

УДК 66. 047. 7, 66.047.3

В. А. КУТОВОЙ, кандидат физико-математических наук, старший. научный сотрудник, kuto-  
voy@kipt.kharkov.ua

А. С. ЛУЦЕНКО, инженер-исследователь, anylucenko@mail.ru

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

## ОСОБЕННОСТИ МЕХАНИЗМОВ ТЕРМОВАКУУМНОГО ПРОЦЕССА СУШКИ И ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ ДИСПЕРСНОГО МАТЕРИАЛА

*Проведены теоретические и экспериментальные исследования, направленные на решение научно - прикладной проблемы по определению механизма непрерывного процесса сушки и одновременного измельчения дисперсных материалов в термовакуумной установке.*

*Приведено описание и принцип действия экспериментальной термовакуумной установки.*

*Результаты теоретических и экспериментальных исследований продемонстрировано на получении диоксида циркония из гидроксида циркония, что подтверждает возможность значительно уменьшить энергозатраты при сушке и измельчении различных дисперсных материалов по сравнению с существующими сушильными установками.*

*Проведені теоретичні та експериментальні дослідження, які спрямовані на вирішення науково - прикладної проблеми по визначенню механізму безперервного процесу сушіння і одночасного подрібнення дисперсних матеріалів в термовакуумній установці.*

*Наведено опис і принцип дії експериментальної термовакуумної установки.*

*Результати теоретичних і експериментальних досліджень продемонстровано на виготовленні діоксиду цирконію із гідроксиду цирконію, що підтверджує можливість значно зменшити енергозатрати при сушінні і подрібненні різних дисперсних матеріалів у порівнянні із існуючими сушильними установками.*

### Введение

Сушка и измельчение дисперсных материалов является довольно распространенным технологическим процессом в различных отраслях промышленности и является одним из самых сложных тепломассообменных процессов. В процессе сушки влага под действием подведенной теплоты превращается в пар. Пар перемещается из глубины высушиваемого материала к его поверхности. Этот процесс продолжается до установления состояния равновесия между влажным материалом и влагосодержанием сушильного агента. За способом подвода теплоты к высушиваемому материалу различают следующие методы сушки: конвективный, контактный, радиационный, сублимационный, диэлектрический. [1, 2, 3, 4]. Повышение эффективности процессов сушки главным образом связано с необходимостью комплексного решения достаточно сложных задач теплофизической и термодинамической направленности с внедрением в производство новых современных экологически чистых, термотехнологичных установок с улучшенными эксплуатационными и технико-экономическими характеристиками [5, 6]. Их использование позволит эффективно подводить тепло к высушиваемому материалу, существенно ускорить процесс тепло - и массообмена в нем, сократит время технологического процесса.

Таким образом, научное обоснование термо-массообменных процессов в термотехнологичных установках и разработка энергосберегающих методов сушки и измельчения дисперсных материалов является актуальной научно-технологической проблемой, что позволит значительно снизить потребление энергетических ресурсов и определить дальнейшее направление научных исследований.

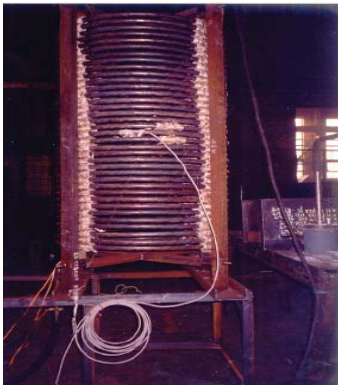
### Основные научные положения рабочих процессов

Чтобы получить эффективный и экономичный метод термовакуумной сушки и одновременного измельчения дисперсного материала необходимо обеспечить быструю подачу влажного материала внутрь нагревательного элемента. Это можно осуществить, если высушиваемый материал поступает вместе с воздухом в полость резистивного полого нагревателя, изготовленного в форме спирали (рис. 1). Возникает двухфазная система газ - твердые частицы. Движение двухфазной системы происходит в восходящем потоке

в нагретом изолированном пространстве при пониженном давлении. Из результатов экспериментальных исследований установлено, что скорость двухфазного потока  $\omega$ , обеспечивающего работоспособность данной установки определяется из выражения.

$$\omega = \frac{\pi \cdot r^2 \cdot d^2 \cdot P_c \cdot (\rho_1 - \rho_2) \cdot V}{2 \cdot R \cdot l \cdot \mu} \quad (1)$$

$$P_c = \frac{P_1 - P_2}{2}$$



Общий вид

нагревательного элемента

где  $\omega$  – скорость движения двухфазного потока в нагревательном элементе имеющего форму змеевика, м/с;

$r$  – внутренний радиус нагревательного элемента, м;

$d$  – диаметр частицы, м;

$P_c$  – среднее давление внутри нагревательного элемента, Па;

$P_1, P_2$  – начальное и конечное давление на концах нагревательного элемента, Па;

$\rho_1$  – плотность материала кг/м<sup>3</sup>;

$\rho_2$  – плотность среды, кг/м<sup>3</sup>;

$V$  – скорость транспортирующего потока, м/с;

$R$  – коэффициент сопротивления, кг/с

$l$  – длина нагревателя, м;

$\mu$  – коэффициент динамической вязкости воздуха, Па·с.

Скорость твердых частиц в восходящем потоке зависит от ее формы, размера, веса, состояния ее поверхности материала стенки нагревателя. При формировании двухфазной системы газ-твердые частицы необходимо обеспечить скорость движения обеих сред одновременно от места входа в нагревательный элемент к месту выхода из аппарата. Взаимодействие между твердыми частицами и газом проявляется в виде аэродинамической силы, действующей на частицы в направлении скорости движения. Величина этой силы при установившемся режиме равна потере напора, затрачиваемого на преодоление сопротивления движения твердых частиц в газовом потоке, в котором частицы подвижны и разделены между собой газовой прослойкой.

Аэродинамическая сила, действующая на частицу, может иметь положительное значение только при условии, что она значительно превышает вес частиц, и все вновь вводимые твердые частицы приобретают положительное ускорение. Таким образом, по характеру движения материала восходящий поток имеет два участка по длине нагревательного элемента: разгонный участок с ускоренным движением материала и участок стабилизированного движения с равномерным движением материала.

Размер разгонного участка можно определить из выражения [7].

$$H = \frac{v_B}{2g} \left[ (v + v_B) \ln \frac{u_2 - v - v_B}{u_1 - v - v_B} - (v - v_B) \ln \frac{u_2 - v + v_B}{u_1 - v + v_B} \right] \quad (2)$$

где  $v$  – кинематическая вязкость воздуха м<sup>2</sup>/с;  $g$  – скорость свободного падения, м/с<sup>2</sup>;  $u_2$  – равновесная скорость в конце участка, м/с;  $u_1$  – скорость в начале участка м/с.  $v_B$  – скорость витания при температуре, м/с

Например, длина разгонного участка в термовакуумной установке для гидроксида циркония равна 12 м.

В двухфазном потоке под влиянием внешних сил, твердые частицы перемешаются не только вдоль потока, но и в поперечном направлении и непрерывно соударяются друг с другом и со стенками. При каждом таком соударении скорость частицы изменяется скачкообразно. Соударения частиц и удары их о стенки приводят к большому разнообразию траекторий частиц; время пребывания отдельных частиц в потоке и распределение их по скоростям в любом сечении потока становятся неопределенными, и при установлении этих величин для потока в целом приходится оперировать усредненными данными. Одним из существенных параметров двухфазного потока является объемная концентрация высушиваемого материала в транспортируемом газовом потоке.

$$\sigma = \frac{m}{3600\gamma u \pi R^2} \quad (3)$$

где  $\sigma$  - объемная концентрация высушиваемого материала в транспортирующемся потоке;  $\text{м}^3/\text{м}^3$ ;

$m$  - производительность установки, кг/час;

$\gamma$  - удельный вес транспортируемого вещества  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;

$u$  - скорость транспортируемых частиц, м/с;

$R$  - радиус нагревательного элемента, м.

Концентрация твердой фазы для гидроксида циркония в термовакуумной установке соответствует  $1,1 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{м}^3$ . Эту концентрацию можно считать верхним пределом с содержанием твердой фазы в объеме транспортирующего газа.

Структура двухфазного потока тесно связана с величиной концентрации в нем твердых частиц. Концентрация в термовакуумной установке определяется согласно выражению.

$$k = \frac{m}{3600 u \pi R^2} \quad (4)$$

где  $k$  - весовая концентрация высушиваемого материала в транспортирующемся потоке,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;

$m$  - производительность установки, кг/час;

$u$  - скорость транспортируемых частиц, м/с;

$R$  - радиус нагревательного элемента, м.

Например, максимальная концентрация твердой фазы гидроксида циркония в транспортирующем потоке газа термовакуумной установки,  $1,2 \text{ кг}/\text{м}^3$ , что совпадает с экспериментальными данными [8].

Рассматривая рабочие процессы сушки и измельчения дисперсного материала, отметим, что при условии движения в полости нагревательного элемента термовакуумной установки по спиральному каналу, на влажный дисперсный материал влияет центробежная сила  $F_u$ ,

$$F_u = \frac{mv^2}{R}, \quad (5)$$

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,  $k$  [9].

$$dQ = kT \Delta t dS \quad (6)$$

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  $t$ .

$$m = m(t).$$

Если на момент времени  $t$  масса тела равна  $m(t)$ , а его масса меняется со скоростью  $v$ , то через некоторое время  $dt$  масса будет  $m(t + dt)$ , а скорость изменения массы  $(v + dv)$ . Поскольку масса тела со временем уменьшается, то приращение массы  $\Delta m$  за время  $\Delta t$  отрицательное.

$$m(t+dt) - m(t) = -dm. \tag{7}$$

Дисперсный материал массой  $m$  движется внутри нагревательного элемента по кругу радиусом  $R$ .  $R$  – радиус окружности центробежной силы также меняется со временем, в зависимости от места нахождения частицы (рис. 2).

$$R(t+dt) - R(t) = R \pm dR_I, \tag{8}$$

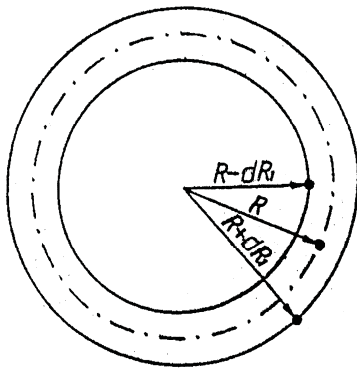


Рис. 2.  
Схема движения высушиваемой частички в нагревательном элементе

где  $\pm dR_I$  изменение радиуса внутренней полости нагревательного элемента в зависимости от того, где находится частица, при движении внутри нагревательного элемента.

Двигаясь в полости нагревательного элемента, влажная частица теряет вес, а ее скорость движения изменяется. Тогда происходит изменение центробежной силы  $F_{ц}$  за бесконечно малый промежуток времени  $dt$ . Согласно второму закону Ньютона возникает

бесконечно малое приращение импульса

$$dp = F_{рав} dt, \tag{9}$$

где  $F_{рав}$  – равнодействующая всех внешних сил, действующих на материальную точку переменной массы.

Приращение  $\Delta p$  является изменение импульса тела за бесконечно малое приращение времени:

$$dp(t) = p(t+dt) - p(t). \tag{10}$$

Если в момент времени  $t$  масса тела равна  $m(t)$ , а ее скорость  $v$ , то через некоторый промежуток времени  $dt$  масса тела будет  $(t + dt)$ , а ее скорость  $(v - dv)$ . Когда масса тела со временем уменьшается, то приращение массы  $dm$  за промежуток времени  $dt$  отрицательное:

$$m(t+dt) - m(t) = -dm \tag{11}$$

Если масса  $dm$  покидает тело со скоростью  $v_I$ . Тогда:

$$p(t+dt) = (m - dm)(v + dv) + v_I dm. \tag{12}$$

После преобразования выражения 12 и согласно с выражение 10, получим:

$$dp dt + p(t) = mv + mdv - vdm - dmdv + v_I dm \tag{13}$$

где  $p(t) = mv$

Выражение 13 примет вид

$$dp dt = mv - mv + mdv - vdm - dmdv + v_I dm \tag{14}$$

Пренебрегая произведением  $dm dv$  как бесконечно малой величиной и согласно выражения (9), получаем:

$$mdv = (v - v_1)dm + F_{рав} dt. \quad (15)$$

Отсюда получим уравнение Мещерского для движения тела со сменной массой,

$$m \frac{dv}{dt} = (v - v_1) \frac{dm}{dt} + F_{рав}, \quad (16)$$

где  $(v - v_1) \frac{dm}{dt} = F_{тяги}$

Отсюда vyplывает

$$m \frac{dv}{dt} = F_{тяги} \cos\phi + F_{рав}. \quad (17)$$

где  $\phi$  – угол, под которым вектор силы тяги направлен относительно вектора равнодействующей силы. ( $\phi = 0^0 \dots 360^0$ ). Согласно выражению 17 под действием силы тяги  $F_{тяги}$  происходит движение материальной точки. Если сила тяги  $F_{тяги} > F$ , а вектор силы тяги направлен в противоположную сторону действия равнодействующей силы,  $\phi = 180$ , то частица будет двигаться к противоположной стенке нагревательного элемента. Рис.2. Там она сталкивается со стенкой нагревателя, снова теряет часть массы, образуется новая сила тяги, которая направлена в сторону действия центробежной силы, тогда  $F_{тяги} + F = F_{рав}$ . В этом случае  $\phi = 0$ . Равнодействующая сила увеличивается и частица движется к противоположной стенке нагревателя. По мере движения высушиваемого материала внутри нагревательного элемента частичка теряет влагу и рассыпается на  $n$  фрагментов.

$$m \frac{dv}{dt} = \sum_1^n (F_{тяги} \cos\phi + F_{рав}) \quad (18)$$

Очевидно, что сушка частиц в термовакуумной установке, в условиях тепло- и массообмена со стенками нагревательного элемента, является движение влажного тела переменной массы при термобарическом воздействии. Сушка и дробление будет проходить до тех пор, пока:  $\frac{dm}{dt} = 0$ .

В зависимости от режимных параметров термовакуумного процесса и характеристик высушиваемого материала происходит изменение его физических, химических и механических свойств. Например, гидроксид циркония превращается в мелкодисперсный диоксид циркония. Это продолжается до тех пор, пока система не будет находиться в локально-равновесном состоянии. Продолжительность получения диоксида циркония из гидроксида циркония в термовакуумной установке происходит менее чем за 10 секунд. При этом, количество электроэнергии, затраченной на получение мелкодисперсного диоксида циркония влажностью 0,5% из гидроксида циркония влажностью 85 % при температуре нагревательного элемента 623К и давлении окружающей среды 1,33.104 Па – составляет 0,34 кВт ч/кг. Размер частиц диоксида циркония от 0,07 до 10 мкм. Конгломераты в полученном порошке отсутствуют. Термовакуумный процесс получения диоксида циркония из гидроксида циркония сокращается более чем в три раза по сравнению с существующим технологическим процессом [10]. При этом три этапа (сушка, прожаривание, измельчение с просеиванием по фракциям) объединяются в один. Происходит непрерывный, энергосберегающий, высокоэффективный процесс получения порошка диоксида циркония с моноклинной структурой высокой чистоты.

### Выводы

Из результатов исследования установлено, что в термовакуумной установке на сушку и одновременное измельчение дисперсного материала применяется



последовательность операций конкретных технологических процессов.

1. Формируется двухфазная система газ - твердые частицы, которой необходимо обеспечить скорость движения обеих сред одновременно от места входа в нагревательный элемент к месту выхода из аппарата.

2. Структура двухфазного потока тесно связана с величиной концентрации в нем твердых частиц и воздействием на неё аэродинамической силы.

3. По мере движения высушиваемого материала внутри нагревательного элемента частичка получает мощный поток тепловой энергии, теряет влагу и рассыпается на мелкие фрагменты.

4. Движение частицы в термовакуумной установке, в условиях тепло- и массообмена со стенками нагревательного элемента, является уравнение движения тела переменной массы.

5. На основании анализа проведенных исследований установлено, что интенсификация процесса сушки и измельчения влажных материалов в термовакуумных установке может быть достигнута в условиях тепло - и массообмена со стенками нагревательного элемента.

Таким образом, полученные результаты свидетельствуют о возможности создания энергосберегающих высокоэффективных термовакуумных установок для одновременной сушки и измельчения дисперсных материалов.

### Список литературы

1. Атаманюк В. М. Наукові основи фільтраційного сушіння дисперсних матеріалів / В. М. Атаманюк, Я. М. Гумницький. Львів : Львівська політехніка, 2013. – 256 с.

2. Кошельник В. М. Энергосберегающая термовакуумная сушка и измельчения бурого угля / В. М. Кошельник., В. А. Кутовой, Ю. Г. Казаринов, А. С. Луценко // XXI Міжнародна науково-практична конференція «Наука техніка, технологія, освіта, здоров'я.» Харків – 2013. – С. 297.

3. Бродский Р. Е. Медленная фрагментация при квадратичном законе дробления / Р. Е. Бродский, Ю. П. Вирченко // Вестник ХНТУ. 2013, № 2 (47). – С. 63–66.

4. Калинина Н. Е. Наноматериалы и нанотехнологии: получение, строение, применение / Н. Е. Калинина, В. Т. Калинин, З. В. Вилищук и др. Днепропетровск.– 2012. – 192 с.

5. Муштаев В. И. Сушка дисперсных материалов / В. И. Муштаев, В. М. Ульянов. М.: Химия. – 1988. – 352 с.

6. Ковалевский М. Ю. Теоретическое обоснование механизма получения мелкодисперсных материалов термовакуумным способом / М. Ю. Ковалевский, В. А. Кутовой, А. А. Николаенко, В. И. Ткаченко, Л. В. Логвинова // Вестник Восточно-украинского национального университета имени Владимира Даля. 2011. – № 14 (185). часть 2. – С. 70–79.

7. Разумов И. М. Псевдооживление и пневматический транспорт сыпучих материалов / И. М. Разумов. М.: Химия. – 1964. – 161с.

8. Кутовой В. А. Исследование структуры мелкодисперсного диоксида циркония, полученного термовакуумным способом / В. А. Кутовой, А. А. Николаенко, В. И. Ткаченко, Ю. Г. Казаринов // XX Международная конференция по физике радиационных явлений и радиационного материаловедения. – 2012. – Алушта, Крым. – С. 248.

9. Исаченко В. И. Теплопередача / В. И. Исаченко, В. А. Осипова, А. С. Сукомел. М. : Энергоиздат. – 1981. – 417 с.

10. Кутовой В. А., Николаенко А. А., Германов А. А., Попов В. И. Энергосберегающий метод получения диоксида циркония из гидроксида циркония // Материалы, технологии, инструменты. – 2010. Т.15, № 4. – С. 75–79.

## SPECIFICS OF THE MECHANISMS OF THERMAL VACUUM DRYING PROCESS AND GRINDING PARTICULATES

V. A. KUTOVYI, Candidate of Physical and Mathematical Sciences,  
Senior Research

A. S. LUTSENKO, Research Engineer

*The paper gives an account of theoretical and experimental study aimed at solving scientific and applied problems of determination of the mechanism of continuous drying process with simultaneous grinding particulates in the thermal vacuum installation.*

*It gives description and the principle of operation of the experimental thermal vacuum installation.*

*The results of theoretical and experimental studies were demonstrated using obtaining of zirconium dioxide from zirconium hydroxide as a case study, which confirms the possibility to significantly reduce energy consumption in drying and grinding of various particulate materials as compared to existing dryers.*

1. Atamaniuk, V.M., Gumnytskyi, Ya.M. (2013), Scientific foundations of filtration drying of disperse materials [Naukovi osnovy filtratsiinogo sushinnia dyspersnykh materialiv], Lvivska Politekhnik, Lviv, 256 p.

2. Koshelnyk, V.M., Kutovoi, V.A., Kazarinov, Yu.G., Lutsenko, A.S. (2013), "Energy saving thermal vacuum drying and breakage of brown coal" ["Energoberegayushchaya termovakuumnaya sushka i izmelcheniya burogo uglya"], XXI International Research-to Practice Conference "Science, engineering, technology, education, health", Kharkiv, 297 p.

3. Brodskiy, R.E., Virchenko Yu.P. (2013), "Slow fragmentation in square crush law" ["Medlennaya fragmentatsiya pri kvadraticnom zakone drobeniya"], Vestnik KhNTU, No. 2 (47), pp. 63-66

4. Kalinina, N.E., Kalinin V.T., Vilishchuk, Z.V. et al (2012), Nanomaterials and nanotechnology: realization, structure, application [Nanomaterialy i nanotekhnologii: poluchenie, stroenie, primeneniye], Dnepropetrovsk, 192 p.

5. Mushtaev, V.M., Ul'yanov, M. (1988), Drying of disperse materials [Sushka dispersnykh materialov], Khimiya, Moscow, 352 p.

6. Kovalevskiy, M.Yu., Kutovoy, V.A., Nikolaenko, A.A., Tkachenko, V.I., Logvinova, L.V. (2011), "Theoretical substantiation of the mechanism of obtaining fines using thermal vacuum method" ["Teoreticheskoe obosnovanie mekhanizma polucheniya melkodispersnykh materialov termovakuumnym sposobom"], Bulletin of Vladimir Dal Eastern-Ukrainian University, No. 14 (185), Part 2, pp. 70-79

7. Razumov, I.M. (1964) Fluidization and pneumatic transport of bulk materilas [Pseudoozhizhenie i pnevmaticheskiiy transport sypuchikh materialov], Khimiya, Moscow, 161 p.

8. Kutovoi, V.A., Nikolaenko, A.A., Tkachenko V.I., Kazarinov, Yu.G., (2012), "Investigation of the structure of fine zirconium dioxide obtained using thermal vacuum method" ["Energoberegayushchaya termovakuumnaya sushka i izmelcheniya burogo uglya"], XX International Conference for Physics of Radiation Phenomena and Radiation Material Science, Alushta, Crimea, 248 p.

9. Isachenko, V.I., Osipova, V.A., Sukomel, A.S. (1981), Heat transfer [Teploperedachya], Energoizdat, Moscow, 417 p.

10. Kutovoy, V.A., Nikolayenko, A.A., Germanov, A.A., Popov, V.I. (2010), "Energy saving method of obtaining of zirconium dioxide from zirconium hydroxide" [Energoberegayushchiy metod polucheniya dioksida tsirkoniya iz gidroksida tsirkoniya], Materialy, tehnologii, instrumenty, Vol. 15, No. 4, pp. 75-79.

Поступила в редакцию 16.12 2013 г.