

СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА ДАННЫХ ПО СУШКЕ ПЛОТНОГО СЛОЯ ЗЕРНОВОГО МАТЕРИАЛА

Календерьян В.А., д-р техн. наук, профессор, Бошкова И.Л., канд. техн. наук, доцент,
Волгушева Н.В., канд. техн. наук, ассистент
Одесская государственная академия холода

Проведена проверка эффективности совместной микроволновой и конвективной сушки. Получено, что при рационально организованной циклической сушке затраты энергии на килограмм испаренной влаги снижаются (в сравнении с микроволновой). Скорость микроволново-конвективной сушки всегда ниже микроволновой, но при циклической сушке решается проблема поддержания теплового режима зернового материала. Получены единые уравнения для сушки неорганических и органических дисперсных материалов в неподвижном и движущемся слое при различных способах подвода теплоты.

Check of efficiency joint microwave and convectional drying is spent. It is received that at rationally organised cyclic drying of an expense of energy on kg of the evaporated moisture decrease (in comparison with microwave). Speed microwave-convection drying always below microwave, but at cyclic drying dares a problem of maintenance of a thermal mode of a grain material. The uniform equations for drying of inorganic and organic disperse materials in a motionless and moving layer are received at various ways of a supply of warmth.

Ключевые слова: сушка, затраты энергии, температурный режим, скорость, цикличность

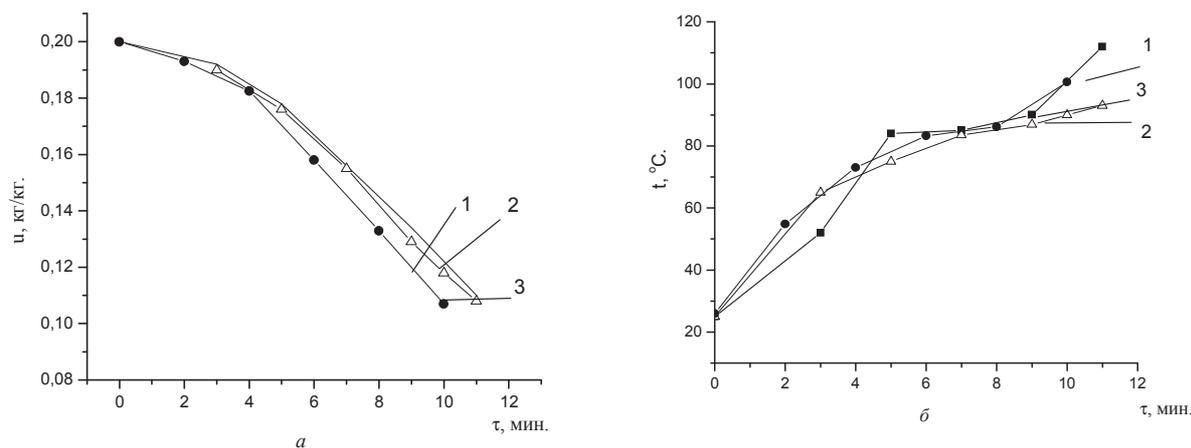
Ранее проведенные исследования кинетики сушки в микроволновом поле [2-6] подтвердили перспективность применения МВ энергии. Скорость сушки на порядок превышала скорость сушки при использовании кондуктивного и конвективного метода. На увеличение скорости сушки оказывает большое влияние увеличение подводимой мощности, однако при этом возникает опасность недопустимого перегрева материала. Также было отмечено, что происходило существенное заполнение межзернового пространства слоя влагой, что объясняется интенсивным подводом влаги к поверхности зерновок в ходе микроволнового нагрева и значительно менее интенсивным ее испарением. Чтобы избежать возникновения указанных негативных явлений, было решено проверить эффективность совместного использования микроволновой и конвективной сушки.

Для проверки совместного влияния микроволнового и конвективного подвода теплоты на кинетику процесса материал (гречиха) помещался в микроволновую камеру и непрерывно обдувался потоком воздуха. Скорость воздуха над поверхностью материала составляла 0,15 м/с, а температура 25 °С-36 °С.

Эксперименты, в которых осуществлялся подвод МВ энергии к исследуемому образцу и одновременный обдув его поверхности, показывают, что существенного ускорения процесса сушки по сравнению с чисто микроволновой не наблюдается (рис. 1). В этом случае улучшаются условия теплообмена только поверхности слоя с окружающей средой, в то время как при продувке воздуха сквозь слой интенсифицируется теплообмен внутри самого слоя. При обдуве поверхности слоя воздухом с температурой окружающей среды скорость сушки практически не изменилась, однако положительный эффект заключался в снижении температуры материала, что позволяет выдерживать необходимый технологический режим. Так, из рис. 2 б видно, что температура при МВ нагреве достигала 112 °С, обдув теплым воздухом снижал температуру до 100 °С, а воздухом без нагрева – до 92 °С. Обдув теплым воздухом привел к незначительному повышению скорости сушки. При выходной мощности магнетрона 187 Вт, массе материала 0,2 кг и толщине слоя 0,032 м скорость сушки равнялась $11,84 \cdot 10^{-3} \text{ мин}^{-1}$, а при обдуве слоя воздухом с температурой 36 °С скорость сушки составляла $12,57 \cdot 10^{-3} \text{ мин}^{-1}$.

Сравнительная оценка затрат энергии при микроволновой и микроволново-конвективной сушке при прочих равных условиях показала, что удельный расход энергии на 1 кг испаренной влаги увеличился на 7,5% при обдуве холодным воздухом и на 36,7% при его нагреве до 36 °С.

Таким образом, в рассматриваемых условиях нецелесообразно сочетать подвод МВ энергии с обдувом поверхности слоя воздухом, т.к. это приводит к увеличению затрат электроэнергии и недостаточно интенсифицирует процесс.



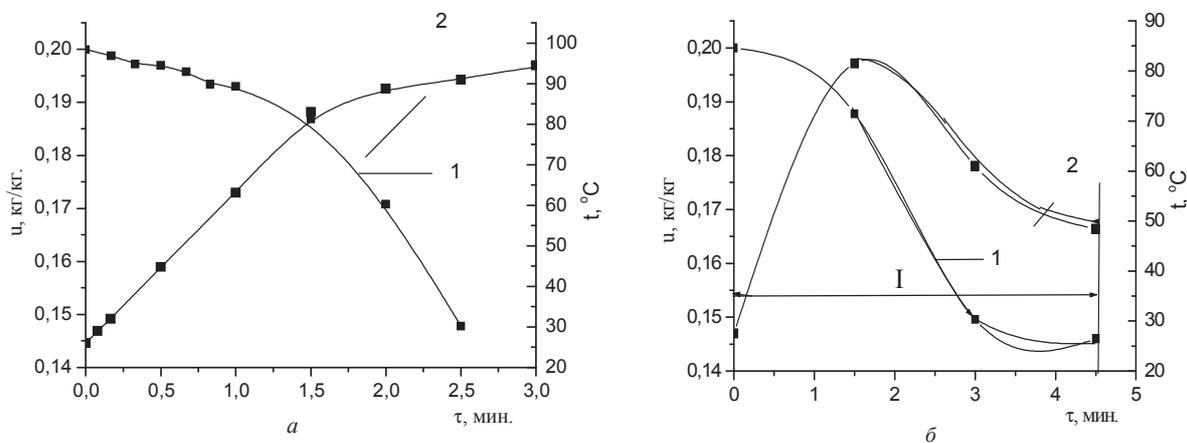
$$N_c = 187 \text{ Вт}; m = 0,2 \text{ кг}; l = 0,032 \text{ м.}$$

- 1 - подвод только СВ энергии;
- 2 - подвод СВ энергии с одновременным обдувом воздухом при $t = 25^{\circ}\text{C}$;
- 3 - подвод СВ энергии с одновременным обдувом воздухом при $t = 36^{\circ}\text{C}$.

Рис. 1 – Кривые интегральных влагосодержаний (а) и температур (б)

Интенсифицировать процессы тепло- и массообмена между слоем и окружающей средой можно с помощью периодической продувки слоя материала воздухом. Для снижения температуры образца эффективна продувка слоя воздухом с температурой окружающей среды. Большое влияние на скорость сушки и температуру материала оказывает соотношение продолжительности периодов СВ нагрева и продувки в каждом цикле и число циклов (n).

Как видно из графиков, микроволновая сушка – процесс более интенсивный, чем циклическая микроволново-конвективная сушка. Однако достоинством последней является возможность выдерживать необходимый температурный уровень и экономия энергозатрат.



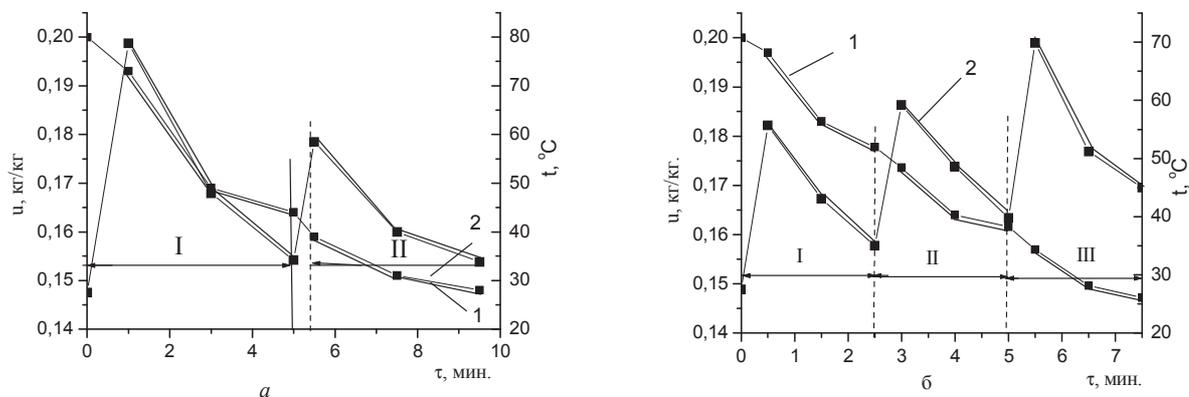
$$N_c = 400 \text{ Вт}; m = 0,1 \text{ кг}; l = 0,016 \text{ м.}$$

— период подвода СВ энергии $\tau = 1,5$ мин; = период продувки воздухом $\tau = 3$ мин; $n = 1$

Рис. 2 – Изменение влагосодержания (1) и температуры (2) при микроволновой (а) и микроволново-конвективной (б) сушке

При подводе только микроволновой энергии средняя скорость сушки составляла $N_{ср} = 0,0212 \text{ мин}^{-1}$ (рис. 2а), и при чередовании периодов нагрева и охлаждения средняя скорость сушки была ниже - $N_{ср} = 0,012 \text{ мин}^{-1}$ (рис. 2б).

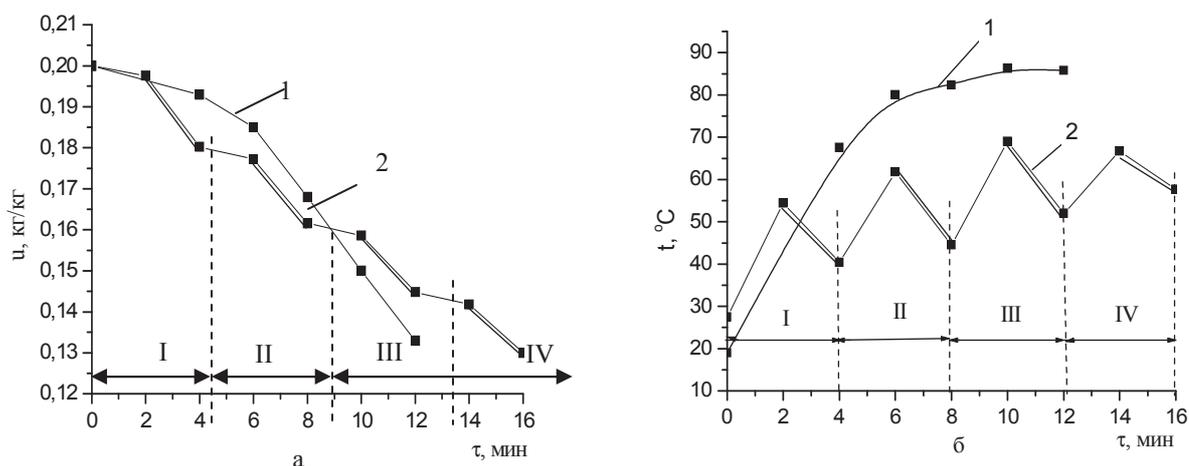
На рис. 3а,б приведенные кривые изменения влагосодержания и температуры в процессе циклической микроволново-конвективной сушки с разной продолжительностью периодов продувки. При уменьшении периода продувки с 4 мин до 2 мин средняя скорость сушки возрастала от 0,005 мин⁻¹ до 0,007 мин⁻¹ в связи с повышением средней температуры слоя.



— период подвода МВ энергии $\tau=0,5$ мин; = период продувки воздухом $\tau=4$ мин;
 $n=2$ (а) и $\tau=2$ мин, $n=3$ (б); $m=0,1$ кг; $l=0,016$ м, $N_c=400$ Вт

Рис. 3 – Изменение влагосодержания (1) и температуры (2) в процессе циклической сушки

Из рис. 3 видно, что темп изменения влагосодержания максимален в первом цикле, когда микроволновой объемный нагрев обеспечивает интенсивное перемещение жидкости изнутри к поверхности зерен, а продувка – ее быстрое испарение. В этом цикле скорость сушки определяется внешним диффузионным сопротивлением. В последующих циклах по мере снижения влагосодержания подвод энергии к поверхности зерен замедляется, определяющим становится внутреннее сопротивление влагопереноса, продувка практически не приводит к интенсификации процесса, скорость сушки падает. Однако продувка позволяет предотвратить перегрев материала и поддерживать его температуру на необходимом уровне. Об этом свидетельствует, например, рис. 4, где приведены кривые влагосодержания (а) и температуры (б) при микроволновом (1) и микроволново-конвективном (2) теплоподводе.



$m=0,2$ кг; $N_c=160$ Вт.

1 – микроволновая сушка, 2 – циклическая.

— период подвода МВ энергии $\tau=2$ мин; = период продувки воздухом $\tau=2$ мин. $n=4$

Рис. 4 – Изменение влагосодержания (а) и температуры (б)

Несмотря на то, что при циклическом режиме скорость сушки примерно на 25% ниже, он является более рациональным. Целесообразно вести процесс при одинаковой длительности периодов микроволнового и конвективного теплоподвода. В этом случае достаточно высокая скорость сушки сочетается с благоприятным для зерна температурным режимом.

По затратам электроэнергии предпочтителен режим с одним циклом – экономия электроэнергии по сравнению с микроволновой сушкой составляла 38%, продолжительность процесса возросла в 1,8 раза. При этом температура зерна в конце периода микроволнового нагрева достигала 81,5 °С, что нежелательно. При трех циклах экономия электроэнергии составляла 33%, время сушки возросло в 3 раза, температура материала не превышала 70 °С.

Во всех случаях с повышением температуры материала в конце микроволнового теплоподвода возрастает скорость сушки как в этом периоде, так и в периоде продувки. Следовательно, в период микроволнового теплоподвода целесообразно нагревать материал до максимально допустимой температуры, а затем начинать его продувку.

Выбор рациональных режимов циклической микроволново-конвективной сушки может быть сделан на основании тепловых и технико-экономических расчетов.

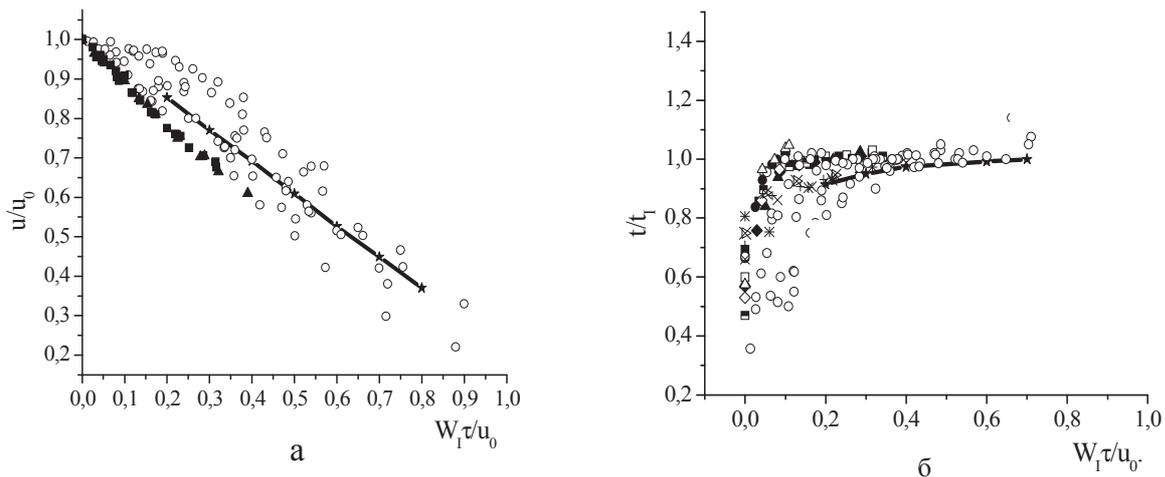
Получены обобщенные уравнения кривых влагосодержания и температуры в процессах сушки дисперсных материалов при различных способах подвода теплоты.

На рис. 5 экспериментальные данные по среднеинтегральным влагосодержаниям и температурам при разных способах подвода теплоты обработаны в виде зависимостей $\frac{\bar{u}}{u_0} = f_1\left(\frac{W\tau}{u_0}\right)$, $\frac{\bar{t}}{t_1} = f_2\left(\frac{W\tau}{u_0}\right)$.

Данные получены при кондуктивной, кондуктивно-конвективной сушке гречихи ([3,5,8,9]), микроволновой, микроволново-конвективной сушке гречихи, пшеницы, ячменя, овса, кукурузы (4,5,6) в неподвижном слое. На этих же графиках нанесены результаты расчетов по зависимостям, которые получены в [1] при кондуктивной сушке абразивных порошков в неподвижном и движущемся слое, кондуктивной сушке сварочных флюсов, активированного угля, плавикового шпата в неподвижном слое [10].

$$\bar{U} = \frac{\bar{u}}{u_0} = \left(1,6 - \frac{\bar{N}_1\tau}{u_0}\right) \left[1,6 + 3\left(\frac{\bar{N}_1\tau}{u_0}\right)^2 - 1,4\left(\frac{\bar{N}_1\tau}{u_0}\right)^{-1}\right], \quad (1);$$

$$\bar{T} = \frac{\bar{t}}{t_1} = 1 + 0,4\left(\frac{\bar{N}_1\tau}{u_0} - 0,8\right)^3, \quad (2).$$



○- микроволновой; ▲- кондуктивно-конвективный; ■-кондуктивный; ★ - кондуктивный

Рис. 5 – Обобщенные кривые влагосодержания (а) и температуры (б) при различных способах теплоподвода

Как видно из рис. 5, эти зависимости обобщают и данные для зерновых культур при различных способах теплоподвода со среднеквадратичной погрешностью по влагосодержанию $\pm 16,2\%$, температуре $\pm 20,8\%$. Эти погрешности выше, чем погрешности частных формул [2], полученных для зерновых культур при разных способах теплоподвода, что объясняется более широким диапазоном описываемых процессов.

Возможность получения единых уравнений для сушки неорганических и органических дисперсных материалов в неподвижном и движущемся слое при различных способах подвода теплоты свидетельствует о наличии общих закономерностей этих процессов. Зависимости (1), (2) позволяют определить среднеинтегральные влагосодержание и температуру в любой момент процесса сушки, либо время, за которое может быть достигнуто заданное влагосодержание или температура.

Литература

1. Календерьян В.А., Кориараки В.В. Теплообмен и сушка в движущемся плотном слое. – Киев: Вища школа. 1982.-160с. - 1
2. Волгушева Н.В. Кинетика сушки плотного слоя дисперсного материала (на примере гречихи) при различных способах подвода теплоты. Дисс. канд. техн. наук, 05.14.05, Одесса, 2005, 225с.
3. Календерьян В.А., Бошкова И.Л., Волгушева Н.В. Кинетика микроволновой сушки гречихи в микроволновом электромагнитном поле // ИФЖ, 2006, №3, т. 79, с. 123-127.
4. Календерьян В.А., Волгушева Н.В., Бошкова И.Л. Кинетика кондуктивной и кондуктивно-конвективной сушки гречихи в микроволновом поле // Наукові праці ОНАХ. Одеса. – 2006. - №29, т. 2. – с. 17-20.
5. Календерьян В.А., Бошкова И.Л., Волгушева Н.В. Сушка зерновых культур в плотном слое с применением микроволнового поля // Хранение и переработка зерна 2008, №1, с. 16-18.
6. Календерьян В.А., Бошкова И.Л., Волгушева Н.В. Кинетика микроволновой сушки зерновых культур // Материалы VI Минского международного форума по тепло- и массообмену, Минск, 19-23 мая 2008 г., с. 204-205.
7. Календерьян В.А., Бошкова И.Л., Волгушева Н.В. Теплоперенос в процессе сушки плотного слоя дисперсного материала при микроволновом подводе энергии // Наукові праці НУХТ, Київ 2008, №25, частина 2. с. 94-95.
8. Kalenderian V.A., Kornaraki V.V. Przenoszenie ciepła podczas suszenia materiałów sypkich w ruchomym złożu zwartym z zanurzonymi elementami grzeijnymi. VIII symp. Suszarnictwa, t. 1, Polska, Warszawa, 1994, p. 62-68.
9. Календерьян В.А., Корнанаки В.В., Кислицына А.Л. Тепловогоперенос при сушке дисперсных материалов в плотном слое. Межд. форум по теплообмену ММФ – 96, т. VIII «Теплообмен в процессах сушки», 1996, с. 110-114.
10. Ву Зуй Тьонг. Теплоперенос в дисперсных материалах при кондуктивной сушке. Дисс. канд. техн. наук, Одесса, 1983
11. Календерьян В.А., Ву Зуй Тьонг. Кинетика процесса и коэффициенты тепловогопереноса при кондуктивной сушке дисперсных материалов. Укр. ИНТЭИ, 1992, №1140, 21 с.

УДК 633.15:631.36

НАУКОВО-ПРАКТИЧНІ ТЕНДЕНЦІЇ РОЗВИТКУ ТЕХНОЛОГІЙ ТА СИСТЕМИ МАШИН ДЛЯ ПЕРВИННОЇ ОБРОБКИ І ЗБЕРІГАННЯ ЗЕРНА

Кирпа М.Я., доктор с.-г. наук
Інститут зернового господарства НААНУ, м. Дніпропетровськ

Наведено аналіз та намічені шляхи розвитку технологій і системи машин для післязбиральної обробки і зберігання зерна, виділені базові технології та прийоми енергозбереження.

The analysis is resulted and ways of development of system of cars for the ambassador of harvest processing and grain storage are planned, base technologies and receptions of savings of energy are allocated.