

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.

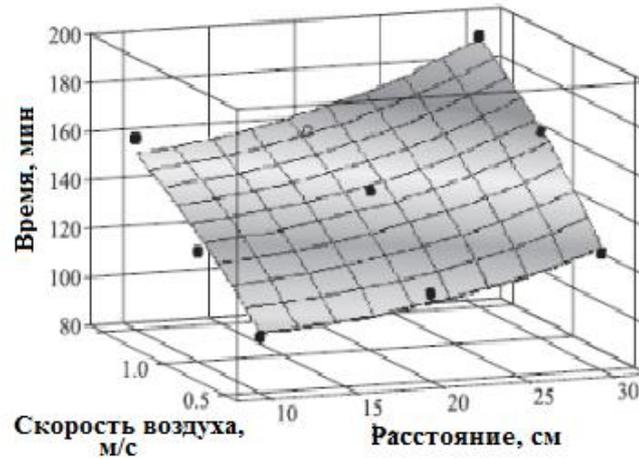


Рис. 1. Влияние скорости воздуха и расстояния между излучателями и поверхностью ломтиков яблок на время, необходимое для испарения 99 %-ов воды [Nowak&Lewicki].

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.

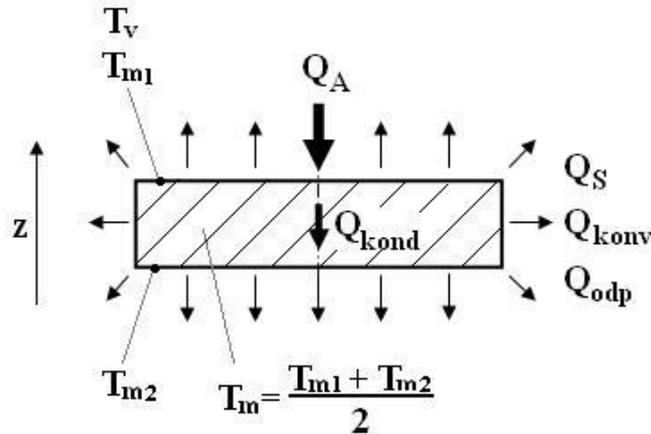


Рис. 2. Распределение поглощенного теплового потока.

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⁻² с⁻¹] 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⁻¹), а S_{\square} [м²] 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 ⁻² | | |
| λ | 1 мкм | | |
| H | 0,007 м | | |
| D | 0,025 м | | |
| l | 0,1 м | | |
| n | 4 | | |
| ε | | 0,95 | |
| A^S | | 0,95 | |
| Pr | | 0.71 | |
| r_w | | 2383 кДж кг ⁻¹ | |
| λ' | | 0,027 Вт м ⁻² К ⁻¹ | |
| λ'' | | 0,42 Вт м ⁻² К ⁻¹ | |
| ν | | $17,2 \cdot 10^{-6}$ м ² с ⁻¹ | |
| $t_o \rightarrow T_o$ | | | 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:

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

α^S это коэффициент переноса тепла излучением, который равен произведению коэффициента взаимного излучения $C_{m,v}$ и теплового коэффициента излучения ξ [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) ε 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 α^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 α^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 λ' , ν и γ' 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⁻² К⁻¹] и кинематическую вязкость воздуха $\nu = 17.2 \cdot 10^{-6}$ [м² с⁻¹]. Коэффициент объемного расширения γ' [К⁻¹] 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 α^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, Hemzal] 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 $n = 4$.

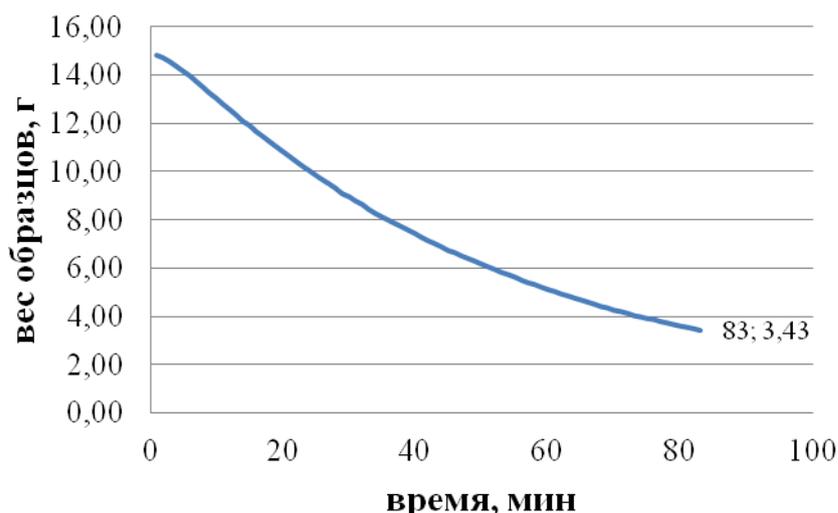


Рис. 3. Кривая ломтиков блишированных яблок.

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.

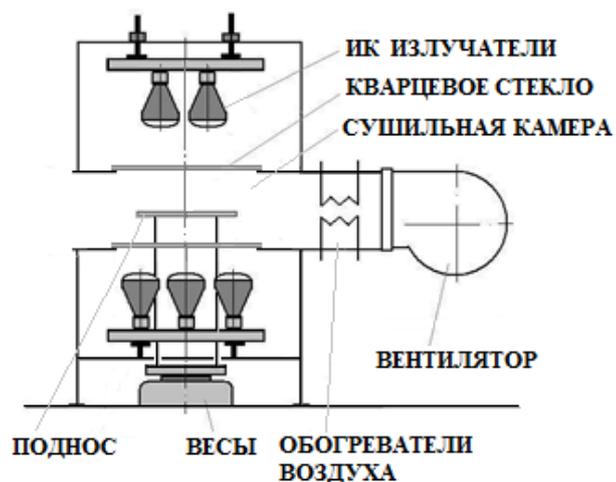


Рис. 4. Схема экспериментальной инфракрасно-конвективной сушилки.

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 ⁻² К ⁻⁴ |
| $C_{m,v}$ | 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 ⁻² |
| 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 ⁻² с ⁻¹ |
| $n_w str$ | средняя скорость испарения влаги по эксперименту | кг м ⁻² с ⁻¹ |
| 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 ⁻² |
| q_{kond} | плотность кондуктивного теплового потока | Вт м ⁻² |
| q_{konv} | плотность конвективного теплового потока | Вт м ⁻² |
| q_{odp} | плотность теплового потока испарением | Вт м ⁻² |
| q_{ray} | плотность теплового потока излучателя | Вт м ⁻² |
| q_S | плотность теплового потока излучением | Вт м ⁻² |
| Ra | число Рэлея | 1 |
| r_w | теплота парообразования воды | Дж кг ⁻¹ |
| S_{hor} | площадь горизонтальных поверхностей | м ² |
| S_{vert} | площадь вертикальных поверхностей | м ² |
| S_v | площадь поверхности воздуха | м ² |
| S_{\perp} | площадь поверхности образца перпендикулярного к излучению | м ² |
| S_{\square} | общая площадь поверхности образца | м ² |
| 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 |
| Δ' | отклонение рассчитанных данных от экспериментальных | % |
| $\Delta\tau$ | продолжительность области сушки | мин |
| α^k | коэффициент переноса тепла конвекцией | Вт м ⁻² К ⁻¹ |
| α^S | коэффициент переноса тепла излучением | Вт м ⁻² К ⁻¹ |
| γ' | коэффициент объемного расширения | К ⁻¹ |
| ε | коэффициент относительного излучения, эмиссивита | 1 |
| λ | длина волны излучения (<i>maxima</i>) | мкм |
| λ' | коэффициент теплопроводности воздуха | Вт м ⁻² К ⁻¹ |
| λ'' | коэффициент теплопроводности образца | Вт м ⁻² К ⁻¹ |
| ν | кинематическая вязкость воздуха | м ² с ⁻¹ |

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.