

На основі проведених досліджень були визначені найбільш раціональні пари гідроколоїдів, які вводились до холодно перед його розливом в ємкості. Кожен із зразків було перевірено на міцність драглю.

Таким чином, в результаті проведених експериментів були визначені оптимальні синергетичні пари гідроколоїдів і їх процентне співвідношення при використанні в м'ясних системах драгленодібною структури.

#### Література

1. Клименко, М. М. Технология мяса та м'ясних продуктів : підручник [Текст] / М. М. Клименко, Л. Г. Віннікова, І. Г. Береза, Г. І. Гончаров, В. М. Пасичний, Л. В. Бал-Прилипко, І. І. Кіщенко, О. Буша, К. Ткаченко; за ред. М. М. Клименка. – К. : Вища освіта, 2006. – 640 с.
2. Віннікова, Л. Г. Теорія і практика переробки м'яса [Текст] / Л. Г. Віннікова. – Ізмаїл : СМІЛ, 2000. – 172 с.
3. Жаринов, А. И. Основы современных технологий переработки мяса: Краткий курс. В ч. I. Эмульгированные и грубоизмельченные мясopодукты [Текст] / А. И. Жаринов, М. П. Воякин. – Москва, 1994. – 250 с.
4. Сходлев, Н. А. Функционально-технологические свойства белков животного происхождения [Текст] / Н. А. Сходлев // Мясная индустрия. – 2000. – № 1. – С. 18–20.
5. Измайлова, В. Н. Поверхностные явления в

белковых системах [Текст] / В. Н. Измайлова, Г. П. Ямпольская, В. Д. Сумм. – М.: Химия, 1988. – 240 с.

6. Неппер, Д. Стабилизация коллоидных дисперсий полимерами [Текст] / Д. Неппер. – М. : Мир, 1986. – 488 с.

#### References

1. Klimentko, M. M., Vinnikova, L. G., Bereza, I. G., Goncharov, G. I., Pasichnyi, V. M., Bal-Prilipko, L. V., Kishenko, I. I., Busha, O. O., Tkachenko, K. D. (2006). Technology of meat and meat products [Tehnologija m'jasa ta m'jasnih produktiv: pidruchnik]. Kiev: Vishha osviti, 640.
2. Vinnikova, L. G. Theory and Practice of meat [Teorija i praktika pererobki m'jasa] (2000) / Ishmael: SMIL, 172.
3. Zharinov, A. I. (1994). Foundations of modern meat processing technology: A Short Course. Part I. The emulsified meat and gruboizmelchennye [Osnovy sovremennyh tehnologij pererabotki m'jasa: Kratkij kurs. Chast' I. Jemul'gированье i gruboizmel'chennye mjasoprodukty]. Moscow, 250.
4. Smodlev, N. A. (2000). Functional and technological properties of proteins of animal origin [Funkcional'no-tehnologicheskie svojstva belkov zhivotnogo proishozhdenija]. Meat industry, 1, 18–20.
5. Izmailov, V. N., Yampolskaya, G. P., Summ, V. D. (1988). Poverkhnostnie yavleniya v belkovih systemah (Surface phenomena in protein systems). Moscow: Khimiya, 240.
6. Nepper, D. (1986). Stabilizaciya kolloidnih dispersiy polimerami (Stabilization of colloidal dispersions of polymers). Moscow: Mir, 488.

*Рекомендовано до публікації д-р техн. наук, проф. Перцевої Ф. В.*

*Дата надходження рукопису 26.11.2014*

**Камсуліна Наталія Валеріївна**, кандидат технічних наук, доцент, кафедра технології м'яса, Харківський державний університет харчування та торгівлі, вул. Клочківська, 333, м. Харків, Україна, 61051.

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

**Скуріхіна Людмила Андроніківна**, кандидат технічних наук, доцент, кафедра технології м'яса, Харківський державний університет харчування та торгівлі, вул. Клочківська, 333, м. Харків, Україна, 61051.

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

УДК 66.047.3, 66.047.7

DOI: 10.15587/2313-8416.2014.30732

## ОСОБЕННОСТИ ТЕРМОВАКУУМНОГО ПРОЦЕССА НЕПРЕРЫВНОГО ПРОИЗВОДСТВА МЕЛКОДИСПЕРСНЫХ МАТЕРИАЛОВ

© И. С. Мысак, В. А. Кутовой, А. С. Луценко, А. А. Николаенко

*Проведена научно-техническая разработка энергоэффективной методики сушки и измельчения дисперсных материалов. Продолжительность сушки и измельчения измеряется секундами, благодаря максимальной поверхности испарения, быстрому нагреванию высушиваемого материала, снижению давления окружающей среды. Приведена схема конструкции термовакуумной установки, позволяющая ускорить технологический процесс сушки дисперсных материалов и одновременно получить мелкодисперсный порошок*

**Ключевые слова:** термовакуумная установка, дисперсный материал, энергосбережение, сушка, измельчение, вакуум

*The scientific and technical development of energy-efficient techniques of drying and pulverizing of dispersed materials is conducted. Drying duration and pulverizing is measured in seconds due to the maximum evaporation surface, rapid heating of the dried material, reducing the environment pressure. It is shown a diagram of thermal vacuum unit construction, allowing accelerate the drying process of dispersed materials and simultaneously obtain a finely-divided powder*

**Keywords:** thermal vacuum unit, dispersed material, energy saving, drying, grinding, vacuum

### 1. Введение

Достижения в получении дисперсных материалов различного назначения в наибольшей степени определяются уровнем развития технологий, которые позволяют получать мелкодисперсные материалы необходимых конфигураций и размеров. Вопросы получения, изучения свойств и использования мелкодисперсных материалов в последнее время широко обсуждаются в мировой литературе, поскольку перспективы их применения обещают существенный прогресс в материаловедении и физике твердого тела. Так, в области оксидной керамики снижение размеров частиц исходного порошка от микро- до нанометров позволяет не только повысить плотность и улучшить механические характеристики керамических материалов, но и существенно изменить их физические свойства. Необычные свойства мелкодисперсных порошков обусловлены как особенностями строения отдельных частиц, включая большую долю поверхности, так и коллективным их поведением, свойственным лишь таким малым объектам. В разных странах проводятся исследования и успешно выполняются программы работ по получению мелкодисперсных материалов. Существуют разные методы получения мелкодисперсных материалов. Порошковый метод первоначально был реализован Глейтером в виде сочетания изготовления ультрадисперсных порошков испарением и конденсацией в вакууме с последующим прессованием порошков без разгерметизации камер.

Разработка и внедрение новых энергосберегающих теплотехнологических установок для сушки и измельчения дисперсных материалов является важной научно – технической проблемой, которая решается в рамках научного направления – промышленной теплоэнергетики.

### 2. Постановка проблемы и анализ публикаций

Потребность в сушке и измельчении дисперсных материалов имеет в настоящее время массовый спрос. Операция измельчения дисперсных материалов трудоемкая, с большими затратами энергии и средств. существующие установки используют много тепловой энергии на единицу веса материала [1, 2].

Измельчение дисперсных материалов является довольно распространенным технологическим процессом. Механизму измельчения посвящен целый ряд теоретических исследований [3, 4]. Однако мало научно-технических работ, которые показывают, как можно ускорить процесс фрагментации дисперсных материалов и какие для этого необходимо оборудование.

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 термовакuumный, что подчеркивает актуальность данной темы, перспективность

использования термовакuumных установок для удаления влаги из дисперсных материалов [5].

### 3. Цель и задачи исследования

Целью данной работы есть разработка научно-технических основ тепломассообменных процессов термовакuumной сушки и измельчения дисперсных материалов.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

– методом физического моделирования и экспериментального исследования обосновать и реализовать концепцию ускорения удаления влаги из дисперсных материалов в термовакuumной сушильной установке;

– на базе совершенствования теплофизических механизмов термовакuumных установок разработать энергосберегающую методику получения мелкодисперсных материалов.

### 4. Термовакuumная установка получения мелкодисперсных материалов

Повышение эффективности технологического процесса сушки и измельчения дисперсных материалов является актуальной задачей. Решение этих задач должно базироваться на изыскании новых оптимальных режимов технологического процесса. Необходимо также учитывать физико-химические свойства высушиваемого объекта. Это дает возможность на основе выбранного критерия оптимальности и варьируемых факторов определить режимы технологического процесса сушки и измельчения дисперсных материалов. В качестве критерия оптимальности выбирается такой показатель, как минимальная продолжительность сушки, что в свою очередь приводит к сокращению времени термического воздействия на высушиваемый объект. 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 и измельчения дисперсных материалов. В термовакuumной установке, блок-схема которой приведена на рис. 1 разработан энергосберегающий метод сушки и измельчения дисперсных материалов

Вакуумная установка состоит: из бункера влажного сырья 1, полого нагревательного элемента, который имеет форму спирали 2, циклона 5, бункера высушенного материала 6, вибрационного фильтра 12, вакуумного водокольцевого насоса 3, измерителя температуры 8, 14, горизонтального ленточного конвейера 10, пульта управления 9.

При движении внутри нагревательного элемента дисперсный материал за короткий промежуток времени нагревается до заданной температуры и под воздействием температуры и низкого давления выделяет влагу в окружающее пространство. После прохождения через нагреватель

дисперсный материал по вакуумному трубопроводу 4 поступает в циклон 5, где происходит отделение твердых частиц высушенного материала от транспортирующего его воздуха и водяного пара. Водяной пар через фильтр 12 поступает в вакуумный водокольцевой насос 3. По мере заполнения бункера дисперсным материалом датчик уровня 14 дает сигнал на открытие шлюзового затвора 7, который предназначен для выгрузки мелкодисперсного материала из бункера, не нарушая непрерывный процесс сушки. Мелкие частицы, которые не задержались в циклоне, попадают в фильтр 12 и там улавливаются с помощью фильтрующих элементов. Такая конструкция установки обеспечивает высокопроизводительную, непрерывную сушку и одновременное измельчение дисперсных материалов. [6].

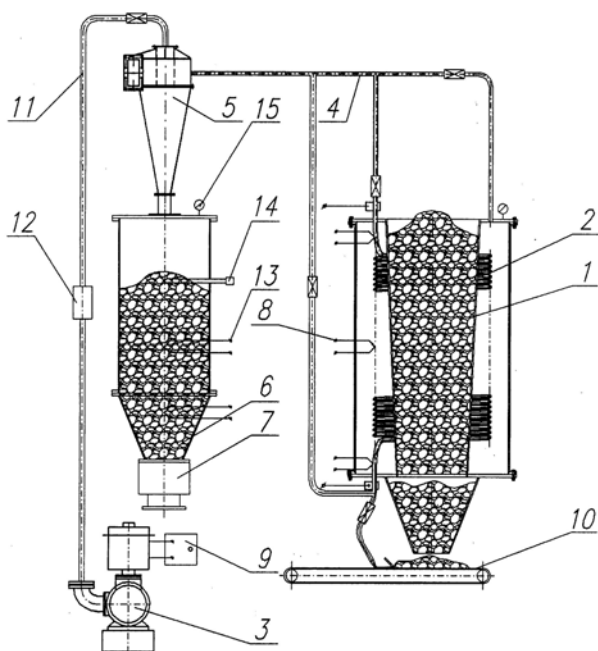


Рис. 1. Блок-схема термовакuumной установки для получения мелкодисперсных материалов

Для получения эффективного и экономичного метода производства мелкодисперсного материала необходимо обеспечить быструю его подачу внутрь нагревательного элемента термовакuumной установки. Это можно осуществить, если дисперсный материал поступает вместе с воздухом в нижнюю полость нагревательного элемента. Возникает двухфазная система газ-твердые частицы, движение происходит в восходящем потоке в нагретом изолированном пространстве. В термовакuumной установке непрерывный восходящий поток в нагревательном элементе создается вакуумным водокольцевым насосом. Взаимодействие между твердыми частицами и газом проявляется в виде аэродинамической силы, действующей на частицы в направлении движения. При формировании двухфазной системы газ-твердые частицы необходимо обеспечить скорость движения и направить перемещение обоих сред одновременно от места входа в нагревательный элемент к месту выхода из

аппарата. Из результатов научных исследований нами установлено, что скорость двухфазного потока  $\omega$ , который обеспечивает работоспособность данной термовакuumной установки, определяется как:

$$\omega = \frac{\pi \cdot r_n^2 \cdot d^2 \cdot (P_2 - P_1) \cdot (\rho_1 - \rho_2) \cdot v}{2 \cdot R_1 \cdot L \cdot \mu}, \quad (1)$$

где  $\omega$  – скорость движения двухфазного потока в нагревательном элементе, который имеет форму спирали, м/с;  $r_n$  – радиус внутренней полости нагревательного элемента, м;  $d$  – диаметр частички, м;  $P_1, P_2$  – начальный и конечное давление на концах нагревательного элемента, Па;  $\rho_1$  – плотность материала кг/м<sup>3</sup>;  $\rho_2$  – плотность среды в нагревательном элементе, кг/м<sup>3</sup>;  $v$  – скорость витания дисперсного материала, м/с;  $R_1$  – коэффициент сопротивления, кг/с;  $\mu$  – коэффициент динамической вязкости воздуха, Па·с.

Двигаясь в полости нагревательного элемента по спиральному каналу, на частичку дисперсного материала влияет центробежная сила  $F$

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

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

Центробежная сила прижимает гранулу дисперсного материала к стенке нагревательного элемента. Элемент поверхности  $dS$  теплообмена получает мощный приток тепла от стенки нагревателя за короткий промежуток времени  $\Delta t$  при коэффициенте теплопередачи  $k_T$

$$dQ = k_T \cdot \Delta t \cdot dS. \quad (3)$$

Температура части тела  $T_1$  гранулы дисперсного материала при теплообмене становится выше температуры испарения влаги  $T_2$  ( $T_1 > T_2$ ). Начинается процесс интенсивного парообразования в середине частицы тела. В результате чего давление внутри тела частицы становится значительно выше, чем на поверхности. Избыток давления внутри частицы разрушает и измельчает ее. Тело гранулы с массой  $m$  со временем меняется, т. е. масса  $m$  является функцией во времени  $t$

$$m = m(t).$$

По мере движения высушиваемого материала внутри нагревательного элемента частичка теряет влагу и рассыпается на  $n$  фрагментов. Это будет происходить до тех пор, пока  $\frac{dm}{dt} = 0$ .

В зависимости от физических характеристик высушиваемого материала и режимных параметров термовакuumного процесса происходит изменение его физических, химических и механических свойств. Например, гидроксид циркония превращается в мелкодисперсный диоксид циркония. Мелкодисперсный порошок полученного диоксида циркония приведены на рис. 2. При этом количество электро-

энергии, затраченной на получение мелкодисперсного диоксида циркония влажностью 0,5 % из гидроксида циркония влажностью 85 % при температуре нагревательного элемента 623 К и давлении  $1,33 \cdot 10^4$  Па, составляет  $0,38$  (кВт·ч) / кг. Технологический процесс получения диоксида циркония из гидроксида циркония сокращается в три раза по сравнению с существующим технологическим процессом.

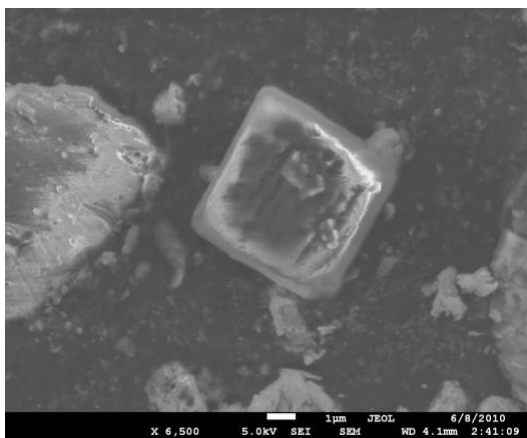


Рис. 2. Мелкодисперсный порошок диоксида циркония

Размер частиц диоксида циркония в полученном порошке составляет от 0,07 до 10 мкм. Из научных исследований нами было установлено, что количество удаляемой влаги из дисперсного материала в термовакuumной установке, прямо пропорционально зависит от мощности нагревателя, температуры нагрева материала, коэффициента теплопередачи от нагревательного элемента к высушиваемому материалу, площади испарения. Обрато пропорционально - от среднего значения давления в нагревательном элементе, кинетической вязкости пары, ударной вязкости материала, объема высушиваемого материала

$$m_{вл} = \frac{2(m_n - m_c) \cdot P \cdot T \cdot \kappa_T \cdot S}{P_c \cdot \nu \cdot W \cdot V}, \quad (4)$$

где  $m_{вл}$  – масса влаги, которая выделяется з высушиваемого материала, кг/с;  $m_n$  – начальная масса высушиваемого материала, кг;  $m_c$  – масса сухого дисперсного материала, кг;  $P$  – мощность нагревательного элемента, Вт;  $\kappa_T$  – коэффициент теплопередачи, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $P_c$  – среднее значение давления в нагревательном элементе, Па;  $\nu$  – кинематическая вязкость, м<sup>2</sup>/с;  $W$  – ударная вязкость, Дж/м<sup>2</sup>;  $S$  – площадь испарения влаги, м<sup>2</sup>;  $V$  – объем высушенного дисперсного материала, м<sup>3</sup>.

Для измельчения и улучшения качества бурого угля предлагается его сушки в термовакuumных установке.

Сушки бурого угля в термовакuumных установке происходит равномерно, минимальный размер кристаллов 40 нм (рис. 3). При этом, количество электроэнергии, затраченной на получение мелкодисперсного бурого угля влажностью менее 1 % из исходной влажностью 40 % при температуре нагревательного элемента  $T = 250$  °С и среднем

давлении окружающей среды 300 мм рт. ст. – составляет 240 кВт ч/т.

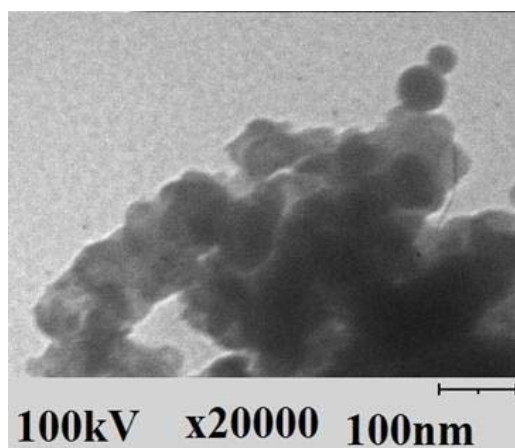


Рис. 3. Нанодисперсный порошок высушенного бурого угля

Из результатов исследования установлено, что термовакuumный метод не только сушит и измельчает бурый уголь но и 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.

Компьютерное моделирование процесса удаления влаги из бурого угля и одновременного его измельчения выяснилось, что скорость выхода влаги из дисперсного материала экспоненциально возрастает с увеличением времени и линейно зависит от размера частички. Т. е. с интенсивным изменением размера дисперсного материала во времени ускоряется процесс удаления влаги из него. Со временем удаление влаги завершается и наступает равновесие между мелкодисперсными частицами и влагой, т. е. образуется высушенный дисперсный материал (рис. 4).

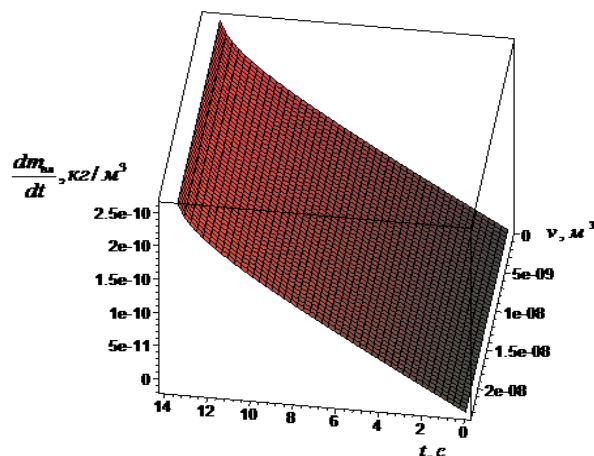


Рис. 4. Процесс измельчения и удаления влаги из бурого угля

На основании теоретических и экспериментальных исследований в термовакuumных установке разработана энергосберегающая, высокоэффективная термовакuumных методика непрерывного сушки отходов деревообрабатывающей промышлен-



ленности. При температуре нагревательного элемента 200 °С опилки с начальной влажностью 70 % высыхают до влажности 5 %. Продолжительность сушки опилок в термовакуумной установке составляет 15 с. Термотехнологические возможности созданной термовакуумной установки позволяют равномерно сушить отходы деревообрабатывающей промышленности (рис. 4, а, б).

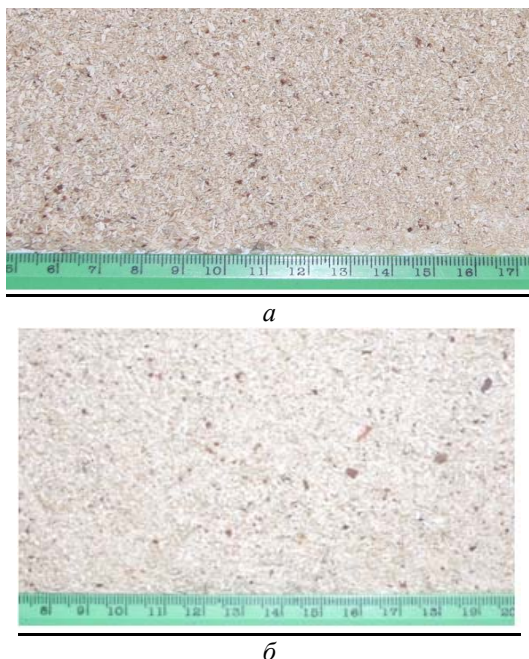


Рис. 4. Опилки: а – начальная влажность 70 %; б – высушенные опилки, влажность 5

### 5. Выводы

Проведена научно-техническая и конструкторская разработка высокопроизводительной термовакуумной установки для непрерывного производства мелкодисперсного материала. Термовакуумный метод позволил сократить время технологического процесса получения мелкодисперсного материала, снизить энергопотребление в сравнении с существующей технологией.

Технические возможности созданной термовакуумной сушильной установки могут найти широкое применение для получения мелкодисперсных материалов. Это дает большие перспективы использования мелкодисперсных материалов в

машиностроении, металлургии, ядерной энергетике, нефтехимической, авиационной и др. отраслях промышленности.

### Литература

1. Муштаев, В. И. Сушка дисперсных материалов [Текст] / В. И. Муштаев, В. М. Ульянов. – М.: Химия, 1988. – 323 с.
2. Атаманюк, В. М. Наукові основи фільтраційного сушіння дисперсних матеріалів [Текст] / В. М. Атаманюк, Я. М. Гумницький. – Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2013. – 256 с.
3. Бродский, Р. Е. Медленная фрагментация при квадратичном законе дробления [Текст] / Р. Е. Бродский, Ю. П. Вирченко // Вестник Херсонского национального технического университета. – 2013. – Вып. 2 (47). – С. 63–66.
4. Ziff, R. M. An explicit solutions to a discrete fragmentation model [Text] / R. M. Ziff // Journal of Physics A: Mathematical and General. – 1992. – Vol. 25, Issue 9. – P. 2569–2576. doi: [10.1088/0305-4470/25/9/027](https://doi.org/10.1088/0305-4470/25/9/027)
5. Кутовой, В. А. Термовакуумный метод получения нанодисперсных материалов [Текст] / В. А. Кутовой, Ю. Г. Казаринов, А. С. Луценко, А. А. Николаенко, В. И. Ткаченко // Вопросы атомной науки и техники. – 2014. – Вып. 103, № 2 (90). – С. 153–157.
6. Пат. 81138 Україна. МПК F26B9/06. Пристрій для термовакуумного сушіння [Текст] / Кутовой В. О. – №a200507488; заявл. 27.07.2005; опубл. 10.12.07. Бюл. №20. – 5 с.

### References

1. Mushtaev, V. I., Ulyanov, V. M. (1998). Sushka dispersnih materialov. Moscow Himiya, 323.
2. Atamanuk, V. M., Gumnitskiy, Ya. M. (2013). Naukovi osnovi filtratsiynogo sushinnya duspersnih materialiv. Lviv: Vidavnutstvo Lvivskoi politehniky, 256.
3. Brodskiy, R. E., Virchenko, Yu. P. (2013). Medlennaya fragmentatsiya pri kvadraticnom zakone drobeniya. Vestnik Khersonskogo natsionalnogo tehniceskogo universiteta, 2 (47), 63–66.
4. Ziff, R. M. (1992). An explicit solutions to a discrete fragmentation model. Journal of Physics A: Mathematical and General, 25 (9), 2569–2576. doi: [10.1088/0305-4470/25/9/027](https://doi.org/10.1088/0305-4470/25/9/027)
5. Kutovoy, V. A., Kazarinov, Yu. G., Lutsenko, A. S., Nikolaenko, A. A., Tkachenko, V. I. (2014). Termovakuumniy metod polucheniya nanodispersnih materialov. Voprosi atomnoynauki i tehniki, 103/2(90), 153–157.
6. Kutovoy, V. O. (2007). Patent 81138 Ukraina. MPK F26B9/06. Pristriy dlya termavakuumnogo sushinnya. №a200507488; zayav. 27.07.2005; opubl. 10.12.07. Bul. № 20, 5.

Дата надходження рукопису 20.11.2014

**Мысак Иосиф Степанович**, доктор технических наук, профессор, кафедра теплотехники и ТЭС тепловых электростанций, Национальный университет "Львовская политехника", ул. С. Бандеры, 12, г. Львов, Украина, 79013  
E-mail: [s.mysak@yandex.ru](mailto:s.mysak@yandex.ru)

**Кутовой Владимир Александрович**, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Национальный научный центр "Харьковский физико-технический институт", НАН Украины, ул. Академическая, 1, г. Харьков, Украина, 61108  
E-mail: [kutovoy@kipt.kharkov.ua](mailto:kutovoy@kipt.kharkov.ua)

**Луценко Анна Сергеевна**, младший научный сотрудник, Национальный научный центр "Харьковский физико-технический институт", НАН Украины, ул. Академическая, 1, г. Харьков, Украина, 61108  
E-mail: [anulucenko89@mail.ru](mailto:anulucenko89@mail.ru)

**Николаенко Алиса Александровна**, младший научный сотрудник, Национальный научный центр "Харьковский физико-технический институт", НАН Украины, ул. Академическая, 1, г. Харьков, Украина, 61108  
E-mail: [nikolaenko@kipt.kharkov.ua](mailto:nikolaenko@kipt.kharkov.ua)