

УДК: 664.854:634.21:621.3.023

ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ПРОЦЕССА СУШКИ ЯДЕР АБРИКОС С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТВЧ

Лупашко Андрей, prof.dr.hab; Дикусар Галина, conf.dr.;
Боиштян Ольга, conf.dr.; Гендов-Мошану Алена, conf.dr.
(Технический Университет Молдовы)

Были проведены исследования по изучению процесса конвективной и комбинированной с использованием токов высокой частоты сушки ядер косточек абрикос сорта «Краснощекий». Были построены кривые сушки и скорости сушки, были рассчитаны кинетические характеристики процесса сушки в 1-ом и 2-ом периодах при различных напряженностях электромагнитного поля.

Введение

С целью интенсификации процесса сушки, сохранения биологических свойств продукта, повышения экономической эффективности и улучшения экологических условий предложена сушка ядер косточек абрикос конвективным и комбинированным методами с использованием токов высокой частоты (ТВЧ).

Методы и материалы

Исследования проводились на описанной в [1] экспериментальной установке. Сушке подвергались ядра косточек абрикос сорта «Краснощекий» с начальным влагосодержанием $U^c = 146\%$.

Для регистрации убыли массы в исследованиях использовали механические весы типа ВНЦ – 200. Скорость воздуха, подаваемого в сушильную камеру, поддерживалась постоянной автоматически и составляла 1,1 м/с. Определяли параметры воздуха до калорифера (начальную температуру t_0 и относительную влажность ϕ_0) и после калорифера (t_1). В первой части работы исследовали кинетику конвективной сушки при температурах сушильного агента 60, 70, 80, 90 и 100 °С. Измеряли убыль массы через каждые 5 мин, обезвоживание проводили до равновесной влажности, равной 30 % [2].

Результаты и обсуждения

На рис.1 представлены кривые сушки $U=f(\tau)$ и скорости сушки $\left(\frac{dU}{dt}\right)_1 = f(U)$ ядер косточек абрикос. Как видно из кривых сушки, продолжительность процесса при температуре 60 °С составляла 620 мин, а для температуры 100 °С - 220 мин., т.е. уменьшилась в 2,85 раза.

Кривые скорости сушки (рис.1б) представляют собой типичные кривые для коллоидно-капиллярных тел, имеющие период прогрева, 1-й и 2-й периоды сушки [3].

На основе опытных данных были рассчитаны скорости сушки в первом периоде. В табл.1 приводятся значения температуры сушки, t_1 , °C, критической влажности, $U_{кр}$, %, скорости сушки в 1-ом периоде, $\left(\frac{dU}{dt}\right)_1$, %/с, константы скорости сушки 1-го K_1 и 2-го K_2 периодов, время прогрева, $\tau_{прогр.}$ и продолжительность сушки 1-го (τ_1 , мин) и 2-го (τ_2 , мин) периодов.

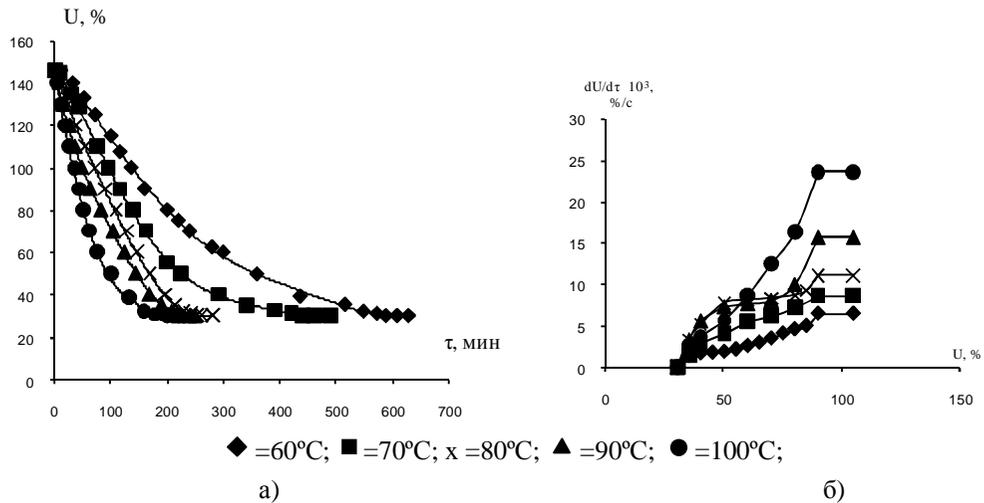


Рис. 1. Кривая сушки (а) и скорости сушки (б) ядер косточек абрикос при конвективном энергоподводе

Во второй части эксперимента исследовали влияние высокочастотного нагрева в сочетании с конвективным способом энергоподвода на кинетику сушки при различных режимах напряжённости электромагнитного поля $E = 8,75 \cdot 10^3$ В/м и $E = 1,8 \cdot 10^4$ В/м.

Таблица 1

Экспериментальные данные кинетики сушки ядер косточек абрикос конвективным методом

| № | t_1 , °C | $U_{кр}$, % | $\left(\frac{dU}{dt}\right)_1 \cdot 10^3$, %/с | K_1 , %/м ² с | $K_2 \cdot 10^6$, С ⁻¹ | $\tau_{прогр.}$, МИН | τ_1 , МИН | τ_2 , МИН | $\tau_{общ.}$, МИН |
|---|------------|--------------|---|----------------------------|------------------------------------|-----------------------|----------------|----------------|---------------------|
| 1 | 60 | 90 | 6,46 | 58,6 | 1,6 | 100 | 240 | 280 | 620 |
| 2 | 70 | 90 | 8,62 | 63,5 | 3,2 | 89 | 184 | 232 | 505 |
| 3 | 80 | 95 | 11,18 | 65,9 | 4,0 | 78 | 158 | 169 | 415 |
| 4 | 90 | 95 | 15,74 | 84,35 | 4,98 | 59 | 122 | 137 | 318 |
| 5 | 100 | 95 | 23,61 | 107,1 | 5,6 | 35 | 91 | 94 | 220 |

Результаты исследований представлены на рис. 2 и 3 в виде кривых сушки и скорости сушки.

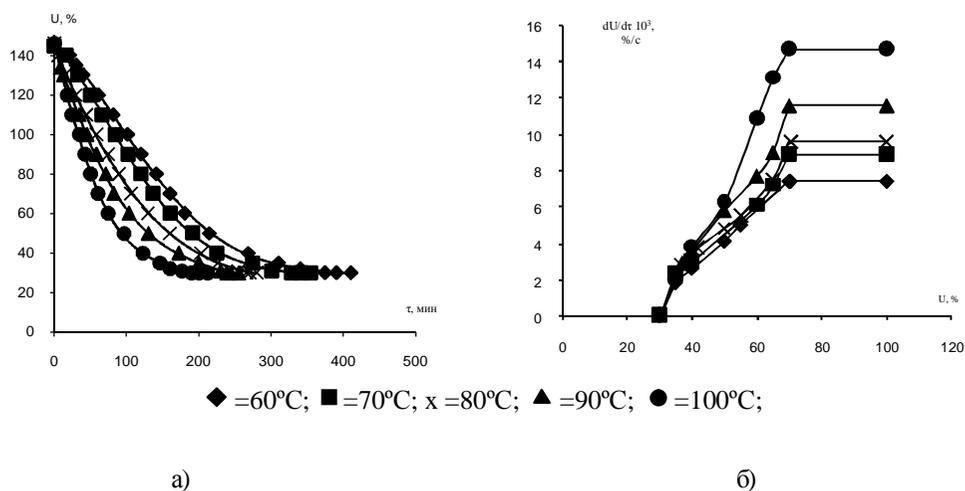


Рис. 2. Кривая сушки (а) и скорости сушки (б) ядер косточек абрикос комбинированным способом (конвекция + ТВЧ) при напряженности электромагнитного поля $E=8750$ В/м

Как видно из данных, представленных на рис. 2, наложение электромагнитных полей высокой частоты в комбинации их с конвективным способом, значительно интенсифицирует процесс сушки.

При этом, с ростом напряжённости поля время процесса сушки для различных температур уменьшается. Так, при температуре 60 °С и напряжённости электромагнитного поля $8,75 \cdot 10^3$ В/м время процесса сушки до влажности 30 % составило 410 мин, а при напряжённости $1,8 \cdot 10^4$ В/м оно составило 370 мин т.е. уменьшилось на 40 мин.

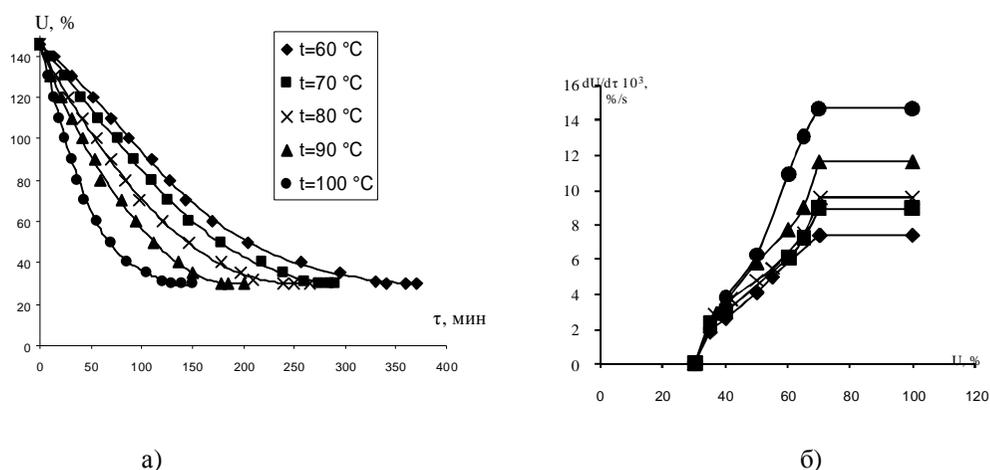


Рис. 3. Кривая сушки (а) и скорости сушки (б) ядер косточек абрикос комбинированным способом (конвекция + ТВЧ) при напряженности электромагнитного поля $E=1,8 \cdot 10^4$ В/м

Если сравнивать процесс обезвоживания при минимальных температуре и напряжённости электромагнитного поля ($t = 60 \text{ }^\circ\text{C}$ и $E = 8,75 \cdot 10^3 \text{ В/м}$) с максимальными температурой и напряжённостью поля ($t = 100 \text{ }^\circ\text{C}$ и $E = 1,8 \cdot 10^4 \text{ В/м}$), то время обезвоживания от 146 % до 30 % сократилось в 2,8 раза.

Сокращение продолжительности процесса сушки ядер обусловлено более интенсивным выделением тепла в единице объёма ядер с ростом напряжённости, поэтому скорость процесса сушки ядер с применением ТВЧ быстро возрастает до максимального значения.

Таблица 2

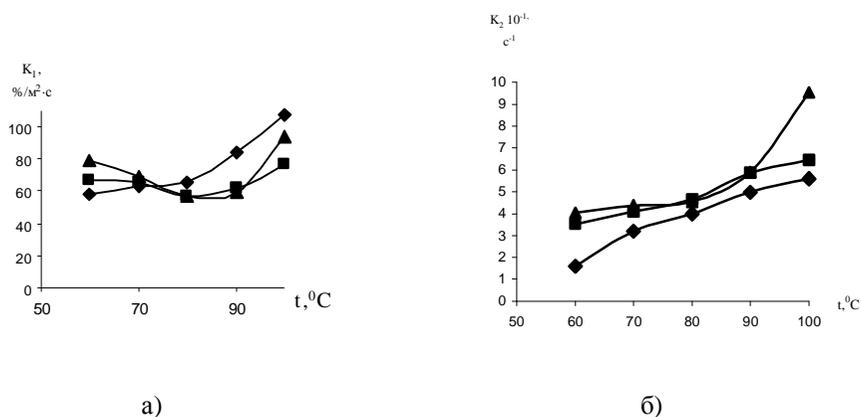
Экспериментальные данные кинетики сушки ядер косточек абрикос при комбинированном методе - конвекция + ТВЧ

| № | $t_1, \text{ }^\circ\text{C}$ | $U_{кр}, \%$ | $\left(\frac{dU}{dt}\right)_1 \cdot 10^3, \%$ %/с | $K_1, \%$ %/м ² с | $K_2 \cdot 10^6, \text{ C}^{-1}$ | $\tau_{прогр.}, \text{ мин}$ | $\tau_1, \text{ мин}$ | $\tau_2, \text{ мин}$ | $\tau_{общ.}, \text{ мин}$ |
|---|-------------------------------|--------------|--|---------------------------------|----------------------------------|------------------------------|-----------------------|-----------------------|----------------------------|
| Напряжённость электрического поля $E = 8,75 \cdot 10^3 \text{ В/м}$ | | | | | | | | | |
| 1 | 60 | 70 | 7,41 | 67,2 | 3,53 | 80 | 235 | 85 | 410 |
| 2 | 70 | 69 | 8,93 | 65,8 | 4,09 | 56 | 223 | 61 | 340 |
| 3 | 80 | 69 | 9,59 | 56,6 | 4,65 | 28 | 193 | 59 | 280 |
| 4 | 90 | 70 | 11,61 | 62,2 | 5,86 | 25 | 187 | 48 | 260 |
| 5 | 100 | 70 | 14,72 | 76,8 | 6,45 | 17 | 165 | 33 | 215 |
| Напряжённость электрического поля $E = 1,8 \cdot 10^4 \text{ В/м}$ | | | | | | | | | |
| 1 | 60 | 68 | 8,73 | 79,2 | 4,04 | 45 | 273 | 47 | 365 |
| 2 | 70 | 72 | 9,44 | 69,6 | 4,37 | 33 | 235 | 31 | 300 |
| 3 | 80 | 69 | 9,61 | 56,5 | 4,56 | 30 | 185 | 29 | 245 |
| 4 | 90 | 66 | 11,01 | 59,0 | 5,90 | 17 | 158 | 23 | 198 |
| 5 | 100 | 72 | 20,63 | 93,6 | 9,55 | 13 | 112 | 20 | 145 |

При температуре сушильного агента $60 \text{ }^\circ\text{C}$ (рис.2, б) и напряженности электромагнитного поля $E = 8,75 \cdot 10^3 \text{ В/м}$ значение максимальной скорости возросло на 17,8 %. С ростом температуры значение максимальной скорости процесса сушки увеличивается. При изменении температуры от $60 \text{ }^\circ\text{C}$ до $100 \text{ }^\circ\text{C}$ и при той же напряженности скорость возросла в 2 раза.

Как для конвективного метода сушки, так для комбинированного метода (конвекция + ТВЧ) при разной напряжённости поля были рассчитаны кинетические характеристики процесса сушки, значения которых приводятся в таблице 2.

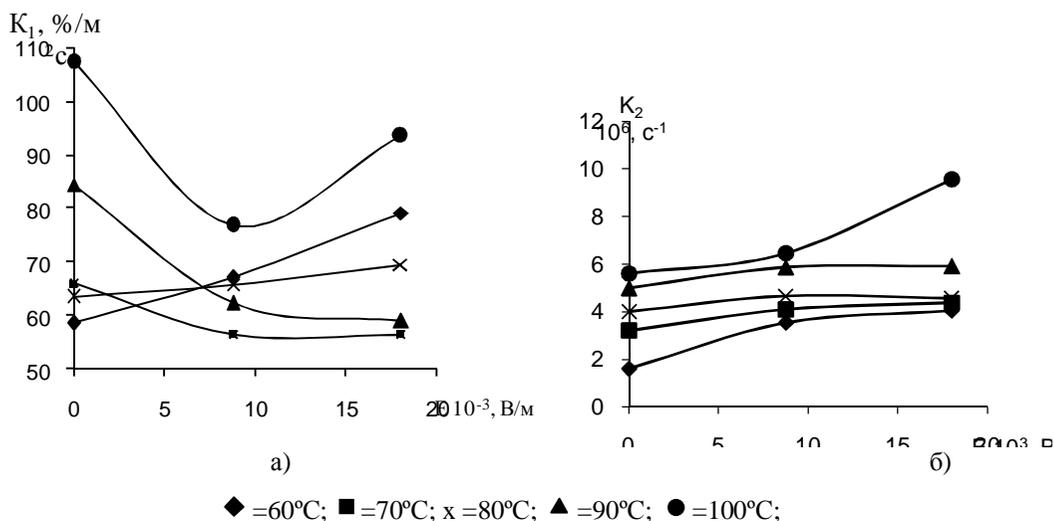
Для 2-го периода константа скорости сушки K_2 при температуре $60 \text{ }^\circ\text{C}$ с увеличением напряженности ЭМП увеличилась на 14,4 %. Влияние температуры от $60 \text{ }^\circ\text{C}$ до $100 \text{ }^\circ\text{C}$ при увеличении напряженности от $E=8,75 \cdot 10^3 \text{ В/м}$ до $E=1,8 \cdot 10^4$ привело к увеличению констант скорости сушки K_2 от 83 % до 136 %. Эти цифры показывают, что влияние ТВЧ на сушку значительно, особенно во 2-ом периоде, что связано с влиянием ТВЧ на структуру продукта и на разрыв связи влаги с материалом. Изменение констант скорости сушки представлены на рис. 4, 5.



◆ – конвекция; ■ – конвекция+ТВЧ, $E=8750$ В/м; ▲ – конвекция+ТВЧ, $E=18000$ В/м

Рис. 4. Зависимость констант скорости сушки от температуры при различных энергоподводах: а) 1-й период; б) 2-й период

Результаты исследований позволяют заключить, что наложение ТВЧ в комплексе с конвективным способом энергоподвода изменяет кинетику процесса сушки: уменьшается время прогрева материала по сравнению с чистой конвекцией от 100 до 13 мин, т.е. более чем в 7 раз, а время 2-го периода сушки сокращается в 14 раз.



◆ =60°C; ■ =70°C; x =80°C; ▲ =90°C; ● =100°C;

Рис. 5. Зависимость констант скорости сушки от напряженности электромагнитного поля: а) 1-й период; б) 2-й период.

Анализ изменения констант скорости сушки в зависимости от температур показывает, что наложение электромагнитных полей ТВЧ больше влияет на внутренний тепло- и массообмен, при этом коэффициент сушки во 2-ом периоде возрастает в 1,83 раза при $E = 8,75 \cdot 10^3$ В/м и в 2,4 раза при $E = 1,8 \cdot 10^4$ В/м. Это свидетельствует о взаимном влиянии температуры и напряжённости электромагнитного поля. Кривая при $E = 1,8 \cdot 10^4$ В/м (рис.4б) явно указывает на синергетический эффект такого влияния.

Полученные результаты исследований процесса сушки ядер косточек абрикос при конвективном подводе тепла (рис. 1) и при сочетании конвективного подвода тепла с нагревом в электрическом поле токов высокой частоты (рис. 2, 3) показали, что ядра являются сложным органическим продуктом. В процессе тепловой обработки в ядрах происходит не только убыль массы за счёт удаления влаги (что характерно для большинства влажных материалов), но и убыль массы за счёт биохимических изменений, происходящих в них при высоких температурах. Поэтому обоснование метода сушки для таких продуктов, какими являются ядра, необходимо проводить с учётом этих особенностей.

Выводы

Из проведенных исследований видно, что высокочастотный нагрев в сочетании с конвективным способом энергоподвода по сравнению с чистой конвекцией является более перспективным для процесса обезвоживания ядер косточек абрикос. Причём, наиболее интенсивным режимом является комбинированная сушка с температурой сушильного агента 100 °С и напряжённостью электромагнитного поля $E = 1,8 \cdot 10^4$ В/м. Процесс сушки лучше проводить в два этапа. На первом этапе до получения критической влажности ядер 110 % следует осуществлять конвективный энергоподвод (100 °С), на втором этапе до получения равновесной влажности 30 % использовать комбинированный энергоподвод (конвенкция + ТВЧ) при напряжённости электромагнитного поля $E = 1,8 \cdot 10^4$ В/м.

Библиография

1. Лупу, О.Ф. Теоретическое и экспериментальное исследование процесса сушки абрикос с применением токов высокой частоты. Автореф. дисс. докт. техн. наук. – Кишинев. – 2005.
2. Гинзбург, А.С., Савина, И.М. Массовлагодобменные характеристики пищевых продуктов. Справочник. М.: Легкая и пищевая промышленность, 1982.-280с.
3. Лыков, А.В. Теория сушки. – М.: Энергия, 1968. – 470 с.