

УДК 66.047.7

**В. М. КОШЕЛЬНИК**, д-р техн. наук, проф.; зав. каф. НТУ «ХПИ»;  
**В. А. КУТОВОЙ**, канд. физ.-мат. наук, с.н.с.; с.н.с. ННЦ «ХФТИ», Харьков;  
**А. С. ЛУЦЕНКО**, инженер-исследователь ННЦ «ХФТИ», Харьков

## НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ТЕРМОВАКУУМНОЙ СУШКИ УГЛЕРОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Разработка новых энергосберегающих теплотехнологических установок является важной научно – технической проблемой, связанной с использованием системного подхода к решению задач энергосбережения применительно к теплофизическим явлениям, реализуемым в теплотехнологических системах и комплексах. В работе представлены результаты исследований энергоэффективного процесса сушки и измельчения бурого угля в термовакуумной установке. Приведены расчеты нагревательного элемента термовакуумной установки. Практическая значимость проведенных исследований связана с возможностью создания промышленного производства нового поколения экологически чистых энергосберегающих термовакуумных сушильных установок.

**Ключевые слова:** энергосбережение, экология, сушка, измельчение, вакуум.

### Введение

Известно, что около 80 % добываемого в Украине угля содержит серу. Для её удаления необходимо измельчить матрицу на фракцию мене 100 мкм с последующим удалением частиц серы. Операция удаления серы из угля трудоемкая, с большими затратами энергии и средств. Согласно существующим технологиям на измельчение угля до тонких фракций расходуется до 150 кВт·ч/т, при этом процессы измельчения не соответствуют экологическим нормам загрязнения окружающей среды [1, 2]. Современные сушильные установки должны обеспечивать однородное температурное поле в массе влажного дисперсного сырья, иметь простую конструкцию и, соответственно, быть как можно более надежными, просты и удобны в изготовлении и обслуживании, иметь высокую производительность при малом удельном расходе энергии; быть пригодными для перевозки и быстрого развертывания в рабочее положение, обеспечивать как можно более стабильные параметры сушки и получить стандартную по качеству продукцию.

Повышение эффективности технологического процесса сушки и уменьшение энергопотребления сушильной установки является актуальной задачей. Решение этих задач должно базироваться на изыскании новых, более эффективных методов энергопотребления сушильной установкой и соответствующих оптимальных режимов технологического процесса, обеспечивающего повышение энергетического КПД установки. Необходимо также учитывать физико-химические свойства высушиваемого объекта. Это дает возможность на основе выбранного критерия оптимальности и варьируемых факторов определить параметры режима технологического процесса сушки и получить энергосберегающую, высокоэффективную сушильную установку. В качестве критерия оптимальности выбирается такой показатель, как минимальная продолжительность сушки, что в свою очередь приводит к сокращению времени термического воздействия на высушиваемый объект.

### Анализ основных достижений и литературы

Потребность в сушке и измельчении углеродных материалов имеет в настоящее время массовый спрос. Поэтому разработка и внедрение новых энергосберегающих

© В.М. Кошельник, В.А. Кутовой, А.С. Луценко, 2014

теплотехнологических установок для сушки и измельчения углеродных материалов является важной научно – технической проблемой, которая решается в рамках научного направления – промышленной теплоэнергетики. В настоящее время во всем мире ведутся разработки по созданию эффективных, энергосберегающих термотехнологических установок, совершенствуются методы интенсификации технологических процессов с целью повышения эффективности теплотехнического оборудования.

В работе [3] приведен электроразрядный метод снижения содержания серы в угле до норм экологических требований – меньше чем 1 %. Замена механического измельчения угля на электроразрядное – обеспечивает тонкую дезинтеграцию угля на фракции ниже 50 мкм с затратами энергии (до 30 кВт·ч/т). Данные сушильные установки имеют множество неудобств. В них не обеспечивается однородность температурного поля даже в тонких слоях сырья, а теплопередача к твердому телу очень низкая. Чем ниже коэффициент теплопередачи от теплоносителя до влажного дисперсного материала, тем хуже обеспечивается однородность температурного поля в слоях высушиваемого сырья. В данных установках необходимо выравнять температурное поле в массе влажного материала, чтобы избежать его локального перегрева. Стоимость данного оборудования и его эксплуатационные расходы чрезмерно высоки. Данные установки используют много тепловой энергии на единицу веса материала.

Для сушки разнообразных сыпучих материалов также используют трубы – сушилки [4]. Установки этого типа представляют прямую вертикальную трубу, в нижнюю часть которой поступают газ-теплоноситель и влажный материал. Влажный материал подхватывается потоком газа и при движении вверх подвергается тепловой обработке. В качестве теплоносителя используются продукты горения или горячий воздух. В этих устройствах сочетается сушка материала и его транспортировка. Недостатком такой сушилки является низкий тепловой КПД, неодинаковая степень термической обработки высушиваемого материала, применение продуктов горения, что существенно увеличивает стоимость процесса сушки и повышает энергоемкость.

#### **Материалы исследования**

Одним из перспективных направлений современного подхода к эффективному использованию энергетических ресурсов является реализация концепции по интенсификации процесса теплообмена при удалении влаги из гетерогенных материалов. В настоящее время ведутся разработки по созданию новых эффективных, энергосберегающих термотехнологических установок, совершенствуются методы интенсификации технологических процессов с целью повышения эффективности теплотехнического оборудования. Наиболее эффективным способом обезвоживания различных материалов – является термовакуумный, что подчеркивает актуальность данной темы, перспективность использования термовакуумных установок для удаления влаги из гетерогенных сред [5, 6]. Таким образом, актуальной проблемой является создание новых термотехнологических установок с улучшенными эксплуатационными и технико-экономическими характеристиками для интенсификации теплообменных процессов, которые позволят эффективно подводить тепло к высушиваемому материалу, ускорят процесс тепло- и массообмена в нем, сократят время сушки.

#### **Результаты исследования**

**Целью** данной работы является научное обоснование тепломассобменных технологических процессов и разработка, на базе совершенствования теплофизических

механизмов, енергосберегающей термовакuumной методики сушки углеродных материалов.

Для улучшения качества бурого угля предлагается термовакuumный метод его обработки [7]. Бурый уголь влажностью 40 %, размером до 6мм (рис. 1) поступает в полый нагревательный элемент термовакuumной установки, рис. 2. В термовакuumной установке бурый уголь сушится и одновременно измельчается, рис. 3.



Рис. 1 – Бурый уголь, исходный

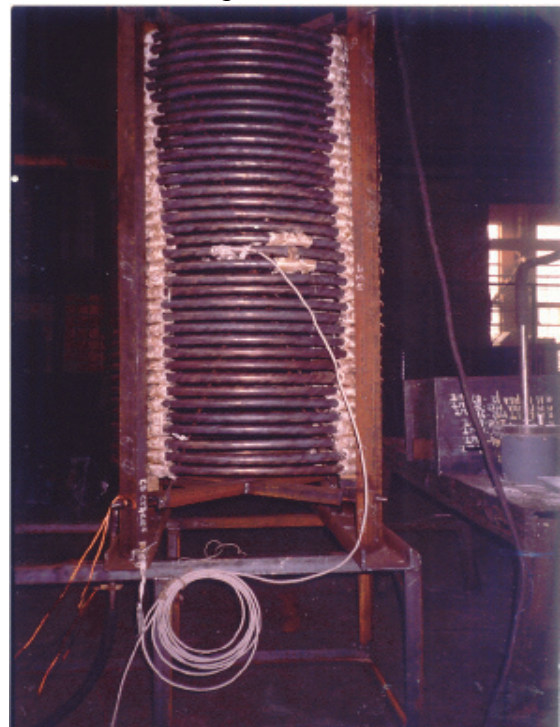


Рис. 2 – Нагревательный элемент термовакuumной установки



Рис. 3 – Бурый уголь, высушенный

Влияние термовакuumных процессов на сушку дисперсных материалов осуществляется за счет переноса влаги из внутренних слоев материала к его поверхности, превращения влаги в пар и удаление пара с поверхности в окружающее пространство. Для этого необходима тепловая энергия  $Q$ , которая используется для подогревания материала и его влаги до температуры испарения

$$dQ = (c_1 m_c + c_2 m_v) dT + [c_4 + c_c (T_{\text{п}} - T_{\text{и}})] dm_v, \quad (1)$$

где  $c_1, c_2$  – теплоемкость сухого сырья и влаги, Дж/(кг·К);  $c_4$  – удельная теплоемкость парообразования,

Дж/(кг·К);  $c_c$  – средняя удельная теплоемкость пара, при  $P = \text{const}$ , Дж/(кг·К);  $m_c, m_b$  – масса сухого сырья и влаги, кг;  $T_{\Pi}$  – температура, до которой перегревается пар влаги, уходящий с поверхности материала, К;  $T_{\text{и}}$  – температура испарения влаги, К.

Количество тепла, передаваемого высушиваемому материалу с площадью  $S$  за бесконечно малый промежуток времени  $d\tau$ , определяется из выражения:

$$dQ = \alpha S(T_c - T_{\Pi})d\tau, \quad (2)$$

где  $\alpha$  – коэффициент теплопередачи;  $T_c$  – температура среды сушильной камеры, К.

Сопоставляя формулу (1) с формулой (2) находим выражение для скорости сушки

$$\frac{dm_b}{d\tau} = \frac{\alpha S(T_c - T_{\Pi}) - (c_1 m_c + c_2 m_b) \frac{dT}{d\tau}}{c_4 + c_c(T_{\Pi} - T_{\text{и}})}. \quad (3)$$

В сушильных установках непрерывного действия процесс сушки разделяется на два периода. В тот момент, когда высушиваемый материал поступает в сушильную камеру, температура тела падает и ещё некоторое время продолжает снижаться, это связано с тем, что в это время сушка происходит не за счёт подводимого внешнего тепла, а за счёт внутренней энергии самого материала. В первый период сушки пар, выделяющийся с поверхности материала, является насыщенным, его температура равна температуре испарения влаги  $T_{\Pi} = T_{\text{и}}$ , следовательно, второй член знаменателя выражения (3) обращается в нуль. Тогда для этого периода сушки выражение (3) можно переписать в виде

$$\frac{dm_b}{d\tau} = \frac{\alpha S(T_c - T_{\Pi}) - (c_1 m_c + c_2 m_b) \frac{dT}{d\tau}}{c_4}. \quad (4)$$

Первый член числителя представляет собой тепло сушильной камеры, передаваемое высушиваемому материалу за единицу времени; второй член – это внутреннее тепло, которое расходуется на нагревание материала и его влаги за этот же промежуток времени.

В первый период сушки прогрев высушиваемого материала за счет внешнего источника тепла отсутствует и скорость сушки, как видно, становится практически зависимой только от произведения  $\alpha S(T_c - T_{\Pi})$ .

При дальнейшем нагревании высушиваемого материала за счет внешнего источника тепла (второй период сушки) влага из центральных слоев материала движется к поверхности в жидком виде. На поверхности она испаряется и дальше движется в парообразном состоянии. Находясь в контакте с нагревателем, пар успевает прогреться до температуры нагревателя и уходит из сушильной камеры в водокольцевой насос. В самом начале второго периода сушки режим работы сушильной установки становится установившимся.

Электрическая мощность нагревателя термовакуумной установки должна, за определенный промежуток времени, обеспечить нагревание сухого сырья, влаги,

деталей и узлов сушильной установки, превратит влагу в пар и скомпенсировать ту часть тепла, которая уходит в окружающее пространство.

Если предположить, что диаметр спирали змеевика  $D$ , то длина  $L_c$  одной спирали нагревательного элемента

$$L_c = \pi D. \quad (5)$$

Тогда количество спиралей  $N$  нагревательного элемента при длине трубопровода  $l$  будет

$$N = \frac{l}{L_c} = \frac{1}{\pi D}. \quad (6)$$

Высоту  $H_{нэ}$  нагревательного элемента можно определить из выражения

$$H_{нэ} = Nd_1 = \frac{1}{L_c} d_1. \quad (7)$$

Сопротивление  $R_{нэ}$  нагревательного элемента определятся из выражения

$$R_{нэ} = \frac{l\rho}{S_4}, \quad (8)$$

где  $\rho$  – удельное электрическое сопротивление материала, из которого изготовлен нагревательный элемент.

Определим площадь поперечного сечения  $S_4$  трубчатого нагревательного элемента из выражения

$$S_4 = \frac{\pi d_1^2}{4} - \frac{\pi d_T^2}{4} = \frac{\pi}{4} (d_1^2 - d_T^2), \quad (9)$$

где  $d_1$  – наружный диаметр нагревательного элемента, м;  $d_T$  – внутренний диаметр нагревательного элемента, м.

Значение  $S_4$  с выражения (9) подставим в выражение (8).

Сопротивление нагревательного элемента  $R_{нэ}$  примет вид

$$R_{нэ} = \frac{4l\rho}{\pi(d_1^2 - d_T^2)}, \quad (10)$$

Определим максимальную мощность  $P_H$  нагревательного элемента из выражения:

$$P_H = I_H^2 R_{нэ}, \quad (11)$$

где  $I$  – ток в нагревательном элементе.

Подставим значение сопротивления из выражения (10) в выражение (11). Максимальную мощность, которую даст нагреватель можно определить из выражения

$$P_H = I_H^2 \frac{4l\rho}{\pi(d_1^2 - d_T^2)}, \quad (12)$$

Из выражения (12) следует, что размеры и материал нагревательного элемента нужно подбирать таким образом, чтобы обеспечить электрическую мощность, для создания необходимого теплового потока, направленного на непрерывную сушку влажного материала до заданной влажности.

Рабочее тело, которое входит в нагревательный элемент с начальной температурой  $T_{p0}$  отбирает от стенок нагревателя тепло

$$Q = -T_{p0}(S_{30} - S_{31}), \quad (13)$$

где  $S_{30}, S_{31}$  – начальное и конечное значение энтропии нагревателя, Дж/К;

Если в нагревательный элемент входит рабочее тело с удельной эксэргией  $E_1$ , а выходит из него с эксэргией  $E_2$  значит, аппарат свершил свою техническую работу  $A_{\text{тех}}$ . Таким образом, потеря энергии в аппарате будет

$$\Delta A = (E_1 - E_2) - A_{\text{тех}}. \quad (14)$$

Если  $\Delta A \rightarrow 0$ , то все происходящие в нагревателе процессы обратимы. Получается максимально возможная в данных условиях работа

$$A_{\text{тех}} = E_1 - E_2. \quad (15)$$

Потеря энергии может происходить только из-за необратимости протекающих в нагревателе процессов. Чем больше необратимость, тем больше  $\Delta A$  и меньше полезная работа  $A_{\text{тех}}$ .

Если полезная работа нагревателя  $A_{\text{тех}}$ , и в неё входит поток рабочего тела с эксэргией  $E_{\text{вх}}$  и подводится поток тепла к нагревательному элементу с эксэргией  $E_q$  от источника с температурой  $T_{\text{ист}}$ , а из нагревателя выходит поток рабочего тела с эксэргией  $E_{\text{вых}}$  то потеря работоспособности составит

$$\Delta A = [(E_{\text{вх}} - E_q) - E_{\text{вых}}] - A_{\text{тех}}. \quad (16)$$

В величину  $\Delta A$  входят потери работоспособности, обусловленные трением и теплообменом при конечной разности температур, а также потери теплоты нагревателем вследствие теплообмена с окружающей средой. Для количественной оценки степени термодинамического совершенства нагревателя используется эксэргетический КПД

$$\eta_{\text{экс}} = \frac{A_{\text{тех}}}{E_{\text{вх}} - E_{\text{вых}} + E_q}. \quad (17)$$

Из выражения (17) следует, чем выше конечная эксэргия нагревателя и чем меньше эксэргия теплоты, тем выше эксэргетический КПД нагревателя.

Рассматривая рабочие процессы сушки и измельчения бурого угля, отметим, что при движении в полости нагревательного элемента термовакuumной установки по спиральному каналу, на влажный дисперсный материал влияет центробежная сила  $F_{ц}$ ,

$$F_{ц} = \frac{mv^2}{R}, \quad (18)$$

где  $m$  – масса материала, кг;  $v$  – скорость движения, м/с;  $R$  – радиус центробежной силы, м.

Центробежная сила прижимает влажную частицу дисперсного материала к стенке нагревательного элемента. Элемент поверхности  $dS$  влажной частицы дисперсного материала получает приток теплоты  $dQ$  от стенки нагревателя с температурой  $T$  за промежуток времени  $\Delta t$  при постоянном значении коэффициента теплопередачи  $K$ .

Температура части тела  $T_1$  влажного материала за счет интенсивного теплообмена между дисперсным материалом и стенкой нагревательного элемента становится выше температуры испарения влаги  $T_2$ , т.е.  $T_1 > T_2$ . Начинается процесс интенсивного парообразования внутри тела. В результате чего, давление внутри тела становится значительно выше, чем на поверхности. Дисперсный материал разрушается на мелкие фрагменты, т.е. масса высушиваемого тела  $m$  является функцией во времени  $\tau$ .

$$m = m(\tau).$$

В зависимости от режимных параметров термовакuumного процесса и характеристик высушиваемого материала происходит изменение его физических, химических и механических свойств. Например, бурый уголь превращается в мелкодисперсный. Это продолжается до тех пор, пока система не будет находиться в локально-равновесном состоянии. При этом, количество электроэнергии, затраченной на получение мелкодисперсного бурого угля влажностью 0,5 % из исходной влажностью 42 % при температуре нагревательного элемента 573 К и давлении окружающей среды ( $1,33 \cdot 10^4$  Па) – составляет 24 кВт·ч/т.

Сушка бурого угля в термовакuumной установке происходит в течение 15 с. Минимальный размер кристаллов 10 nm.

### **Выводы**

Результаты теоретических и экспериментальных исследований, представленные в данной работе, направлены на реализацию технологического процесса сушки и одновременного измельчения углеродных материалов.

На примере сушки бурого угля в термовакuumной установке показано, что термовакuumный метод снижает содержание серы в буром угле в 4,6 раза, азота – 8,5 раза, что приводит к уменьшению объема вредных выбросов в атмосферу при его сжигании.

Дана оценка эффективности термодинамической системы за период эксплуатации оборудования. Скорость сушки зависит от коэффициента теплопередачи от нагревателя к высушиваемому материалу, величины источника тепла.

Повышение экономичности процесса сушки влажных материалов, и получение качественной высушенной продукции, главным образом, связано с внедрением в



производство новых современных экологически чистых установок и энергосберегающих технологий, которые с успехом могут решать поставленные задачи.

Применение термовакuumных технологий позволяет создать энергосберегающую, высокоэффективную методику непрерывной сушки углеродных материалов и одновременного его измельчения и повысить экологию технологического процесса.

**Список литературы:** 1. Ризун, А. Р. Электроразрядная дезинтеграция и десульфурация угля при изготовлении водно-угольного топлива [Текст] / А. Р. Ризун, Т. Д. Денисюк, Ю. В. Голень, В. Ю. Кононов, А. Н. Рачков // Электронная обработка материалов. – 2011. – № 47(1). – С. 113–115. 2. Филипенко, Ю. Н. Подготовка угольного топлива для пылевидного сжигания на тепловых электростанциях [Текст] / Ю. Н. Филипенко, П. Т. Скляр, Е. В. Харлова, Е. В. Юдавина, Н. В. Чернявский // Збагачення корисних копалин. – 2013. – Вип. 53(94). – С. 54–61. 3. Высоцкий, С. П. Десульфурация и обогащение углей перед их сжиганием на ТЭС [Текст] / С. П. Высоцкий, Ю. С. Мاستика и др. // Энергетика и электрофикация. – 1993. – № 3. – С. 53–56. 4. Бабуха, Г. Л. Механика и теплообмен потоков полидисперсной газозвеси [Текст] / Г. Л. Бабуха, М. И. Рабинович. – Киев: Наукова думка, 1969. – С. 185–186. 5. Пат. 81138 Україна. МПК F26B9/06. Пристрій для термовакuumного сушіння / Кутовий В. О.; Заявник та патентовласник ННЦ ХФТИ. – № а200507488; заявл. 27.07.2005; опубл. 10.12.07. Бюл. № 20. – 5 с. 6. Научно-практические основы энергосберегающего термовакuumного процесса сушки дисперсных материалов [Текст] / В. А. Кутовой, А. С. Луценко, В. М. Кошельник // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Х.: НТУ «ХПІ», 2013. – № 70(1043). – С. 175–180. 7. Кошельник, В. М. Энергосберегающая термовакuumная сушка и измельчение бурого угля [Текст] / В. М. Кошельник, В. А. Кутовой, Ю. Г. Казаринов, А. С. Луценко // Наука техніка, технологія, освіта, здоров'я: матеріали ХХІ Міжнародної науково-практичної конференції, Харків, 31 травня 2013 р. – С. 297.

**Bibliography (transliterated):** 1. Rizun, A. R., et al. "Jelektrozrjadnaja dezintegracija i desul'furacija uglja pri izgotovlenii vodno-ugol'nogo topliva." *Jelektroonnaja obrabotka materialov* 47(1) (2011): 113–115. Print. 2. Filipenko, Ju. N., et al. "Podgotovka ugol'nogo topliva dlja pylevidnogo szhiganija na teplovyh jelektrostantsijah." *Zbagachennja korysnyh kopalyn* 53(94) (2013): 54–61. Print. 3. Vysockij, S. P., et al. "Desul'furacija i obogashhenie uglej pered ih szhiganiem na TJeS." *Jenergetika i jelektrofikacija* 3 (1993): 53–56. Print. 4. Babuha, G. L., and M. I. Rabinovich. *Mehanika i teploobmen potokov polidispersnoj gazovzvesi*. Kiev: Naukova dumka, 1969. 185–186. Print. 5. Kutovoj, V. O. "Prystrij dlja termovakuumnogo sushinnja." U Patent 81138 (MPK F26B9/06) 10 December 2007. 6. Kutovoj, V. A., A. S. Lucenko and V. M. Koshel'nik. "Nauchno-prakticheskie osnovy jenergosberegajushhego termovakuumnogo processa sushki dispersnyh materialov." *Visnyk NTU "HPI". Serija: Novi rishennja v suchasnyh tehnologijah*. No. 70(1043). Kharkiv: NTU "HPI", 2013. 175–180. Print. 7. Koshel'nik, V. M., et al. "Jenergosberegajushhaja termovakuumnaja sushka i izmel'chenija burogo uglja." *Nauka tehnik, tehnologija, osvita, zdorov'ja: materialy HHI Mizhnarodnoi' naukovo-praktychnoi' konferencii' 31 May 2013*. Kharkiv, 297. Print.

Поступила (received) 19.02.2014