

УДК 664.723

КИНЕТИКА МИКРОВОЛНОВОЙ СУШКИ ЗЕРНОВЫХ КУЛЬТУР

В.А. Календерьян, И.Л. Бошкова, Н.В. Волгушева

Одесская государственная академия холода

Сохранность пищевой ценности зерна зависит от технологии переработки. Интенсивность превращения белковых веществ при различных способах сушки неодинакова. При сушке с нагревом на 2 – 6 °С выше границ безопасных температур содержание белковых веществ ниже, чем при нагреве в пределах безопасных температур. При кондуктивной и конвективной сушке при обеспечении высокой интенсивности процесса избежать перегрева зерна достаточно сложно. Микроволновая сушка благодаря объемному подводу энергии позволяет поддерживать требуемый температурный режим во всем объеме материала. Микроволновая сушка имеет еще ряд преимуществ. Так, исследование режимов конвективной сушки позволило установить, что при предварительном нагреве зерна поверхностный градиент влагосодержания меньше, чем при обычной конвективной сушке, зона испарения размещается вблизи поверхности, к которой влага движется в виде жидкости [1]. Это предотвращает перегрев поверхности зерна и улучшает его качество. Подобная картина наблюдается в процессе всей микроволновой сушки – зона испарения всегда находится вблизи поверхности зерновки и необходимости в предварительном нагреве нет. Кроме того, при правильной организации микроволнового нагрева (рациональной загрузке камеры) потребление энергии может быть существенно снижено по сравнению с конвективной сушкой [2]. Несмотря на актуальность перехода к микроволновым технологиям сушки, недостаток данных по кинетике и условиям правильной организации слоя в микроволновом поле тормозит их развитие. Целью исследования было выявление основных закономерностей кинетики микроволновой сушки зерна пшеницы, гречихи, овса и ячменя в плотном слое и определение влияния массы материала, величины подводимой мощности и времени микроволнового воздействия.

В рабочую камеру прямоугольного сечения размерами 306x201x322 мм микроволновая энергия поступала через волновод от магнетрона с частотой генерации 2,45 ГГц и регулируемой мощностью 80 – 800 Вт. Начальное влагосодержание зерна изменялось от 0,136 до 0,20 кг/кг, масса – от 0,1 до 1,0 кг, подводимая мощность – от 180 до 600 Вт, толщина слоя – от 0,013 до 0,06 м. Исследуемый материал помещался в экспериментальную ячейку, которая устанавливалась в микроволновую камеру. Через определенные интервалы времени, шаг которых варьировался в зависимости от величины подводимой мощности в пределах от 30 с до 5 минут, весовым методом определялось количество испарившейся влаги и рассчитывалось влагосодержание зерна, а также скорость сушки. Измерения температуры производились с помощью медь-константановых термопар в комплекте с вольтметром универсальным В7-21, термопары помещались в слой зерна непосредственно после выключения магнетрона.

Анализ полученных результатов показал, что кривые кинетики сушки имеют общий для всех зерновых видов. В качестве примера на рис. 1 представлены зависимости влагосодержания и температуры ячменя от длительности сушки в микроволновом поле при различной массе загрузки.

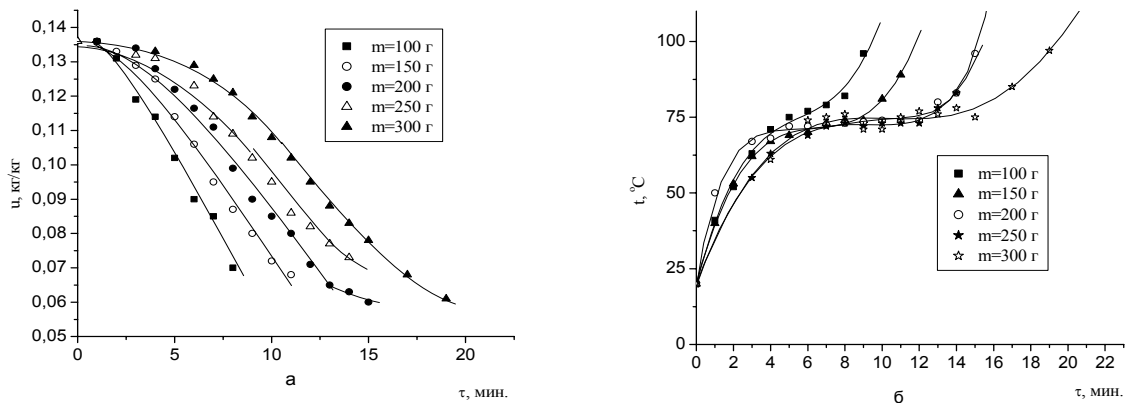


Рис.1. Изменение влагосодержания (а) и температуры (б) ячменя в зависимости от времени сушки в МВ камере при различной массе загрузки.

Видно, что можно выделить три периода: прогрева (0), постоянной (1) и падающей (2) скорости сушки, что также отмечалось ранее при исследовании сушки гречихи [3]. Увеличение массы загрузки приводит к увеличению продолжительности сушки, однако при этом температурный режим может быть выдержан более строго. Кроме того, увеличение массы в указанном диапазоне приводит к увеличению КПД камеры, т.е. более полному использованию электроэнергии.

Данные для всех исследованных материалов могут быть обобщены единой зависимостью скорости сушки от приведенного теплового потока, т.е. отношения полезного теплового потока (количества теплоты, расходуемого на нагрев материала и испарение из него влаги) к массе образца $q_m = \frac{Q_{пол}}{m}$.

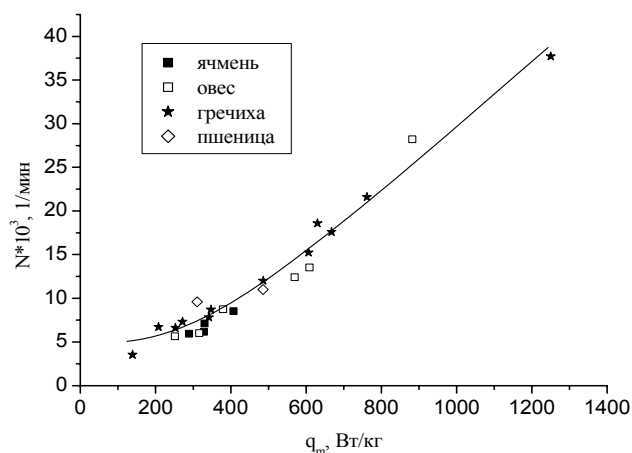


Рис.2. Зависимость скорости сушки зерна в первом периоде N от приведенного теплового потока q_m .

Представленная на рис.2 зависимость описывается следующей эмпирической формулой, позволяющей рассчитать скорость сушки в первом периоде:

$$N = 9.47 \cdot 10^{-6} (q_m)^{1.11}, \text{ мин}^{-1} \quad (1)$$

Для расчета средней температуры зерна в периоде постоянной скорости сушки (первом периоде) \bar{t}_1 может быть рекомендована зависимость, полученная по результатам экспериментальных исследований:

$$\bar{t}_1 = 13.22 \cdot (q_m)^{0.28} \text{ } ^\circ\text{C}, \quad (2)$$

Зависимости (1,2) справедливы при $200 \leq q_m \leq 1285$ Вт/кг с погрешностью $\pm 15\%$ и $\pm 13\%$.

Для расчета полезного теплового потока удобно пользоваться формулой, которая учитывает потребляемую от сети электроэнергию P , КПД микроволновой камеры η_k и КПД магнетрона η_m :

$$Q_{\text{пол}} = P \cdot \eta_k \cdot \eta_m, \text{ Вт.}$$

КПД микроволновой камеры определяется экспериментально и его значение зависит от согласованности массы загрузки с объемом камеры.

Для расчета КПД камеры была получена эмпирическая зависимость, которая учитывает полноту загрузки камеры за счет введения симплекса V_m / V_k , где V_m - объем, занимаемый материалом, V_k - объем камеры:

$$\eta_k = 0,71 \left(1 - \frac{2,57}{17,6 + e^{21,8 \cdot V_m / V_k}} \right)$$

Экспериментальные данные по интегральному влагосодержанию и температуре материала обработаны в виде обобщенных зависимостей безразмерных текущих влагосодержания u/u_0 (рис. 3а) и температуры t/t_1 (рис. 3б) от безразмерного комплекса $N\tau/u_0$, который достаточно полно учитывает условия взаимосвязанного теплопереноса в процессе сушки [4].

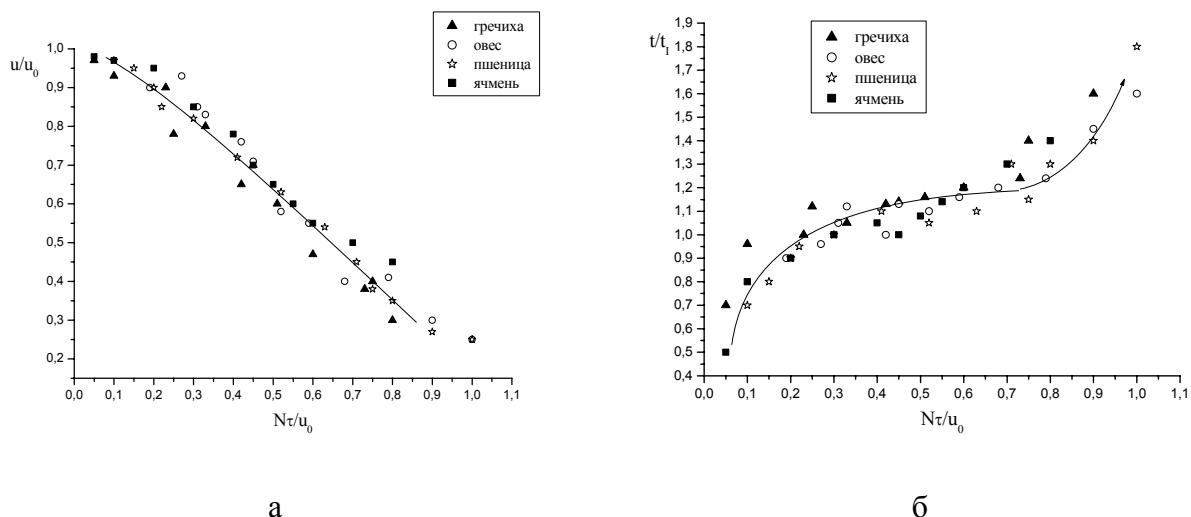


Рис. 3 - Обобщенные кривые влагосодержания (а) и температуры (б)

В этом комплексе была использована скорость сушки в периоде постоянной скорости. Комплекс $N\tau/u_0$ позволяет учесть влияние всех исследованных режимных и геометрических факторов.

Анализ результатов показал, что данные для всех исследованных зерновых могут быть обобщены едиными уравнениями с приемлемой погрешностью. Соответствующие уравнения, описывающие все периоды процесса сушки исследуемых культур при $0,036 \leq \frac{N\tau}{u_0} \leq 0,83$, имеют вид:

$$\frac{\bar{u}}{u_0} = 1.016 - 0.332 \frac{N\tau}{u_0} - 1.449 \left(\frac{N\tau}{u_0} \right)^2 + 1.091 \left(\frac{N\tau}{u_0} \right)^3, \quad (3)$$

$$\frac{\bar{t}}{t_1} = 0.511 + 3.506 \frac{N\tau}{u_0} - 8.341 \left(\frac{N\tau}{u_0} \right)^2 + 7.095 \left(\frac{N\tau}{u_0} \right)^3, \quad (4)$$

Формулы (3, 4) справедливы со среднеквадратичной погрешностью $\pm 9,8\%$ и $\pm 11,9\%$ соответственно.

Как показали результаты наших исследований, скорость МВ сушки при отсутствии перегрева зерна составляет $(5-37) \cdot 10^{-3} \text{ мин}^{-1}$, что существенно превышает значения, полученные при других способах подвода теплоты. Так, для гречихи скорость кондуктивной сушки составляла $1.6 \cdot 10^{-4} \text{ мин}^{-1}$ [3,5], кондуктивно-конвективной – до $1 \cdot 10^{-3} \text{ мин}^{-1}$ [6], максимальная скорость конвективной сушки пшеницы – до $9 \cdot 10^{-4} \text{ мин}^{-1}$ [1]. Возможность значительно интенсифицировать процесс свидетельствует о перспективности применения микроволнового поля для сушки зерновых.

Полученные данные являются основой расчета сушилок для зерновых, использующих микроволновой нагрев. В качестве примера рассмотрим порядок расчета микроволновой сушилки периодического действия с неподвижным слоем зерна. Необходимо задать следующие исходные данные: род материала, его начальное u_0 и конечное u_k влагосодержание, максимально допустимую температуру зерна t_{\max} . Следует выбрать тип микроволновой камеры, массу загружаемого материала, расположение слоя, его форму и размеры. Алгоритм расчета следующий.

1. Задаться значением $\frac{Q_{\text{пол}}}{m}$ в пределах применимости зависимости (1) и из нее определить скорость сушки в первом периоде N .
2. Из обобщенного уравнения влагосодержания (3), зная конечное значение безразмерного влагосодержания $U_k = \frac{u_k}{u_0}$ и N , определить значение комплекса $\frac{N\tau}{u_0}$, а из него – необходимую продолжительность процесса сушки, обеспечивающую достижение заданного влагосодержания u_k .
3. Из зависимости (2) определить среднюю температуру материала в первом периоде.
4. Зная массу материала, его начальные и конечные температуры и влагосодержания, найти количество теплоты, которое должно быть подведено к материалу в течение всего процесса сушки.

5. По принятому значению $\frac{Q_{пол}}{m}$ и массе материала найти значение $Q_{пол}$, а затем необходимую мощность магнетрона $P_M = \frac{Q_{пол}}{\eta_M}$.

На основании вариантных расчетов при различных значениях $\frac{Q_{пол}}{m}$ может быть выбран рациональный режим, обеспечивающий достаточно высокую интенсивность процесса сушки без перегрева материала. Приведенные зависимости позволяют определить, как изменятся конечные влагосодержание и температура при изменении их начальных значений, а также найти мощность магнетронов, необходимую для того, чтобы при изменении начального влагосодержания либо температура конечное оставалось неизменным.

Если в исходных данных, помимо перечисленных выше, задано время сушки, то расчет следует вести в следующем порядке:

- 1) Из обобщенного уравнения влагосодержания (3), зная $\bar{U}_\kappa = \frac{\bar{u}_\kappa}{u_0}$ найти значение комплекса $\frac{N\tau}{u_0}$, а из него – необходимую скорость сушки.
- 2) Из формулы (1) найти значение $\frac{Q_{пол}}{m}$, затем - $Q_{пол}$.
- 3) Найти необходимую мощность магнетронов P_M .

Приведенные зависимости могут быть использованы и для расчета микроволновых сушилок с плотным движущимся слоем зерна.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Атаназевич В. И. Сушка зерна. М.: Лабиринт, 1997. 245 с.
- [2] Ауэрман Л. Я., Губиев Ю. К., Пруидзе Э. Г. СВЧ-конвективная сушка зерна пшеницы. Известия вузов, Пищевая технология. 1984. №3. с. 54 – 57
- [3] Календерьян В.А., Бошкова И.Л., Волгушева Н.В. Исследование кинетики сушки крупы гречихи в микроволновом электромагнитном поле. ИФЖ, 2006. №3, т. 79. с. 123 – 127.
- [4] Календерьян В.А, Корнараки В.В. Теплообмен и сушка в движущемся плотном слое. К.: Вища школа, 1982.
- [5] Kalenderian V. A., Kornaraki V. V. Przenoszenie ciepła podczas suszenia materiałov sypkych w ruchomym zlozu zwartym z zanurzonymi elementami grzeinyymi. VIII symp. Suszarnictwa, t.1., Polska, Warszawa. 1994. Pp. 62 – 68.
- [6] Волгушева Н.В. Кинетика сушки плотного слоя дисперсного материала (на примере гречихи) при различных способах подвода теплоты. Автореферат канд. дисс. Одесса, 2005. 12с.