

## **Анализ хода температурных кривых при конвективно-радиационной сушки кураги**

**Усманов И.И., Иваненко В.П.\*, Крысин А.Г.\*, Пеленко В.В.,**  
[\*\*petrobars.spb@mail.ru\*\*](mailto:petrobars.spb@mail.ru)

Санкт-Петербургский государственный университет  
низкотемпературных и пищевых технологий,  
Санкт-Петербургский торгово-экономический институт\*

*В статье описаны особенности процесса массопереноса влаги с поверхности плодов кураги в условиях вынужденной конвекции и инфракрасного облучения, а так же проанализирован ход температурных кривых на основании результатов прецизионных измерений параметров процесса сушки.*

**Ключевые слова:** температура, конвекция, излучение, теплота, пограничный слой, прозрачность, скорость массопереноса, динамическое равновесие, фазовое превращение.

### **Analysis of the temperature curves in the convective-radiative drying apricots**

**Usmanov I.I., Ivanenko, W.P.\*, Krysin A.G. ,\* PelenkoW.W.,**  
**petrobars.spb @ mail.ru**

St. Petersburg State University  
Refrigeration and Food Engineering,  
Saint-Petersburg Trade-Economic Institute \*

This article describes the features of the process of mass transfer of moisture from the surface of the fruit dried apricots in conditions of forced convection and infrared radiation, as well as consider the course of the temperature curves on the basis of precise measurements of dehydration process.

**Key words:** temperature, convection, radiation, heat, boundary layer, transpaequilibrium phase transformation.rency, speed of mass transport, dynamic equilibrium, phase transformation.

Техническое обеспечение экспериментов прецизионными приборами измерения (относительная погрешность весового комплекса менее 0,008%, измерения температуры – менее 0,04 %) позволило обнаружить такие кинетические и теплофизические особенности процессов массообмена, которые не отмечаются в известных литературных источниках, где указано лишь, что «Все эти процессы являются сложными и взаимно зависимыми, ... это связано прежде всего с тем, что воздействию в этих процессах подвергают пищевые продукты, которые с позицией тепло- и массообмена представляют собой чрезвычайно сложный объект с тонкими и подчас труднопредсказуемыми свойствами» [1].

Как следует из полученных экспериментальных данных, иллюстрируемых рис.1, при ИК- облучении мощностью  $W= 2000 \text{ Вт/см}^2$ . в режиме естественной конвекции температура центра продукта (кривая 2) растет быстрее, чем температура поверхности (кривая 1), что обусловлено существенным съемом теплоты с поверхности плода за счет внешнего испарения.

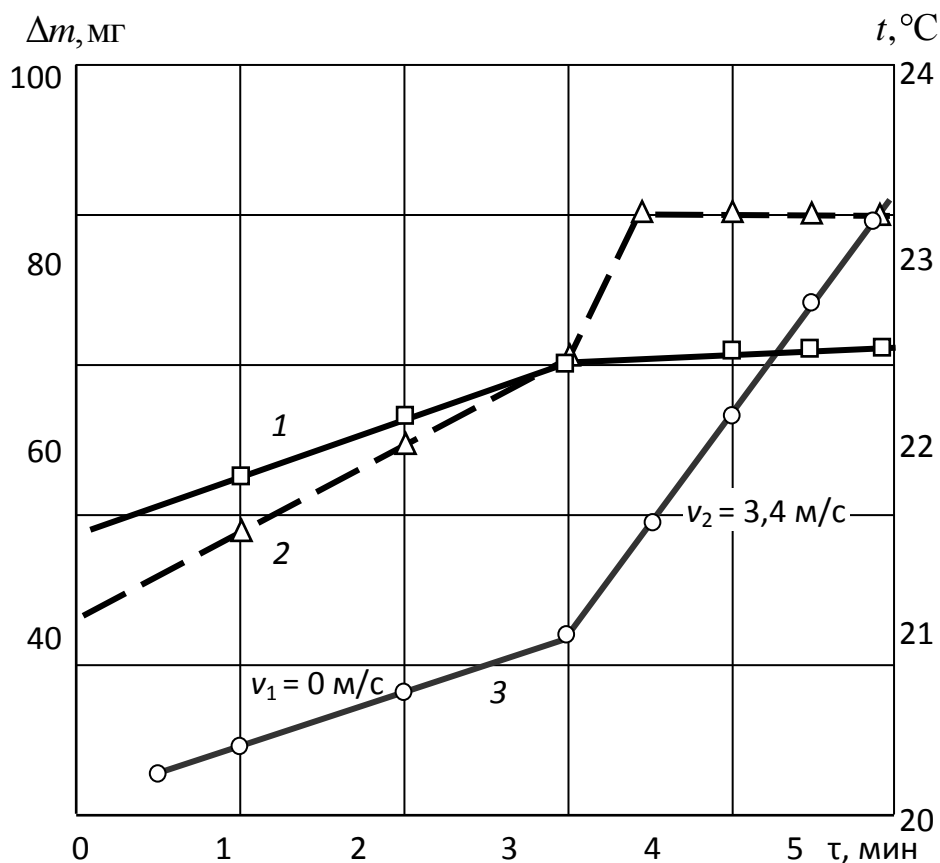


Рис.1. Зависимость  $\Delta m = f(\tau)$  и  $t = f(\tau)$  при  $w = 2000 \text{ Вт/м}^2$ ;  $t_T = 20^\circ\text{C}$   
1 – температура поверхности; 2 – температура центра; 3 – унос влаги при  
 $V_1 = 0 \text{ м/с}$  и  $V_2 = 3,4 \text{ м/с}$ .

С момента перехода к режиму вынужденной конвекции наблюдается, во-первых, значительное увеличение скорости массоуноса с 8 до 28 мг/мин, т.е. в 2,5 раза (кривая 3), а во-вторых, существенное увеличение темпа роста температуры центра продукта (от 0,58 до 2,5<sup>0</sup>С/мин). Скорость роста температуры поверхности плода кураги снизилась от 0,38<sup>0</sup>С/мин до 0,1<sup>0</sup>С/мин.

Интенсивный рост кривой температуры в центре продукта на промежутке 3,0-3,5 мин обусловлен переходом к режиму вынужденной конвекции, в результате чего толщина парового пограничного слоя существенно уменьшается, что приводит к увеличению прозрачности пограничного слоя для ИК излучения.

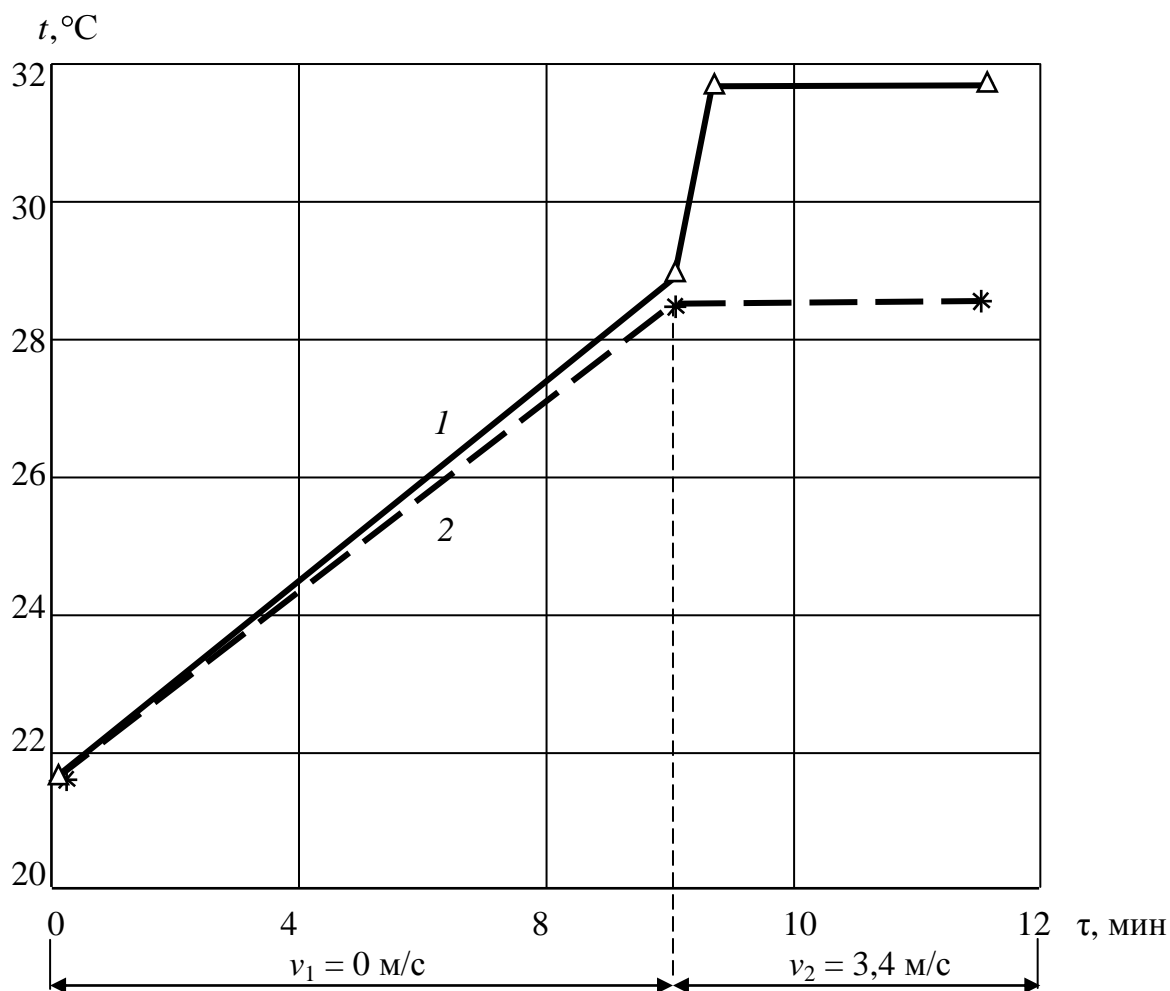


Рис.2. Зависимость  $t=f(\tau)$  при  $w = 6000$  Вт/м<sup>2</sup>,  $v_1=0$  м/с,  $v_2=3,4$  м/с  $t_T = 21^{\circ}\text{C}$ ;  
 1 – температура в центре; 2 – температура поверхности.

Повышение прозрачности характеризуется снижением коэффициента рассеяния от 2-4,3 до  $(1-22) \cdot 10^{-3}$  [2]. Значительный скачок температуры внутри продукта, обусловленный резким снижением коэффициента рассеяния, приводит к существенной интенсификацией процесса фазового превращения и, как следствие, снижению роста температуры.

На промежутке времени от 3.5 до 5 мин устанавливается динамическое равновесие между поступающей теплотой от ИК источника и теплотой фазового превращения, в результате чего наблюдается выравнивание темпов изменения температур в центре и на поверхности продукта.

Характер дальнейшего изменения хода температур определяется соотношением интенсивностей принудительной конвекции, мощности ИК облучения и массообменными характеристиками продукта.

Как показали эксперименты, возможны все три варианта хода кривых температур:

- рост температуры;
- стабилизация температуры;
- убывание температуры.

В частности, на рис.2. приведена динамика изменения температур для мощности ИК-излучения  $W=6000 \text{ Вт/м}^2$  и прежней скорости принудительной конвекции  $V=3,4 \text{ м/с}$  с моментом включения обдува на 9 минуте. Сравнение кривых на рисунках 1 и 2 подтверждает обоснованность выявленной закономерности.

Действительно, если на рис. 1 при  $W=2000 \text{ Вт/м}^2$  наблюдается рост температур, то на рис. 2, при  $W=6000 \text{ Вт/м}^2$  интенсификация процесса испарения приводит к стабилизации температуры.

Указанный факт установления динамического равновесия между теплотой фазового превращения и поглощаемой теплотой отчетливо иллюстрируется ходом изменения во времени модифицированного критерия Коссовича  $Ko$ , отражающего отношение между количеством теплоты затраченной на испарение влаги ( $r\Delta U$ ) и на нагревание влажного тела ( $c\Delta T$ ) и являющегося специфической формой критерия фазового превращения.

На рисунках 3 и 4 представлены графики зависимости  $Ko=Ko(\tau)$  для различных значений температур теплоносителя ( $20^\circ\text{C}$  и  $60^\circ\text{C}$ ) и различных величин мощности ИК облучения (2600, 4800 и  $7000 \text{ Вт/м}^2$ ).



Рис.3. Зависимость  $Ko=f(\tau)$  при мощности ИК – излучения: 1-  $0 \text{ Вт/м}^2$ ; 2-  $2600 \text{ Вт/м}^2$ ; 3- $4800 \text{ Вт/м}^2$ ; 4- $7000 \text{ Вт/м}^2$  при  $t_c=60^0\text{с}$

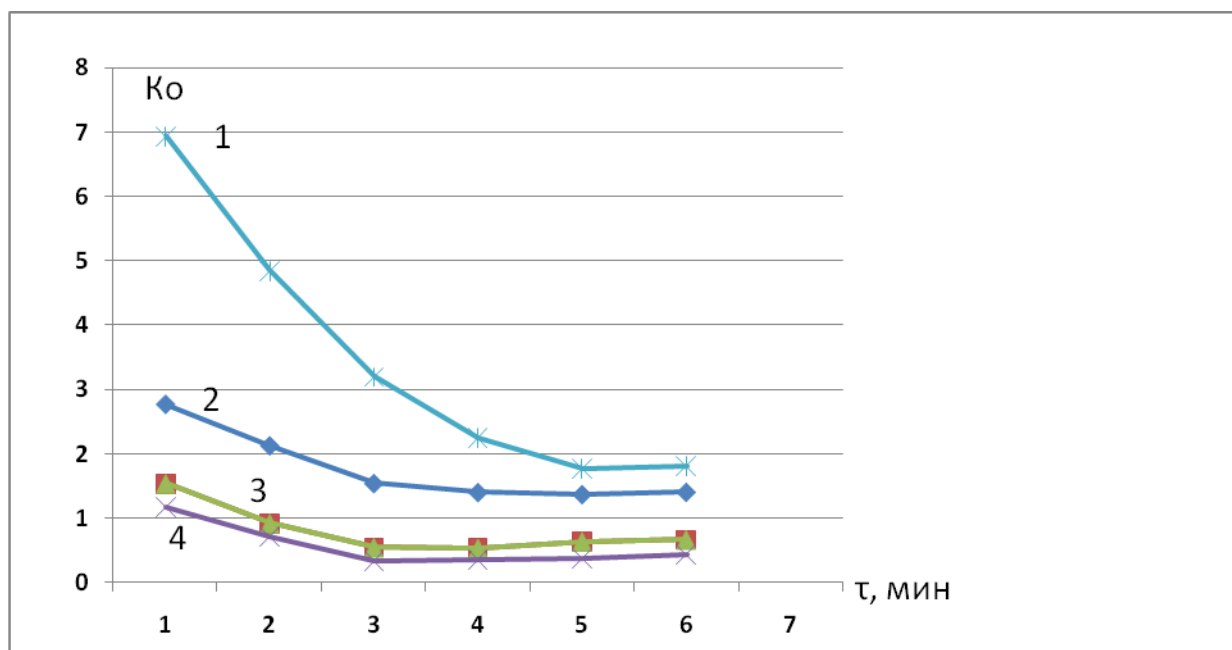


Рис. 4. Зависимость  $Ko=f(\tau)$  при мощности ИК излучения: 1- $0 \text{ Вт/м}^2$ ; 2 –  $2600 \text{ Вт/м}^2$  ; 3- $4800 \text{ Вт/м}^2$ ; 4- $7000 \text{ Вт/м}^2$  при  $t_c = 23^0\text{с}$

Анализ значений критерия Коссовича ( $Ko$ ) указывает на смещение кривых в зону больших величин для меньшего значения температуры теплоносителя ( $t_c=23^0\text{с}$ ), что обусловлено превалированием энергии испарения над энергией

нагревания. Момент стабилизации критерия Коссовича определяет фактический момент окончания уноса избыточной влаги.

**Список литературы:**

1. Фролов С.В., Куцакова В.Е., Кипнис В.Л. Тепло- и массообмен в расчетах процессов холодильной технологии пищевых продуктов.- М.: Колос-пресс, 2001.-144с.
2. Мучник Г.Ф., Рубашов И.Б. Методы теории теплообмена. Тепловое излучение. Учеб. пособие для вузов. М., «Высш. школа», 1974.- 272 с.