

Исследование влияния конвективного энергоподвода на интенсивность инфракрасной сушки плодов томата

Канд. техн. наук **Э.П. Дяченко**, amed-nauka@yandex.ru

*ВНИИ овощеводства – филиал Федерального научного центра овощеводства
Россия, 140153, Московская обл., Раменский р-н, дер. Верея, стр. 500*

д-р техн. наук **И.Ю. Алексанян**, amed-nauka@yandex.ru

*Астраханский государственный технический университет
Россия, 414056, Астрахань, ул. Татищева, 16*

канд. с.-х. наук **О.А. Разин**, vniioh@yandex.ru

*Федеральный научный центр овощеводства
Россия, 143086, Московская обл., Одинцовский район, п. ВНИИССОК, ул. Селекционная, 14*

д-р с.-х. наук **М.И. Иванова**, ivanova_170@mail.ru

*ВНИИ овощеводства – филиал Федерального научного центра овощеводства
Россия, 140153, Московская обл., Раменский р-н, дер. Верея, стр. 500*

Исследовали влияние конвективного энергоподвода на интенсивность инфракрасной (ИК) сушки плодов томата, нарезанных на дольки. Объектами изучения стали плоды томата сортов Ревизор и Сливка. Исследования проводились по полному многофакторному многоуровневому плану. В качестве целевой функции, характеризующей интенсивность процесса, выбрана удельная производительность сушильного аппарата (выход высушенного продукта с единицы площади рабочей поверхности в единицу времени). Основными факторами, влияющими на целевую функцию, выбраны: начальная влажность плодов томата w_n , кг/кг; начальная толщина дольки h_n , м; плотность падающего на одну сторону дольки теплового потока E_n , кВт/м²; температура T_b , К и скорость сушильного агента v , м/с. Установлено, что введение в процесс ИК сушки томатных долек принудительного конвективного энергоподвода при рациональных режимах позволяет на треть увеличить удельную производительность процесса и на 30% сократить время сушки продукта при оптимальных режимах. При этом интенсификация процесса происходит в течение всего периода обезвоживания продукта. Разработаны рациональные режимы процесса ИК и ИК конвективной сушки, получены функциональные зависимости целевой функции от основных влияющих факторов. Оценка качества сухого продукта проводилась по органолептическим показателям в соответствии с ОСТ 10 326-2003. Установлено, что цвет образцов, полученных способом ИК сушки, имел более темный оттенок в сравнении с образцами ИК конвективной сушки, на поверхности сухих долек, полученных при ИК сушке, наблюдались очаги, свидетельствующие о начале деструктивных процессов в материале, применение принудительного конвективного энергоподвода позволяет смягчить условия влагоудаления. Полученные результаты применимы для расчета аппаратов для сушки плодоовощного сырья, для моделирования тепломассопереноса и расчета эволюции полей температур в процессе ИК конвективной сушки.

Ключевые слова: консервирование пищевых продуктов; инфракрасная сушка; тепломассообмен; интенсивность сушки; плоды томата.

DOI: 10.17586/2310-1164-2019-12-4-40-47

The effect of convective energy supply on the infrared drying intensity of tomatoes

Ph. D. **Eduard P. Dyachenko**, amed-nauka@yandex.ru

*All-Russian Scientific Research Institute of Vegetable Growing – Branch of the Federal Scientific Center for Vegetable Growing
p. 500, Vereya village, Ramensky district, Moscow region, 140153, Russia*

D. Sc. **Igor Yu. Aleksanyan**, amed-nauka@yandex.ru

*Astrakhan State Technical University
16, Tatishcheva str., Astrakhan, 414056, Russia*

Ph. D. **Oleg A. Razin**, vniioh@yandex.ru

*Federal Scientific Center for Vegetable Growing
14, Selektionnaya str., VNISSOK settlement, Odintsovo district, Moscow region, 140153, Russia*

D. Sc. **Maria I. Ivanova**, ivanova_170@mail.ru

*All-Russian Scientific Research Institute of Vegetable Growing – Branch of the Federal Scientific Center for Vegetable Growing
p. 500, Vereya village, Ramensky district, Moscow region, 140153, Russia*

We studied the effect of convective energy supply on the intensity of infrared (IR) drying of tomatoes cut into slices. The objects used were Revizor and Slivka tomato varieties. The studies were carried out according to the full multi-factor multi-level plan. The specific productivity of the drying apparatus (the yield of the dried product from a unit of the surface area per unit time) was selected as the objective function characterizing the intensity of the process. The following factors were selected as the main factors affecting the objective function: initial humidity of tomato fruits w_n , kg/kg; the initial thickness of the lobules h_n , m; the density of the heat flux incident on one side of the lobule E_n , kW/m²; temperature T_n , K, and drying agent velocity v , m/s. It has been established that the introduction of forced convective energy supply into rational drying of tomato slices under rational conditions allows to increase the specific productivity of the process by a third and reduce the drying time of the product by 30%. Moreover, the intensification of the process occurs during the entire period of dehydration of the product. Rational modes of IR and IR convective drying have been developed, the functional dependences of the objective function on the main influencing factors are obtained. The dry product quality assessment was carried out according to organoleptic indicators in accordance with Standard 10 326-2003. It was established that the color of the samples obtained by the method of IR drying had a darker shade in comparison with the samples of IR convective drying. Foci on the surface of dry lobules obtained by IR drying were observed, which indicate the onset of destructive processes in the material. The use of forced convective energy supply allows to soften the conditions of moisture removal. The results obtained are applicable in designing apparatus for drying fruit and vegetable raw materials, simulating heat and mass transfer, and calculating the evolution of temperature fields in the process of infrared convective drying.

Keywords: food preservation; infrared drying; drying method; heat and mass transfer; drying intensity; tomato.

Введение

Благодаря своей продуктивности, вкусовым качествам и биологической ценности томат является одной из наиболее распространенных на отечественном рынке овощных культур. Плоды томата богаты витаминами, антиоксидантами и различными минеральными солями [1], однако сезонность, высокая интенсивность порчи томата, необходимость соблюдения специальных условий хранения плодов сдерживают стабильное снабжение потребителей в течение всего года. Обезвоживание является одним из наиболее простых и надежных способов переработки растительного сырья, позволяет значительно увеличить сроки хранения продукции, для организации которого не нужны специальные условия и большие складские площади [2–4]. Производство сухих томатных продуктов обладает рядом преимуществ по сравнению с традиционными технологиями переработки, для их хранения не требуется дорогостоящей стеклянной и жестяной тары, за счет меньшего объема значительно сокращаются транспортные расходы, исключаются потери из-за бомбажа и т.д. Однако использование традиционных способов сушки плодов томата малоэффективно ввиду особенностей структурно-механических характеристик и фракционного состава ягод, сравнительно большого влагосодержания продукта, а также специфики механизма внутреннего теплопереноса [5–7].

Разработка способа сушки плодов томата, в том числе его аппаратное оформление, должны быть направлены на повышение эффективности процесса обезвоживания при сохранении качественных характеристик сухого продукта на уровне нативного сырья. Для решения указанной задачи, выбора и обоснования рациональных режимов необходимо изучение кинетики и интенсивности сушки [2, 3, 7].

Энергоподвод является ключевым фактором, определяющим интенсивность и энергоемкость процесса сушки, качество сухого продукта. Сушка при инфракрасном (ИК) энергоподводе обладает рядом преимуществ в сравнении с традиционными способами, например, конвективным или естественной сушкой [2, 5], которые, несмотря на современное развитие науки и техники, наиболее распространены в производстве и широко исследуются [8–10]. При объемном ИК энергоподводе исключается перегрев материала при контакте с рабочей поверхностью аппарата. ИК сушка при рациональных режимах существенно интенсифицирует процесс влагоудаления, экологически безопасна, исключает загрязнение обезвоживаемого материала, характеризуется минимальным удельным энергопотреблением по сравнению с традиционными способами [2, 5, 11].

Несмотря на указанные преимущества, широкое использование метода ИК сушки при производстве сушеного томата сдерживается отсутствием рациональных режимов процесса, а также отсутствием универсальных и простых аппаратов, пригодных для переработки растительного сырья с широким диапазоном структурно-механических и физико-химических свойств, высокой энергоемкостью и сложностью существующего оборудования.

В ряде работ показано, что передача энергии исключительно ИК излучением малоэффективна в связи с особенностями теплообмена [2, 12]. В отдельных периодах процесса ИК сушки ИК энергоподвод, наоборот, сдерживает влагоудаление, при этом введение в процесс принудительного конвективного энергоподвода позволяет интенсифицировать удаление влаги, обеспечить «мягкие» режимы обезвоживания для сокращения потерь термолабильных веществ при производстве сухих растительных материалов [2, 3, 12].

Целью настоящего исследования является изучение влияния принудительного конвективного энергоподвода на интенсивность и определение рациональных режимов процесса ИК сушки долек (дисков, слайсов) плодов томата.

Объекты и методы исследования

В качестве исследуемых объектов использовались пригодные для равномерного нарезания и обеспечения равномерной сушки плоды томата сортов Ревизор и Сливка, цилиндрической формы, характеризующиеся плотной мякотью, мясистостью, малым количеством семян и жидкости в семенных камерах, плотной кожицей, стойкой к растрескиванию.

Исследования проводились по полному многофакторному многоуровневому плану [13]. В качестве целевой функции, характеризующей интенсивность процесса, выбрана удельная производительность сушильного аппарата (выход высушенного продукта с единицы площади рабочей поверхности в единицу времени) G , кг/(м²·ч)

$$G = M_{\text{сп}} / (F \cdot \tau), \tag{1}$$

где $M_{\text{сп}}$ – масса высушенного продукта до конечной влажности не более $w_k = 0,6$ кг/кг, выбор которой осуществлен на основе результатов анализа гигроскопических характеристик продукта [3, 14];

F – площадь рабочей поверхности, занимаемой продуктом, м²;

τ – экспериментальное время сушки, ч.

Для уточнения влияния отдельных основных параметров (факторов) на интенсивность процесса обезвоживания все второстепенные параметры фиксировались. Перечень основных факторов и диапазоны их варьирования установлены на основе анализа научно-технической и патентной литературы, а также поисковых экспериментальных исследований [15, 16]. В таблице 1 представлены основные факторы, влияющие на целевую функцию ИК и ИК конвективной сушки томатных долек, уровни их варьирования, в том числе начальная влажность плодов томата w_n , кг/кг; начальная толщина дольки h_n , м; плотность теплового потока, падающего на одну сторону дольки E_n , кВт/м² (при симметричном двухстороннем облучении $E_n = 2E$); температура T_b , К и скорость сушильного агента v , м/с.

Таблица 1– Уровни варьирования факторов при ИК и ИК конвективной сушке долек плодов томата

Table 1. Factor variation at IR and IR convective drying of tomato slices

Уровни	Факторы				
	h_n , мм	E_n , кВт/м ²	v , м/с	T_b , К	w_n , кг/кг
1	1	1,84	3,4	330	0,92–0,94
2	2	2,70	–	–	–
3	3	2,9	–	–	–
4	4	–	–	–	–

В плодах томата, несмотря на малый диапазон варьирования, исходная концентрация сухих веществ $s_n (1-w_n)$ кг/кг является немаловажным фактором, определяющим механизм протекания процесса обезвоживания, влияющим на скорость сушки и, соответственно, величину удельного выхода сухого продукта. В основном s_n определяется количеством жидкости в семенных камерах, в настоящих исследованиях w_n исследуемых плодов томата не превышала 0,94 кг/кг.

При изучении процесса сушки долек томата величину плотности теплового потока поддерживали в пределах $E_n = 1,84 - 2,98$ кВт/м². Регулирование параметра при проведении экспериментов достигалось регулированием напряжения, подаваемого на ИК излучатели, а также расстоянием от излучателей до рабочей поверхности сушильной камеры. Увеличение плотности теплового потока более 2,98 кВт/м² не способствовало существенному повышению интенсивности процесса и приводило к локальному подгоранию и стеклованию его поверхности при высоких значениях влагосодержания внутри продукта

и, как следствие, к ухудшению качественных показателей сухого материала. Снижение плотности теплового потока $E_{\text{т}} < 1,84 \text{ кВт/м}^2$ нецелесообразно ввиду резкого снижения целевой функции при высоких затратах энергии. Для обеспечения максимальной эффективности использования энергии излучателей длина волны излучения должна соответствовать максимальной излучательной способности ИК излучателей.

Одним из основных факторов, влияющих на эффективность сушки, является начальная толщина обезвоживаемой дольки томата. Величину $h_{\text{н}}$ выдерживали в пределах $h_{\text{н}} = 1-4 \text{ мм}$, что обуславливается технологическими особенностями процесса. Уменьшение толщины долек ($h_{\text{н}} < 1 \text{ мм}$) технически трудноосуществимо и нецелесообразно ввиду резкого снижения выхода сухого продукта. Увеличение $h_{\text{н}}$ более 4 мм затрудняет равномерный прогрев продукта по толщине слоя из-за снижения пропускательной способности материала, что приводит к неравномерности процесса влагоудаления и, как следствие, к снижению качества сухого продукта.

Согласно литературным данным [3, 17], при обезвоживании продуктов растительного происхождения в неподвижном состоянии величина верхней границы температуры сушильного агента не должна превышать $T_{\text{в}} = 353 \text{ К}$. Дальнейшее увеличение $T_{\text{в}}$ обуславливает ухудшение качественных показателей вследствие неравномерного нагревания материала и подгорания продукта. При этом, учитывая дополнительное воздействие ИК теплового потока, температуру сушильного агента рекомендуется выдерживать в пределах $T_{\text{в}} = 330 - 333 \text{ К}$.

На основе предварительных экспериментальных исследований скорость сушильного агента принимали равной $v = 3,2 - 3,4 \text{ м/с}$. Снижение значения скорости нецелесообразно, поскольку приводит к снижению интенсивности испарения влаги с поверхности теплообмена, верхний предел скорости ($v = 3,4 \text{ м/с}$) ограничен повышением вероятности уноса продукта в процессе сушки с игольчатого носителя. Ввиду небольшого диапазона варьирования температуры $T_{\text{в}}$, К и скорости сушильного агента v , м/с в рациональном режиме нецелесообразно включать их как независимые факторы в рамках данного исследования.

Исследования проводились с использованием лабораторного оборудования Астраханского государственного технического университета. Для приготовления экспериментального образца продукта свежий плод томата предварительно мыли, подогрели до комнатной температуры, нарезали на дольки равномерной толщины $h_{\text{н}}$, м, и далее наносили на рабочую поверхность (плоский игольчатый носитель) экспериментальной сушильной установки. Дольки обезвоживались при ИК и ИК конвективном энергоподводе до конечной влажности $w_{\text{к}} = 0,06 \text{ кг/кг}$ и при постоянной регистрации убыли массы продукта в процессе сушки, затем выводились из сушильной камеры.

Результаты и их обсуждение

В результате получены значения текущей влажности продукта w , кг/кг в процессе обезвоживания от времени t , с. Примеры кривых сушки томатных долек при исследуемых методах энергоподвода изображены на рисунке 1. Полученные кривые сушки в последующем использовали для построения кривой скорости сушки с целью анализа механизма теплопереноса и определения удельной производительности процесса. Согласно результатам анализа кинетики сушки, конвективный энергоподвод интенсифицирует процесс в течение всего периода обезвоживания продукта.

Показатели качества сухого продукта оценивались в соответствии с ОСТ 10 326-2003 «Томаты сушеные. Промышленное сырье. Технические условия». После извлечения из сушильной камеры продукт имел следующие характеристики (таблица 2): по внешнему виду готовый продукт представлял собой сухие деформированные пластинки без признаков посторонних включений; цвет сухого продукта равномерный, теплых оттенков красного цвета, характеризовался цветом обезвоживаемых плодов томата; вкус сухого продукта кисловато-сладковатый, характерный для томатов; запах сухого продукта также характерный для томатов; по консистенции сухой продукт в основном эластичный, слегка хрустящий по центру пластинки; массовая доля влаги продукта $w_{\text{к}}$, % не превышала 6%.

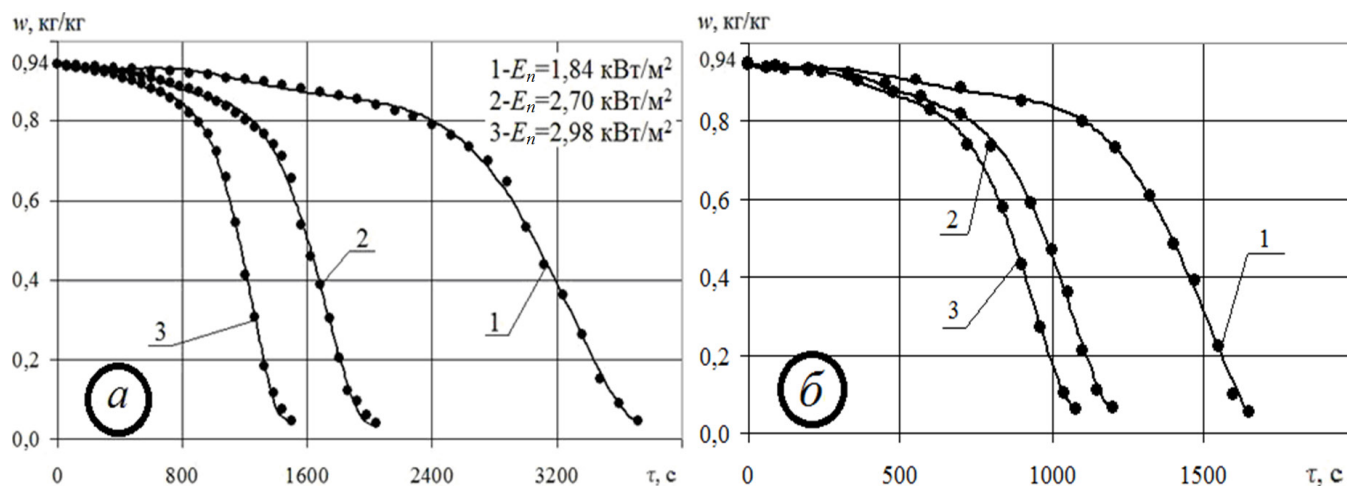


Рисунок 1 – Кривые сушки плодов томата сорта Ревизор в дольках (●) и их аппроксимирующие функции (—) при $h_n = 4$ мм при ИК (а) и ИК конвективном (б) энергоподводе
 Figure 1. The curves for sliced Revizor tomato drying (●) and their approximating functions (—) at $h_n = 4$ mm with IR (a) and IR convective (б) energy supply

Таблица 2 – Результаты оценки качества высушенного томата в соответствии с ОСТ 10 326-2003 при рациональных режимах сушки

Table 2. Quality evaluation of dried tomatoes according to the Standard 10 326-2003 at rational drying modes

Метод энергоподвода	Критерии оценки					$w_k, \%$
	Внешний вид	Цвет	Вкус	Запах	Консистенция	
ИК	сушеные пластинки без признаков загрязнения	неравномерный, теплых оттенков красного цвета, с очагами локального подгорания	кисловато-сладковатый, свойственный томатам, с горьковатым привкусом	характерен для аромата томатов	неравномерная, продукт локально эластичный, локально хрустящий	≤6
ИК конвективный		равномерный, теплых оттенков красного цвета	кисловато-сладковатый, свойственный томатам		продукт эластичный, слегка хрустящий	

На основе визуального и органолептического анализа установлено, что применение принудительного конвективного энергоподвода позволяет смягчить условия влагоудаления. Так, цвет образцов, полученных способом ИК сушки, имел более темный оттенок в сравнении с образцами ИК конвективной сушки, а на поверхности сухих долек, полученных при ИК сушке, наблюдались очаги, свидетельствующие о начале деструктивных процессов в материале.

В результате экспериментальных исследований по формуле (1) получены значения выхода высушенного продукта с единицы площади рабочей поверхности в единицу времени (G) для выбранных вариантов реализации процесса, при различных значениях начальной толщины долек плодов томата (h_n) и плотности теплового потока (E_n). Относительная ошибка при определении G не превышала 12%. Компьютерная обработка экспериментальных данных позволила получить адекватные аппроксимирующие зависимости целевой функции от варьируемых факторов, при этом погрешность аппроксимации R^2 зависимостей $G = f(w_n, h_n)$ составила не менее 0,995:

$$G(E_n, h_n) = \left[\begin{aligned} &(a_1 \cdot E_n^2 + b_1 \cdot E_n + c_1) \cdot h_n^3 + (a_2 \cdot E_n^2 + b_2 \cdot E_n + c_2) \cdot h_n^2 + \\ &+ (a_3 \cdot E_n^2 + b_3 \cdot E_n + c_3) \cdot h_n + (a_4 \cdot E_n^2 + b_4 \cdot E_n + c_4) \end{aligned} \right]. \quad (2)$$

Значения эмпирических коэффициентов $a_1, b_1, c_1, a_2, b_2, c_2, a_3, b_3, c_3, a_4, b_4, c_4$ представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Значения эмпирических коэффициентов целевой функции в зависимости от варьируемых факторов

Table 3. Empirical coefficients of the target function depending on the varied factors

Сушка при объемном ИК энергоподводе							
a_1	-0,012	a_2	0,083	a_3	-0,146	a_4	0,164
b_1	0,057	b_2	-0,403	b_3	0,738	b_4	-0,642
c_1	-0,061	c_2	0,428	c_3	-0,749	c_4	0,673
Сушка при объемном ИК конвективном энергоподводе							
a_1	-0,0047	a_2	0,00073	a_3	0,079	a_4	0,03344
b_1	0,0039	b_2	-0,143	b_3	-0,00224	b_4	-0,3007
c_1	-0,057	c_2	0,256	c_3	-0,1154	c_4	0,587

На рисунке 2 в виде полей значений G представлены результаты расчета целевой функции по уравнению (2), полученные для различных методов энергоподвода. Зависимости целевых функций ИК и ИК конвективной сушки долек плодов томата от влияющих факторов h_n и E_n в диапазоне $3 \leq h_n \leq 4$ мм в целом имеют схожий характер. Для рассматриваемых вариантов реализации процесса рост целевой функции наблюдается как при увеличении толщины продукта, так и при увеличении плотности теплового потока и ограничивается верхними предельными значениями указанных факторов.

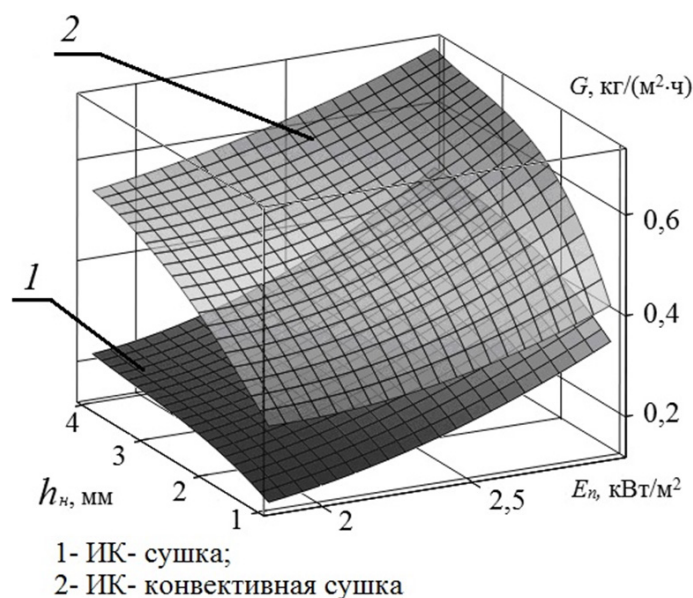


Рисунок 2 – Поля значений выхода высушенных плодов томата в долях с единицы площади в единицу времени G , при различных значениях начальной толщины дольки h_n и плотности теплового потока E_n

Figure 2. Value fields for the yield of the dried sliced tomato a unit of the surface area per unit time G at different values of initial slice thickness h_n and heat flux density E_n

При h_n менее 3 мм наблюдается менее выраженное влияние плотности теплового потока на интенсивность процесса ИК конвективной сушки, чем при ИК сушке. С другой стороны, введение в процесс принудительного конвективного энергоподвода способствует более интенсивному росту целевой функции при увеличении толщины слоя.

По результатам исследований для плодов томата с влажностью $w_n = 0,92-0,94$ кг/кг максимальная интенсивность процесса ИК конвективной сушки, соответствующая значению целевой функции $G_{max} = 0,714$ кг/(м²·ч) достигается при следующих рациональных режимах: $h_n = 4$ мм; $E_n = 2,98$ кВт/м²; $v = 3,2-3,4$ м/с; $T_b = 330-333$ К. При этом введение в процесс ИК сушки принудительного конвективного энергоподвода при рациональных режимах позволяет практически на 30% увеличить производительность процесса (рисунок 1) и сократить время обезвоживания продукта с 25 до 18 минут (рисунок 1) при сохранении, а по некоторым показателям – улучшении качества сухого продукта.

Выводы

В результате проведения экспериментально-аналитических исследований установлено, что введение в процесс ИК сушки томатных долек принудительного конвективного энергоподвода при

рациональных режимах позволяет на треть увеличить удельную производительность процесса и на 30% сократить время сушки продукта. Сухой продукт ИК конвективной сушки соответствует показателям, регламентированным ОСТ 10 326-2003. При этом согласно результатам анализа кинетики сушки, конвективный энергоподвод интенсифицирует процесс в течение всего периода обезвоживания продукта. Разработанные рациональные режимы процесса ИК и ИК конвективной сушки и соответствующие функциональные зависимости удельной производительности сушильного аппарата от основных влияющих факторов, могут быть использованы для дальнейшего усовершенствования процесса сушки плодов томата, в расчетах при проектировании универсальных аппаратов, пригодных для переработки растительного сырья с широким диапазоном структурно-механических и физико-химических свойств. Кривые сушки применимы для численно-аналитического моделирования эволюции полей температур в дольке томата в процессе ИК и ИК конвективной сушки, что позволит определить величину и распределение температуры в слое в любой момент времени и необходимо для полного изучения процесса в целях соблюдения технологических требований [3, 18, 19].

Литература

1. Гавриш С.Ф. Томаты. М.: Вече, 2005. 160 с.
2. Алексанян И.Ю., Буйнов А.А. Высокоинтенсивная сушка пищевых продуктов. Пеносушка. Теория. Практика. Моделирование. Астрахань: Изд-во Астрахан. гос. техн. ун-та, 2004. 380 с.
3. Максименко Ю.А. Развитие научно-практических основ и совершенствование процессов сушки растительного сырья в диспергированном состоянии: автореф. дис. ... докт. техн. наук. Астрахань, 2016.
4. Гаджиева А.М., Квасенков О.И. Новые технологии производства пищевых продуктов из томатов // Пищевая промышленность. 2016. № 8. С. 50–52.
5. Попов В.М., Афонькина В.А., Левинский В.Н. Результаты исследований качественных показателей процесса ИК – сушки томатов по содержанию аскорбиновой кислоты // Международный научно-исследовательский журнал. 2017. № 9(63). Часть 3. С 58–62.
6. Correia A.F.K., Loro A.C., Zanatta S., Spoto M.H.F., Vieira T.M.F.S. Effect of temperature, time, and material thickness on the dehydration process of tomato. *International Journal of Food Science*. 2015, pp. 1–7.
7. Ben Mariem S., Ben Mabrouk S. Drying characteristics of tomato slices and mathematical modeling. *International Journal of Energy Engineering*. 2014, V. 4, Is. 2A, pp. 17–24.
8. Bashir N., Mudassir A.B., Dar B.N., Shah M.A. Effect of different drying methods on the quality of tomatoes. *Advances in Food Sciences*. 2014, V. 36, pp. 65–69.
9. Kumar V., Singh B.R., Samsher, Chandra S., Singh S. A Review on tomato drying by different methods with pretreatments. *International Journal of Food and Fermentation Technology*. 2015. V. 5, no. 1, pp. 15–24.
10. Mavis O.-A., Oduro I., Saalia F., Tortoe Ch., Ambrose K. Physicochemical and nutritional characteristics of solar and sun-dried tomato powder. *Journal of Food Research*. 2018, V. 7, no. 6, pp. 1–15.
11. Алтухов И.В. Технология получения концентрированных сахаросодержащих продуктов с использованием импульсной инфракрасной обработки и сушки корнеклубнеплодов: автореф. дис. ... докт. техн. наук. Красноярск, 2016.
12. Purkayastha M.Das, Mahanta C.L., Nath A., Deka B.C. Thin layer drying of tomato slices. *Journal of Food Science and Technology*. 2011, V. 50, Is. 4, pp. 642–653.
13. Грачев Ю.П., Плаксин Ю.М. Математические методы планирования эксперимента. М.: ДеЛи, 2005. 296 с.
14. Алексанян И.Ю., Максименко Ю.А., Феклунова Ю.С. Исследование влияния температуры на гигроскопические характеристики плодоовощных продуктов // Технологии пищевой и перерабатывающей промышленности АПК-продукты здорового питания. 2017. Т4. С. 86–89.
15. Дяченко Н.П., Алексанян И.Ю., Дяченко Э.П. Исследование процесса сушки томатов при различных методах энергоподвода [Электронный ресурс] // Международная научная конференция научно-педагогических работников Астраханского гос. техн. ун-та (Астрахань, 2016 г.): сб. тр. Астрахань: Изд-во Астраханского гос. техн. ун-та, 2016. 1 электрон. опт. диск (CD-ROM).
16. Дяченко Э.П., Васильченко Е.И., Дяченко Н.П. Исследование процесса сушки плодоовощных продуктов при переменном инфракрасном энергоподводе [Электронный ресурс] // Международная научная конференция научно-педагогических работников Астраханского гос. техн. ун-та (Астрахань, 2013 г.): сб. тр. Астрахань: Изд-во Астраханского гос. техн. ун-та, 2013. 1 электрон. опт. диск (CD-ROM).
17. Титова Л.М. Разработка и научное обоснование способа сушки пищевых волокон: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Астрахань, 2009. 21 с.
18. Aleksanian I.Yu., Sergeeva I.Yu., Rudnev S.D., Nugmanov A.H.H., Kryuk R.V., Zhidkova A.A. Improvement of the process of drying tea semi-finished products from vegetable raw materials (Blooming Sally Narrow-leaved *Epilobium angustifolium*). *Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2018, V. 13, Is. 24, pp. 10406–10416.

19. Максименко Ю.А., Степанович А.Н., Дяченко Э.П. Расчет температурных полей путем реализации модели тепломассопереноса при распылительной сушке пектинового экстракта // Вестник Астраханского государственного технического университета. 2008. № 2(43). С. 202–207.

References

1. Gavriš S.F. *Tomatoes*. Moscow, Veche Publ., 2005. 160 p. (In Russian).
2. Aleksanyan I.Yu., Buynov A.A. *High intensity food drying. Foam dryer. Theory. Practice. Modeling*. Astrakhan, Astrakhan State Technical University Publ., 2004. 380 p. (In Russian).
3. Maksimenko Yu.A. Development of scientific and practical foundations and improvement of drying processes of plant materials in a dispersed state. *Candidate's thesis*. Astrakhan, 2016 (In Russian).
4. Gadzhieva A.M., Kvasenkov O.I. New technologies for the production of food products from tomatoes. *Food Industry*. 2016, no. 8, pp. 50–52 (In Russian).
5. Popov V.M., Afonkina V.A., Levinsky V.N. Results of studies of qualitative indicators of the process of IR-drying of tomatoes by the content of ascorbic acid. *International Scientific Journal*. 2017, no. 9(63), Part 3, pp. 58–62 (In Russian).
6. Correia A.F.K., Loro A.C., Zanatta S., Spoto M.H.F., Vieira T.M.F.S. Effect of temperature, time, and material thickness on the dehydration process of tomato. *International Journal of Food Science*. 2015, pp. 1–7.
7. Ben Mariem S., Ben Mabrouk S. Drying characteristics of tomato slices and mathematical modeling. *International Journal of Energy Engineering*. 2014, V. 4, Is. 2A, pp. 17–24.
8. Bashir N., Mudassir A.B., Dar B.N., Shah M.A. Effect of different drying methods on the quality of tomatoes. *Advances in Food Sciences*. 2014, V. 36, pp. 65–69.
9. Kumar V., Singh B.R., Samsher, Chandra S., Singh S. A Review on tomato drying by different methods with pretreatments. *International Journal of Food and Fermentation Technology*. 2015. V. 5, no. 1, pp. 15–24.
10. Mavis O.-A., Oduro I., Saalia F., Tortoe Ch., Ambrose K. Physicochemical and nutritional characteristics of solar and sun-dried tomato powder. *Journal of Food Research*. 2018, V. 7, no. 6, pp. 1–15.
11. Altukhov I.V. The technology of obtaining concentrated sugar-containing products using pulsed infrared processing and drying of root crops. *Extended abstract of Doctor's thesis*. Krasnoyarsk, 2016, 34 p. (In Russian).
12. Purkayastha M.Das, Mahanta C.L., Nath A., Deka B.C. Thin layer drying of tomato slices. *Journal of Food Science and Technology*. 2011, V. 50, Is. 4, pp. 642–653.
13. Grachev Yu.P., Plaksin Yu.M. *Mathematical methods of planning an experiment*. Moscow, DeLi Publ., 2005. 296 p. (In Russian).
14. Aleksanyan I.Yu., Maksimenko Yu.A., Feklunova Yu.S. Investigation of the effect of temperature on the hygroscopic characteristics of fruit and vegetable products. *Technologies of the food and processing industry AIC products of healthy nutrition*. 2017, V. 4, pp. 86–89.
15. Dyachenko N.P., Aleksanyan I.Yu., Dyachenko E.P. Study of the drying process of tomatoes with various methods of energy supply. *Proceedings of the International Conference of Scientific and Pedagogical Workers of the Astrakhan State. Tech. University* (Astrakhan, 2016). Astrakhan State. Tech. University Publ., 2016, 1 CD-ROM. (In Russian).
16. Dyachenko E.P., Vasilchenko E.I., Dyachenko N.P. Investigation of the drying process of fruit and vegetable products with variable infrared energy supply. *Proceedings of the International Conference of Scientific and Pedagogical Workers of the Astrakhan State. Tech. University* (Astrakhan, 2013). Astrakhan State. Tech. University Publ., 2013, 1 CD-ROM. (In Russian).
17. Titova L.M. Development and scientific justification of the method of drying dietary fiber. *Extended abstract of Doctor's thesis*. Astrakhan, 2009, 21 p. (In Russian).
18. Aleksanian I.Yu., Sergeeva I.Yu., Rudnev S.D., Nugmanov A.H.H., Kryuk R.V., Zhidkova A.A. Improvement of the process of drying tea semi-finished products from vegetable raw materials (Blooming Sally Narrow-leaved *Epilobium angustifolium*). *Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2018, V. 13, Is. 24, pp. 10406–10416.
19. Maksimenko Yu.A., Stepanovich A.N., Dyachenko E.P. Calculation of temperature fields by implementing a model of heat and mass transfer during spray drying of pectin extract. *Herald of the Astrakhan State Technical University*. 2008, no. 2(43), pp. 202–207 (In Russian).

Статья поступила в редакцию 15.09.2019