

Гигроскопические исследования джекфрута как объекта сушки

Тхи Сен Нгуен*, И. Ю. Алексанян^{ID}, А. Х.-Х. Нугманов^{ID}, Л. М. Титова



Дата поступления в редакцию: 01.08.2019
Дата принятия в печать: 15.10.2019

ФГБОУ ВО «Астраханский государственный
технический университет»,
414056, Россия, Астрахань, ул. Татищева, 16

*e-mail: albert909@yandex.ru



© Тхи Сен Нгуен, И. Ю. Алексанян, А. Х.-Х. Нугманов, Л. М. Титова, 2019

Аннотация. Изучение статистики процесса удаления влаги из материалов опирается на исследование закономерностей взаимодействия между парогазовой средой и объектом обезвоживания при стремлении к термодинамически равновесному состоянию. Для влажных термолabile материалов, к которым относится плод джекфрута, при статическом равновесии между продуктом и окружающей средой, содержание в нем воды в гигроскопическом состоянии зависит от его вида и энергии, влажности и ряда параметров, в частности, температуры и парциального давления его паров над поверхностью объекта. Авторами построены графические зависимости активности воды ломтиков джекфрута от влажности при различных температурах окружающей среды, их аналогия в полулогарифмических координатах, на основе которых был выявлен диапазон влажностей, определяющих вид связи влаги объекта исследования с сухим остатком. Изучение закономерностей механизма тепло- и массопереноса является актуальным при определении динамики процесса обезвоживания и является предпосылкой для выявления путей интенсификации процесса удаления влаги при рациональных режимных параметрах. Исследование авторами статьи состояний равновесия в системе дает возможность найти движущую силу влагопереноса, оценить потенциал теплоносителя, обосновать значения параметров объекта исследования и внешней среды при хранении и транспортировке готовой сухой продукции. Величина относительного влагосодержания в состоянии равновесия, определяемая по изотермическим сорбционным кривым, обусловлена предварительной обработкой объекта сушки, условиями его контакта с внешней средой, а также энергией и видом взаимосвязи сухого остатка и влаги. Полученные авторами эмпирические результаты, оформленные в виде графических зависимостей, позволили теоретически получить их математическую аппроксимацию, получая уравнения зависимости между равновесной влажностью материала и относительной влажностью паровоздушной среды, которые включают множество констант, которые также надо определять эмпирически. Опираясь на полученные математические зависимости, аппроксимирующие изотермические кривые сорбции, то есть связь между влажностью продукта и показателями активности воды, можно провести термодинамический анализ процесса сорбции и определить величины свободной, связанной и внутренней энергий процесса поглощения влаги исследуемым капиллярно пористым телом. Полученный результат гигроскопического исследования плодов джекфрута также необходим и при принятии конструкторских решений для рационального осуществления технологических операций, включая операции по хранению и транспортировке готовых сухих ломтиков плодов джекфрута.

Ключевые слова. Гигроскопические свойства, равновесное состояние, влагосодержание, активность воды, изотермическая кривая сорбции, джекфрут

Для цитирования: Гигроскопические исследования джекфрута как объекта сушки / Т. С. Нгуен, И. Ю. Алексанян, А. Х.-Х. Нугманов [и др.] // Техника и технология пищевых производств. – 2019. – Т. 49, № 4. – С. 612–620. DOI: <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2019-4-612-620>.

Original article

Available online at <http://fptt.ru/eng>

Jackfruit as an Object of Drying: A Hygroscopic Study

Thi Sen Nguyen*, I.Yu. Aleksanyan^{ID}, A.H.-H. Nugmanov^{ID}, L.M. Titova

Received: August 01, 2019
Accepted: October 15, 2019

Astrakhan State Technical University,
16, Tatischeva Str., Astrakhan, 414056, Russia

*e-mail: albert909@yandex.ru



© Thi Sen Nguyen, I.Yu. Aleksanyan, A.H.-H. Nugmanov, L.M. Titova, 2019

Abstract. Statics of drying is based on the laws of interaction between the gas medium and the dehydration facility, which seek a thermodynamically equilibrium state. Jackfruit is a wet thermolabile material. With a static equilibrium between the product and the environment, the water content in a hygroscopic state depends on the type of the product, its energy, humidity, and a number

of parameters, e.g. temperature and partial pressure of the vapor on the surface. The paper introduces graphical dependences of the activity of water of jackfruit slices on humidity at various ambient temperatures. The authors also give its analogy in semilogarithmic coordinates. It helped to define a range of humidity that determined the type of connection between the moisture of the object and the dry residue. The laws of the mechanism of heat and mass transfer are relevant in determining the dynamics of the dehydration process. Their study can help to intensify the process of moisture removal with rational operating parameters. The present study featured the equilibrium states in the system, which made it possible to find the driving force of moisture transfer and to evaluate the heat carrier potential, as well as to substantiate the values of the parameters and the environment during storage and transportation of the finished dry product. The value of relative moisture content in equilibrium was determined by isothermal sorption curves. The value depends on the pre-treatment of the drying object, the conditions of its contact with the external environment, as well as by the energy and type of relationship between the dry residue and the moisture. The empirical results were arranged in the form of graphical dependences, which made it possible to theoretically obtain their mathematical approximation. The equations of dependence between the equilibrium moisture content of the material and the relative humidity of the vapor-air medium included a lot of constants, which also needed to be determined empirically. The mathematical dependences approximate the isothermal sorption curves, i.e. the relationship between the product's moisture and water activity indices. The dependences can be used to conduct a thermodynamic analysis of the sorption process and determine the free, bound, and internal energies of the process of moisture absorption by the capillary-porous object of study. The hygroscopic examination of jackfruit is also necessary when making design decisions for the rational implementation of technological operations, including the storage and transportation of dry jackfruit slices.

Keywords. Hygroscopic properties, equilibrium state, moisture content, water activity, isothermal sorption curve, jackfruit

For citation: Nguyen TS, Aleksanyan IYu, Nugmanov AH-H, Titova LM. Jackfruit as an Object of Drying: A Hygroscopic Study. Food Processing: Techniques and Technology. 2019;49(4):612–620. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2019-4-612-620>.

Введение

Тропический фрукт под названием джекфрут становится все популярнее в мире [1]. Его своеобразный запах и необычный вкус не становится преградой для его распространения в России. При правильном приготовлении и использовании соответствующих продуктов и приправ он оказывается вкусным блюдом, обязательно понравится людям, любящим европейскую кухню.

Плоды (соплодия) джекфрута являются самыми большими съедобными фруктами, произрастающими на деревьях [2]. Длина их может составлять 20 ± 110 см, а в диаметре доходить до 20 см. Вес может достигать 34 кг. Кожура покрыта множеством конусных выступов (рис. 1). Незрелые плоды имеют зелёный цвет, а при созревании приобретают жёлтый оттенок [3]. Внутренняя область плода раздроблена на крупные доли, содержащие сладкую сочную волокнисто-скользкую мякоть желтого цвета. Во всех долях находится продолговатое коричневое семя размером примерно 6 см.



Рисунок 1. Джекфрут натуральный

Figure 1. Jackfruit

В Россию, как правило, этот плод попадает в виде сухофруктов, привычных к употреблению россиянами. Согласно статистике процент потребления на рынке этого вида завозной из-за рубежа продукции составляет примерно 85 % [4].

Для влажных термолабильных материалов, к которым относится плод джекфрута, статическое равновесное состояние системы, состоящей из продукта и внешней среды, обусловлено постоянством ее параметров в течение времени [5]. При таком равновесии количество воды в гигроскопичном продукте зависит от его вида и энергии, содержащейся в нем влаги, а также ряда параметров, в частности температуры и парциального давления его паров над поверхностью продукта [6–8]. Исследование состояний равновесия в системе дает возможность найти движущую силу влагопереноса, оценить потенциал теплоносителя, обосновать значения параметров объекта исследования и внешней среды при хранении и транспортировке готовой сухой продукции.

Равновесная сорбционная/десорбционная криволинейная зависимость показывает взаимную связь между относительным содержанием влаги в объекте изучения и влажностью окружающего его воздуха при потоянной температуре t [6, 9]. Эта связь в настоящее время не имеет корректной аналитической формулировки, поэтому она выявляется эмпирически [10, 11].

Объекты и методы исследования

При изучении свойств джекфрутового соплодия исследовались его гигроскопические параметры тензометрической методикой Ван Бамелена, по которой пробы материала находились определенный промежуток времени в эксикаторе с известной влажностью и с различно

концентрированным серноокислым раствором [6, 9–11]. Концентрация раствора при t однозначно обуславливает величину парциального давления паров воды и, как следствие, величину относительной влажности паровоздушной смеси j [12, 13]. Проба взвешивалась на весах с точностью до 0,001 г. После прекращения массового изменения рассчитывалась влажность W_p , при определении которой выявлялась ошибка измерений при дублировании опытов 3 ± 5 раз.

W_p , вычислялась по выражению:

$$W_p = \frac{G_2 - G_1(1 - W_{образца})}{G_2} \quad (1)$$

где $W_{образца}$ – исходная влажность продукта, кг/кг;

G_1 – его исходная масса, кг;

G_2 – его масса в состоянии термодинамического равновесия, кг.

Эмпирическое исследование гигроскопических характеристик необходимо для обоснования итоговой влажности продукта для обеспечения рационального срока хранения. Получение сорбционных статических зависимостей проводилось, основываясь на том, что величина активности воды Aw и ϕ идентичны из-за равенства при равновесии парциального парового давления в пограничном с образцом слое и во внешней среде [2, 6, 7].

Результаты и их обсуждение

После реализации серии экспериментов на эксикаторной опытной установке получены изотермы сорбции влаги соплодия джекфрута при температурах воздуха 298 К, 308 К и 318 К, которые представлены ниже (рис. 2) [14].

На изотермической сорбционной кривой присутствуют три характерных зоны, что особенно

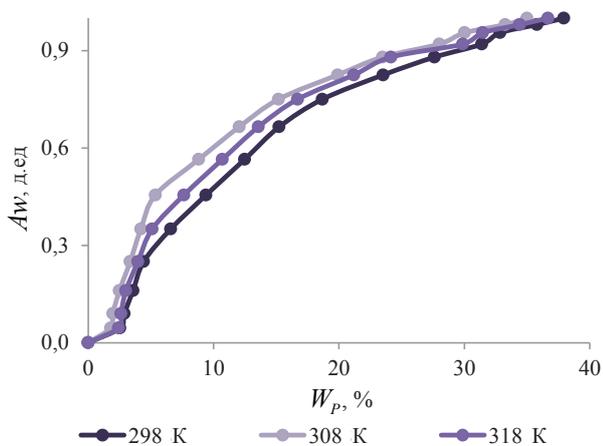


Рисунок 2. Кривые равновесия при сорбции влаги джекфрутом при различных температурах

Figure 2 Equilibrium curves during moisture sorption in jackfruit at various temperatures

проявляется при ее графической трансформации в полулогарифмический вид (рис. 3).

Из работ академика А. В. Лыкова следует, что влажные вещества подразделяются на ряд видов, обусловленных их коллоидными и физико-химическими показателями: коллоидные, коллоидно-капиллярно-пористые и капиллярно-пористые [13]. Соплодие джекфрута представляет собой по структуре капиллярно-пористое тело с большим количеством микропор капилляров и пустот, через которые пары воды легко могут проникать или удаляться.

Поведение воды в объекте исследования и обусловленные им параметрические показатели влагопереноса определяются путем изучения адсорбционных явлений на поверхности фазового раздела (паровоздушная среда – материал), опираясь на теоретические положения полимолекулярной адсорбции, обоснованные С. Брунауэром и др. Учеными выделены 5 основных видов изотермических равновесных кривых [15].

Полученные изотермы можно отнести к II типу, которые характерны для всех пищевых гидрофильных продуктов [15]. Это объясняется тем, что при проведении сорбции в условиях постепенного повышения ϕ происходит накопление влаги вокруг активных центров вследствие чего формируются молекулярные грозди.

Г. К. Филоненко предложил математическое описание изотерм проводить двумя уравнениями. Для этого нужно кривую (рис. 2) разбить на два участка: первый – от W_0 до W_m ; второй – от W_m и выше. Точка W_0 на изотерме характеризует переход от мономолекулярной к полимолекулярной адсорбции и становится пересечением продолжения прямолинейного участка изотермы с осью абсцисс. В реальных условиях обезвоживания

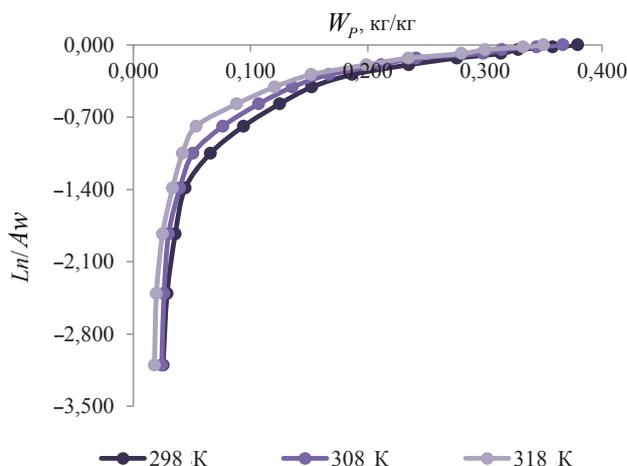


Рисунок 3. Изотермы сорбции влаги джекфрутом в полулогарифмических координатах

Figure 3. Log-magnitude sorption isotherms for jackfruit

мономолекулярная адсорбционная влага не подлежит удалению, поэтому зона в интервале от 0 до W_0 обычно математически не аппроксимируется. Точка W_m характеризует переход от влаги, связанной полимолекулярной адсорбцией, к капиллярно и осмотически связанной влаге и становится пересечением прямой с кривой изотермы в верхней части графика. Начиная от значений W_m и, соответственно, A_m , кривая изотермы резко уходит вправо.

Следуя этому подходу, на изотермах, которые представлены на рисунке 2, можно выделить эти участки: прямолинейный от W_0 до W_m , характеризующий адсорбционно-связанную влагу, и криволинейный от W_m и выше, характеризующий капиллярно-связанную и осмотическую влагу.

В работах [9, 10] сделан вывод о том, что в веществе поверхностные ионы и молекулы энергетически не являются насыщенными из-за того, что в доле их силового поля, устремленной во внешний ареал (относительно поверхности частиц), нет ни ионов, ни молекул, на адсорбцию которых может быть потрачена энергия этой доли силового поля. Результатом является образование поверхностной энергии любого вещества. В случае, когда относительно сухой материал оказывается в среде с молекулами паров воды, они адсорбируются молекулами его поверхностного слоя. Это является исходным этапом сорбции внешней парообразной влаги веществом при формировании 1 мономолекулярного слоя на поверхности сухого скелета материала.

Даже при незначительной величине относительной влажности паровоздушной среды (доли процента), наблюдается формирование мономолекулярного сорбционного водного слоя. Целесообразно принять во внимание силы взаимодействия между свободными и адсорбированными водными молекулами, которые являются диполями. Это приводит при адсорбции, кроме утраты подвижности, к их ориентированию в зависимости от заряда к точке адсорбции своим полюсом с положительным или отрицательным зарядом. Таким образом, поверхностный мономолекулярный сорбционный слой включает разнонаправленные по полюсам диполи, образующие новую поверхность с множеством сорбционных центров для формирования последующего слоя. Впоследствии по тому же принципу образуются 2, 3 и так далее слои. Течение сорбционных процессов определяется такими же усилиями, как и те, которые приводят к межмолекулярному сцеплению в твердых и жидких средах и к отклонениям в поведении реальных и идеальных газовых фаз.

Физическая адсорбция сама по себе протекает с очень большой скоростью, но проникновение молекул вглубь капилляров адсорбента происходит

очень медленно. Известно, что в некоторых случаях адсорбционное равновесие достигается за много часов и даже дней [6, 9]. При постоянной температуре количество адсорбированного газа (водяного пара) прямо пропорционально давлению. При постоянном давлении число адсорбированных молекул с повышением температуры уменьшается по экспоненциальной зависимости. Как уже указывалось, всякое тело обладает поверхностной энергией, величина которой при прочих равных условиях тем больше, чем больше удельная поверхность данного тела, т. е. чем выше его дисперсность. Поверхностная энергия данного вещества имеет наибольшее значение тогда, когда оно находится в вакууме. При соприкосновении вещества с воздухом его энергетический потенциал на поверхности снижается из-за заполнения адсорбционных центров водными молекулами. Это приводит к выделению тепловой энергии, которую принято называть теплотой адсорбции. Полимолекулярная адсорбция сопровождается формированием в мономолекулярном конденсированного слоя или конденсированных зон.

Энергия взаимосвязи капиллярной воды и сухого каркаса определяется, в том числе, связью полимолекулярного слоя с капиллярными стенками и уменьшением парового давления над вогнутым капиллярным мениском (положительное смачивание) ниже парового давления над плоской поверхностью влаги в свободном состоянии. Известно, что пограничные слои у межфазной поверхности контакта существенно отличаются по свойствам от свойств ядер фаз. Так, внутренняя водная молекула равномерно притягивается соседними и равнодействующая сил межмолекулярного взаимодействия равняется нулю. Когда молекула находится на межфазной поверхности контакта межмолекулярные силы взаимодействия направлены в ядро жидкой фазы и по ее поверхности. Причем силы притяжения в паровую среду с достаточной точностью можно не учитывать из-за того, что длина свободного пробега паровых молекул пара существенно больше по сравнению с длиной свободного пробега молекул жидкой фазы. То есть толщина пограничного к поверхности контакта фаз молекулярного слоя соизмерима с ареалом влияния сил молекулярного взаимодействия. В варианте сорбции воды капиллярно-пористым веществом капиллярные стенки покрыты ее адсорбционно связанным полимолекулярным слоем. При этом у воды в таком состоянии частично изменяются характеристики при сохранении свойств основной массы влаги, связанной капиллярно, кроме которой присутствует и механически связанная свободная влага.

В работах [6, 9] сделан вывод о том, что в итоге формирования раствора снижается относи-

тельное содержание свободных молекул в среде растворителя, что очевидно, потому что в нем распределено иное вещество. Не вызывает сомнений то, что снижение содержания молекул растворителя в свободном состоянии будет тем больше, чем больше объемная доля растворенных молекул. Одним из вариантов изменения относительного содержания растворенных молекул в свободном состоянии является осмос, который присутствует тогда, когда контактируют растворы с различным относительным содержанием растворенного вещества, разделенные полупроницаемой мембраной, селективно задерживающей растворенные молекулы и пропускающей молекулы растворителя. Суть явления осмоса состоит в самопроизвольном переносе молекул растворителя в системе из одной части в другую. Проход молекул растворителя через полупроницаемую мембрану происходит посредством их предварительного растворения в ней, поэтому избирательная проницаемость обусловлена не размерами пор перегородки, а различной способностью к растворению материала по отношению к отдельным соприкасающимся к ней веществам.

Капиллярно-пористое вещество является композицией замкнутых ячеек, в частности клеток, у которых стенки скомпонованы из высокомолекулярных нерастворимых фракций. Внутри ячеек находится низкомолекулярная растворимая фракция, которая не может проникнуть через клеточные стенки и образуется при формировании вещества. Причем низкомолекулярная фракция присутствует не только внутри ячейки, но и снаружи на ее поверхности. Относительное содержание этой фракции внутри превышает ее содержание снаружи клетки, следствием чего является проход влаги в клетку через стенку диффузионным путем. Иными словами клетка представляется закрытой ячейкой и движущей силой перемещения воды будет разница осмотических давлений растворенной фракции. Отметим, что

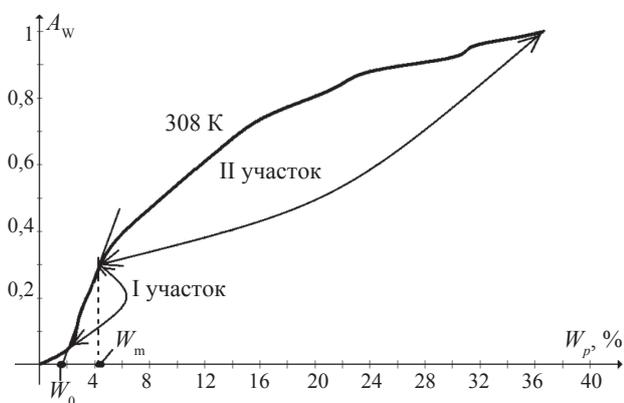


Рисунок 4. Изотерма сорбции влаги джекфрутом при 308 К, разбитая на 2 участка

Figure 4. Two-section sorption isotherm for jackfruit at 308K

такое перемещение жидкой фазы происходит без теплового эффекта и контракции всей системы при росте объема вещества. Осмотическая влага по характеристикам является свободной, так как в ней не растворяются легкорастворимые компоненты из-за невозможности диффузионного переноса вещества в клетку, где она находится.

Разрушение осмотической связи наблюдается при влагоудалении при условии разности концентраций до и после клеточной мембраны. Осмотическая влага диффундирует в материале через клеточные оболочки в жидком виде, также как и попала в него.

Таким образом, из эмпирически полученных изотерм сорбции (рис. 2, 3) выделяются два основных участка, причина появления которых аналитически обоснована. 1 зоной считают диапазон влажности, где превалирует процесс мономолекулярной адсорбции, в котором вода сильно связана с сухим остатком и 2 микробиологической, где также ферментативная активность мала. По этой причине именно на границе 1 и 2 зон влажность является рациональной для последующего хранения и колеблется для растительной продукции в интервале $0,050 \leq A_w \leq 0,40$.

Полученные таким образом участки наглядно представлены на рисунке 4 для кривой сорбции влаги джекфрутом, полученной при температуре 308 К [14, 16].

На рисунке 4 видны четкие точки перехода от одной зоны к другой, где превалирует влага с той или иной формой связи с сухим веществом [16–18].

Операция логарифмирования упрощает математическую интерпретацию изотермических кривых равновесия (рис. 2). Они для удобства разбиты на 2 участка и аппроксимированы логарифмическими функциями, которые графически представлены на рисунке 5 при ошибке аппроксимации экспериментальных данных, не превышающей 3 %.

Аппроксимированные математические зависимости, описывающие экспериментально получен-

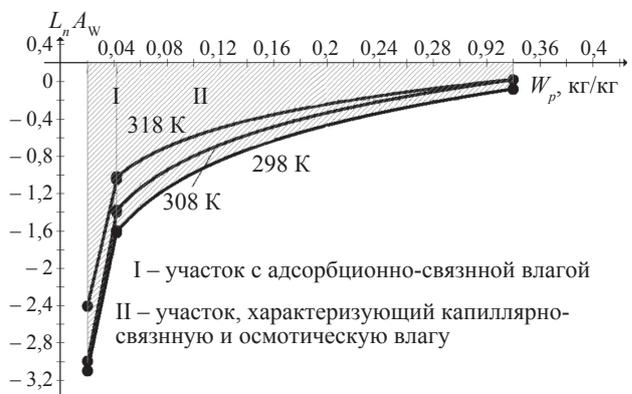


Рисунок 5. Линейная и логарифмическая аппроксимация изотерм сорбции влаги джекфрутом

Figure 5. Linear and logarithmic approximation of sorption isotherms for jackfruit

Таблица 1. Уравнения линейной и логарифмической аппроксимации (по участкам) изотерм сорбции влаги джекфрутом

Table 1. Equations of linear and logarithmic approximation (in sections) of sorption isotherms for jackfruit

Температура, К	1 участок	2 участок
298	$LnA_w = 68,18W_p - 4,463$	$LnA_w = 0,735Ln(W_p) + 0,715$
308	$LnA_w = 72,727W_p - 4,454$	$LnA_w = 0,669Ln(W_p) + 0,743$
318	$LnA_w = 61,727W_p - 3,64$	$LnA_w = 4,9969Ln(W_p) + 0,5635$

Таблица 2. Значения коэффициентов $a_i, b_i, c_i, d_i, e_i, f_i$ для каждого участка W_p , подставляемые в уравнение 2 или 3

Table 2. Values of coefficients $a_i, b_i, c_i, d_i, e_i, f_i$ for each section W_p , substituted in equation 2 or 3

Эмпирические коэффициенты	$0,02 \leq W_p \leq 0,042, i = 1$	$0,042 \leq W_p \leq 0,34, i = 2$
a_i	-0,0777	-0,00052
b_i	47,56	0,3067
c_i	-7202,15	-44,75
d_i	0,004	-0,00104
e_i	-2,438	0,632
f_i	364,7	-95,35

ные изотермы сорбции джекфрутом в полулогарифмических координатах при трех различных температурах (рис. 5), для удобства разбиты на 2 участка и представлены в таблице 1.

Для наглядности и удобства термодинамического исследования эмпирические данные целесообразно обрабатывать в виде комплексной зависимости логарифма A_w от T и W_p :

I участок:

$$\ln A_w = (a_i T^2 + b_i T + c_i) W_p + (d_i T^2 + e_i T + f_i) \quad (2)$$

II участок:

$$\ln A_w = (a_i T^2 + b_i T + c_i) \ln(W_p) + (d_i T^2 + e_i T + f_i) \quad (3)$$

где $a_i, b_i, c_i, d_i, e_i, f_i$ – эмпирические коэффициенты;

i – порядковый номер участка изотермы.

Значения этих коэффициентов для каждого участка сведены в таблицу 2.

Выводы

Вследствие того, что в технологии получения сухофруктов из джекфрута основным процессом является удаление влаги из плодов, который происходит, в частности, в гигроскопическом диапазоне влажности, необходимо изучение статистики процесса и его анализ с термодинамической точки зрения, который возможен только при наличии результатов гигроскопического исследования объекта сушки. Термодинамический анализ важен для оценки влияния механизма связывания влаги с сухим скелетом вещества на качество получаемого сухого продукта при снижении его влажности. Также полученный результат гигроскопического исследования плодов джекфрута необходимо учитывать и при принятии конструкторских решений для рационального осуществления технологических операций, включая операции по хранению и транспортировке.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest

The authors declare that there is no conflict of interest regarding the publication of this article.

Список литературы

- Goswami, C. Jackfruit (*Artocarpus heterophyllus*) / C. Goswami, R. Chacrabati // Nutritional composition of fruit cultivars / M. S. J. Simmonds, V. R. Preedy. – Academic Press, 2016. – P. 317–335. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-408117-8.00014-3>.
- Grimm, J. E. Characterization of the major odor-active compounds in jackfruit pulp / J. E. Grimm, M. Steinhaus // Journal of Agricultural and Food Chemistry. – 2019. – Vol. 67, № 20. – P. 5838–5846. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.9b01445>.
- Rana, S. S. Variation in properties of tender jackfruit during different stages of maturity / S. S. Rana, R. C. Pradhan, S. Mishra // Journal of Food Science and Technology. – 2018. – Vol. 55, № 6. – P. 2122–2129. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13197-018-3127-9>.
- Рынок сухофруктов в России: 3 региона, контролирующего рынок сухофруктов [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://marketing.rbc.ru/articles/10574/>. – Дата обращения: 25.07.2019.
- Saxena, J. Drying kinetics and moisture diffusivity study of ripe Jackfruit / J. Saxena, K. K. Dash // International Food Research Journal. – 2015. – Vol. 22, № 1. – P. 414–420.
- Алексамян, И. Ю. Высокоинтенсивная сушка пищевых продуктов. Пеносушка. Теория. Практика. Моделирование: монография / И. Ю. Алексамян, А. А. Буйнов. – Астрахань: АГТУ, 2004. – 380 с.

7. Eco-friendly extraction and physicochemical properties of pectin from jackfruit peel waste with subcritical water / W.-J. Li, Z.-G. Fan, Y.-Y. Wu [et al.] // *Journal of the Science of Food and Agriculture*. – 2019. – Vol. 99, № 12. – P. 5283–5292. DOI: <https://doi.org/10.1002/jsfa.9729>.
8. Jackfruit (*Artocarpus heterophyllus* Lam.) peel: A better source of antioxidants and a-glucosidase inhibitors than pulp, flake and seed, and phytochemical profile by HPLC-QTOF-MS/MS / L. Zhang, Z.-C. Tu, X. Xie [et al.] // *Food chemistry*. – 2017. – Vol. 234. – P. 303–313. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.05.003>.
9. Определение гигроскопических свойств и десорбционных параметров в технологии гранулирования пшеничной клейковины / Е. В. Фоменко, И. Ю. Александян, О. А. Петровичев [и др.] // *Вестник Международной академии холода*. – 2019. – № 2. – С. 86–94. DOI: <https://doi.org/10.17586/1606-4313-2019-18-2-86-94>.
10. Александян, И. Ю. Инновационные технологии переработки сырья растительного происхождения / И. Ю. Александян, Ю. А. Максименко Л. М. Титова // *Инновационные технологии АПК России – 2014 : материалы II конференции в рамках Международного научно-технологического форума «Биоиндустрия – основа зеленой экономики, качества жизни и активного долголетия»*. – М., 2014. – С. 12–18.
11. Александян, И. Ю. Инновационные технологии переработки сырья растительного происхождения / И. Ю. Александян, Ю. А. Максименко // *Инновационные пищевые технологии в области хранения и переработки сельскохозяйственного сырья: фундаментальные и прикладные аспекты : материалы V международной научно-практической конференции*. – Воронеж, 2015. – С. 115–119.
12. Гинзбург, А. С. Основы теории и техники сушки пищевых продуктов / А. С. Гинзбург. – М. : Пищевая промышленность, 1975. – 527 с.
13. Лыков, А. В. Сушка в химической промышленности / А. В. Лыков. – М. : Химия, 1970. – 499 с.
14. Effects of minimal processing technologies on jackfruit (*Artocarpus heterophyllus* Lam.) quality parameters / L. M. Anaya-Esparza, G. A. González-Aguilar, J. A. Domínguez-Ávila [et al.] // *Food and Bioprocess Technology*. – 2018. – Vol. 11, № 9. – P. 1761–1774. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11947-018-2136-z>.
15. Брунауер, С. Адсорбция газов и паров. Том 1. Физическая адсорбция / С. Брунауер. – М. : Государственное издательство иностранной литературы, 1948. – 754 с.
16. Wong, C. W. Production of spray-dried honey jackfruit (*Artocarpus heterophyllus*) powder from enzymatic liquefied puree / C. W. Wong, H. H. Tan // *Journal of Food Science and Technology*. – 2017. – Vol. 54, № 2. – P. 564–571. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13197-017-2501-3>.
17. Structural and functional properties of pectin extracted from jackfruit (*Artocarpus heterophyllus*) waste: Effects of drying / R. Begum, Y. A. Yusof, M. G. Aziz [et al.] // *International Journal of Food Properties*. – 2017. – Vol. 20. – P. S190–S201. DOI: <https://doi.org/10.1080/10942912.2017.1295054>.
18. Ultrasonic-microwave assisted extraction, characterization and biological activity of pectin from jackfruit peel / S.-Y. Xu, J.-P. Liu, X. Huang [et al.] // *LWT – Food Science and Technology*. – 2018. – Vol. 90. – P. 577–582. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2018.01.007>.

References

1. Goswami C, Chacrabati R. Jackfruit (*Artocarpus heterophyllus*). In: Simmonds MSJ, Preedy VR, editors. *Nutritional composition of fruit cultivars*. Academic Press; 2016. 317–335 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-408117-8.00014-3>.
2. Grimm JE, Steinhaus M. Characterization of the major odor-active compounds in jackfruit pulp. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 2019;67(20):5838–5846. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.9b01445>.
3. Rana SS, Pradhan RC, Mishra S. Variation in properties of tender jackfruit during different stages of maturity. *Journal of Food Science and Technology*. 2018;55(6):2122–2129. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13197-018-3127-9>.
4. Rynok sukhofruktov v Rossii: 3 regiona, kontroliruyushchikh rynek sukhofruktov [Dried fruit market in Russia: three regions that control the dried fruit market] [Internet]. [cited 2019 Jul 25]. Available from: <https://marketing.rbc.ru/articles/10574/>.
5. Saxena J, Dash KK. Drying kinetics and moisture diffusivity study of ripe Jackfruit. *International Food Research Journal*. 2015;22(1):414–420.
6. Aleksanyan IYu, Buynov AA. Vysokointensivnaya sushka pishchevykh produktov. Penosushka. Teoriya. Praktika. Modelirovanie: monografiya [High intensity food drying. Foam dryer. Theory. Practice. Modeling: Monograph]. Astrakhan: Astrakhan State Technical University; 2004. 380 p. (In Russ.).
7. Li W-J, Fan Z-G, Wu Y-Y, Jiang Z-G, Shi R-C. Eco-friendly extraction and physicochemical properties of pectin from jackfruit peel waste with subcritical water. *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 2019;99(12):5283–5292. DOI: <https://doi.org/10.1002/jsfa.9729>.
8. Zhang L, Tu Z-C, Xie X, Wang H, Wanga H, Wang Z-X, et al. Jackfruit (*Artocarpus heterophyllus* Lam.) peel: A better source of antioxidants and a-glucosidase inhibitors than pulp, flake and seed, and phytochemical profile by HPLC-QTOF-MS/MS. *Food chemistry*. 2017;234:303–313. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.05.003>.

9. Fomenko EV, Aleksanyan IYu, Petrovichev OA, Lysova VN. Determination of hygroscopic properties and desorption parameters in the technology of wheat gluten granulation. Journal of International Academy of Refrigeration. 2019;(2):86–94. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.17586/1606-4313-2019-18-2-86-94>.

10. Aleksanyan IYu, Maksimenko YuA, Titova LM. Innovatsionnye tekhnologii pererabotki syr'ya rastitel'nogo proiskhozhdeniya [Innovative technologies for processing raw materials of plant origin]. Innovatsionnye tekhnologii APK Rossii – 2014: materialy II konferentsii v ramkakh Mezhdunarodnogo nauchno-tekhnologicheskogo foruma 'Bioindustriya – osnova zelenoy ehkonomiki, kachestva zhizni i aktivnogo dolgoletiya' [Innovative Technologies in the Agricultural Sector of Russia – 2014: Proceedings of the II Conference at the International Science and Technology Forum 'Bioindustry as the basis for a green economy, quality of life, and active longevity']; 2014; Moscow. Moscow, 2014. p. 12–18. (In Russ.).

11. Aleksanyan IYu, Maksimenko YuA. Innovatsionnye tekhnologii pererabotki syr'ya rastitel'nogo proiskhozhdeniya [Innovative technologies for processing raw materials of plant origin]. Innovatsionnye pishchevye tekhnologii v oblasti khraneniya i pererabotki sel'skokhozyaystvennogo syr'ya: fundamental'nye i prikladnye aspekty: Materialy V Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii [Innovative Food Technologies in the Field of Storage and Processing of Agricultural Raw Materials: Fundamental and Applied Aspects: Materials of the V International Scientific and Practical Conference]; 2015. Voronezh. Voronezh, 2015. p. 115–119. (In Russ.).

12. Ginzburg AS. Osnovy teorii i tekhniki sushki pishchevykh produktov [Fundamentals of the theory and technique of drying food products]. Moscow: Pishchevaya promyshlennost; 1975. 527 p. (In Russ.).

13. Lykov AV. Sushka v khimicheskoy promyshlennosti [Drying in the chemical industry]. Moscow: Khimiya; 1970. 499 p. (In Russ.).

14. Anaya-Esparza LM, González-Aguilar GA, Domínguez-Ávila JA, Olmos-Cornejo JE, Pérez-Larios A, Montalvo-González E. Effects of minimal processing technologies on jackfruit (*Artocarpus heterophyllus* Lam.) quality parameters. Food and Bioprocess Technology. 2018;11(9):1761–1774. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11947-018-2136-z>.

15. Brunauer S. Adsorbtsiya gazov i parov. Tom 1. Fizicheskaya adsorbtsiya [Adsorption of gases and vapors. Vol. 1. Physical adsorption]. Moscow: Gosudarstvennoe izdatel'stvo inostrannoy literatury; 1948. 754 p. (In Russ.).

16. Wong CW, Tan HH. Production of spray-dried honey jackfruit (*Artocarpus heterophyllus*) powder from enzymatic liquefied puree. Journal of Food Science and Technology. 2017;54(2):564–571. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13197-017-2501-3>.

17. Begum R, Yusof YA, Aziz MG, Uddin MB. Structural and functional properties of pectin extracted from jackfruit (*Artocarpus heterophyllus*) waste: Effects of drying. International Journal of Food Properties. 2017;20:S190–S201. DOI: <https://doi.org/10.1080/10942912.2017.1295054>.

18. Xu S-Y, Liu J-P, Huang X, Du L-P, Shi F-L, Dong R, et al. Ultrasonic-microwave assisted extraction, characterization and biological activity of pectin from jackfruit peel. LWT – Food Science and Technology. 2018;90:577–582. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2018.01.007>.

Сведения об авторах

Нгуен Тхи Сен

аспирант кафедры технологических машин и оборудования, ФГБОУ ВО «Астраханский государственный технический университет», 414056, Россия, г. Астрахань, ул. Татищева, 16, тел.: +7 (8512) 61-41-91, e-mail: albert909@yandex.ru

Алексанян Игорь Юрьевич

д-р. техн. наук, профессор, профессор кафедры технологических машин и оборудования, ФГБОУ ВО «Астраханский государственный технический университет», 414056, Россия, г. Астрахань, ул. Татищева, 16, тел.: +7 (8512) 61-41-91, e-mail: 16081960igor@gmail.com
 <https://orcid.org/0000-0001-5494-1226>

Нугманов Альберт Хамед-Харисович

д-р. техн. наук, доцент, профессор кафедры технологических машин и оборудования, ФГБОУ ВО «Астраханский государственный технический университет», 414056, Россия, г. Астрахань, ул. Татищева, 16, тел.: +7 (8512) 61-41-91, e-mail: albert909@yandex.ru
 <https://orcid.org/0000-0002-4093-9982>

Information about the authors

Thi Sen Nguyen

Postgraduate Student of the Department of Technological Machines and Machinery, Astrakhan State Technical University, 16, Tatishcheva Str., Astrakhan, 414056, Russia phone: +7 (8512) 61-41-91, e-mail: albert909@yandex.ru

Igor Yu. Aleksanian

Dr.Sci.(Eng.), Professor, Professor of the Department of Technological Machines and Machinery, Astrakhan State Technical University, 16, Tatishcheva Str., Astrakhan, 414056, Russia phone: +7 (8512) 61-41-91, e-mail: 16081960igor@gmail.com
 <https://orcid.org/0000-0001-5494-1226>

Albert H.-H. Nugmanov

Dr.Sci.(Eng.), Associate Professor, Professor of the Department of Technological Machines and Machinery, Astrakhan State Technical University, 16, Tatishcheva Str., Astrakhan, 414056, Russia phone: +7 (8512) 61-41-91, e-mail: albert909@yandex.ru
 <https://orcid.org/0000-0002-4093-9982>

Титова Любовь Михайловна

канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры технологических машин и оборудования, ФГБОУ ВО «Астраханский государственный технический университет», 414056, Россия, г. Астрахань, ул. Татищева, 16, тел.: +7 (8512) 61-41-91, e-mail: titovalyubov@mail.ru

Lyubov M. Titova

Cand.Sci.(Eng.), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Technological Machines and Machinery, Astrakhan State Technical University, 16, Tatischeva Str., Astrakhan, 414056, Russia phone: +7 (8512) 61-41-91, e-mail: titovalyubov@mail.ru