

Кутовой В.А., Николаенко А.А.

*Национальный Научный Центр.
Харьковский физико-технический институт*

Энергосберегающие термовакуумные установки для сушки дисперсных материалов.

На вновь созданных термовакуумных сушильных установках изучалось влияние температуры на скорость и качество сушки дисперсных материалов. Изучена кинетика изменения влаги в высушиваемых крупногабаритных керамических изделиях, гидроксиде циркония, зерне в зависимости от времени нагревания и давления в вакуумной камере. Найдено необходимое время нагревания исследуемых материалов в процессе сушки. Показано, что для разных видов дисперсных материалов, во время сушки, необходимо применять разные тепловые режимы.

Введение. В настоящее время большое внимание уделяется разработке новых высокопроизводительных установок и энергосберегающих технологий для сушки дисперсных материалов.

В зависимости от структуры высушиваемого материала и режимных параметров технологического процесса происходит изменение его физических, химических и механических свойств. Для каждого материала, который высушивается, необходима своя конструкция установки и технология сушки.

Разница во времени и температуры сушки связана со структурой материала, зависит от режимов сушки и оказывает влияние на скорость ухода жидкости из высушиваемого материала.

При создании сушильных установок и разработке новых технологий сушки следует учитывать структуру объектов сушки, качество высушенного материала и затраты энергии, необходимые для сушки дисперсных материалов.

1. Термовакуумная сушка крупногабаритных керамических изделий.

Крупногабаритный керамический блок размером 460×210×210 мм массой 80 кг формуют методом вакуумного вибролитья из тонкодисперсного хромосидного порошка с размером частиц менее 10 мкм. В качестве связующего вещества при производстве блоков используют воду в сочетании с органической связкой. Массовая доля влаги составляет 7...9%. Перед обжигом сырец керамического изделия необходимо высушить до влажности не выше 0,5%.

Среди известных методов сушки керамических изделий наибольшее распространение получили сушка токами высокой частоты, объемными тлеющими разрядами, нагретым воздухом, газом или перегретым паром. Все эти методы энергоемкие, с низким КПД, большой продолжительностью сушки и требуют сложного оборудования. Одним из перспективных энергосберегающих способов удаления влаги из крупногабаритных керамических блоков является сушка

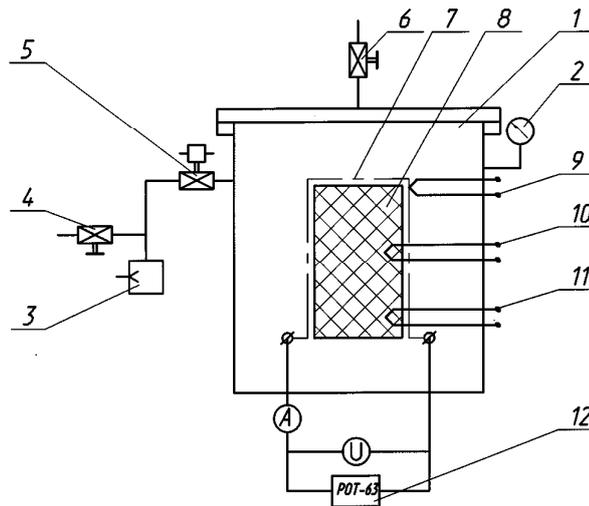


Рис. 1. Схема вакуумной сушильной установки

в вакууме [1]. Для отработки технологии сушки крупных керамических изделий была разработана и изготовлена вакуумная установка, схема которой приведена на рис. 1.

В данной разработке используется метод кондуктивной передачи тепла к высушиваемому изделию от гибкого электронагревателя, плотно контактирующего с изделием, что позволяет обеспечить хороший тепловой контакт между нагревателем и высушиваемым изделием. Электрический нагреватель 7 (рис.1) плотно облегает керамический блок 8 и тем самым создается равномерный нагрев блока по объему. К блоку подсоединяют термопары 9, 10, 11. Вакуумный объем герметизируют и откачивают вакуумным насосом, 3. Давление в вакуумной камере поддерживается в пределах 1,33 – 2кПа. Водяной пар, который образуется на поверхности высушиваемого изделия, легко проникает через поры нагревателя и уходит в вакуумный насос. Максимальная мощность нагревательного элемента 250 Вт. На начальном этапе сушки температура нагревательного элемента составляет не больше 303К. В процессе сушки температуру нагревательного элемента медленно поднимали, и на конечном этапе сушки температура составила 328К. Температурный режим сушки подбирался таким образом, чтобы во время сушки керамический блок не разорвало.

Вакуумную сушку сырца крупногабаритного керамического изделия проводили двумя способами. Первый способ осуществлялся в дискретном режиме, второй - в непрерывном режиме.

При дискретном режиме изделие нагревали и сушили в вакууме 16 часов, после чего отключали нагреватель и вакуумный насос, а изделие в течение 8-ми часов находилось в вакуумной камере при остаточном давлении. Второй способ предусматривал непрерывный нагрев изделия и откачку паров воды из вакуумной камеры. Кинетика сушки керамических изделий в вакуумной сушильной установке представлена на рис.2.

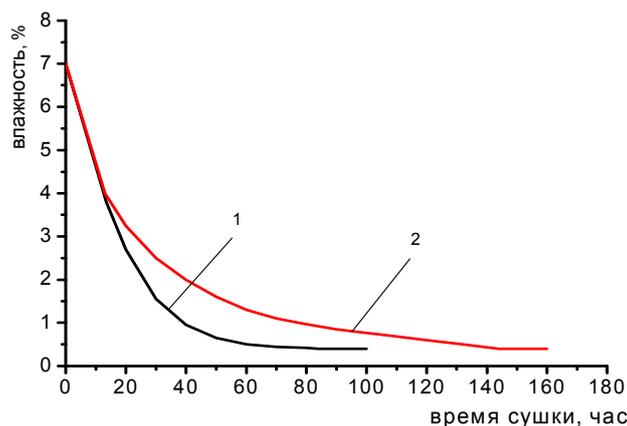


Рис. 2. Кинетика вакуумной сушки сырца крупногабаритных керамических изделий:
1 – дискретный режим; 2 – непрерывный режим

Из рис. 2 следует, что более интенсивная сушка изделия происходит при дискретном режиме (кривая 1), в то время, как меньше влаги удаляется из высушиваемого материала, при непрерывном режиме сушки (кривая 2). Продолжительность сушки без учета перерывов в дискретном режиме составила 84 ч, а при непрерывном режиме – 144 ч. Такая разница во времени связана с изменением структуры материала, зависящая от режимов сушки и оказывает влияние на скорость ухода жидкости из пористого тела. Во время сушки на поверхности изделия образуется высохший слой. Несмотря на его малую толщину, сопротивление этого слоя массопереносу влаги увеличивается по сравнению с сопротивлением внутренних слоев, так как в высохшем поверхностном слое количество пор уменьшается, в связи с этим выход влаги из высушиваемого объекта понизится. Если при этом сушку приостановить, то влага, которая осталась в высушиваемом изделии, равномерно распределяется по всему объему и увлажняет высохший поверхностный слой. В увлажненном поверхностном слое количество пор увеличится, и при последующем включении вакуумной сушильной установки влага более интенсивно уходит из высушиваемого объекта. Из пористого изделия в процессе сушки удаляется влага интенсивно до тех пор, пока поверхностный слой снова не высохнет, а количество пор в этом слое не уменьшится.

Скорость сушки таких же керамических изделий при атмосферном давлении составляет 60 суток.

Керамические изделия, высушенные в вакууме, обжигались при температуре 1873К. Обожженные изделия не имели трещин и других дефектов, отличались высокой прочностью и технологичностью при дальнейшей обработке.

2. Термовакuumная сушка гидроксида циркония. В настоящее время технологический процесс получения диоксида циркония из гидроксида циркония включает в себя три этапа – сушка, прожаривание и измельчение с просеиванием по фракциям. Первый этап – сушка гидроксида циркония в трубчатой печи ВНД-6М – 3 часа с начальной влажностью 80-85 % проходит при следующих режимах:

- температура I зоны нагрева. 673...723К;
- температура 2 зоны нагрева. 723...823К;
- время пребывания продукта в печи – 3 часа;
- затраты воздуха – 1...1,5 м³/час;
- температура воздуха – 396...447К.

Второй этап – прожаривание проходит при температуре 873...1073К за 1,5...3 часа.

Третий этап – измельчение диоксида циркония с просеиванием по фракциям. На выше перечисленные этапы получения диоксида циркония из гидроксида циркония энергетические затраты составляют около 1,2 кВт/кг. Приведенная технология имеет множество недостатков: теплопередача от газа к твердому телу требует большого количества нагретого газа или пара, стоимость трубчатых печей и их эксплуатационные расходы чрезмерно высокие.

Целью настоящей работы является разработка энергосберегающего метода получения диоксида циркония из гидроксида циркония, сокращение технологического процесса и получение мелкодисперсного порошка.

На вновь созданной термовакуумной установке [2] разработана энергосберегающая технология получения диоксида циркония из гидроксида циркония с начальной влажностью 85%.

Схема вакуумной установки для получения диоксида циркония из гидроксида циркония приведена на рис.3.

Вакуумная установка состоит из вакуумного насоса 1, системы управления вакуумной установкой 2, бункера-питателя 3, в котором находится гидроксид циркония 20, трубчатого резистивного, теплоизолированного нагревательного элемента 8, изготовленного из трубы в виде змеевика. Установка оснащена приемником высушенного сырья (бункер-накопитель) 11, вакуумными трубопроводами 19 и клапанами 16, системой загрузки 4 и выгрузки 12, измерителями давления 14, 15, температуры 18 и регулятором всасываемого воздуха 10, который позволяет регулировать концентрацию высушиваемого материала внутри нагревательного элемента. Второй конец нагревателя соединен вакуумным трубопроводом 19 с входным патрубком вакуумного насоса 1 через бункер-накопитель высушенного сырья 11, который выполнен в виде отдельного вакуум-плотного корпуса. Разряжение в полости нагревателя 8 и бункере-накопителе 11 создается вакуумным насосом. Температура полученного диоксида циркония измеряется термометрами 18, а давление в бункере-накопителе контролируется вакуумметром 15. Такая конструкция установки обеспечивает высокопроизводительную, непрерывную технологию получения диоксида циркония из гидроксида циркония. Гидроксид циркония всасывается вместе с воздухом через патрубок 7 внутрь нагревателя 8 с транспортера 5. Высота насыпанного слоя сырья на транспортере формируется раклею 6.

Двигаясь внутри нагревательного элемента, гранулы гидроксида циркония соприкасаются с нагретыми стенками нагревателя, аккумулирует тепло и при этом быстро нагреваются до высокой температуры.

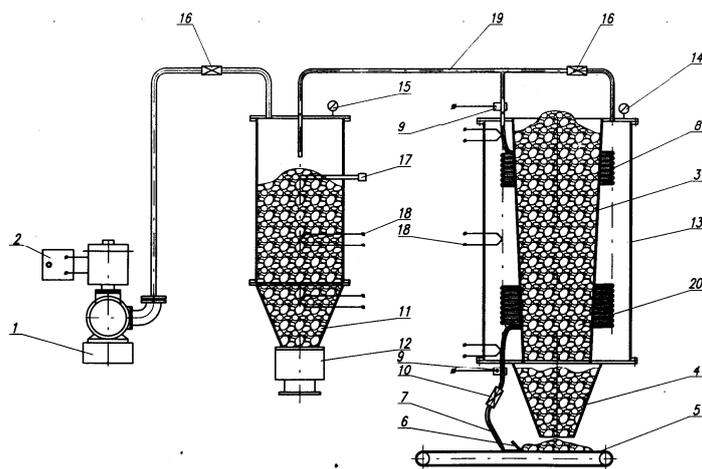


Рис.3. Схема вакуумной установки для получения диоксида циркония.

Суммарный поток тепла, который получает гранула за время от 0 до τ зависит от площади и объема гранулы, мгновенного потока тепла, удельной теплоемкости, коэффициента теплопередачи, плотности среды, температуры нагревания, [3].

$$Q = \int_0^{\tau} A q d\tau = c_p V (T_c - T_0) \left[1 - \exp\left(-\frac{\alpha \tau}{c_p R_v}\right) \right] \quad (1)$$

где Q – суммарный поток тепла, Дж; A – площадь гранулы, м^2 ; q – мгновенный поток тепла, Вт; τ – время, с; c – удельная теплоемкость гранулы, $\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$; ρ – плотность среды, $\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$; V – объем гранулы, м^3 ; T_c – температура нагревания гранулы, К; T_0 – начальная температура гранулы, К; α – коэффициент теплопередачи, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$; R_v – относительный объем гранулы, равный отношению объема гранулы V к ее поверхности S .

Скорость нагревания гранулы прямо пропорциональна разности температуры среды и температуры гранулы, зависит от коэффициента пропорциональности:

$$-\frac{dT}{d\tau} = \alpha (T_2 - T_1), \quad (2)$$

где $\frac{dT}{d\tau}$ – скорость нагревания гранулы, К/с; T_1 – температуры гранулы, К; T_2 – температуры среды, К;

Получив мощный поток тепла за короткое время, температура гранулы становится выше температуры испарения влаги, которая находится внутри гранулы ($T_1 > T_2$). При быстром понижении давления окружающей среды и интенсивному нагреванию гранулы влага внутри высушиваемого гидроксида циркония резко вскипает. Начинается процесс интенсивного паровыделения внутри гранулы гидроксида циркония. Избыток давления разрывает гранулу гидроксида циркония на мелкие частицы. Происходит изменение физических, химиче-

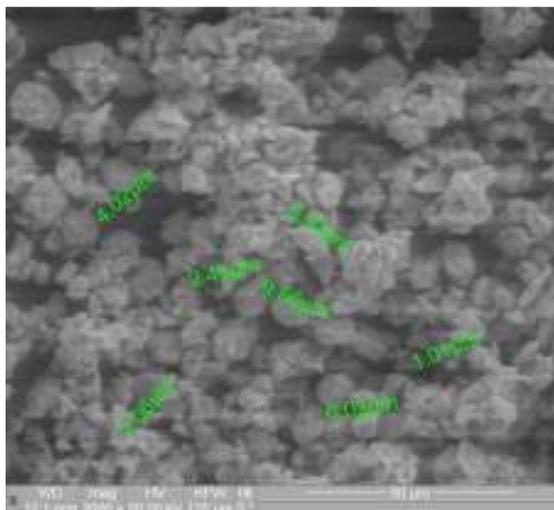


Рис.4. Порошок диоксида циркония, полученный в термовакуумной установке

ских и механических свойств высушиваемого материала. Перемещаясь в полости нагревательного элемента, гидроксид циркония превращается в мелкодисперсный порошок диоксида циркония по реакции:



При дальнейшем продвижении диоксида циркония в полости нагревательного элемента он еще больше измельчается за счет трения о стенки нагревательного элемента и столкновения между собой. Полученный порошок диоксида циркония имеет влажность ниже 1% с размером фракций от 1.01 до 9.66 мкм, рис. 4.

Нагретый и измельченный порошок диоксида циркония поступает в бункер-накопитель 11, рис.3, в котором происходит отделение влаги от высушенного материала. Влага, которая испарилась, вместе с воздухом, поступает в вакуумный насос, а высушенный материал остается в бункере-накопителе. Продолжительность сушки гидроксида циркония равняется 20 секундам. При этом количество электроэнергии, израсходованной для получения диоксида циркония влажностью, ниже 1% в данной установке, составляет около 0.4 кВт/кг, что по сравнению с существующей технологией в три раза меньше.

Термовакuumная сушка зерна. Процесс сушка зерна в термовакuumной установке рис.3 отличается от процесса сушки гидроксида циркония. Сушка фуражного зерна происходит при температуре до 343К, а семенного зерна при температуре не выше 323К, давление $1.33 \cdot 10^4$ Па. Максимальная допустимая температура нагревания зерна определяется термостойкостью его белкового содержания и зависит от свойств клейковины. Исследование показали, что зерно быстро нагревается к предельно допустимой температуре, но медленно отдает влагу. Для сушки посевного зерна необходимо применять осциллирующий режим, т.е. после нагревания зерно подвергают промежуточному охлаждению. Потом цикл сушки повторяется. Такой режим сушки сохраняет питательные вещества в зерне и зерно остается жизнеспособным. Как видно из рис. 5 алейроновые клетки, крахмал, белок, клейковина в зерне сохранены. Не разрушена кожа зерна, которая сохраняет от повреждения алейроновый пласт, который в

свою очередь полностью сохраняет клетки эндоспермы.

При повышении температуры сушки жизнеспособные клетки зерна гибнут и зерно может использоваться как фуражное (рис.6).

Выводы

При выполнении данных работ изучали влияние температуры на скорость и качество вакуумной сушки крупногабаритных керамических изделий, гидроксида циркония, зерна. Изучена кинетика изменения влаги при сушке в зависимости от времени нагревания и давления в вакуумной камере. Найдено необходимое время нагревания исследуемых материалов в процессе сушки. Показано, что для разных видов продукции, во время сушки, необходимо применять разные тепловые процессы и разрабатывать свои специфические условия сушки, которые обеспечивают высокое качество конечного продукта.

Для каждого вида продукции необходимо создавать индивидуальные формы нагревателей, чтобы улучшить теплопередачу от нагревательного элемента к высушиваемому материалу, что значительно улучшает электротехнические характеристики и продуктивность сушильной установки.

Полученные результаты являются следствием новых конструктивных разработок с использованием комплекса физических, механических и электронно-микроскопических методов исследования.

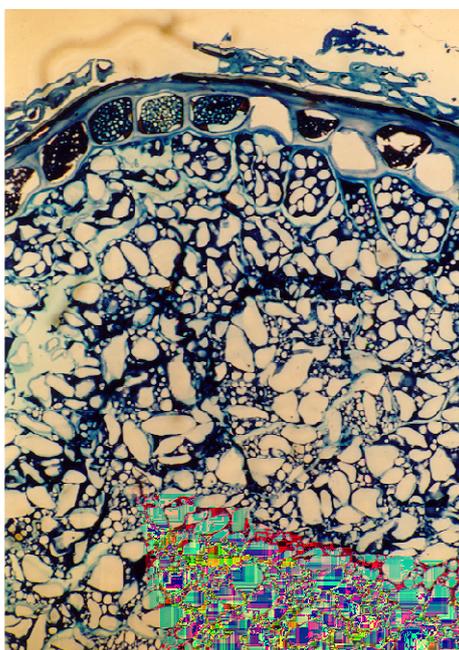


Рис.5 Сушка зерна при $T=323\text{ K}$.

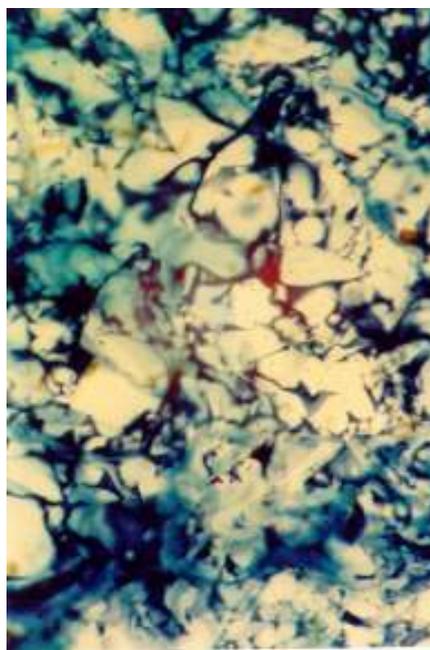


Рис. 6 Сушка зерна при $T=343\text{ K}$.

Литература:

1. *Кутовий В.О., Мацько О.О., Примаченко В.В., и др.* Спосіб вакуумного сушіння сирцю вогнетривких виробів. Патент на винахід №82918 от 26.05.2008. Україна.

2. *Kutovoy V.* Apparatus for drying of wet dispersed raw materials. International patent number: PCT/UA2005/000051. International publication number: WO/2007/013866, date 01.02.2007
3. *Лыков А.В.* Тепломассообмен. Справочник. – М.: Энергия, 1972. – 560 с.

Кутовий В. О., Ніколаєнко А. О.

Енергозберігаючі термовакуумні установки для сушіння дисперсних матеріалів.

АНОТАЦІЯ

На новостворених термовакуумних сушильних установках вивчався вплив температури на швидкість і якість сушіння дисперсних матеріалів. Вивчено кінетику зміни вологи в великогабаритних керамічних виробках, гідроксиду цирконію, зерні залежно від часу нагрівання і тиску у вакуумній камері. Знайдено необхідний час нагрівання досліджуваних матеріалів в процесі сушіння. Показано, що для різних видів дисперсних матеріалів, під час сушіння, необхідно застосовувати різні теплові режими.

Kutovoy V. A., Nikolaenko A. A.

Energy-saving thermal vacuum installations for drying of disperse materials

SUMMARY

The given effort was devoted to study of temperature influence onto intensity and quality of vacuum drying of large-sized ceramic products, zirconium hydroxide, grain. It was studied kinetics of moisture changes in dried materials versus time of heating and pressure in the vacuum chamber. Necessary time of heating of investigated materials was determined in the course of drying. It is shown that for different kinds of products different thermal modes is necessary to apply during drying.