

Изучение кинетических закономерностей и моделирование тепло- и массопереноса в процессе сушки джекфрута

Алексанян Игорь Юрьевич

*ФГБОУ ВО «Астраханский государственный технический университет»
Адрес: 414056, город Астрахань, ул. Татищева, дом 16
E-mail: albert909@yandex.ru*

Максименко Юрий Александрович

*ФГБОУ ВО «Астраханский государственный технический университет»
Адрес: 414056, город Астрахань, ул. Татищева, дом 16
E-mail: albert909@yandex.ru*

Нугманов Альберт Хамед-Харисович

*ФГБОУ ВО «Астраханский государственный технический университет»
Адрес: 414056, город Астрахань, ул. Татищева, дом 16
E-mail: albert909@yandex.ru*

Нгуен Тхи Сен

*ФГБОУ ВО «Астраханский государственный технический университет»
Адрес: 414056, город Астрахань, ул. Татищева, дом 16
E-mail: albert909@yandex.ru*

В последнее время в мире приобретает популярность плод хлебного дерева (джекфрут), особенно среди вегетарианцев, вследствие того, что его плоды придают энергию из-за наличия в нем простых сахаров (фруктозы и сахарозы), при этом он не содержит жиров и вредного холестерина, что делает его превосходным источником энергии. С целью консервирования данного продукта рекомендовано применение биоразлагаемых полимерных покрытий для повышения сроков годности с максимальным сохранением пищевой ценности. Целью работы является разработка рациональных режимных параметров сушки ломтиков джекфрута с защитным биопокрытием и моделирование тепло- и массопереноса. Для достижения поставленной цели установлены кинетические закономерности процесса конвективной сушки ломтиков джекфрута, как двухслойного объекта и построены кривые скорости удаления воды. При варьировании в рамках технологических ограничений параметров, влияющих на интенсивность обезвоживания, определена, зависящая от их величины удельная производительность процесса и ее рациональное значение. Опираясь на анализ закономерностей протекания процессов переноса тепловой энергии и вещества выявлены их специфические особенности при удалении влаги из двухслойного объекта. Численно решена модель переноса тепловой энергии и вещества и рассчитана эволюция полей температур в образце при сушке. Полученные результаты позволили определить рациональные режимы обезвоживания, обеспечивающие устойчивость на поверхности ломтика нанесенного защитного покрытия, что способствует увеличению сроков его хранения при конечной влажности 25%, а также снижению энергоемкости реализуемого процесса консервации обезвоживанием. Обоснована возможность использования биополимерного покрытия на основе альгината натрия при сушке ломтиков джекфрута.

Ключевые слова: характеристики джекфрута, альгинат натрия, защитные пищевые покрытия, конвективный подвод энергии, кривые сушки, математическая аппроксимация кинетических кривых сушки, температурные режимы обезвоживания

Введение

В последнее время приобретает популярность в мире джекфрут (плод хлебного дерева), особенно среди вегетарианцев, так как его выраженная текстура, похожая на мясо, делают незрелый фрукт незаменимым продуктом в их рационе, вследствие чего увеличивается его экспортный

потенциал. Плоды джекфрута придают энергию из-за наличия в нем простых сахаров (фруктозы и сахарозы), при этом он не содержит жиров и вредного холестерина, что делает его превосходным источником энергии (Rana, Pradhan, Mishra, 2018a, p. 2123). Помимо наличия в нем витамина С он богат фитонутриентами, такими как изофлавоноиды, сапонины и лигнаны с выра-

женными противораковыми и антивозрастными свойствами.

На сегодняшний момент основной конечной продукцией промышленной переработки растительного сырья являются замороженные и консервированные овощи и фрукты, натуральные концентрированные в охлажденном и замороженном состоянии соки, что сказывается на необходимости больших площадей и затрат при хранении и увеличения их на дорогостоящую упаковку.

Некоторые традиционные способы консервирования, такие как «шоковая» заморозка и сублимационная сушка без их совершенствования не выдерживают современных требований по снижению удельных энергозатрат на производство единицы продукции, вследствие их высокой энергоемкости, по сравнению, например, с обычным замораживанием и конвективным влагоудалением, несмотря на некоторое снижение потребительских свойств конечной продукции, которое можно уменьшить технологическими ограничениями процесса влагоудаления при нанесении защитного покрытия (Rana, Pradhan, Mishra, 2018b, p. 201).

Таким образом, научно обоснованная разработка эффективной технологии консервирования фруктов, опираясь на выявление и исследование взаимосвязанных физических, биохимических и тепловых эффектов при дегидратационной обработке фруктов и выборе рационального биопокрытия актуальна и даст возможность производить сухие ломтики джекфрута с заданными потребительскими свойствами при снижении затрат энергии.

Литературный обзор

Из исследований, проводимых за рубежом по освещаемой в статье тематике, можно представить работы таких ученых как: T. Kudra, A.S. Mujumdar (Mujumdar, 2007, p. 200-295; Kudra, Mujumdar, 2009, p. 85-310, 620-815), James R. Couper и W. Roy Penny (2005, p. 64-315), Gavin P. Towler и Ray K. Sinnott (2008, p. 35-220, 400-718) и других (Smith, 2005, p. 154-489; Bird, Stewart, Lightfoot, 2002, p. 218-383; Sazhin, Sazhin, 2007, p. 44-372). Среди советских и российских исследователей, осуществивших существенное развитие теоретических положений и технических устройств сушки растительных материалов, можно выделить А.С. Гинзбурга, М.А. Громова (1987, с. 33-77),

А.В. Лыкова, Г.К. Филоненко, П.А. Ребиндера, С.П. Рудобашту, А.Н. Острикова и других.

В последнее время широко распространены методы увеличения периода сохранности пищевой продукции и полуфабрикатов путем применения газомодифицированных сред и полиэтиленовых резервуаров с силиконово-каучуковыми диффузионными газообменниками (Хабибуллина, Сидоров, 2017, с. 147), негативными сторонами которых являются сравнительно малый промежуток времени хранения, особенно для скоропортящихся материалов, так как необходимы использование регулируемой атмосферы и температуры хранения и возможность повреждения ткани.

Для повышения стойкости к воздействию окружающей среды мягких фруктов и ягод сегодня применяются технологии их поверхностной обработки специальным защитным покрытием, нанесение которого приводит к увеличению срока их хранения с гарантией высокого качества конечной продукции (Хабибуллина, Сидоров, 2017, с. 147). Такая дополнительная обработка способствует росту адгезионных свойств у образующего пленку покрытия с поверхностью мягких плодов и улучшает однородность распределения защитного биополимера по его наружному слою. Представляют интерес исследования по интенсификации процесса обезвоживания растительного сырья с использованием биоразлагаемых полимерных покрытий на основе альгината натрия, которые наносятся на продукт перед его консервацией.

Вопросы, связанные с разработкой эффективной промышленной технологии сушки ломтиков джекфрута поверхностно обработанных биополимерным гелем, то есть многослойного объекта и ее конструкторского оформления, недостаточно проработаны и требуют дальнейшего изучения.

Теоретическое обоснование

В контексте решения данной проблемы интерес вызывает применение биоразлагаемых полимерных покрытий для повышения сроков годности плодов и овощей с максимальным сохранением пищевой ценности (Хабибуллина, Сидоров, 2017, с. 149). В настоящее время использование в пищевой промышленности защитных и экологически чистых покрытий представляет высокий интерес в связи с повышением требований к условиям хранения и потребления продуктов питания. Производство биоконпозиционных

съедобных покрытий может осуществляться из вторичного сырья и отходов пищевой и сельскохозяйственной промышленности, что значительно снижает экологическую нагрузку на окружающую среду. Промышленная реализация, а в особенности экспорт джекфрута в виде товарного продукта вызывает значительные технические и технологические трудности ввиду его больших размеров, поэтому для повышения эффективности хранения, транспортировки, упаковки и реализации в торговой сети эта продукция предварительно подвергается измельчению, но при этом нарушается ее структура и усиливается негативное влияние окружающей среды, вследствие чего измельченный джекфрут консервируют, в основном обезвоживанием. При исследовании процессов сушки и разработки оборудования для их обеспечения особо важным является выбор и диапазоны варьирования факторов, обуславливающих время технологической операции при рациональной интенсивности обезвоживания измельченного джекфрута. При этом целесообразно одновременно с сушкой использование съедобных покрытий, которые наносятся на продукт перед обезвоживанием и способствуют повышению сроков хранения продукции с минимальной потерей ее пищевой ценности.

В этой связи целью работы является разработка рациональных режимных параметров сушки ломтиков джекфрута с защитным биопокрытием и моделирование тепло- и массопереноса.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. определить направления роста скорости тепловых и массообменных операций при обезвоживании с конвективным энергоподводом к ломтикам джекфрута с гелевым биополимерным покрытием;
2. определить рациональные режимы процесса удаления воды из 2-х слойного материала и удельный выход готового продукта при их осуществлении в сушилке, а также его кинетические закономерности с целью их применения при расчете оборудования;
3. выявить и проанализировать механизм внешнего и внутреннего переноса тепла и вещества при конвективном обезвоживании двухслойного объекта, провести моделирование этого процесса, результатом которого будет распределение температуры по толщине ломтика в зависимости от его влажности.

Основой исследований является изучение кинетики процесса конвективной сушки многослойных

объектов с целью его ускорения и расчет трансформации температурных полей путем решения математической модели. Адекватность аппроксимирующих уравнений опытным результатам исследования в диапазонах обеспечения заданных потребительских свойств готового продукта, а также технологических и временных ограничений, подтверждена их вероятностно-статистической обработкой.

Результаты

При разработке рациональных режимов обезвоживания джекфрута с защитным покрытием необходимо соблюдать следующие технологические ограничения: температура теплоносителя не должна быть более 100°C , так как выше этого предела прочностные характеристики защитного материала заметно снижаются, ухудшаются сенсорные характеристики фруктов (Jianyong, 2016, p. 1124), подвергаемых консервации влагоудалением, что приводит к потере питательных веществ; скорость теплоносителя не должна превышать значения, соответствующего критической скорости уноса продукта; согласно требованиям TCVN 4594-1988 сухофрукты должны быть желтого цвета с характерным ароматом без посторонних запахов, с влажностью не выше 25%, без содержания внешних сахаров. В Таблице 1 и на Рисунке 1 приведены массовые и геометрические характеристики объекта обезвоживания. Для определения влажности ломтиков джекфрута применялся метод высушивания в вакууме. Результаты экспериментов по определению влажности объекта исследования с относительной погрешностью не выше $\varepsilon_w = 3,22\%$ представлены в Таблице 2.

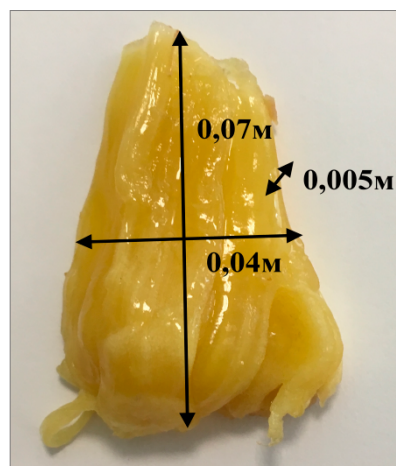


Рисунок 1. Средние габаритные размеры ломтика джекфрута при их средней массе 0,015 кг.

Таблица 1

Массовые и геометрические характеристики ломтика джекфрута

Масса, кг m_d	Длина, м l_d	Ширина, м b_d	Толщина, м h_d
0,017	0,072	0,06	0,006
0,018	0,074	0,02	0,008
-	-	-	-
0,013	0,068	0,04	0,003
0,012	0,067	0,05	0,004
средние значения			
≈0,015	≈0,07	≈0,04	≈0,005

Таблица 2

Данные экспериментов по определению содержания влаги в ломтиках джекфрута

Номер эксперимента	Влажность ломтика джекфрута, W , %	Концентрация связанной воды, %	Концентрация свободной воды, %
1	70,3		36,3
2	74,6		40,6
3	72,8	34	38,8
4	71,9		37,9
5	73,7		39,7
Среднее значение	≈73	≈34	≈39

Принципиальная схема конвективной опытной сушильной установки и ее общий вид показаны на Рисунках 2, 3. Конструкция экспериментальной сушильной установки предусматривает заданную регулировку режимных параметров (температуру и скорость сушильного агента) в необходимых диапазонах. Температура ограничивается 100°C, так как при более высокой температуре появляется высокая вероятность перегрева продукта, скорость сушильного агента ограничивается возможностью вентилятора калорифера, а именно 4,5 м/с.

Учитывая, что при влагоудалении в тонком слое ломтика джекфрута определить изменение влажности в пространственных точках его объема эмпирически очень сложно и технически невозможно, то для получения кинетических уравнений сушки материала использовали способ аппроксимирования опытных кривых обезвоживания, являющихся зависимостью средней по слою влажности от продолжительности процесса (Saxena, Dash, 2015, p. 415).

За варьируемые параметры, определяющие скорость обезвоживания, необходимо принять: температуру сушильного агента (K), его скорость (м/с), которые приведены в Таблице 3.

Таблица 3

Уровни значений влияющих факторов при средней высоте ломтиков джекфрута равной 0,005 м

Температура сушильного агента, °C	Скорость сушильного агента, м/с
50	≈3,1
	≈0,05
73	≈1,5
	≈3,1
98	3,1

В итоге осуществления эмпирического исследования влагоудаления из ломтиков джекфрута получены результаты, графически аппроксимированные в виде кривых сушки, показанных на Рисунках 4, 5.

При проведении определен съём сухого продукта при влагоудалении Y , кг/(м²·ч) или удельная производительность:

$$Y = \frac{M}{\tau \cdot S}, \quad (1)$$

где M – масса ломтиков на длине участка диска, равной длине ломтика (Таблица 1); τ – продолжительность сушки, (час); S – площадь поверхности, (м²).

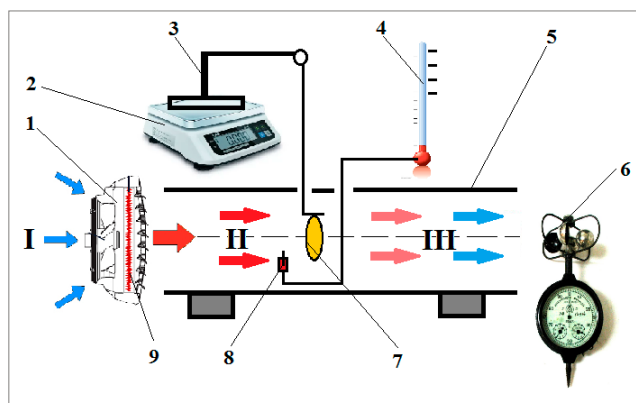


Рисунок 2. Принципиальная схема конвективной опытной сушильной установки: I – потоки холодного воздуха; II – поток сушильного агента с заданной температурой и скоростью; III – поток отработанного сушильного агента.

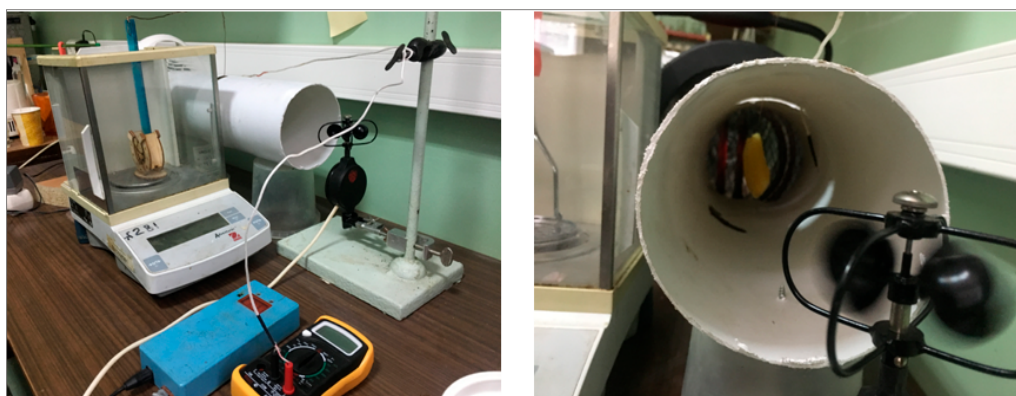


Рисунок 3. Внешний вид конвективной опытной сушильной установки. Экспериментальная сушилка включает: 1 – калорифер; 2 – электронные весы; 3 – приспособление для подвеса образца; 4 – термопара; 5 – рабочая камера; 6 – электронный анемометр; 7 – объект сушки; 8 – температурный датчик; 9 – нагреватель калорифера.

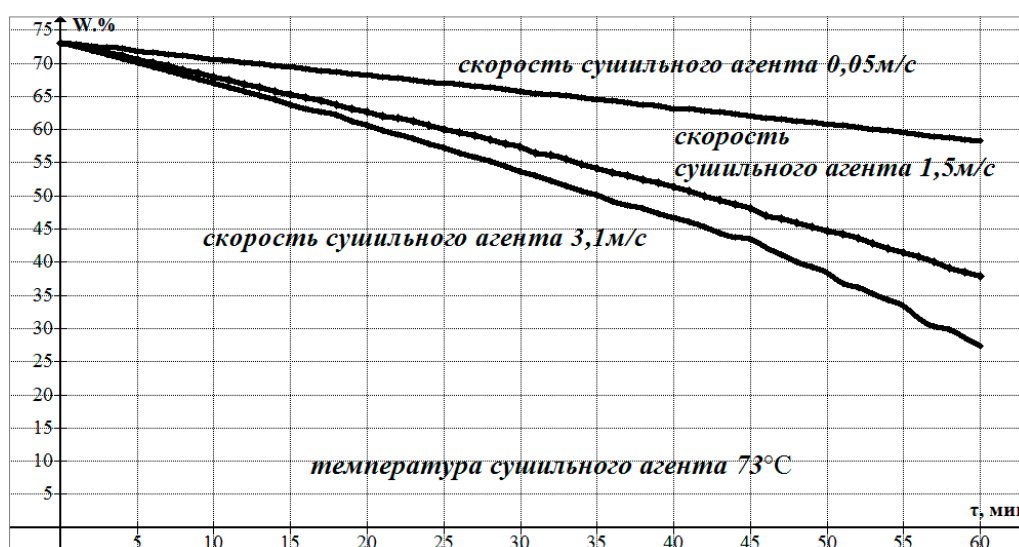


Рисунок 4. Кривые конвективной сушки ломтиков джефрута при следующих параметрах: $T_{c.a.} = 73^{\circ}\text{C}$ и $v_{c.a.} = 0,05 \text{ м/с}$; $T_{c.a.} = 73^{\circ}\text{C}$ и $v_{c.a.} = 1,5 \text{ м/с}$; $T_{c.a.} = 73^{\circ}\text{C}$ и $v_{c.a.} = 3,1 \text{ м/с}$

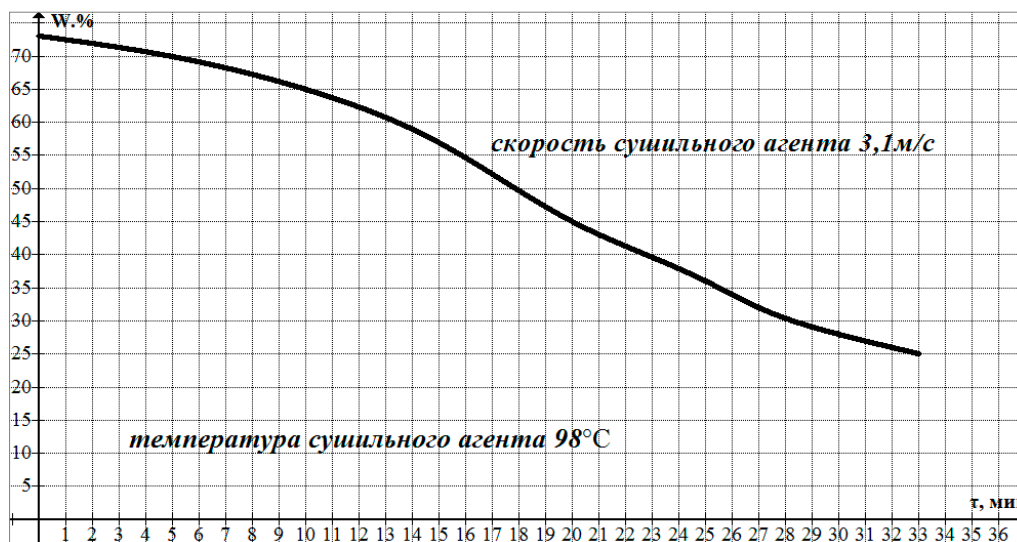


Рисунок 5. Кривая конвективной сушки ломтиков джекфрута при параметрах: $T_{c.a.} = 98^{\circ}\text{C}$ и $v_{c.a.} = 3,1 \text{ м/с}$

Масса ломтиков M на длине участка диска зависит от их количества n_L , которое можно рассчитать следующим образом:

$$n_L = \frac{2\pi R}{l_L}, \quad (2)$$

тогда:

$$M = \frac{2\pi R}{l_L} \cdot m_L, \quad (3)$$

где R – радиус диска сушилки, (м). Если принять, что наиболее рациональным диаметром дискового ротора для сушки ломтиков джекфрута будет диаметр 5 м, то $R = 2,5 \text{ м}$.

Продолжительность сушки, исходя из опытных данных (Рисунок 5), равна 33 минутам или 0,55 часа, к тому же она обратно пропорционально связана с частотой вращения диска n , (об/час):

$$\tau = \frac{1}{n} \quad (4)$$

Площадь рабочей поверхности S зависит от длины участка и ширины ломтика b_L (Таблица 1), поэтому:

$$S = b_L \cdot 2\pi R, \quad (5)$$

Учитывая соотношения 1-5, получим зависимость удельной производительности Y от частоты вращения сушильного диска:

$$Y = \frac{2\pi R \cdot m_L \cdot n}{l_L \cdot b_L \cdot 2\pi R} = \frac{m_L}{l_L \cdot b_L} \cdot n, \quad (6)$$

Приняв во внимание опытные данные, можно определиться с частотой вращения сушиль-

ного диска n (об/час), при этом следует учесть, что продукт, подвергаемой сушке за 0,55 часа не должен делать полный оборот вместе с ротором, так как необходим участок для загрузки, выгрузки и поверхностной обработки материала. Этот участок может составлять около 20% от полного оборота сушильного диска, в этом случае частота вращения сушильного диска будет равна:

$$n = \frac{0,8}{0,55} = 1,45 \text{ об/час.}$$

Расчетное число оборотов рабочего диска не превышает предельную скорость вращения, рекомендованную для роторных аппаратов.

Таким образом, можно рассчитать удельную производительность разрабатываемой установки в зависимости от заданных частоты вращения сушильного диска, геометрических и массовой характеристик объекта сушки, которая равна:

$$Y = \frac{0,005}{0,07 \cdot 0,04} \cdot 1,45 = 2,59 \text{ кг/(м}^2 \cdot \text{ч)}.$$

Анализ механизма внутреннего массопереноса в процессе влагоудаления из ломтиков джекфрута осуществляют, опираясь на термодинамический анализ взаимодействия материала с водой, проведенный авторами ранее при изучении гигроскопических характеристик объекта исследования (Нгуен, Нугманов, Арабова, Нугманова, 2019, с. 219) и кинетическую кривую, описывающую зависимость интенсивности (скорости) высушивания от влажности образца, определенную путем аппроксимации кривой обезвоживания (Рисунок 5), что представлено уравнением:

$$W = 0,00215\tau^3 - 0,1216\tau^2 + 0,227\tau + 72,598, \quad (7)$$

где W – влажность ломтиков джекфрута, %; τ – продолжительность сушки, мин.

Для упрощения получения кинетической зависимости $\frac{dC}{d\tau} = f(C)$ представлена кривая сушки в

виде $\tau = f(C)$ с погрешностью аппроксимации

1,5% в виде:

$$\tau = 0,000503C^3 - 0,08063C^2 + 4,6876C - 77,179, \quad (8)$$

где τ – продолжительность сушки, мин; C – концентрация сухих веществ в ломтике джекфрута, %.

После взятия производной от $\tau = f(C)$ имеем

$$\frac{d\tau}{dC} = f'(C) \text{ и в итоге } \frac{dC}{d\tau} = 1 / (f'(C)) \text{ кг/(кг·с),}$$

которая представлена графически (Рисунок 6) и в виде математической зависимости:

$$\frac{dC}{d\tau} = \frac{1}{0,001509C^2 - 0,16126C + 4,6876} \quad (9)$$

Математическая модель тепломассопереноса, представленная ниже в виде дифференциального уравнения, ввиду сложности ее аналитического решения, реализована методом конечных разностей с учетом кинетических закономерностей

Дифференциальное уравнение, описывающее перенос тепловой энергии в одномерном случае, имеет следующую формулировку (Лыков, 1968, с. 288):

$$c \cdot \rho \cdot \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \varepsilon \cdot r \cdot \rho \cdot \frac{\partial W}{\partial \tau} + w, \quad (10)$$

где x – координата глубины образца, м; r – теплота, расходуемая на образование пара и разрушение связи воды с сухим веществом, Дж/

кг; ρ – плотность материала, кг/м³; C – массовая теплоемкость; где λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К); $\varepsilon = 1$ – коэффициент фазовых

переходов при переносе воды преимущественно в парообразном виде; $\partial W / \partial \tau$ – скорость

удаления воды, кг/(кг·с); W – функция распределения объемной плотности поглощенной энергии внутри образца.

При решении модели W заменена содержанием

сухого остатка C , учитывая, что $C = 1 - W$. После преобразования с учетом предлагаемого варианта сушки уравнение (10) приобретает следующую форму:

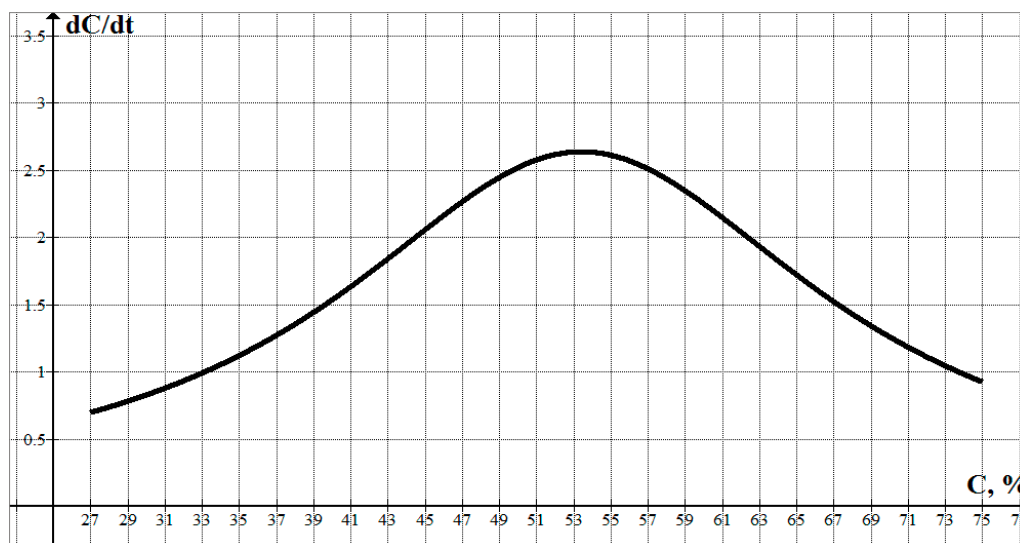


Рисунок 6. Кривая скорости сушки ломтиков джекфрута при параметрах: $T_{c.a.} = 98^\circ\text{C}$ и $v_{c.a.} = 3,1 \text{ м/с}$

$$\frac{\partial T}{\partial C} = \frac{a}{\partial C} \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{rp}{c_v}, \quad (11)$$

где a – температуропроводность материала, $\text{м}^2/\text{с}$; $c_v = cp$ – объемная теплоемкость материала, $\text{Дж}/(\text{м}^3 \cdot \text{К})$.

Условия на всей границе фазового раздела при однозначном двухстороннем теплообмене имеют вид:

$$-\lambda(c) \frac{\partial T}{\partial x} = \alpha(T_{c.a} - T_{пов}), \quad (12)$$

где α – коэффициент теплоотдачи, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$; $T_{c.a}$ – температура теплоносителя; $T_{пов}$ – на границе между образцом и теплоносителем, К .

За начальное условие принята постоянная по объему образца исходная температура объекта.

Для определения эволюции полей температур по объему объекта обработки, состоящего из ломтика джекфрута и его защитного покрытия,

необходимо комплексно учесть различия их физико-химических характеристик при построении математической модели тепломассопереноса, то есть совместить модели для обоих слоев в одном общем решении. Для решения поставленной задачи были получены комплексные зависимости характеристик по толщине двухслойного объекта обработки.

Физическая плотность, коэффициент теплопроводности, удельная теплоемкость, теплота, расходуемая на образование пара и разрушение связи воды с сухим веществом для реальных диапазонов влажности W покрытия и ломтика по глубине x двухслойного объекта исследования представлены на Рисунках 7, 8, 9, 10 (Максименко, Нгуен, Арапова, Алексанян, Нугманов, 2019, с. 60).

Полученные графические и математические интерпретации зависимости характеристик от влияющих факторов позволяют после подстановки их в математическую модель решить ее с заданной точностью. Решение уравнения (10) было осуществлено путем численного прибли-

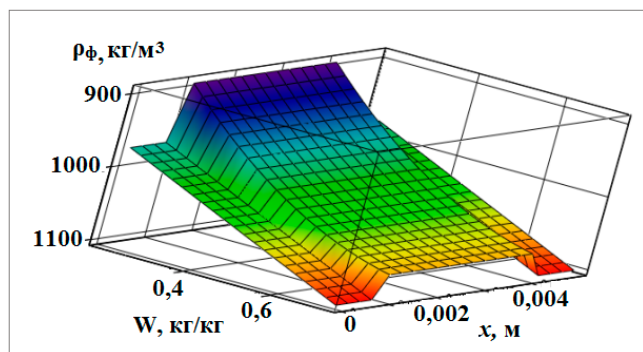


Рисунок 7. Эволюция полей плотности по глубине ломтика в зависимости от его влажности.

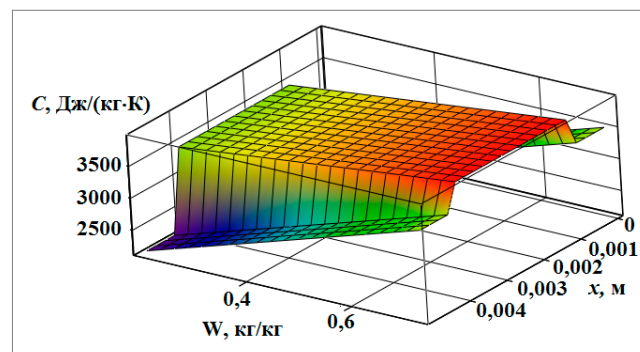


Рисунок 9. Эволюция полей удельной теплоемкости по глубине ломтика в зависимости от его влажности.

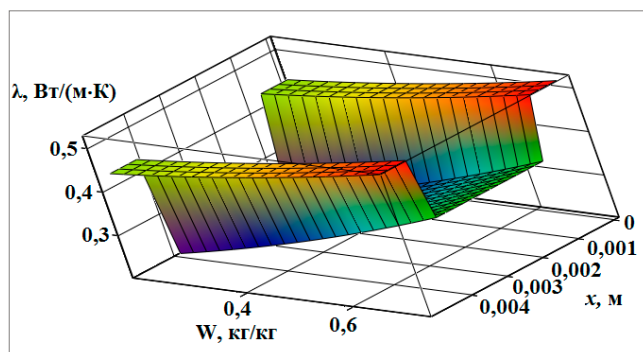


Рисунок 8. Эволюция полей коэффициента теплопроводности по глубине ломтика в зависимости от его влажности.

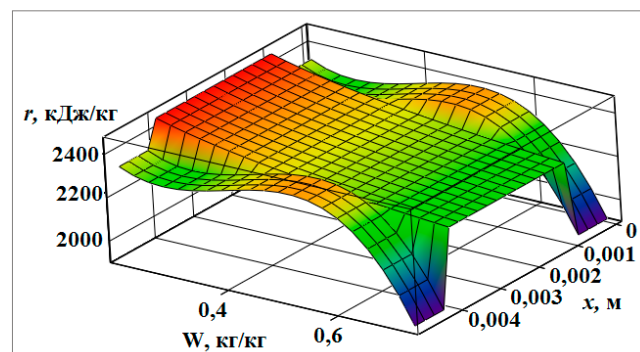


Рисунок 10. Теплота, расходуемая на образование пара и разрушение связи воды с сухим веществом по глубине ломтика в зависимости от его влажности.

женного решения конечно-разностным методом конечных разностей при задании функциональной зависимости на континууме в сетчатой векторной интерпретации, а дифференциалы заменялись разностными аналогами (Алексанян, Буйнов, 2004, с. 222; Пасконов, Полежаев, Чудов, 1984, с. 154-186; Тихонов, Самарский, 2004, с. 136).

В ходе решения математической модели определена эволюция полей температур по толщине ломтика и изменению концентраций с учетом его поверхностной обработки, показанная на Рисунке 10 для ломтика джекфрута конечной толщиной 5 мм.

На Рисунке 12 показана зависимость среднеобъемной T_{cp} , К от C , % на поверхности и внутри ломтика фрукта при конвективной сушке влажного сырья, предварительно поверхностно обработанного биополимерным гелем.

Обсуждение

Вода в пищевых материалах играет значительную роль и определяет их консистенцию, структурные характеристики и устойчивость при дальнейшей переработке или хранении, которая обусловлена соотношением воды в свободном и связанном состоянии в ломтике джекфрута (Таблица 2), так как в свободном состоянии она не связана с тепловым эффектом и более доступна для фазового превращения.

Таким образом, начальная влажность материала составляет в среднем 73%, а требуемая конечная влажность ломтиков джекфрута, принятая с учетом рекомендуемых технологических ограничений для обеспечения качества конечного продукта, равна 25%, и ее значение определено в

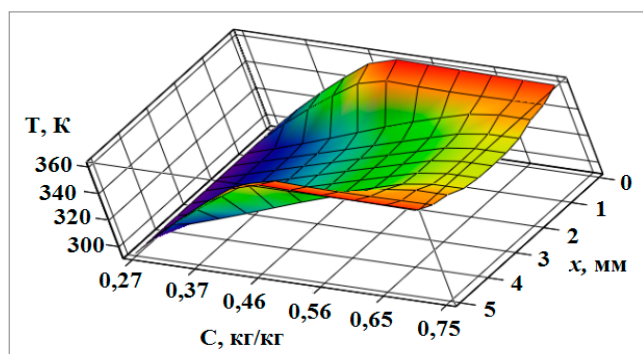


Рисунок 11. Трансформация полей температур при сушке ломтика джекфрута.

ранее проведенных исследованиях гигроскопических характеристик джекфрута и соответствует величине активности воды $A_w = 0,89$ на границе участка изотермы сорбции, где преобладает капиллярно-осмотическая связь влаги с сухим остатком (Нгуен, Нугманов, Арабова, Нугманова, 2019, с. 219).

Следует отметить, что экспериментальное исследование по влагоудалению при параметрах: $T_{c.a.} = 50^\circ\text{C}$ и $v_{c.a.} = 3$ м/с выявило, что продолжительность процесса в этих условиях составляет более 3-х часов, что нерационально и поэтому здесь не представлено. В связи с этим проводились опыты, согласованные со второй частью плана проведения экспериментов, при варьируемых параметрах температуры $70\div 90^\circ\text{C}$ и скорости сушильного агента $0,05\div 3,5$ м/с, часть из которых графически представлена на Рисунке 4.

В результате была определена рациональная скорость сушильного агента, равная 3,1 м/с, а рациональный температурный параметр, который положительно изменялся с шагом 3°C до 94°C в этой серии экспериментов не был выявлен. Поэтому для определения необходимой температуры, при которой продолжительность сушки будет близка к 35 минутам, был снижен шаг изменения параметра до $+1^\circ\text{C}$, а скорость сушильного агента уже не варьировалась и оставалась равной $v_{c.a.} = 3,1$ м/с. Таким образом, необходимая температура, при которой достигалась заданная продолжительность процесса, была определена, и ее значение составляет $T_{c.a.} = 98^\circ\text{C}$ (Рисунок 5).

Полученная в результате реализации предложенного способа удельная производительность превышает этот показатель для известных технологий джекфрута, что подтверждает актуальность исследования и его технико-экономическую обоснованность.

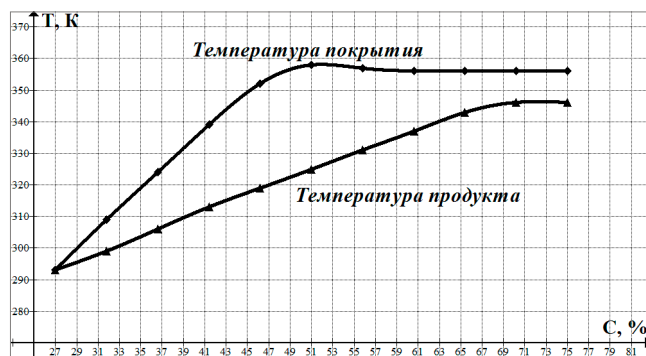


Рисунок 12. Изменение T_{cp} продукта на поверхности и внутри образца при сушке.

На кинетической кривой явно прослеживаются два этапа удаления воды, что не входит в противоречие с теорией сушки (Алексанян, Буйнов, 2004, с. 96; Лыков, 1968, с. 312-346; Никулина, 2018, с. 77-94).

Первый этап, где интенсивность влагоотнятия растет (Рисунок 6), соответствует удалению свободной воды, при котором наблюдается активное парообразование, и снижается вероятность перегрева образца. При этом его незначительную усадку можно не учитывать. При росте относительного содержания сухого остатка уменьшаются расстояния между мицеллами, и формируется внутренняя структура высушенного капиллярно-пористого материала, что обуславливает варьирование скорости сушки температуры образца.

По окончании первого этапа влагоотдачи влажность образца соответствует гигроскопической величине, и начинается удаление воды в связанном состоянии, причем усадка ломтика значительно снижается.

На втором этапе после скоростного экстремума из-за разницы между количеством удаляемой с поверхности образца и продвигающейся из внутренних слоев воды наблюдается углубление зоны парообразования (Алексанян, Буйнов, 2004, с. 176; Лыков, 1968, с. 312-346; Никулина, 2018, с. 77-94). Причем значение температуры стремится к ее значению у теплоносителя, и появляется вероятность локального растрескивания образца. Механизм влагопереноса имеет специфические особенности, обусловленные многослойностью объекта исследования, так как джекфрут и биополимерное покрытие имеют различные физико-химические свойства, что и отражается не только на механизме обезвоживания, но и на температурных режимах сушки двухслойного образца, что в итоге и определяет оригинальные подходы к моделированию удаления влаги из материала.

Из построенных кривых (Рисунок 11) видно, что при любой влажности ломтика и пленки существуют температурные перепады, что свидетельствует о различии физико-химических свойств покрытия и объекта обработки.

Как видно из полученной графической зависимости для биополимерного покрытия, его среднеобъемная температура растет плавно до содержания сухих веществ в нем 50%, что соответствует 1-ой точке перегиба при нагревании

образца и отводе воды в свободном состоянии. При близком к гигроскопическому значению $C = 50\%$ температура покрытия начинает стабилизироваться из-за отвода влаги в связанном состоянии и «парникового» эффекта под покрытием, связанного с увеличением внутреннего давления. Это свидетельствует о высвобождении структурной влаги при уменьшении толщины капиллярных стенок, площади поперечного сечения капилляров и пор, а также об их частичном разрушении.

После второй характерной точки при $C = 65\%$ наблюдается окончательное выравнивание температуры, вследствие становления устойчивой структуры защитной пленки. Максимального значения температура покрытия достигает в интервале $C = 50 \div 65$.

Значения концентрации сухого остатка и температур по слою защитного покрытия не превышают критических величин 360 К, что предопределяет сохранение качественных показателей сухих долек джекфрута.

Исходя из полученной графической зависимости (Рисунок 12) видно, что среднеобъемная температура ломтика джекфрута плавно растет до содержания сухих веществ в нем 65%, что соответствует первой характерной точке на кривой. При значении концентрации сухого остатка в ломтике, близком к гигроскопическому, его температура меняется незначительно при активном влагопереносе из ломтика в защитное покрытие. В дальнейшем температура образца может увеличиваться из-за теплового эффекта при отнятии воды в связанном состоянии, но по предлагаемой технологии итоговая влажность имеет величину не более 25%, что исключает негативный рост температуры.

При этом малые температурные перепады положительно влияют на сохранение качества продукта при сушке растительных продуктов (Алексанян, Буйнов, 2004, с. 165-176; Никулина, 2018, с. 77-94).

Среднеобъемные величины температур ломтика джекфрута, равные $330 \div 345$ К, не выходят за рамки технологических ограничений (Калинин, 2009, с. 2; Неменуша, Степанищева, Соломатин, 2009, с. 69-113). Таким образом, разработанные температурные режимы конвективной сушки ломтиков джекфрута, поверхностно обработанных биополимерным гелем, могут быть рекомендованы для внедрения в производственную практику.

Выводы

1. Установлены кинетические закономерности процесса конвективной сушки ломтиков джекфрута как двухслойного объекта, и построены кривые скорости удаления воды, определены рациональные время и режимные параметры обезвоживания.
2. При варьировании в рамках технологических ограничений параметров, влияющих на интенсивность обезвоживания, определена зависящая от их величины удельная производительность процесса и ее рациональное значение.
3. Опираясь на термодинамический анализ закономерностей взаимодействия материала с водой и протекания процессов переноса тепловой энергии и вещества, выявлены специфические особенности при удалении влаги из двухслойного объекта при конвективном энергоподводе.
4. Численно решена модель переноса тепловой энергии и вещества, рассчитана эволюция полей температур в образце при сушке.

Теоретическая значимость данного исследования обусловлена тем, что на основе ранее проведенного изучения физико-химических свойств объекта обезвоживания и защитного покрытия исследован процесс его конвективной сушки, как двухслойного материала с конечным содержанием сухих веществ 75%.

Полученные результаты позволили определить рациональные режимы обезвоживания, обеспечивающие устойчивость на поверхности ломтика нанесенного защитного покрытия, что способствует увеличению сроков его хранения при конечной влажности 25%, а также снижению энергоемкости реализуемого процесса консервации обезвоживанием. Обоснована возможность использования биополимерного покрытия на основе альгината натрия при сушке ломтиков джекфрута.

Литература

Алексамян И.Ю., Буйнов А.А. Высокоинтенсивная сушка пищевых продуктов. Пеносушка. Теория. Практика. Моделирование: монография. Астрахань: АГТУ, 2004. 380 с.

- Гинзбург А.С., Громов М.А. Теплофизические характеристики картофеля, овощей и плодов. М.: Агропромиздат, 1987. 272 с.
- Джекфрут, что это? Вегетарианцы торжествуют. Наконец нашелся тот самый плод. URL: <https://likeni.info/dzhekfrut/> (дата обращения: 15.07.2019).
- Калинин А.Б. Совершенствование систем хранения картофеля и овощей // Сельскохозяйственные Вести. 2009. № 3. URL: <https://agri-news.ru/zhurnal/2009/%E2%84%963/2009/xranenie/sovershenstvovanie-sistem-xraneniya-kartofelya-i-ovoshhej.html> (дата обращения: 19.07.2019).
- Лыков А.В. Теория сушки. М.: Энергия, 1968. 471 с.
- Максименко Ю.А., Нгуен Т.С., Арапова З.М., Алексамян И.Ю., Нугманов А.Х.-Х. Теплофизические и структурно-механические характеристики ломтиков джекфрута // Индустрия питания. 2019. Т. 4. № 4. С. 53-63.
- Нгуен Т.С., Нугманов А.Х.-Х., Арапова З.М., Нугманова А.А. Вычисление энергии на испарение связанной влаги из джекфрута // Известия КГТУ. 2019. № 55. С. 214-225.
- Неменуша Л.А., Степанищева Н.М., Соломатин Д.М. Современные технологии хранения и переработки плодоовощной продукции. М.: ФГНУ «Росинформагротех», 2009. 172 с.
- Никулина М.А. Совершенствование процесса инфракрасной сушки пищевой съедобной пленки: дис ... канд. техн. наук: 05.18.12: утв. 05.12.18. Санкт-Петербург, 2018. 228 с.
- Пасконов В.М., Полежаев В.И., Чудов Л.А. Численное моделирование процессов тепло-массообмена. М.: Наука, 1984. 288 с.
- Постановление правительства СПб № 1819/QĐ-TTg от 16.11.2017. URL: <https://thuvienphapluat.vn/van-ban/Linh-vuc-khac/Quyet-dinh-1819-QĐ-TTg-2017-phe-duyet-Ke-hoach-co-cau-lai-nganh-nong-nghiep-367693.aspx> (дата обращения: 13.07.2019).
- Роторная сушилка: пат. 2520752 Рос. Федерация. № 2013115610/06 / Остриков А.Н., Шевцов С.А., Столяров И.Н.; заявл. 05.04.2013; опубл. 27.06.2014, Бюл. № 18. 6 с.
- Состав биодegradируемой полимерной композиции для обработки пищевых продуктов: пат. 2649981 Рос. Федерация. № 2017120355 / Подшивалов А.В., Захарова М.В., Успенская М.В., Самуйлова Е.О.; заявл. 09.06.2017; опубл. 06.04.2018, Бюл. № 10. 5 с.
- Способ формирования защитного покрытия для хранения рыбной продукции: пат. 2297151 Рос. Федерация. № 2005119909/13 / Маслова Г.В., Сподобина Л.А., Красавцев В.Е., Нудьга Л.А.,

- Петрова В.А., Бочек А.М., Панарин Е.Ф.; заявл. 27.06.2005; опубл. 20.04.2007, Бюл. № 11. 6 с.
- Способ хранения плодовоовощной и растениеводческой продукции: пат. 2325811 Рос. Федерация. № 2006123023/13 / Швец В.Ф., Гудковский В.А., Козловский Р.А., Кустов А.В.; заявл. 28.06.2006; опубл. 10.06.2008, Бюл. № 16. 7 с.
- Способ хранения сельскохозяйственной продукции: пат. 2525722 Рос. Федерация. № 2013108726/13 / Ханикян В.Л.; заявл. 28.02.2013; опубл. 20.08.2014, Бюл. № 23. 5 с.
- Средство для защиты пищевых продуктов от порчи, способ защиты пищевых продуктов от порчи: пат. 2322160 Рос. Федерация. № 2006106039/13 / Ткаченко Ю.А., Кулькин М.Ю.; заявл. 26.02.2006; опубл. 20.04.2008, Бюл. № 11. 11 с.
- Тихонов А.Н., Самарский А.А. Уравнения математической физики. М.: Наука, 2004. 798 с.
- Хабибуллина Л.Ф., Сидоров Ю.Д. Применение композиций на основе полимеров для повышения сохраняемости плодовоовощной продукции // Вестник технологического университета. 2017. Т. 20. № 19. С. 146–150.
- Bird R.B., Stewart W.E., Lightfoot E.N. Transport Phenomena. New York: Wiley, 2002. 895 p.
- Công nghệ chế biến thực phẩm. URL: <http://doan.edu.vn/do-an/de-tai-tim-hieu-cong-nghe-che-bien-thuc-pham-25508/> (дата обращения: 18.07.2019).
- Couper J.R., Penny W.R., Fair J.R., Walas S.M. Chemical Process Equipment: Selection and Design. London: Elsevier, 2005. 814 p.
- Gavin P., Towler R., Sinnott K. Chemical Engineering Design: Principles, Practice and Economics of Plant and Process Design. Amsterdam, Boston: Elsevier, 2008. 1245 p.
- Kudra T., Mujumdar A.S. Advanced Drying Technologies. New York: Taylor&Francis, 2009. 500 p.
- Mujumdar A.S. Handbook of Industrial Drying. New York: Taylor&Francis, 2007. 1280 p.
- Rana S.S., Pradhan R.C., Mishra S. Optimization of chemical treatment on fresh cut tender jackfruit slices for prevention of browning by using response surface methodology // International food research journal. 2018b. Vol. 25. No. 1. P. 196–203.
- Rana S.S., Pradhan R.C., Mishra S. Variation in properties of tender jackfruit during different stages of maturity // J Food Sci Technol. 2018a. Vol. 55. No. 6. P. 2122–2129.
- Saxena J., Dash K.K. Drying kinetics and moisture diffusivity study of ripe Jackfruit // International food research journal. 2015. Vol. 22. No. 1. P. 414–420.
- Sazhin B.S., Sazhin V.B. Scientific Principles of Drying Technology. New York: Begell House, 2007. 497 p.
- Smith R. Chemical Process Design and Integration. Chichester; Hoboken: Wiley, 2005. 687 p.
- Yi J., Zhou L., Bi J. Influence of pre-drying treatments on physicochemical and organoleptic properties of explosion puff dried jackfruit chips // J Food Sci Technol. 2016. Vol. 53. No. 2. P. 1120–1129.

Study of Kinetic Laws and Modeling of Heat and Mass Transfer During Jackfruit Drying

Igor Yu. Aleksanyan

*Astrakhan State Technical University
16, Tatisheva str., Astrakhan, 414056, Russian Federation
E-mail: albert909@yandex.ru*

Yuriy A. Maksimenko

*Astrakhan State Technical University
16, Tatisheva str., Astrakhan, 414056, Russian Federation
E-mail: albert909@yandex.ru*

Albert H.-H. Nugmanov

*Astrakhan State Technical University
16, Tatisheva str., Astrakhan, 414056, Russian Federation
E-mail: albert909@yandex.ru*

Thi Sen Nguyen

*Astrakhan State Technical University
16, Tatisheva str., Astrakhan, 414056, Russian Federation
E-mail: albert909@yandex.ru*

Recently, the breadfruit (jackfruit) is gaining popularity in the world, especially among vegetarians, due to the fact that its fruits give energy due to the presence of simple sugars (fructose and sucrose) in it, while it does not contain fat and bad cholesterol, making it an excellent source of energy. In order to preserve this product, it is recommended to use biodegradable polymer coatings to increase shelf life with maximum preservation of nutritional value. The aim of the work is to develop rational operating parameters for drying jackfruit slices with protective biocoating and to simulate heat and mass transfer.

To achieve this goal, the kinetic laws of the process of convective drying of jackfruit slices as a two-layer object were established and the curves of the rate of water removal were constructed. When varying within the technological limitations of the parameters affecting the intensity of dehydration, the specific productivity of the process and its rational value, depending on their value, are determined. Based on an analysis of the laws governing the processes of transfer of thermal energy and matter, their specific features are revealed when moisture is removed from a two-layer object. The model of transfer of thermal energy and matter was numerically solved and the evolution of temperature fields in the sample during drying was calculated. The results made it possible to determine rational dehydration regimes that ensure stability on the surface of the slice of the applied protective coating, which helps to increase its shelf life at a final moisture content of 25%, as well as reduce the energy intensity of the dehydration preservation process, which is substantiated. The possibility of using a biopolymer coating based on sodium alginate when drying jackfruit slices is substantiated.

Keywords: jackfruit characteristics, sodium alginate, protective food coatings, convective energy supply, drying curves, mathematical approximation of kinetic drying curves, temperature dehydration conditions

References

- Aleksanyan I.Yu., Buynov A.A. Vysokointensivnaya sushka pishchevykh produktov. Penosushka. Teoriya. Praktika. Modelirovaniye [High intensity food drying. Foam dryer. Theory. Practice. Modeling]. Astrakhan: AGTU, 2004. 380 p.
- Ginzburg A.S., Gromov M.A. Teplofizicheskiye kharakteristiki kartofelya, ovoshchey i plodov [Thermophysical characteristics of potatoes, vegetables and fruits]. Moscow: Agropromizdat, 1987. 272 p.
- Dzhekfrut, chto eto? Vegetariantsy torzhestvuyut. Nakonets nashelsya tot samyy plod [Jackfruit, what is it? Vegetarians triumph. Finally found

- the very fruit of the]. URL: <https://likeni.info/dzhekfrut/> (accessed 15.07.2019).
- Kalinin A.B. Sovershenstvovaniye sistem khraneniya kartofelya i ovoshchey [Improving storage systems for potatoes and vegetables]. *Selskokhozyaystvennyye Vesti* [Agricultural News], 2009, no. 3. URL: <https://agri-news.ru/zhurnal/2009/%E2%84%963/2009/xranenie/sovershenstvovanie-sistem-xraneniya-kartofelya-i-ovoshhej.html> (accessed 19.07.2019).
- Lykov A.V. Teoriya sushki [Drying theory]. Moscow: Energiya, 1968. 471 p.
- Maksimenko Yu.A., Nguyen T.S., Arabova Z.M., Aleksanyan I.Yu., Nugmanov A.Kh.-Kh. Teplofizicheskiye i strukturno-mekhanicheskiye kharakteristiki lomtikov dzhekfruta [Thermophysical and structural-mechanical characteristics of jackfruit slices]. *Industriya pitaniya* [Food Industry], 2019, vol. 4, no. 4, pp. 53-63.
- Nguyen T.S., Nugmanov A.Kh.-Kh., Arabova Z.M., Nugmanova A.A. Vychisleniye energii na ispareniye svyazannoy vlagi iz dzhekfruta [Calculation of energy for the evaporation of bound moisture from jackfruit]. *Izvestiya KGTU* [Izvestiya KSTU], 2019, no. 55, pp. 214-225.
- Nemenushchaya L.A., Stepanishcheva N.M., Solomatin D.M. Sovremennyye tekhnologii khraneniya i pererabotki plodoovoshchnoy produktsii [Modern technologies of storage and processing of fruits and vegetables]. Moscow: FGUN "Rosinformagrotekh", 2009. 172 p.
- Nikulina M.A. Sovershenstvovaniye protsessa infrakrasnoy sushki pishchevoy syedobnoy plenki: Dis. kand. tekhn. nauk [Improving the process of infrared drying of edible film. Ph.D. (Technology) thesis]. Sankt-Peterburg, 2018. 228 p.
- Paskonov V.M., Polezhayev V.I., Chudov L.A. CHislennoye modelirovaniye protsessov teplo-massoobmena [Numerical modeling of heat and mass transfer processes]. Moscow: Nauka, 1984. 288 p.
- Postanovleniye pravitelstva SRV [Government Order of the Socialist Republic of Vietnam]. URL: <https://thuvienphapluat.vn/van-ban/Linh-vuc-khac/Quyet-dinh-1819-QD-TTg-2017-phe-duyet-Ke-hoach-co-cau-lai-nganh-nong-nghiep-367693.aspx> (assecced 13.07.2019).
- Rotornaya sushilka [Rotary dryer]: Pat. 2520752 Russian Federation, IPC F26B 15/04 (2006.01). No. 2013115610/06. Ostrikov A.N., Shevtsov S.A., Stolyarov I.N.; applicant and patent holder FSBEI of HE "Voronezh State University of Engineering Technology"; declared 04.05.2013; publ. 06.27.2014, bulletin no. 18. 6 p.
- Sostav biodegradiruyemoy polimernoy kompozitsii dlya obrabotki pishchevykh produktov [The composition of the biodegradable polymer composition for food processing]: Pat. 2649981 Russian Federation, IPC A23B 4/10 (2006.01). No. 2017120355. Podshivalov A.V., Zakharova M.V., Uspenskaya M.V., Samuylova E.O.; applicant and patent holder LLC "Scientific Production Firm SmartMaterials"; declared 06.09.2017; publ. 04.06.2018, bulletin. no. 10. 5 p.
- Sposob formirovaniya zashchitnogo pokrytiya dlya khraneniya rybnoy produktsii [A method of forming a protective coating for storing fish products]: Pat. 2297151 Russian Federation, IPC A23B 4/10 (2006.01), A23P 1/08 (2006.01). No. 2005119909/13. Maslova G.V., Spodobina L.A., Krasavtsev V.E., Nudga L.A., Petrova V.A., Bohek A.M., Panarin E.F.; applicant and patent holder FSUE "GIPRORYBFLOT"; declared 06.27.2005; publ. 04.20.2007, bulletin no. 11. 6 p.
- Sposob khraneniya plodoovoshchnoy i rasteniyevodcheskoy produktsii [The method of storage of fruits and vegetables and crop products]: Pat. 2325811 Russian Federation, IPC A23B 7/152 (2006.01). No. 2006123023/13. Shvets V.F., Gudkovsky V.A., Kozlovsky R.A., Kustov A.V.; applicant and patent holder LLC "Fito-Mag"; declared 06.28.2006; publ. 06.10.2008, bulletin no. 16. 7 p.
- Sposob khraneniya selskokhozyaystvennoy produktsii [The method of storage of agricultural products]: Pat. 2525722 Russian Federation, IPC A01F 25/00 (2006.01), A23B 7/152 (2006.01). No. 2013108726/13. Khanikyan V.L.; applicant and patent holder LLC "AlXiTech"; declared 02.28.2013; publ. 08.20.2014, bulletin no. 23. 5 p.
- Sredstvo dlya zashchity pishchevykh produktov ot porchi, sposob zashchity pishchevykh produktov ot porchi [Means for protecting food from spoilage, a method of protecting food from spoilage]: Pat. 2322160 Russian Federation, IPC A23L 3/00 (2006.01), A23P 1/08 (2006.01), B65D 65/42 (2006.01), B65D 81/24 (2006.01), A22C 13/00 (2006.01). No. 2006106039/13. Tkachenko Yu.A., Kulkin M.Yu; applicant and patent holder LLC "Beresta-EcoDom"; declared 02.26.2006; publ. 04.20.2008, bulletin no. 11. 11 p.
- Tikhonov A.N., Samarskiy A.A. Uravneniya matematicheskoy fiziki [Equations of mathematical physics]. Moscow: Nauka, 2004. 798 p.
- Khabibullina L.F., Sidorov Yu.D. Primeneniye kompozitsiy na osnove polimerov dlya povysheniya sokhranyayemosti plodoovoshchnoy produktsii [The use of polymer-based compositions to increase the shelf life of fruits and vegetables]. *Vestnik tekhnologicheskogo universiteta* [Bulletin of the Technological University], 2016, vol. 20, no. 19, pp. 146-150.

- Bird R.B., Stewart W.E., Lightfoot E.N. Transport Phenomena. New York: Wiley, 2002. 895 p.
- Công nghệ chế biến thực phẩm. URL: <http://doan.edu.vn/do-an/de-tai-tim-hieu-cong-nghe-che-bien-thuc-pham-25508/> (accessed 18.07.2019).
- Couper J.R., Penny W.R., Fair J.R., Walas S.M. Chemical Process Equipment: Selection and Design. London: Elsevier, 2005. 814 p.
- Gavin P., Towler R., Sinnott K. Chemical Engineering Design: Principles, Practice and Economics of Plant and Process Design. Amsterdam, Boston: Elsevier, 2008. 1245 p.
- Kudra T., Mujumdar A.S. Advanced Drying Technologies. New York: Taylor&Francis, 2009. 500 p.
- Mujumdar A.S. Handbook of Industrial Drying. New York: Taylor&Francis, 2007. 1280 p.
- Rana S.S., Pradhan R.C., Mishra S. Variation in properties of tender jackfruit during different stages of maturity. *J Food Sci Technol*, 2018a, vol. 55, no. 6, pp. 2122-2129.
- Rana S.S., Pradhan R.C., Mishra S. Optimization of chemical treatment on fresh cut tender jackfruit slices for prevention of browning by using response surface methodology. *International food research journal*, 2018b, vol. 25, no. 1, pp. 196-203.
- Sazhin B.S., Sazhin V.B. Scientific Principles of Drying Technology. New York: Begell House, 2007. 497 pp.
- Saxena J., Dash K.K. Drying kinetics and moisture diffusivity study of ripe Jackfruit. *International food research journal*, 2015, vol. 22, no. 1, pp. 414-420.
- Smith R. Chemical Process Design and Integration. Chichester; Hoboken: Wiley, 2005. 687 p.
- Yi J., Zhou L., Bi J. Influence of pre-drying treatments on physicochemical and organoleptic properties of explosion puff dried jackfruit chips. *J Food Sci Technol*, 2016, vol. 53, no. 2, pp. 1120-1129.