

УДК 66.047.7; 662.742.2

В. А. КУТОВОЙ, канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник

Ю. Г. КАЗАРИНОВ, инженер-исследователь 1 категории

А. С. ЛУЦЕНКО, инженер-исследователь

А. А. НИКОЛАЕНКО, младший научный сотрудник

Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт», г. Харьков

В. М. КОШЕЛЬНИК, д-р техн. наук, профессор

Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», г. Харьков

## ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИЙ МЕТОД ПОДГОТОВКИ ТВЕРДОГО ТОПЛИВА К СЖИГАНИЮ

*Разработана методика термовакуумной сушки бурого угля. Приведена структура высушенного бурого угля и определено содержание азота и серы в нем после сушки, измерена влажность в высушенном буром угле. Показано, что термовакуумный метод сушки улучшает качество бурого угля, уменьшает количество примесей в нем и одновременно измельчает его.*

*Разработана методика термовакуумного сушения бурого вугілля. Приведена структура висушеного бурого вугілля і визначено зміст азоту і сірки в ньому після сушіння, виміряна вологість у висушеному бурому вугіллі. Показано, що термовакуумний метод сушіння покращує якість бурого вугілля, зменшує кількість домішок у ньому і одночасно подрібнює його.*

### Введение

В условиях энергетического кризиса возникла потребность в использовании твердых топлив: каменного и бурого угля, сланцев, и т.д. Основным направлением применения бурого угля является его топливное использование на ТЭС, малых ТЭЦ и промышленных предприятиях. Модернизация ТЭС усложнена материальными и энергетическими затратами на создание цикла подготовки твердого топлива к сжиганию. Существующие технологические процессы являются дорогостоящими, энергоемкими и взрывоопасными. Кроме того, твердое топливо, особенно бурый уголь, содержит до 3 % серы и 1,5...2% азота. Развитие теплоэнергетики в современных условиях требует высококачественного топлива с низким содержанием серы и азота.

**Цель исследования:** проведение научно-технической разработки термовакуумной методики непрерывной сушки бурого угля для уменьшения примесей в нем и увеличения его теплотворной способности.

### Основные материалы исследования

Для оптимизации цикла подготовки твердого топлива к сжиганию на ТЭС необходимо использовать альтернативные способы обработки углей, путем создания энергосберегающих технологий непрерывной сушки бурого угля и одновременного его дробления с повышением топливных характеристик. Существенным мероприятием в отношении энергосбережения является ограничение масштаба сброса теплоты в окружающую среду и защита биосферы от выбросов оксидов серы и азота, которые выделяются в процессе сжигания бурого угля.

Для измельчения, и улучшения качества бурого угля предлагается использовать термовакуумную технологию сушки.

Термотехнологическая переработка бурого угля проводили в термовакуумной установке. рис. 1 [1]).

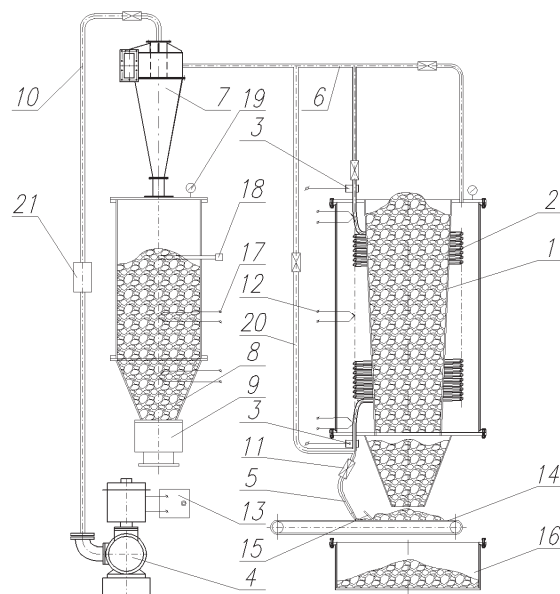


Рис. 1. Схема вакуумной сушильной установки

Установка состоит из бункера-питателя 1. Корпус бункера-питателя выполнен в виде сосуда со сквозным отверстием в его центральной части, проходное отверстие которого уменьшается в направлении сверху вниз и образует емкость - в форме перевернутого усеченного конуса. В межстенном термоизолированном пространстве бункера питателя 1 размещен вертикально резистивный нагреватель 2. Нагревательный элемент полый, имеет форму змеевика, изготовленный из материала который имеет высокое электрическое сопротивление и выполняет одновременно две функции, как вакуумный объем, и как нагреватель. Нагревательный элемент подсоединяется к электрическому источнику питания через клеммы 3. Контроль напряжения и тока в цепи нагревателя измеряется вольтметром и амперметром. Разрежение внутри нагревательного элемента создается с помощью вакуумного водокольцевого насоса 4. Входной конец нагревателя 2 подсоединен к питателю 5. Второй конец нагревателя соединен через вакуумный трубопровод 6 с циклоном 7. Циклон расположен сверху на приемнике высушенного сырья 8. Приемник продукта выполнен в виде отдельного вакуум-плотного корпуса, в нижней части которого находится шлюзовой затвор 9. Вакуумный водокольцевой насос, через трубопровод 10 соединен с циклоном 7. Нагреватель оснащен дополнительным устройством 11, позволяющим регулировать концентрацию бурого угля в нагревателе. Контроль температуры нагревательного элемента осуществляется термопарами 12, которые присоединены к прибору РТ-40, погрешность измерения:  $\pm 1^\circ\text{C}$ . Устройство РТ-40 размещено в пульте управления 13 и регулирует температуру нагревательного элемента. При достижении заданной температуры, прибор РТ-40 дает команду на отключения источника питания от нагревательного элемента. При понижении температуры нагревательного элемента на 1 градус (от заданной температуры) прибор РТ-40 дает команду на включение источника питания нагревательного элемента.

Бурый уголь из бункера-питателя 1 высыпается на ленту транспортера 14. Ракла 15 формирует на движущейся ленте, ровный слой бурого угля, который через питатель 5 поступает вместе с воздухом в трубчатый нагревательный элемент 2 и, при необходимости, дополнительно, разрыхляется воздухом через устройство подачи воздуха 11. Избыток влажного сырья, которое не помещается на транспортере, падает в емкость 16. При движении внутри нагревательного элемента бурый уголь за короткий промежуток времени нагревается до заданной температуры и под воздействием температуры и низкого давления выделяет влагу в окружающее пространство. После прохождения через нагреватель бурый уголь по

вакуумному трубопроводу 6 поступает в циклон 7. В циклоне происходит разделение пара и высушенных твердых частиц бурого угля. Пар вместе с примесями других летучих веществ через трубопровод 10 уходит в водокольцевой вакуумный насос 4, а высушенный бурый уголь проступает в приемник высушенного сырья 8. По мере заполнения приемника бурым углем включается шлюзовой затвор 9 для периодической или непрерывной выгрузки высушенного продукта.

Контроль температуры бурого угля поступающего в приемнике 8 измеряется датчиком температуры 17, а уровень высушенного угля, в приемнике, контролируется датчиком уровня 18. По мере заполнения приемника 8 высушенным материалом датчик уровня дает сигнал на включение шлюзового затвора 9.

Давление в вакуумной системе установки осуществляется вакуумметром 19. Для очищения воздуха, поступающего в водокольцевой насос, от мелкодисперсной пыли между циклоном и водокольцевым насосом устанавливается фильтр 21. Такая конструкция обеспечивает высокопроизводительную непрерывную теомовакуумную сушку дисперсных материалов рис. 1. Для интенсификации сушки необходимо обеспечить быструю подачу влажного материала внутрь вакуумного нагревательного элемента 2. Высушиваемый материал поступает вместе с воздухом в нижнюю полость нагревательного элемента 5. Движение происходит в восходящем потоке, в нагретом изолированном пространстве в который интенсивно подводят тепловую энергию дабы ускорить процесс теплообмена. Как было показано А. В. Лыковым [2] перемещение влаги из высушиваемого материала к его поверхности зависит от коэффициентов: диффузии влаги, термодиффузии, молярного переноса –  $K_{ij}$  ( $ij = 1,2,3$ ); градиента влажности, температуры, давления –  $\nabla U; \nabla T, \nabla P$ .

$$\frac{\partial U}{\partial \tau} = K_{11} \nabla^2 U + K_{12} \nabla^2 T + K_{13} \nabla^2 P; \quad (1)$$

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = K_{21} \nabla^2 U + K_{22} \nabla^2 T + K_{23} \nabla^2 P; \quad (2)$$

$$\frac{\partial P}{\partial \tau} = K_{31} \nabla^2 U + K_{32} \nabla^2 T + K_{33} \nabla^2 P; \quad (3)$$

Как видно из уравнения (1, 2, 3), движение влаги в материале при сушке происходит не только вследствие изменения влажности, но и под действием температурных перепадов. Кроме того, кинетические коэффициенты  $K$  — не постоянные величины, а являются некоторыми функциями температуры, давления и влажности. Уравнение 1,2 описывает закон сохранения массы и энергии, а уравнения 3 отражает влияние микроструктуры вещества на тепло - и массообмен. Анализируя уравнение (1, 2, 3) можно выявить пути интенсификации процесса сушки:

- а) увеличением разности давлений насыщенного пара у поверхности испарения и парциального давления пара в окружающей среде –  $\Delta P$ ;
- б) увеличением площади поверхности испарения;
- в) увеличением коэффициента, учитывающего гидродинамические условия на поверхности испарения;
- г) повышения температуры нагревания тела высушиваемого материала.

Скорость сушки угля зависит от коэффициента теплопередачи от нагревателя к высушиваемому материалу, мощности источника тепла, площади испарения, разности давлений окружающей среды и давления в теле высушиваемого материала, производительности вакуумного насоса.

Скорость двухфазного потока, которая обеспечивает работоспособность данной системы, можно определить из выражения [3].

$$\omega = \frac{\pi r^2 d^2 (P_1 - P_2) (\rho_t - \rho_c) \nu_1 K_v^2}{R \ell \mu} \quad (4)$$

где  $\omega$  – скорость движения двухфазного потока, м/с;  
 $d$  – диаметр частицы, м;  $r$  – радиус трубы нагревательного элемента, м;  
 $P_1$  – начальное давление, Па;  $P_2$  – конечное давление, Па;  
 $\rho_t$  – плотность высушиваемого материала, кг/м<sup>3</sup>;  $\rho_c$  – плотность среды, кг/м<sup>3</sup>;  
 $K$  – фактор формы частиц;  
 $l$  – длина нагревательного элемента, м;  
 $\mu$  – коэффициент динамической вязкости воздуха, Па·с;  
 $V_1$  – скорость витания при температуре, м/с;

$R$  – коэффициент сопротивления, кг/с.

В участке нагревательного элемента установившаяся скорость движения транспортируемых частиц составляет 9,0 м/с.

Из результатов экспериментального исследования следует, что весовая концентрацию бурого угля в потоке воздуха составляет 1,3 кг/м<sup>3</sup>, а объемная концентрация бурого угля в потоке воздуха составляет – 1,1 10<sup>-3</sup> м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>.

На влажный материал, который двигается в полости нагревательного элемента, оказывает влияние центробежная сила.

$$F = \frac{1}{6} \pi d^3 \Delta \rho \omega^2 r, \quad (5)$$

где  $d$  – диаметр частицы, м;  
 $\Delta \rho$  – разность плотностей твердой и газообразной фаз, кг/м<sup>3</sup>;  
 $\omega$  – частота вращения, с<sup>-1</sup>;  
 $r$  – расстояние от частицы до оси вращения, м.

Под действием центробежной силы материал соприкасается со стенкой нагревательного элемента, в результате чего частицы бурого угля получают мощный поток тепловой энергии за малый промежуток времени. Начинается процесс интенсивного паровыделения внутри тела. Давление превышает прочностные свойства высушиваемого материала и уголь распадается на мелкие частицы, что способствует увеличению отвода жидкости из высушиваемого объекта. При движении в полости нагревательного элемента, возникает сила трения между стенкой и материалом, частицы модифицируются в мелкодисперсный порошок, с влажностью 0,5 %, измельчается до фракции от 0,1 до 12 мкм, (рис. 1).

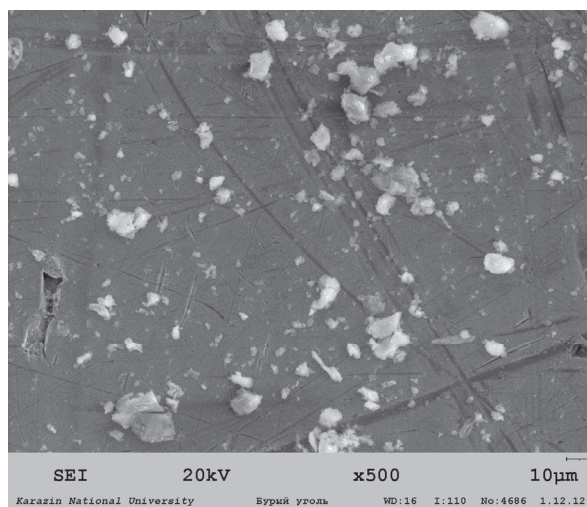


Рис.1

Результаты сушки бурого угля приведены в табл. 2. Для сравнения приведена сушка угля антрацит. Из результатов исследования видно, что влага с антрацита удаляется медленнее,

чем из бурого. Это определяется структурной, плотностью материалов и обусловлено разными коэффициентами массо-теплопроводности.

Таблица 2

## Результаты сушки бурого угля

№п/п	Уголь	Температура нагревателя, °С	Температура высушенного угля, °С	Начальная влажность, %	Конечная влажность, %	Время сушки, с
1	Бурый	250	80	14,88	0,51	12
2	Антрацит	250	80	12,25	0,57	12

С помощью рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии исследованы спектры серы и азота в высушенном буром угле (рис. 2).

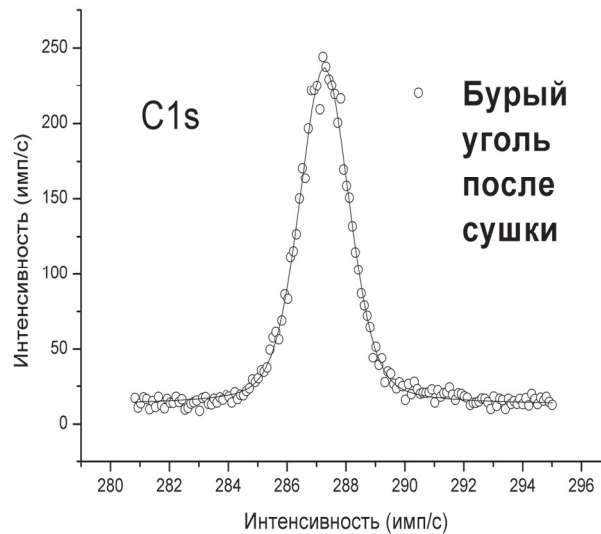


Рис. 2. Рентгеновский фотоэлектронный спектр линии C1s в образце бурого угля после термовакуумной сушки

Спектр 1s линии углерода состоит из одной линии с максимумом 287,3 эВ. Модифицированный Оже параметр равный 549,1 эВ соответствует аморфному углероду, а сдвиг спектра в результате подзарядки составил 3 В. Также, в спектре зарегистрирована слабая линия O1s связанная со следами адсорбированных на поверхности воды и углекислого газа.

Из результатов исследования установлено, количество серы в высушенном буром угле понизилось с 3,2 % ниже порога чувствительности прибора. Количество содержания азота уменьшилось с 1,7 % тоже ниже порога чувствительности (рис. 3).

Линия индия, обусловлена подложкой из индия в которую впрессован порошок бурого угля. Линий серы и азота в спектре не обнаружено, что свидетельствует о том, что концентрация этих элементов ниже порога обнаружения, что составляет для серы и азота менее 1 % ат. Пик кислорода связан с адсорбированными водой и углекислым газом.

### Выводы

Проведена научно-техническая разработка экологически чистой, высокопроизводительной термовакуумной методики непрерывной сушки бурого угля.

Сушка бурого угля в термовакуумной установке происходит равномерно, размер кристаллов угля не более 12мкм, конгломераты в полученном порошке отсутствуют.

Термовакуумный метод сушки понижает содержание серы в буром угле в 4,6 раза, а азота – 8,5 раза.

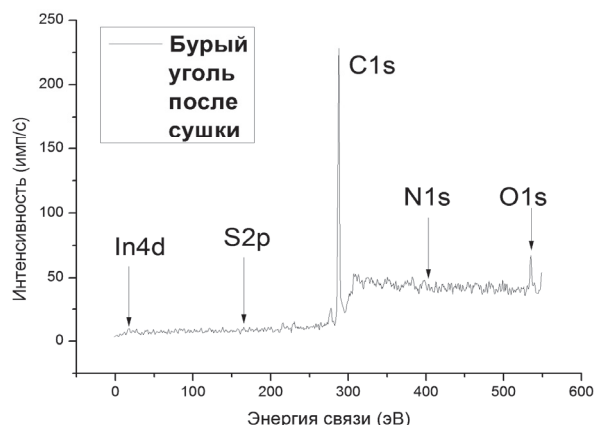


Рис. 3. Обзорный рентгеновский фотоэлектронный спектр образца бурого угля после термовакуумной сушки

Эффективность процесса сушки зависит от подведенного тепла к материалу, интенсивности перемещения влаги в материале и скорости отвода последней от поверхности тела.

Применение термовакуумных технологий позволяет создать энергосберегающие, высокоэффективную методику, непрерывной сушки угля и одновременного его дробления. Такие установки позволяют снизить затраты на удаление влаги и повысить экологию технологического процесса и улучшить качество бурого угля.

#### Список литературы

1. Пат. 81138 Україна. МПК F26B9/06. Пристрій для термовакуумного сушіння/ Кутовий В. О. – № а200507488; заявл. 27.07 2005; опубл. 10.12.07. Бюл. № 20. 5 с.
2. Лыков А. В. Тепломассообмен: [Справочник] / А. В. Лыков. – М.: Энергия, 1972, – 309 с.
3. Разумов И. М. Псевдооживление и пневматический транспорт сыпучих материалов / И. М. Разумов. – Москва: Химия, 1964. –160 с.

#### ENERGY-SAVING METHOD OF PREPARATION OF SOLID FUEL TO BURNING

V. A. KUTOVOY, Cand. Physicomathematical Sciences, senior researcher,  
 A. S. LUTSENKO, engineer-researcher  
 Ju. G. KAZARINOV, Research Engineer Category 1  
 A. A. Nikolaenko, Junior Researcher

*A technique for thermo vacuum drying of brown coal was developed. The paper presents the structure of brown coal, determines its nitrogen and sulfur content after drying and gives measurement of humidity in dried brown coal. It shows that the thermo vacuum drying method improves quality of brown coal, decreases the amount of impurities in it, while comminuting it.*

Поступила в редакцию 18.05 2013 г.