

# Расчёт скорости испарения влаги при ИК сушке

инж. Грдзелишвили Гульнара

Руководитель: Гоффман Павел, канд. тех. наук, доц.

## **Абстракт**

*В представленной статье излагается вычисление скорости испарения влаги, которая определяет скорость и продолжительность инфракрасной (ИК) сушки и соответственно качество высушенного продукта и себестоимость сушки. Материалом сушки является яблоко GALA. ИК сушка осуществляется в условиях естественной конвекции в открытом пространстве. В статье рассмотрена область постоянной скорости сушки. Расчитанные значения скорости испарения влаги сопоставлены с экспериментальными данными сушки.*

## **Ключевые слова**

*Drying, Infrared, IR, preservation, food materials, dryer, rate of moisture vaporization, moisture movement, heat transfer, mass transfer, apple*

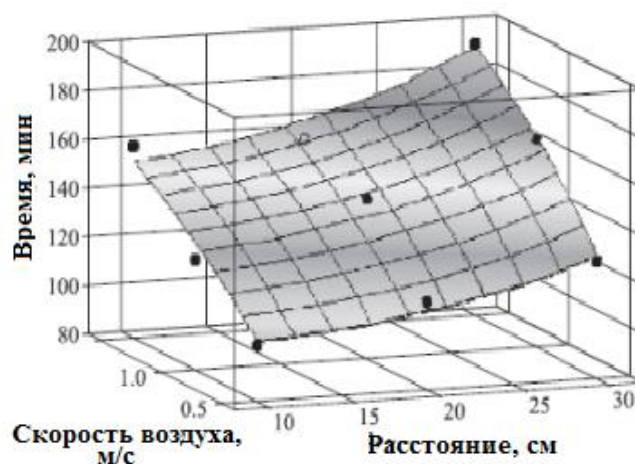
## **1. Введение**

Сушка является вероятно древнейшим методом консервирования пищевых продуктов и представляет собой одну из наиболее распространенных процессов, используемых в целях повышения продовольственной стабильности, так как она снижает активность воды в продукте, уменьшает микробиологическую активность и сводит к минимуму физические и химические изменения в процессе хранения [Mayor&Serenio].

Инфракрасная сушка является эффективным способом дегидратации. Энергия ИК-излучения передается от нагревательного элемента к поверхности продукта без нагрева окружающего воздуха. Излучение падает на открытый материал, проникает в него, а затем превращается в осязаемое тепло [Ginzburg]. В течении процесса сушки постоянно изменяются поглощаемость, отражательная способность и пропускаемость излучения высушиваемого материала из-за снижения содержания воды в нем. Поглощение, толщина поглощающего слоя (*skin depth*) и пропускаемость зависят от длины волны ИК-излучения и свойств облученных материалов.

Преимуществами инфракрасного излучения являются высокие коэффициенты теплоотдачи, короткое время сушки и легкость контроля температуры материала [Nowak&Lewicki]. С учетом этих преимуществ вполне вероятно, что ИК-сушка в сочетании с конвекцией или вакуумом будет становиться все более популярной [Mujumdar].

Кинетика сушки зависит от длины волны излучения, от расстояния между инфракрасными излучателями и облученной поверхностью, и от скорости воздушного потока. При ИК сушке ломтиков яблока толщиной 5,5 мм [Nowak&Lewicki] зависимость времени, необходимого для испарения 99 % воды, на скорость воздуха и на расстояние между ИК-излучателями и поверхностью высушиваемого материала, имеют вид, как показано на рис. 1.



*Рис. 1. Влияние скорости воздуха и расстояния между излучателями и поверхностью ломтиков яблок на время, необходимое для испарения 99 %-ов воды [Nowak&Lewicki].*

Как правило, скорость сушки увеличивается с повышением температуры и снижением относительной влажности воздуха сушильной среды. Тем не менее, температура сушки не может быть слишком высокой, потому что это может привести к термической деструкции термолабильных фитохимических веществ [Sze Pheng Ong & Chung Lim Law].

Время сушки значительно сокращается, когда все поверхности высушиваемых ломтиков доступны для испарения воды [Nowak&Lewicki], к тому же, лучше сохраняется форма продукта. Уменьшение размеров высушиваемых материалов также сокращает продолжительность сушки [Киселева], но в этом случае питательные вещества продуктов теряются больше.

Такие свойства материала, как цвет, способность к поглощению воды, и механическая стойкость к разрушению не зависят от того, каким способом тепло приводится к материалу подвергающемуся сушке [Nowak&Lewicki\_2005]. Наиболее важными являются двое переменных: скорость сушки и конечная температура материала [Nowak&Lewicki\_2005]. Обычно высокая скорость сушки вызывает повреждение ткани и материал становится хрупким [Nowak&Lewicki\_2005]. При ИК-сушке, скорость сушки уменьшается с уменьшением содержания влаги и с уменьшением мощности инфракрасного излучения [Kocabiyik&Tezer]. На завершающей стадии сушки возможно некоторое потемнение из-за химических изменений в ломтиках яблок [Nowak&Lewicki\_2005].

Целью этой работы является рассчитать скорость испарения влаги при ИК сушке ломтиков яблока. Эта величина определяет скорость и продолжительность процесса сушки, а также и, соответственно, качество высушенного продукта и себестоимость сушки.

## 2. Математический расчёт скорости испарения влаги

Скорость испарения влаги  $n_w$  [ $\text{кг м}^{-2} \text{с}^{-1}$ ] с поверхности образца яблока может быть определена несколькими способами. Одним из них является математическое выражение скорости испарения влаги из уравнения баланса переноса энергии при инфракрасной сушке, которое написано в соответствии с законом сохранения энергии (рис. 2) и имеет следующий вид:

$$Q_A = Q_S + Q_{konv} + Q_{kond} + Q_{odp}, \quad (1)$$

где  $Q_A$  это поглощенный тепловой поток, Вт,

$Q_S$  - тепловой поток излучением в окружающую среду, Вт,

$Q_{konv}$  - тепловой поток конвекцией в окружающую среду, Вт,

$Q_{kond}$  - тепловой поток кондукцией в материале, Вт,

$Q_{odp}$  - тепловой поток испарением влаги с материала, Вт.

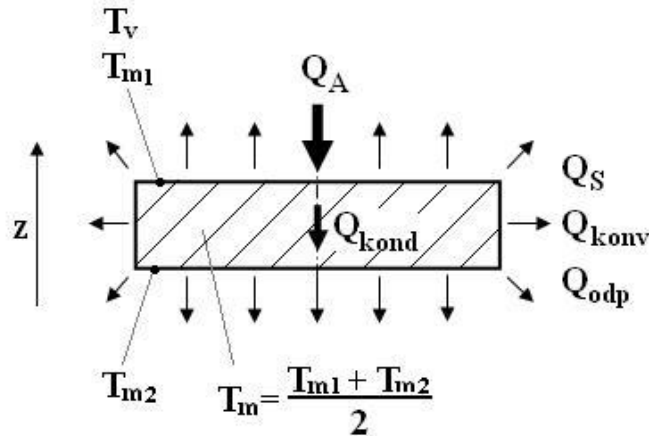


Рис. 2. Распределение поглощенного теплового потока.

Скорость испарения влаги  $n_w$  можно выразить из уравнения теплового потока путём испарения  $Q_{odp}$ , которое имеет следующий вид:

$$Q_{odp} = q_{odp} S_{\square} = n_w r_w S_{\square} \quad (2)$$

Таким образом, скорость испарения влаги  $n_w$  [кг м<sup>-2</sup> с<sup>-1</sup>] равна:

$$n_w = \frac{Q_{odp}}{r_w S_{\square}} \quad (3)$$

В этом уравнении  $r_w$  является теплотой парообразования воды и найти его значение можно в соответствующих таблицах ( $r_w = 2383$  кДж кг<sup>-1</sup>), а  $S_{\square}$  [м<sup>2</sup>] это площадь всей поверхности образца высушиваемого материала, и в этом случае равна:

$$S_{\square} = 2\pi R(R + H) = 2 \cdot 3,14 \cdot 0,0125(0,0125 + 0,007) = 1,53 \cdot 10^{-3} \text{ [м}^2\text{]} \quad (4)$$

Тепловой поток испарением  $Q_{odp}$  определяется из уравнения баланса переноса энергии при ИК сушке (1):

$$Q_{odp} = Q_A - Q_S - Q_{konv} - Q_{kond} \quad (5)$$

Значения известных, найденных в соответствующих таблицах и экспериментальных данных для расчета приведены в табл. 1.

Таблица 1. Известные, найденные в соответствующих таблицах и экспериментальные данные для расчета.

ОБОЗНАЧЕНИЕ	ИЗВЕСТНО	ВЗЯТО ИЗ ТАБЛИЦ	ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ
$q_{ray}$	5000 Вт м <sup>-2</sup>		
$\lambda$	1 мкм		
$H$	0,007 м		
$D$	0,025 м		
$l$	0,1 м		
$n$	4		
$\varepsilon$		0,95	
$A^S$		0,95	
$Pr$		0.71	
$r_w$		2383 кДж кг <sup>-1</sup>	
$\lambda'$		0,027 Вт м <sup>-2</sup> К <sup>-1</sup>	
$\lambda''$		0,42 Вт м <sup>-2</sup> К <sup>-1</sup>	
$\nu$		$17,2 \cdot 10^{-6}$ м <sup>2</sup> с <sup>-1</sup>	
$t_o \rightarrow T_o$			28 °С → 301 К
$t_{m1} \rightarrow T_{m1}$			50,3 °С → 323,3 К
$t_{m2} \rightarrow T_{m2}$			49,7 °С → 322,7 К
$G_{6 min}$			$13,95 \cdot 10^{-3}$ кг
$G_{31 min}$			$8,78 \cdot 10^{-3}$ кг
$\Delta\tau$			25 мин

Каждый член этого уравнения (5) определяется по отдельности следующим образом:

- 1) Поглощенный тепловой поток  $Q_A$  [Вт] равен:

$$Q_A = A^S q_{ray} S_{\perp}, \quad (6)$$

где  $q_{ray}$  это плотность теплового потока излучателя,

$S_{\perp}$  - площадь поверхности образца перпендикулярного направлению излучения, и в этом случае равна:

$$S_{\perp} = \pi R^2 = 3,14 \cdot 0,0125^2 = 0,491 \cdot 10^{-3} \text{ [м}^2\text{]} \quad (7)$$

Таким образом, поглощенный тепловой поток  $Q_A$  [Вт] равен:

$$Q_A = 0,95 \cdot 5000 \cdot 0,491 \cdot 10^{-3} = 2,33225 \text{ [Вт]}$$

- 2) Тепловой поток излучением  $Q_S$  [Вт] [Hemzal] равен:

$$Q_S = q_S S_{\square} = \alpha^S F_{m,v} (T_m - T_v) S_{\square} \quad (8)$$

где  $F_{m,v}$  это коэффициент относительного облучения (коэффициент облучения), который указывает, какая часть теплового потока излучаемого поверхностью образца  $S_{\square}$  попадает на поверхности воздуха (микро частиц воздуха)  $S_v$  и поглощается ими. В этом случае тепловой поток излучением  $Q_S$  определяем на основе предположения, что образец окружён пространством имеющим температуру равной температуре воздуха. Поэтому коэффициент относительного облучения  $F_{m,v} = 1$ .

$T_m$  это средняя абсолютная температура образца, которую определяем следующим образом:

$$T_m = t_m + 273 = \frac{t_{m1} + t_{m2}}{2} + 273 = \frac{49,7 + 50,3}{2} + 273 = 323 \text{ [K]} \quad (9)$$

$\alpha^S$  это коэффициент переноса тепла излучением, который равен произведению коэффициента взаимного излучения  $C_{m,v}$  и теплового коэффициента излучения  $\xi$  [Hemzal].

$$\alpha^S = C_{m,v} \xi \quad (10)$$

Коэффициент взаимного излучения  $C_{m,v}$  для излучаемого тела с площадью поверхности  $S_{\square}$  и окруженного воздухом с площадью поверхности  $S_v$ , когда  $F_{m,v} = 1$  и  $S_v \gg S_{\square}$ , равен произведению коэффициента относительного излучения (емисивиты)  $\varepsilon$  и коэффициента излучения абсолютно чёрного тела  $C_0 = 5,67 \text{ [Вт м}^{-2} \text{ К}^{-4}]$ . Поэтому уравнение для вычисления коэффициента переноса тепла излучением  $\alpha^S$  примет следующий вид [Hemzal]:

$$\alpha^S = C_{m,v} \xi = \varepsilon C_0 \frac{\left(\frac{T_m}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_v}{100}\right)^4}{(T_m - T_v)} \quad (11)$$

и равен:

$$\alpha^S = 0,95 \cdot 5,67 \frac{\left(\frac{323}{100}\right)^4 - \left(\frac{301}{100}\right)^4}{(323 - 301)} = 5,3865 \cdot \frac{26,76}{22} \approx 6,552 \text{ [Вт м}^{-2} \text{ К}^{-1}]$$

А тепловой поток излучением  $Q_S$  [Вт] [Hemzal] равен:

$$Q_S = \alpha^S F_{m,v} (T_m - T_v) S_{\square} = 6,55 \cdot 1 \cdot (323 - 301) \cdot 1,53 \cdot 10^{-3} \approx 0,2205 \text{ [Вт]}$$

3) Тепловой поток конвекцией  $Q_{konv}$  [Вт] [Rieger, Hemzal] равен:

$$\begin{aligned} Q_{konv} &= q_{konv} S_{\square} = \alpha^k (T_m - T_v) S_{\square} = \\ &= \alpha^{k'} S_{hor} (T_m - T_v) + \alpha^{k''} S_{vert} (T_m - T_v) \end{aligned} \quad (12)$$

где  $\alpha^k$  это коэффициент переноса тепла конвекцией, который определяется из соответствующих критериальных корреляций для критерия Нуссельта [Rieger, Lin, Hemzal]. При естественной конвекции в открытом пространстве критериальная корреляция имеет следующий вид:

$$Nu = \frac{\alpha^k L}{\lambda'} = C \cdot Ra^m, \quad (13)$$

где

$$Ra = Gr \cdot Pr = \frac{g \gamma' L^3 \Delta T}{\nu^2} \cdot Pr. \quad (14)$$

Теплофизические свойства воздуха  $\lambda'$ ,  $\nu$  и  $\gamma'$  определяются по средней температуре пограничного слоя, которая определяется следующим образом:

$$t_{st\ddot{r}} = \frac{t_m + t_v}{2} = \frac{50 + 28}{2} = 39 \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (15)$$

По значению  $t_{st\ddot{r}}$  в соответствующих таблицах находим теплопроводность воздуха  $\lambda' = 0.027$  [Вт м<sup>-2</sup> К<sup>-1</sup>] и кинематическую вязкость воздуха  $\nu = 17.2 \cdot 10^{-6}$  [м<sup>2</sup> с<sup>-1</sup>]. Коэффициент объемного расширения  $\gamma'$  [К<sup>-1</sup>] определяется следующим образом:

$$\gamma' = \frac{1}{T_{st\ddot{r}}} = \frac{1}{39 + 273} = \frac{1}{312} \text{ [K}^{-1}\text{]} \quad (16)$$

Таким образом, число Рэлея для горизонтальных стен равно:

$$Ra = Gr \cdot Pr = \frac{g \gamma' D^3 \Delta T}{\nu^2} \cdot Pr = \frac{9.81 \cdot \frac{1}{312} \cdot 0.025^3 \cdot 22}{(17.2 \cdot 10^{-6})^2} \cdot 0.71 \approx 2.57 \cdot 10^4 \quad (17)$$

Число Рэлея для вертикальных стен равно:

$$Ra = Gr \cdot Pr = \frac{g \gamma' H^3 \Delta T}{\nu^2} \cdot Pr = \frac{9.81 \cdot \frac{1}{312} \cdot 0.007^3 \cdot 22}{(17.2 \cdot 10^{-6})^2} \cdot 0.71 \approx 467.6 \quad (18)$$

Когда  $2 \cdot 10^4 \leq Ra \leq 8 \cdot 10^6$  для горизонтальных стен критериальная корреляция для критерия Нуссельта [Rieger, Lin, Hemzal] имеет следующий вид:

$$Nu = \frac{\alpha^k D}{\lambda'} = 0.54 \cdot Ra^{1/4} \quad (19)$$

А для вертикальных стен, когда  $Ra < 10^4$ , критерий Нуссельта [Rieger] равен:

$$Nu = \frac{\alpha^k H}{\lambda'} = 0.68 + \frac{0.67 \cdot Ra^{1/4}}{\left[1 + \left(\frac{0.492}{Pr}\right)^{\frac{9}{16}}\right]^{\frac{4}{9}}} \approx 1.394 \quad (20)$$

Из уравнений (19) и (20) определяем коэффициент переноса тепла конвекцией  $\alpha^k$  для горизонтальных и вертикальных стен соответственно:

$$\alpha^k = \frac{\lambda'}{D} 0.54 \cdot Ra^{1/4} = \frac{0.027}{0.025} 0.54 \cdot (2.57 \cdot 10^4)^{1/4} \approx 7.383 \text{ [Вт м}^{-2}\text{К}^{-1}\text{]} \quad (21)$$

$$\alpha^{k''} = \frac{\lambda'}{H} 1,394 = \frac{0,027}{0,007} 1,394 \approx 5,377 \text{ [Вт м}^{-2}\text{К}^{-1}\text{]} \quad (22)$$

Таким образом, тепловой поток конвекцией  $Q_{konv}$  [Вт] равен:

$$\begin{aligned} Q_{konv} &= \alpha^{k'} S_{hor} (T_m - T_v) + \alpha^{k''} S_{vert} (T_m - T_v) = \\ &= 7,383 \cdot 2 \cdot \pi \cdot 0,0125^2 \cdot 22 + 5,377 \cdot \pi \cdot 0,025 \cdot 0,007 \cdot 22 = \\ &= 0,15938 + 0,065 = 0,22438 \text{ [Вт]} \end{aligned}$$

4) Тепловой поток кондукцией  $Q_{kond}$  [Вт] [Rieger, Nemzal] определяется по следующему уравнению:

$$Q_{kond} = q_{kond} S_{\perp} = \frac{\lambda''}{H} (T_{m1} - T_{m2}) S_{\perp} \quad (23)$$

и равен:

$$Q_{kond} = \frac{0,42}{0,007} (50,3 - 49,7) 0,491 \cdot 10^{-3} = 0,017676 \text{ [Вт]}$$

В итоге тепловой поток испарением  $Q_{odp}$  по уравнению (5) равен:

$$\begin{aligned} Q_{odp} &= Q_A - Q_S - Q_{konv} - Q_{kond} = \\ &= 2,33225 - 0,2205 - 0,22438 - 0,017676 \approx 1,8697 \text{ [Вт]} \end{aligned}$$

И скорость испарения влаги  $n_w'$  по уравнению (3) равна:

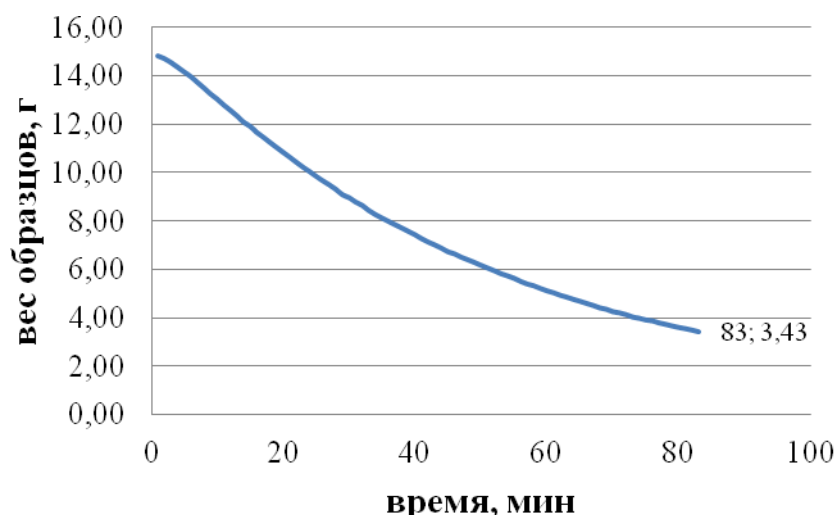
$$n_w' = \frac{Q_{odp}}{r_w S_{\square}} = \frac{1,8697}{2383 \cdot 10^3 \cdot 1,53 \cdot 10^{-3}} \approx 0,5127 \cdot 10^{-3} \text{ [кг м}^{-2}\text{с}^{-1}\text{]}$$

### 3. Рассчёт скорости испарения влаги по экспериментальным данным

На основе предварительных экспериментов инфракрасной сушки ломтиков бланшированного яблока с естественной конвекцией, результаты которого показаны на рис. 3, скорость испарения влаги в области постоянной скорости сушки, что соответствует периоду от 6 до 31 минуты, определяется по следующему уравнению:

$$n_{w \text{ st\ddot{r}}} = \frac{G_{6 \text{ min}} - G_{31 \text{ min}}}{60 \Delta \tau n S_{\square}} = \frac{(13,95 - 8,78) \cdot 10^{-3}}{60 \cdot 25 \cdot 4 \cdot 1,53 \cdot 10^{-3}} = 0,5631 \cdot 10^{-3} \text{ [кг м}^{-2}\text{с}^{-1}\text{]} \quad (24)$$

Средняя продолжительность периода постоянной скорости сушки (6-31 минут) составляет 25 минут. Количество образцов бланшированного яблока при сушке  $n = 4$ .



*Рис. 3. Кривая ломтиков блишированных яблок.*

### 1. Заключение: сравнение скоростей испарения влаги по математическому расчёту и по экспериментальным данным

Отклонение расчетной скорости испарения влаги  $n_w'$  от экспериментальной средней скорости испарения влаги  $n_{w\ st\ddot{r}}$  в области постоянной скорости сушки равна:

$$\Delta' = \frac{n_{w\ st\ddot{r}} - n_w'}{n_{w\ st\ddot{r}}} \cdot 100\% = \frac{0,5631 \cdot 10^{-3} - 0,5127 \cdot 10^{-3}}{0,5631 \cdot 10^{-3}} \approx 8,95\% \quad (25)$$

Скорость испарения  $n_w'$  рассчитанная математически в соответствии с уравнением (3) на 8,95 % меньше, чем средняя скорость испарения влаги  $n_{w\ st\ddot{r}}$  в области постоянной скорости сушки, расчет которого основан на результатах эксперимента.

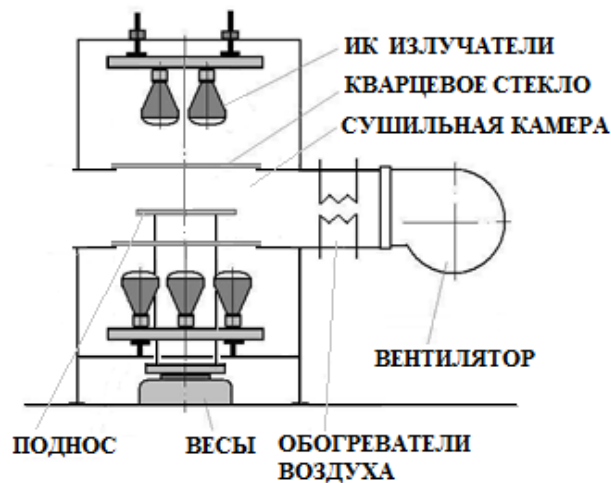
Отклонения рассчитанных данных от экспериментальных связаны со сложностью определения точного значения плотности излучения ИК-лампы в области сушки из-за неравномерного распределения излучения на облучаемой поверхности.

### 2. Дальнейшие планы диссертационной работы

Предполагаю следующий ход дальнейшей работы:

В ближайшем будущем закончится изготовление экспериментального оборудования – инфракрасно-конвективной сушилки (рис. 4), который разработан на основе результатов и опыта предварительных экспериментов и спроектирован в связи с планируемыми экспериментами.





*Рис. 4. Схема экспериментальной инфракрасно-конвективной сушилки.*

Целью моей дальнейшей работы будет более подробно изучить процесс ИК сушки и изучить возможности ускорения сушки пищевых продуктов таким образом, чтобы максимально сохранить качество, а также сохранить или улучшить его вкус.

Кроме того, планирую провести эксперименты с осциллирующим режимом сушки путем периодического ИК облучения продукта. Этот метод целесообразно применять особенно в завершающей стадии сушки, при которой требуется меньший привод тепла. Целью применения осциллирующего режима является снижение энергоемкости заключительного этапа сушки.

Планирую также выразить уравнение глубины проникновения излучения в высушиваемый материал, что важно для определения оптимальной начальной толщины высушиваемого продукта, а также провести анализ существующих отношений определения скорости и времени сушки на основе результатов реальных экспериментов.

### Список символов

$A^S$	поглощение (абсорптивита)	1
$C_0$	коэффициент излучения абсолютно черного тела, $C_0=5,67$	Вт м <sup>-2</sup> К <sup>-4</sup>
$C_{m,v}$	коэффициент взаимного излучения	1
$D$	диаметр образца	м
$F_{m,v}$	коэффициент относительного облучения	1
$G_{6 min}$	вес образцов на 6-ой минуте сушки	кг
$G_{31 min}$	вес образцов на 31-ой минуте сушки	кг
$Gr$	критерий Грашофа	1
$g$	ускорение свободного падения	м с <sup>-2</sup>
$H$	толщина образца	м
$l$	расстояние между излучателем и поверхностью образца	м
$L$	характеристический размер	м
$n$	количество образцов бланшированного яблока при сушке	1
$n_w'$	скорость испарения влаги по расчету	кг м <sup>-2</sup> с <sup>-1</sup>
$n_w str$	средняя скорость испарения влаги по эксперименту	кг м <sup>-2</sup> с <sup>-1</sup>
$Nu$	критерий Нуссельта	1
$Pr$	критерий Прандтля	1
$Q_A$	поглощенный тепловой поток	Вт
$Q_{kond}$	тепловой поток кондукцией	Вт
$Q_{konv}$	тепловой поток конвекцией	Вт
$Q_{odp}$	тепловой поток испарением	Вт
$Q_S$	тепловой поток излучением	Вт
$q_A$	плотность поглощенного теплового потока	Вт м <sup>-2</sup>
$q_{kond}$	плотность кондуктивного теплового потока	Вт м <sup>-2</sup>
$q_{konv}$	плотность конвективного теплового потока	Вт м <sup>-2</sup>
$q_{odp}$	плотность теплового потока испарением	Вт м <sup>-2</sup>
$q_{ray}$	плотность теплового потока излучателя	Вт м <sup>-2</sup>
$q_S$	плотность теплового потока излучением	Вт м <sup>-2</sup>
$Ra$	число Рэлея	1
$r_w$	теплота парообразования воды	Дж кг <sup>-1</sup>
$S_{hor}$	площадь горизонтальных поверхностей	м <sup>2</sup>
$S_{vert}$	площадь вертикальных поверхностей	м <sup>2</sup>
$S_v$	площадь поверхности воздуха	м <sup>2</sup>
$S_{\perp}$	площадь поверхности образца перпендикулярного к излучению	м <sup>2</sup>
$S_{\square}$	общая площадь поверхности образца	м <sup>2</sup>
$T_m$	абсолютная температура образца	К
$T_{m1}$	абсолютная температура верхней поверхности образца	К
$T_{m2}$	абсолютная температура нижней поверхности образца	К
$T_v$	абсолютная температура воздуха	К
$\Delta'$	отклонение рассчитанных данных от экспериментальных	%
$\Delta\tau$	продолжительность области сушки	мин
$\alpha^k$	коэффициент переноса тепла конвекцией	Вт м <sup>-2</sup> К <sup>-1</sup>
$\alpha^S$	коэффициент переноса тепла излучением	Вт м <sup>-2</sup> К <sup>-1</sup>
$\gamma'$	коэффициент объемного расширения	К <sup>-1</sup>
$\varepsilon$	коэффициент относительного излучения, эмиссивита	1
$\lambda$	длина волны излучения ( <i>maxima</i> )	мкм
$\lambda'$	коэффициент теплопроводности воздуха	Вт м <sup>-2</sup> К <sup>-1</sup>
$\lambda''$	коэффициент теплопроводности образца	Вт м <sup>-2</sup> К <sup>-1</sup>
$\nu$	кинематическая вязкость воздуха	м <sup>2</sup> с <sup>-1</sup>

***Список использованной литературы***

- Ginzburg, A. S.: Infrared radiation in food industry. Warszawa: Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, 1969, in Polish.
- Hemzal, K.: Přenosové jevy v technice prostředí, Praha: Vydavatelství ČVUT, 2007.
- Hoffman, P.: Sbíрка přednášek, 2012.
- Kocabiyik, H. &Tezer, D.: Drying of carrot slices using infrared radiation, International Journal of Food Science and Technology 2009, 44, 953–959
- L. Mayor, A.M. Sereno,: Modeling shrinkage during convective drying of food materials: a review, Journal of Food Engineering 61 (2004) 373–386.
- Lin, Y. L. , Li, S. J. , Zhu, Y. , Bingol, G. , Pan, Z. and McHugh, Tara H.(2009): 'Heat and Mass Transfer Modeling of Apple Slices Under Simultaneous Infrared Dry Blanching and Dehydration Process', Drying Technology, 27: 10, 1051 - 1059
- Mujumdar, A. S.: Handbook of industrial drying I, New York : Dekker, 1995, 742 s.
- Nowak, D., Lewicki, P.: Infrared drying of apple slices, Innovative Food Science and Emerging Technologies 5 (2004) 353–360.
- Nowak, Dorota and Lewicki, Piotr : 'Quality of Infrared Dried Apple Slices', Drying Technology, 23 (2005): 4, 831 — 846
- Rieger, F., Šesták, J.: Přenos hybnosti, tepla a hmoty, Praha: Vydavatelství ČVUT, 1993, 299 s.
- Sze Pheng Ong & Chung Lim Law: Drying Kinetics and Antioxidant Phytochemicals Retention of Salak Fruit under Different Drying and Pretreatment Conditions, Drying Technology, 29 (2011): 429–441
- Šesták, J., Žitný, R.: Tepelné pochody II., Praha: Vydavatelství ČVUT, 1997, 165 s.
- Киселева, Т.Ф.: Технология сушки, КТИПП: Кемерово, 2007, 117 с.