

УДК 663.952.1

РЕШЕНИЕ ПРОБЛЕМЫ ВЫРАВНИВАНИЯ ТЕМПЕРАТУР В СЛОЯХ ЧАЯ ПРИ ПРОЦЕССЕ ЕГО ЗАВЯЛИВАНИЯ

© Расим Султанович Ахметханов, Элгуджа Георгиевич Гудушаури,
Михаил Борисович Модестов, Александр Анатольевич Шульженко

*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт машиноведения им. А.А.Благонравова РАН, г.Москва,
aa_shulzhenko.01@mail.ru, Россия*

***Аннотация.** В технологии обработки чая, а именно, при завяливании чая в искусственных условиях, существует проблема выравнивания температуры в слоях чая. В настоящей работе на основе математического моделирования были проанализированы и устранены причины неравномерного распределения температуры в камере для завяливания чая, благодаря использованию дополнительных источников тепла в местах расположения слоев чая. Данные результаты можно использовать для усовершенствования технологии обработки не только чая, а и другого сырья растительного происхождения.*

***Ключевые слова:** завяливание чая, эластичный электронагреватель, тканый электронагреватель, математическое моделирование, тепловое поле*

THE SOLUTION TO THE PROBLEM OF EQUALIZATION OF TEMPERATURES IN THE LAYERS OF TEA IN THE PROCESS OF WITHERING

© R. S. Akhmethanov, È. G. Gudushauri, M. B. Modestov, A. A. Shulzhenko

*Institute of machine science n. a. A. A. Blagonravova Russian Academy of Sciences,
Moscow, Russia*

***Abstract.** In the technology of processing of tea, namely, tea during the withering under artificial conditions, there is the problem of equalizing the temperature in the layers of tea. In the present work on the basis of mathematical modeling have been analyzed and eliminated causes of the uneven distribution of temperature in the chamber for withering of tea, through the use of additional heat sources in the locations of the layers of tea. These results can be used to improve the processing technology of not only tea, but also other raw materials of vegetable origin.*

***Key words:** the withering of tea, flexible heater, woven heater, mathematical modeling, thermal field.*

При изготовлении чая используются два основных способа его обработки: искусственный и естественный. Будем рассматривать искусственный способ.

Завяливание является важным звеном технологии обработки чая, так как от качественного проведения этой операции во многом зависит следующий этап обработки – ферментация, и, как следствие, выход качественного чая в результате всей технологической обработки. Так в местах, где температура будет превышать требуемый уровень, будет происходить перезавяливание чайного листа, а в местах, где температура существенно ниже требуемой, будет происходить недозавяливание. Поэтому одной из основных проблем при завяливании чая является обеспечение равномерного распределения температуры в камере для завяливания чая, особенно в областях нахождения слоев обрабатываемого чая.

В технологическом процессе завяливания чая, описанном в [1], используется завялочная камера с многоярусным расположением лент транспортеров, на которых располагается обрабатываемый чай. Воздух подается в камеру снизу и проходит через отверстия в лентах транспортеров и вокруг транспортеров. Причем может использоваться как принудительная, так и естественная вентиляция.

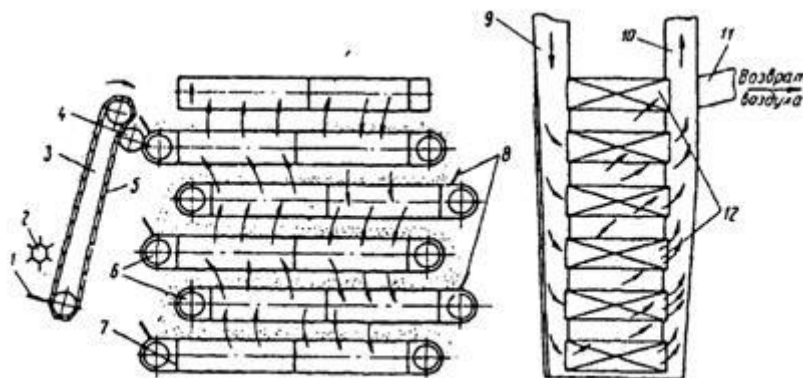


Рис.1. Завялочная машина укупорочного завяливания:

1 – бункер, 2 – мотовилочный выравниватель, 3 – элеватор, 4 – нажимная звездочка, 5 – цепь, 6 – конвейер завялочной камеры, 7 – вертикальные перегородки, 8 – щитки, 9 – нагнетательный короб, 10 – отсасывающий короб, 11 – рециркуляционная труба, 12 – наклонные перегородки.

Будем считать, что камера имеет форму параллелепипеда.

Ленты транспортера, на которых находится чай, располагаются строго горизонтально по всей площади камеры. Ленты транспортера абсолютно прозрачны для потоков воздуха. Пусть в модели будет 3 ленты.

Будем полагать, что тепловой процесс происходит в изотропной среде.

Представим тепловые процессы, происходящие в завялочной камере под воздействием внешнего источника тепла, при наличии конвекции и теплопроводности, с помощью выражения [2]

$$\frac{\partial \Delta T}{\partial t} + v_z \text{grad} \Delta T - \lambda \nabla^2 \Delta T = f(t, x, y, z) \quad (1)$$

$\Delta T = T_{\text{кам}} - T_{\text{ср}}$ - где $T_{\text{кам}}$ текущая температура в камере для завяливания чая; $T_{\text{ср}}$ – температура среды; v_z – скорость конвекционного процесса, $f(t, x, y, z)$ – источник тепла, t – текущее значение времени, x – текущее значение абсциссы, y – текущее значение ординаты, z – текущее значение аппликаты; λ – коэффициент теплопроводности среды; $v_z \text{grad} \Delta T$ –

слагаемое, учитывающее конвекционный тепловой процесс; $\lambda \nabla^2 \Delta T$ - слагаемое, учитывающее процесс теплопроводности; $0 \leq x \leq a, 0 \leq y \leq b, 0 \leq z \leq c, a = b = c = l$.

Определим начальные и граничные условия, а также особенности происходящих тепловых процессов в рассматриваемой задаче.

Будем считать, что тепловой процесс носит характер стационарного, так как время завяливания чая на много больше времени переходных тепловых процессов, происходящих в камере, поэтому $\frac{\partial \Delta T}{\partial t} = 0$.

Еще одной особенностью является одномерность процесса переноса. Рассматриваемый процесс переноса осуществляется только по оси Z , так как принудительное движение воздуха будем обеспечивать вентилятором от нижней части камеры к верхней части параллельными потоками с одинаковой скоростью по всему объему камеры, и скорость эта равна v_z . Слагаемое, описывающее в (1) процесс переноса, имеет вид: $v_z \frac{\partial \Delta T}{\partial z}$.

Будем считать, что до включения источника тепла камера равномерно нагрета и ее температура равна температуре внешней среды T_{cp} .

Граничными условиями первого рода будут являться

$$T(t, 0, y, z) = T(t, x, 0, z) = T(t, x, y, 0) = T(t, a, y, z) = T(t, x, b, z) = T(t, x, y, c) = T_{cp} \quad (2)$$

Кроме температуры, равной температуре среды, в камере происходит генерация тепла, которая обеспечивается внешним источником.

Пусть внешний источник расположен в нижней части завялочной камеры, и распределяется по всей ее площади. Толщина источника, изготовленного из эластичного электронагревателя, $d \rightarrow 0$. Будем полагать, что источник излучает тепло только с верхней своей поверхности. Работу внешнего источника в камере, согласно [3, 4], можно описать с помощью следующего выражения

$$f(x, y, z) = K \cdot \frac{P}{V} \cdot (e^{-|l-\frac{x}{xv}|} + e^{-|l-\frac{y}{yv}|} + e^{-z}) \quad (3)$$

K - обобщенный коэффициент, учитывающий особенности эксплуатации нагревателя, который находится экспериментально для каждого конкретного источника тепла; P - мощность источника, расположенного в нижней части завялочной камеры; V - объем источника тепла; x - переменная по оси X ; y - переменная по оси Y ; xv - координата нахождения максимального значения температуры источника по оси X ; yv - координата нахождения максимального значения температуры источника по оси Y ; $zv=0$ - координата нахождения максимального значения температуры источника по оси Z .

Таким образом, зная уравнение, описывающее тепловые процессы в завялочной камере при условии стационарности этих процессов и при конвекции вдоль оси Z , а также закономерность работы источника (3) и граничные условия (2), можно считать, что задача Коши сформулирована

$$\begin{cases} v_z \frac{\partial \Delta T}{\partial z} - \lambda \nabla^2 \Delta T = K \cdot \frac{P}{V} \cdot (e^{-|l-\frac{x}{xv}|} + e^{-|l-\frac{y}{yv}|} + e^{-z}) \\ T(t, 0, y, z) = T(t, x, 0, z) = T(t, x, y, 0) = T(t, a, y, z) = T(t, x, b, z) = T(t, x, y, c) = T_{cp} \end{cases} \quad (4)$$

Методы решения неоднородных дифференциальных уравнений второй степени с постоянными коэффициентами довольно подробно изложены в [5]. Само решение имеет вид

$$T = T_{cp} + K \cdot \frac{P}{\lambda} \cdot \left(\frac{l}{S_1} e^{-\left|l-\frac{x}{\lambda}\right|} + \frac{m}{S_2} e^{-\left|l-\frac{y}{\lambda}\right|} + \frac{n}{S} \left(e^{-pz} - \frac{l}{p-1} z^2 e^{-z} \right) \right) \quad (5)$$

p - коэффициент, учитывающий конвекционный процесс и теплопроводность в завялочной камере; l, m, n – соответственно длина, ширина и высота завялочной камеры.

Визуальное представление теплового процесса в завялочной камере с внешним тепловым источником в среде MATLAB показано на рис. 1.

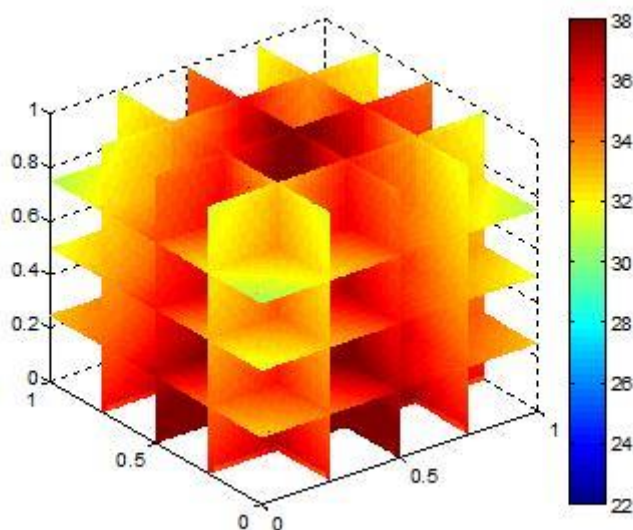


Рис. 1. Распределение температур при использовании одного нагревателя в нижней части камеры.

На рис. 1 хорошо видна неравномерность распределения температур по завялочной камере. Можно отметить, что колебания температур - весьма существенны.

Неравномерность распределения температур присутствует как по вертикали, так и в горизонтальной плоскости, то есть в местах расположения лент транспортера, на которых лежат слои чая. Общий перепад температур составляет более 10°C.

Для обеспечения более равномерного распределения температуры необходимо поддерживать температуру на требуемом уровне по горизонтали в районе нахождения слоев чая, что наиболее удобно делать непосредственно на поверхности лент транспортеров [6]. С этой целью на лентах транспортеров устанавливаются дополнительные эластичные электронагреватели [7], обеспечивающие поддержание требуемой температуры. Также как и для лент транспортеров, примем, что эластичные электронагреватели закрывают всю поверхность верхней части ленты транспортеров по всему горизонтальному сечению камеры. Дополнительные эластичные электронагреватели имеют малую толщину, поэтому справедливо соотношение $d \rightarrow 0$. Будем считать, что объемные тепловыделения, создаваемые дополнительными электронагревателями, равномерно распределяются по всей их поверхности.

Используя выражение (3), и вводя новые источники тепла, расположенные на поверхности лент транспортеров, согласно [5], была получена новая формула для суммарного теплового процесса при наличии дополнительных источников (в рассматриваемом примере в суммарном источнике тепла использовалось 3 дополнительных источника, расположенных в районе горизонтальных плоскостей на рис. 2 и 3)

$$T = T_{cp} + K \cdot \frac{P}{\lambda} \cdot \left[\left(\frac{l}{S_1} e^{-\left| \frac{l-x}{xv} \right|} + \frac{m}{S_2} e^{-\left| \frac{l-y}{yv} \right|} \right) + \frac{n}{S} \left(e^{-pz} - \frac{l}{p-1} \cdot z^2 \cdot e^{-z} \right) \right] - \frac{n}{\lambda S(p-1)} z^2 \cdot (K_1 \cdot P_1 \cdot e^{-|c1-z|} + K_2 \cdot P_2 \cdot e^{-|c2-z|} + K_3 \cdot P_3 \cdot e^{-|c3-z|}) \quad (6)$$

$K_{1,2,3}$ - обобщенные коэффициенты, учитывающие особенности эксплуатации дополнительных нагревателей, которые находятся экспериментально для каждого конкретного источника тепла; $P_{1,2,3}$ - мощности дополнительных источников тепла, расположенных на поверхности лент транспортеров; $c1, c2, c3$ - координаты по аппликате мест расположения в завялочной камере дополнительных источников тепла.

Уточненные параметры эластичных электронагревателей, которые использовались в качестве дополнительных источников тепла, были получены в процессе моделирования.

Распределение температур в завялочной камере, согласно новой тепловой модели, приведено на рис. 2.

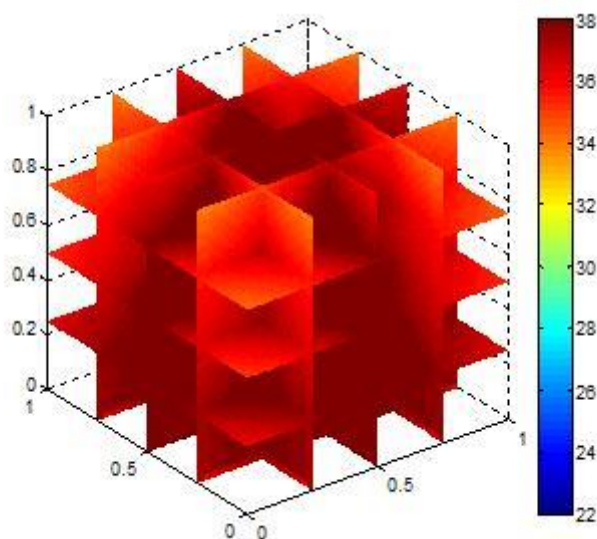


Рис. 2. Распределение температур в завялочной камере при использовании дополнительных источников тепла в области лент транспортера.

Выводы. Конечно, в приведенном примере имеется много допущений. Так было сделано предположение о том, что ленты транспортеров прозрачны для потоков воздуха. На самом деле они, даже с имеющимися отверстиями представляют серьезное препятствие для прохождения воздуха. Сами потоки воздуха распространяются не параллельно и не имеют постоянную скорость. Размеры лент транспортера конечно не равны поперечному сечению камеры. То есть, реальная картина конвекции намного сложнее, чем в построенной модели, и приводит к еще большим неравномерностям распределения температур в камере для заваливания.

Решение задачи выравнивания температур в завялочной камере возможно различными способами. Однако, наиболее предпочтительным является способ позволяющий обеспечить более равномерное распределение температур в местах расположения слоев чая, лежащих на лентах транспортеров, с помощью дополнительных эластичных электронагревателей, находящихся также в области лент транспортеров.

Значения температур в различных горизонтальных сечениях в модели без дополнительных эластичных электронагревателей различны и, следовательно, для выравнивания температур в камере требуются эластичные электронагреватели,

расположенные на различных уровнях, с разными мощностями. При определении этих мощностей исходим из экспоненциальной закономерности распределения тепла по оси Z (6). Уточнение мощностей дополнительных электронагревателей производится в процессе моделирования.

Таким образом, при использовании эластичных электронагревателей на поверхностях лент транспортера, происходит выравнивание температуры не только в областях лент транспортеров, то есть в нижних частях слоев чая, а и в завялочной камере в целом, что естественно делает более равномерным распределение температуры и по толще слоев чая. Общий перепад температуры в камере снижается более, чем в 2 раза и не превышает 4°C . Такое распределение температуры значительно улучшает конечный выход качественного чая, а также сократить время процесса завяливания.

Примененный подход, базирующийся на моделировании тепловых процессов, в данном случае, для осуществления температурного выравнивания в завялочной камере, позволяет априорно формировать требуемые тепловые режимы с целью оптимизации настройки, а иногда и кардинальной перестройке обрабатываемых технологий, в которых используются эти тепловые процессы.

Полученные результаты можно применять для усовершенствования технологий обработки не только чая, а и другого сырья растительного происхождения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ахметханов Р.С., Гудушаури Э.Г., Дубинин Е.Ф., Петров В.П. Методы механики сбора и переработки чайного листа, перспективы их развития. Под редакцией академика РАН Фролова К.В. и чл.-корр. РАН Махутова Н.А. М. Институт машиноведения им. А.А.Благонравова, 2002. – 264 с.
2. Самарский А.А., Вабишевич П.Н. Вычислительная теплопередача. М., Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2009, 784 с.
3. Шульженко А.А., Модестов М.Б., Мнев Б.А. Расчет теплового поля тканого нагревателя со сплошным расположением высокоомных нитей. М., Проблемы машиностроения и надежности машин, 2009, № 5, с. 112-117.
4. Шульженко А.А., Модестов М.Б. Расчет теплового поля нагревательных элементов, изготовленных на основе электронагревательной ткани. 7 краткий отчет об основных результатах научно-исследовательских работ за 2005-2006 гг., М., ИМАШ РАН, 2006, с. 88-91.
5. Баврин И.И. Курс высшей математики. М.: «ВЛАДОС», 2004.- 560 с.
6. Гудушаури Э.Г., Ахметханов Р.С., Мнев Б.А., Модестов М.Б., Петров В.П., Сухоруков Р.Ю., Шульженко А.А. Способ завяливания чая. Патент РФ № 2511407, М., 2014, Бюллетень № 10.
7. Шульженко А.А., Корнев В.Н., Модестов М.Б. «Электронагревательная ткань, нагревательный элемент на ее основе и средство соединения нагревательного элемента с источником электропитания (варианты)», патент РФ № 2145984, М., 2000, Бюллетень № 6, 24 с.

Дата поступления статьи: 10 марта 2016 года.