй, И. А. Десятков*

## ИССЛЕДОВАНИЕ НЕПОЛНОТЫ СГОРАНИЯ ТОРФА МЕТОДОМ СИНХРОННОГО ТЕРМИЧЕСКОГО АНАЛИЗА

Для проведения количественного анализа неполноты сгорания (недожога) торфа произведен отбор проб шлака и золы в разных частях системы котла БКЗ-210-140Ф Кировской ТЭЦ-4. Представлены микрофотографии исследуемых частиц шлака и золы. Рассмотрена методика подготовки образцов для проведения количественной оценки недожога торфа. В работе использован метод синхронного термического анализа, сочетающий методы дифференциальной сканирующей калориметрии и термогравиметрического анализа при одном измерении. Данный подход позволил качественно и количественно охарактеризовать процессы, протекающие при нагреве образцов до температуры 1100 °С. Проведено дожигание твердых продуктов сгорания с одновременной регистрацией величины потери массы исследуемых образцов в зависимости от температуры и времени нагрева, и оценкой сопровождающих данный процесс тепловых эффектов. Определены направление и величина энтальпии химических реакций и фазовых превращений веществ.

*Ключевые слова:* механический недожог, термический анализ, шлак, зола торфа.

Количественное определение неполноты сгорания (недожога) торфа является необходимым для оценки эффективности использования данного вида топлива в котлоагрегате и обеспечения экологической безопасности. При сжигании торфа механический недожог обусловлен наличием коксового остатка, содержащегося в продуктах сгорания топлива. Вследствие малого времени пребывания в области высоких температур факела, недогоревшие крупные частицы топлива теряются вместе со шлаком (выпадают в холодную воронку), а мелкие – уносятся потоком газа вместе с летучей золой. Эта мелкая

фракция проходит через газоход котла, а затем удаляется из газового потока в золоуловителях. Твердые частицы уноса состоят из золовых частиц (в подавляющей массе) и горючих коксовых частиц топлива. Механический недожог определяется исходными характеристиками топлива, режимами его сжигания и конструкцией топки. Проектным топливом для котла №5 БКЗ-210-140Ф Кировской ТЭЦ-4 является фрезерный торф местных месторождений, а также природный газ и мазут. Пылевое сжигание торфа в котле осуществляется с подсветкой природным газом при режимных параметрах работы котла №5 БКЗ-210-140Ф, представленных в таблице 1.

Для определения неполноты сгорания торфа произведен отбор проб шлака и золы в разных частях котловой системы. Названия и описание образцов приведены в таблице 2.

Таблица 1

Параметры режима работы котла №5 БКЗ-210-140Ф [1]

№	Параметр	Значение
1	Давление перегретого пара	13,5 МПа
2	Разряжение в топке	30-40 Па
3	Разряжение перед дымососом	3 кПа
4	Давление воздуха до воздухоподогревателей	250 Па
5	Давление воздуха после воздухоподогревателей	200 Па
6	Расход торфа	15 т/час
7	Расход сжигаемого газа	1055 м <sup>3</sup> /час
8	Температура факела	1473 К
9	Температура холодного воздуха	278 К
10	Температура воздуха после воздухоподогревателей	649,9 К (слева), 581,4 К (справа)
11	Температура уходящих газов	413 – 433 К
12	Содержание O <sub>2</sub> в уходящих газах	4,6 – 5%

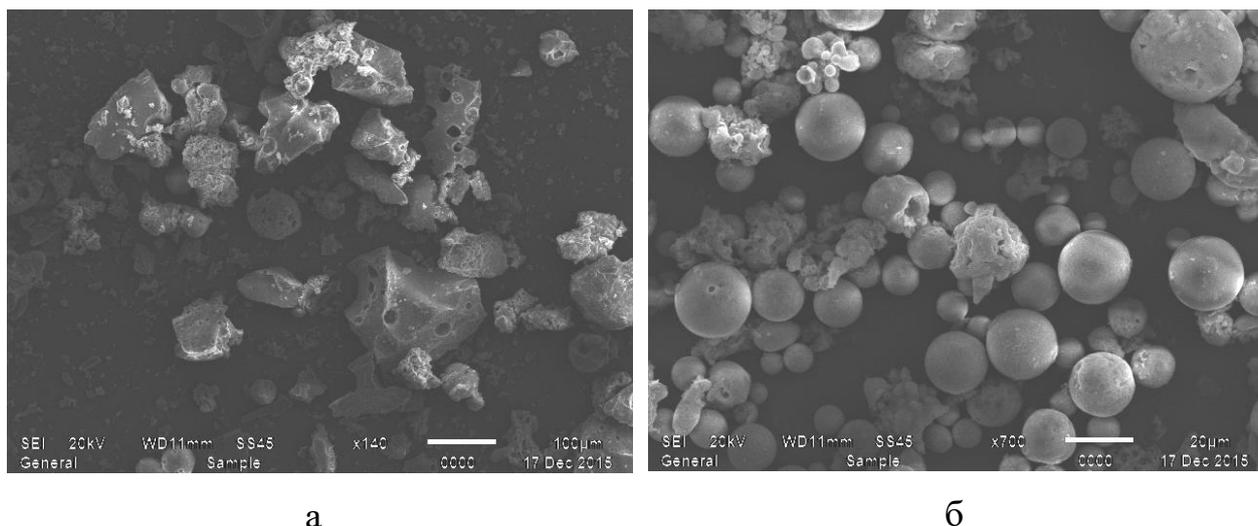
Таблица 2

**Характеристики исследуемых образцов**

	Образец №1	Образец №2
Название	Топливный шлак	Зола мокрого отбора
Характеристика пробы	Спекшийся кусок темно серого цвета	Частицы золы
Место отбора пробы	Шлаковая ванна, расположенная внизу котла, под факелом	Скруббер
Способ удаления золы	Механический	Гидрозолоудаление

На рис.1 представлены микрофотографии исследуемых частиц шлака и золы, полученные по методике работы [2]. Размеры и формы частиц шлака и золы определяются характеристиками исходного торфа, его подготовкой к сжиганию, тепловым режимом работы котлоагрегата и местом отбора проб. Неправильная (угловатая) форма частиц торфяного шлака (рис.1а) свидетельствует о незавершенности процесса горения коксового остатка, что определяется малым временем пребывания частицы в области высоких температур. Шарообразная форма частиц (рис.1б) обуславливается плавлением минеральной части торфа и высокой степенью догорания органического остатка топлива. Поэтому по соотношению количества сферических и несферических частиц можно предварительно судить о величине неполноты сгорания торфа (недожоге). Для проведения количественного анализа недожога торфа рассматривается методика, позволяющая провести дожигание твердых продуктов сгорания с одновременной регистрацией величины потери массы и оценкой сопровождающих данный процесс тепловых эффектов.

Термогравиметрический анализ (ТГА) использовался для регистрации изменения массы исследуемых образцов в зависимости от температуры и времени при нагревании в заданной среде с регулируемой скоростью.



*Рис. 1.* Микрофотографии формы и размеров частиц шлака и золы, полученные с помощью электронного микроскопа: а – Образец №1; б – Образец №2

Произведенный дифференциальный термический анализ (ДТА) позволил зарегистрировать разность температур каждого исследуемого вещества (образца) и эталона как функцию от времени или температуры при непрерывном нагревании по определенной программе.

Указанные исследования проводились методами ТГА и ДТА на приборе DTG-60 ф. «Shimadzu» в научно-образовательном центре полимерных материалов ВятГУ. В данном приборе реализуется одновременное измерение потери массы и тепловых эффектов для исследуемых образцов. Таким образом, синхронный термический анализ сочетает методы дифференциальной сканирующей калориметрии и термогравиметрического анализа при одном измерении.

Образец для анализа готовился особым образом. Для получения устойчивых результатов масса исследуемого образца должна быть не менее 4 мг, максимальная масса навески ограничивается объемом тигля. Необходимо обеспечить максимально возможную область контакта между исследуемым образцом и дном тигля. Чем больше область контакта, тем сильнее и точнее сигнал, фиксируемый прибором. Подготовленные к измерениям пустой тигель-эталон и тигель с образцом помещались в измерительную камеру. С помощью

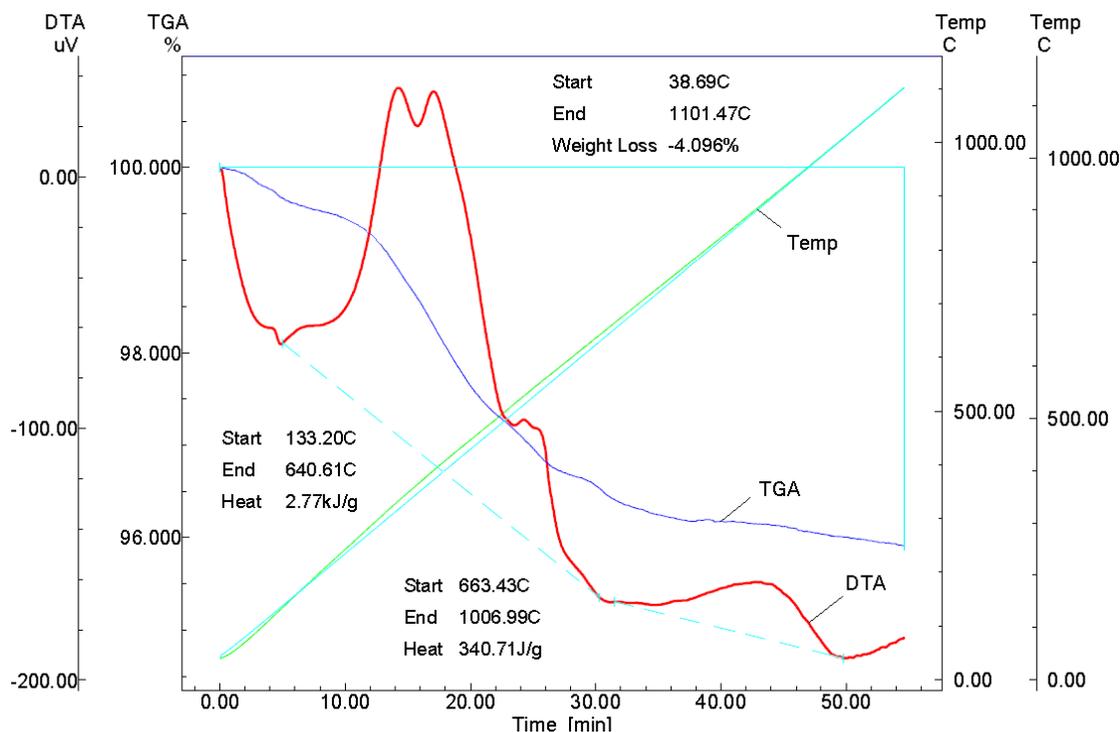
программного обеспечения DTG-60 создавался новый файл, содержащий всю информацию об измерении. В указанном файле задавались масса образца, вид атмосферы, материал тигля, выбирались файлы калибровки по температуре и чувствительности. С помощью программного обеспечения составлялась температурная программа измерений.

Нагревание исследуемых образцов производилось от комнатной температуры до 1100 °С со скоростью 20 °С/мин в воздушной атмосфере с расходом 150 мл/мин. Массы веществ:  $m_1=33,889$  мг (образец №1) и  $m_2=29,551$  мг (образец №2). Материал тигля – платина.

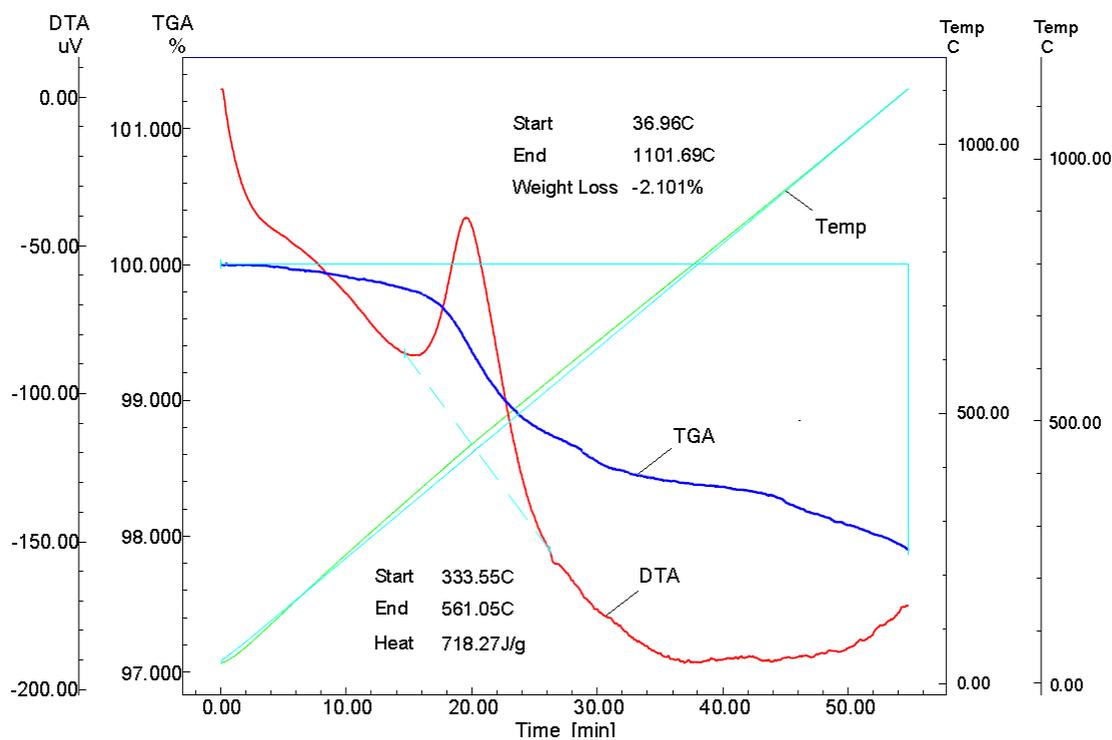
На основании кривой ТГА можно судить об изменении массы образца при нагревании (рис. 2).

Вначале происходит выпаривание влаги, затем выгорание серы и углерода. При достижении максимальной температуры 1100 °С уменьшение массы для образца №1 составляет 4,096 % от исходной  $m_1$ , а для образца №2 2,101 % от  $m_2$ . Это свидетельствует о бóльшем содержании органических остатков в топливном шлаке, чем в золе. Конечная температура эксперимента, обусловленная параметрами прибора DTG-60, не позволила в полной мере судить о величине механического недожога топлива, т.к. графики ТГА не вышли на асимптоту в процессе измерений. Максимальная температура 1100 °С является недостаточной для полного термического анализа исследованных образцов.

Используемый метод ДТА позволил определить направление и величину энтальпии химических реакций и фазовых превращений веществ. Графики ДТА имеют области, направленные вверх от базовых линий (пунктирные линии на рис. 2). Эти области характеризуют термические эффекты, которые соответствуют экзотермическим превращениям.



а



б

Рис. 2. Результаты ТГА и ДТА для шлака и золы, полученные с помощью дериватографа DTG-60: а – Образец №1; б – Образец №2

По площади пика можно определить теплоту (энтальпию) перехода или реакции, прокалибровав прибор по веществу с известной теплотой плавления [3]:

$$\Delta H = \frac{\Delta H_0 \cdot m_0 \cdot S}{S_0 \cdot m} = \frac{K \cdot S}{m},$$

где  $\Delta H$  и  $\Delta H_0$  – теплоты перехода исходного образца и эталона (Дж/кг),  $m$  и  $m_0$  – массы образца и эталона (кг),  $S$  и  $S_0$  – площади пиков образца и эталона ( $m^2$ ),  $K$  – калибровочный коэффициент (Дж/м<sup>2</sup>).

Для образца №1 удельное изменение энтальпии  $\Delta H$  составило 2,77 МДж/кг при переходе от 133 °С до 641°С и 0,341 МДж/кг в интервале от 663 °С до 1007 °С.

Для образца №2 удельное изменение энтальпии  $\Delta H$  составило 0,718 МДж/кг при переходе от 334 °С до 561°С.

В работе методом синхронного термического анализа проанализировано изменение массы исследуемых образцов шлака и золы в зависимости от температуры и времени нагрева, проведена оценка тепловых эффектов.

Совместное применение методов ТГА и ДТА позволило качественно и количественно охарактеризовать процессы, протекающие при нагреве образцов до температуры 1100 °С. Величина механического недожога шлака при сжигании торфа в котле №5 БКЗ-210-140Ф составляет более 4 %, а золы более 2 %. Для получения точного количественного результата по величине недожога торфа необходим прогрев образцов до более высоких температур, обеспечивающих выгорание всего органического остатка топлива.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 15-48-02482 р\_поволжье\_а.

### Список литературы

1. Инструкция по эксплуатации котлоагрегата высокого давления типа БКЗ-210-140Ф при работе на твёрдом топливе. Киров, 2005. 42 с.
2. Кузьмин В. А., Заграй И. А., Десятков И. А. Исследование дисперсности и химического состава частиц в продуктах сгорания при сжигании газоторфяной смеси в паровом котле БКЗ-210-140Ф // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2016. № 5–6. С. 55–64.
3. Отто М. Современные методы аналитической химии. М.: Техносфера, 2008. 544 с.

**КУЗЬМИН Владимир Алексеевич** – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры инженерной физики, Вятский государственный университет». 610000, г. Киров, ул. Московская, 36.

E-mail: [vl.kuzmin@mail.ru](mailto:vl.kuzmin@mail.ru)

**ЗАГРАЙ Ираида Александровна** – кандидат технических наук, доцент кафедры инженерной физики, Вятский государственный университет». 610000, г. Киров, ул. Московская, 36.

E-mail: [Zagray@vyatsu.ru](mailto:Zagray@vyatsu.ru)

**ДЕСЯТКОВ Иван Андреевич** – аспирант кафедры инженерной физики, Вятский государственный университет». 610000, г. Киров, ул. Московская, 36.

E-mail: [ivan109292@gmail.com](mailto:ivan109292@gmail.com)