

Научная статья

УДК 664.8.047

DOI: 10.17586/2310-1164-2026-19-2-16-25

Определение удельной энергии парообразования связанной влаги в мякоти томатаВ.П. Дяченко¹, И.Ю. Александян¹, Ю.А. Максименко¹, Э.П. Дяченко^{2*}¹Астраханский государственный технический университет, Россия, Астрахань²Институт медицинских материалов, Россия, Москва, *amed-nauka@yandex.ru

Аннотация. Представлены результаты термодинамического анализа процесса удаления влаги из мякоти томата и определения удельной энергии испарения связанной воды на основе гигроскопических характеристик сырья. Объектом исследования служила мякоть спелых томатов сливовидных сортов, предварительно высушенных радиационно-конвективной переменной сушкой до остаточного влагосодержания $W_{\text{обр.}} = 0,064\text{--}0,078$ кг/кг. Гигроскопические свойства изучали статическим тензометрическим методом Ван Бамелена с применением растворов серной кислоты различной концентрации. На основе экспериментальных данных построены изотермы сорбции, описывающие зависимость активности воды A_w от равновесного влагосодержания при температурах $T = 293$ и 313 К. Путем позонной аппроксимации эмпирических данных выведена зависимость активности воды A_w от влажности и температуры мякоти томата. Для термодинамического анализа применялось уравнение Гиббса – Гельмгольца, с помощью которого получены функциональные зависимости свободной, связанной и внутренней энергии влаги, а также общей удельной тепловой энергии парообразования воды из мякоти томата в гигроскопической области. Установлено, что форма изотерм соответствует S-образному (II тип по BET) поведению, типичному для коллоидно-капиллярных пищевых материалов. Наибольшие удельные тепловые затраты на влагоудаление наблюдаются при низком влагосодержании, где преобладает прочно связанная влага. По результатам анализа изотерм сорбции для исследуемого продукта определена гигроскопическая влажность мякоти томата для различных его температур: $W_{g1} = 0,540$ кг/кг для $T = 293$ К и $W_{g2} = 0,521$ кг/кг для $T = 313$ К. Полученные результаты могут быть использованы при проектировании и оптимизации конвективных и радиационно-конвективных сушилок для томатного сырья.

Ключевые слова: консервирование пищевых продуктов; гигроскопические свойства; термодинамический анализ; энергия парообразования; радиационно-конвективная сушка; мякоть томата

Original article

Specific evaporation energy of bound water in tomato fleshVyacheslav P. Dyachenko¹, Igor Yu. Aleksanyan¹, Yuri A. Maksimenko¹, Eduard P. Dyachenko²¹Astrakhan State Technical University, Astrakhan, Russia²Institute of Medical Materials, Moscow, Russia, *amed-nauka@yandex.ru

Abstract. The article presents the results of a thermodynamic analysis of the moisture removal process from tomato pulp and the determination of the specific energy of evaporation of bound water based on the hygroscopic characteristics of the raw material. The object of study was the pulp of ripe plum-type tomatoes, pre-dried by radiation-convective variable drying to a residual moisture content of $W_{\text{обр.}} = 0.064\text{--}0.078$ kg/kg. The hygroscopic properties were studied using the static tensometric method of Van Bammelen with sulfuric acid solutions of various concentrations. Based on experimental data, sorption isotherms were build, describing the dependence of water activity A_w on equilibrium moisture content at temperatures $T = 293$ and 313 K. Through zone-wise approximation of empirical data, a functional relationship between water activity and the moisture content and temperature of tomato pulp was derived. For the thermodynamic analysis, the Gibbs – Helmholtz equation was applied, from which functional dependencies of the free, bound, and internal energy of moisture were obtained, as well as the total specific thermal energy of water vaporization from tomato pulp in the hygroscopic region. It was found that the shape of the isotherms corresponds to S-shaped (Type II according to BET) behavior, typical of colloidal-capillary food materials. The highest specific thermal costs for moisture removal are observed at low moisture content, where strongly bound moisture predominates. Based on the analysis of sorption isotherms for the product under study, the hygroscopic moisture content of tomato pulp was determined for various temperatures: $W_{g1} = 0.540$ kg/kg for $T = 293$ K and $W_{g2} = 0.521$ kg/kg for $T = 313$ K. The results obtained can be used in the design and optimization of convective and radiation-convective dryers for tomato raw materials.

Keywords: food preservation; hygroscopic properties; thermodynamic analysis; vaporization energy; radiation-convective drying; tomato pulp

Введение

Томат (*Solanum lycopersicum* L.) – это одна из наиболее распространенных овощных культур в мире. Благодаря высокому содержанию ликопина, β -каротина, аскорбиновой кислоты и других биологически активных компонентов томаты широко используются как в свежем виде, так и для выработки концентратов, паст, порошков и сушеных продуктов. Вместе с тем содержание влаги в свежих плодах достигает 93–95%, что существенно ограничивает сроки их хранения и обуславливает значительные потери урожая без применения консервирующих обработок [1, 2].

Сушка, являясь одним из приоритетных направлений переработки томатного сырья, позволяет снизить массу и объем продукта, обеспечить его микробиологическую стабильность и сохранить питательную ценность [3, 4]. В последние годы активно развиваются такие высокоинтенсивные энергосберегающие технологии, как инфракрасная [5–7], микроволновая, вакуумно-микроволновая, радиационно-конвективная сушка [8–10], сушка в среде инертного газа и электромагнитного поля низких частот [4], ультразвуковая и комбинированная сушка [11] и другие. Однако большинство исследований сосредоточено на кинетике обезвоживания и влиянии внешних параметров сушильного агента на скорость процесса и качество готового продукта, тогда как внутренний перенос влаги и ее энергетическое состояние в материале остаются менее изученными [12, 13].

Разработка рациональных режимов сушки невозможна без понимания статистики процесса – изотерм сорбции, форм связи влаги с твердым остатком и энергетических характеристик ее удаления [2, 12, 14]. Для томатной мякоти, которая является коллоидно-капиллярным биополимерным материалом, особое значение имеет оценка удельной тепловой энергии, требуемой для испарения связанной влаги в гигроскопическом диапазоне, поскольку именно на завершающей стадии сушки ее доля наиболее высока, а риск деградации термолабильных компонентов максимален [2, 15].

Термодинамический подход, основанный на уравнении Гиббса – Гельмгольца, позволяет связать изотермы сорбции с энергетическими функциями состояния влаги: свободной и внутренней энергией, энтальпией и энтропией, и тем самым обосновать предельные режимные параметры и конечную влажность продукта при сушке. Аналогичный подход успешно применялся для широкого круга пищевых биополимерных систем, например, рыбного гидролизата, томатного порошка из томатной пасты с добавлением рыбного гидролизата [2], концентратов из различных плодовоовощных продуктов и экстрактов [3], порошка яичного белка [16], ихтиожелатина из кожи рыбы [17], соевых бобов [18], микрокапсул из камеди мескита и концентрата сывороточного белка [19].

Цель настоящей работы – исследовать гигроскопические свойства мякоти томатов и определить удельную энергию парообразования связанной влаги на основе экспериментальных изотерм сорбции с использованием уравнения Гиббса – Гельмгольца.

Объекты и методы исследования

В качестве объекта изучения использовали высушенную мякоть зрелых томатов сорта «Сливка», предназначенных для переработки. Плоды промывали, нарезали на дольки равномерной толщины $h = 3\text{--}4$ мм, удаляли кожицу и пульпу с семенами, после чего сушили при комбинированном радиационно-конвективном энергоподводе до остаточного влагосодержания $W_{\text{обр}} = 0,064\text{--}0,078$ кг/кг (определяли методом Карла Фишера). Предварительное обезвоживание до указанного уровня влагосодержания обусловлено необходимостью исключить влияние остаточной свободной влаги на форму изотерм сорбции, что соответствует стандартной практике для исследования гигроскопических свойств сухих пищевых продуктов [2, 3].

Сушку проводили специально разработанным способом [20]: сушили на плоском игольчатом носителе в течение 5,3 мин при плотности теплового потока $2,2$ кВт/м² и длине волны инфракрасных лучей $1,16$ мкм, затем в течение 3 мин постепенно снижали плотность теплового потока до значения $0,71$ кВт/м², при котором сушили еще 3,5 мин; через 0,5 мин после начала инфракрасного облучения дольки начинали сушить потоком воздуха с температурой 298 К и скоростью потока воздуха $1,3$ м/с, которую постепенно повышали в течение 4,8 мин до значения 5 м/с, при котором сушку долек продолжали и прекращали вместе с завершением их инфракрасного облучения; далее дольки снимали с плоского игольчатого носителя и укладывали на сетчатый носитель на ребро и досушивали до требуемой

влажности потоком воздуха, проходящим через сетчатый носитель при температуре воздуха 333 К и при скорости потока воздуха 3,1 м/с.

Гигроскопические характеристики мякоти томатов изучали тензометрическим методом Ван Бамелена в статических условиях сорбционного равновесия. Навески предварительно высушенной томатной мякоти массой $m = (0,0013 \pm 0,0001)$ кг (слой 1–2 мм в чашках Петри) помещали в герметичные эксикаторные камеры над растворами серной кислоты различной концентрации C_k , % и плотности ρ_k , кг/м³, которые, согласно ГОСТ 29244-91 (ИСО 483-88), обеспечивали фиксированные значения относительной влажности в эксикаторных камерах φ в диапазоне 4,5–83% при температурах $T = 293$ и 313 К (таблица 1).

Таблица 1. Зависимость относительной влажности в эксикаторных камерах от концентрации серной кислоты в насыщенном растворе при различных температурах
Table 1. Dependence of relative humidity in desiccator chambers on the concentration of sulfuric acid at different temperatures

T , К	ρ_k , кг/м ³ (при температуре $t = 20^\circ\text{C}$)	C_k , %	φ , %
293	1610,5	70	4,5
	1498,2	60	16
	1395,1	50	35
	1302,8	40	56,5
	1178,3	25	82,5
313	1610,5	70	6
	1498,2	60	19
	1404,9	51	35
	1302,8	40	59
	1178,3	25	83

Эксикаторы с навесками выдерживали в термостате с точностью поддержания температуры ± 1 К. Массу образцов взвешивали с определенными интервалами времени (раз в 3 суток для $4,5 \leq \varphi \leq 19\%$; раз в 7 суток для $35 \leq \varphi \leq 59\%$; раз в 14 суток для $\varphi \geq 82,5\%$) на весах Adventurer OHAUS AR3130 (США), соответствующих второму классу точности по ГОСТ 24104-2001, до достижения постоянной массы образцов – признака наступления сорбционного равновесия. По конечной массе образца G_2 (кг) рассчитывали равновесную массовую долю влаги

$$W_p = \frac{G_2 - G_1 \cdot (1 - W_{\text{обр}})}{G_2},$$

где G_1 – начальная масса навески, кг;

$W_{\text{обр}} = 0,064\text{--}0,078$ кг/кг – начальное влагосодержание образца.

Активность воды в продукте при данной температуре принималась равной относительной влажности над раствором, деленной на 100.

Термодинамический подход к анализу влагосвязи в коллоидно-капиллярных биополимерных системах базируется на уравнении Гиббса – Гельмгольца и связи химического потенциала сорбированной влаги с ее активностью. Свободная энергия связи одного моля воды с матриксом томатной мякоти при постоянных T и P равна [2, 3]

$$E_{\text{св}} = \left(\frac{\partial \Delta G}{\partial W_p} \right)_{T,P} = -R \cdot T \cdot \ln A_w, \quad (1)$$

где R – универсальная газовая постоянная, Дж/(моль·К);

T – температура, К.

Изменение химического потенциала влаги относительно свободного состояния

$$\Delta \mu = R \cdot T \cdot \ln A_w.$$

Уравнение Гиббса – Гельмгольца для системы «продукт – водяной пар» записывают в виде

$$\Delta G = \Delta H - T \cdot \Delta S,$$

откуда, дифференцируя по влагосодержанию W_p при постоянных T и P , получают соотношения для термического эффекта сорбции и изменения энтропии влаги [2, 3]:

$$\left(\frac{\partial \Delta S}{\partial W_p}\right)_{T,P} = -R \cdot \frac{\partial(T \cdot \ln A_w)}{\partial T}, \quad (2)$$

$$\left(\frac{\partial \Delta H}{\partial W_p}\right)_{T,P} = \left(\frac{\partial \Delta G}{\partial W_p}\right)_{T,P} + T \cdot \left(\frac{\partial \Delta S}{\partial W_p}\right)_{T,P}. \quad (3)$$

Общую удельную тепловую энергию испарения воды из томатной мякоти рассчитывали как [2, 3]

$$r(W_p, T) = r' + r_{\text{см}} + r_{\text{энт}}, \quad (4)$$

где r' – удельная теплота парообразования свободной воды при температуре T , Дж/кг;

$r_{\text{см}}$ – составляющая, обусловленная изменением свободной энергии связи влаги, Дж/кг;

$r_{\text{энт}}$ – энтропийная составляющая, Дж/кг.

В интервале температур $T = 293\text{--}313$ К, соответствующем условиям эксперимента, теплота парообразования свободной воды описывается линейным соотношением [2, 3]

$$r' = 3118,458 - 2286,66 \cdot T. \quad (5)$$

Остальные составляющие определялись через производные функции $A_w(W_p, T)$

$$r_{\text{см}} = \left| -\frac{R}{\alpha} \cdot \ln A_w \right|, \quad (6)$$

$$r_{\text{энт}} = \left| -\frac{R}{\alpha} \cdot \frac{\partial(T \cdot \ln A_w)}{\partial T} \right|, \quad (7)$$

где $\alpha = 0,018$ кг/моль – молярная масса воды.

Результаты и их обсуждение

В результате проведения экспериментальных исследований построены изотермы сорбции для исследуемого материала при $T = 293$ и 313 К. Исследования проведены при трех повторностях (три параллельных образца на каждое φ). Относительная ошибка при определении A_w не превышала $\varepsilon_{A_w} = 8,1\%$. Эмпирически полученные равновесные сорбционные зависимости (изотермы сорбции) для мякоти томата изображены на рисунке 1.

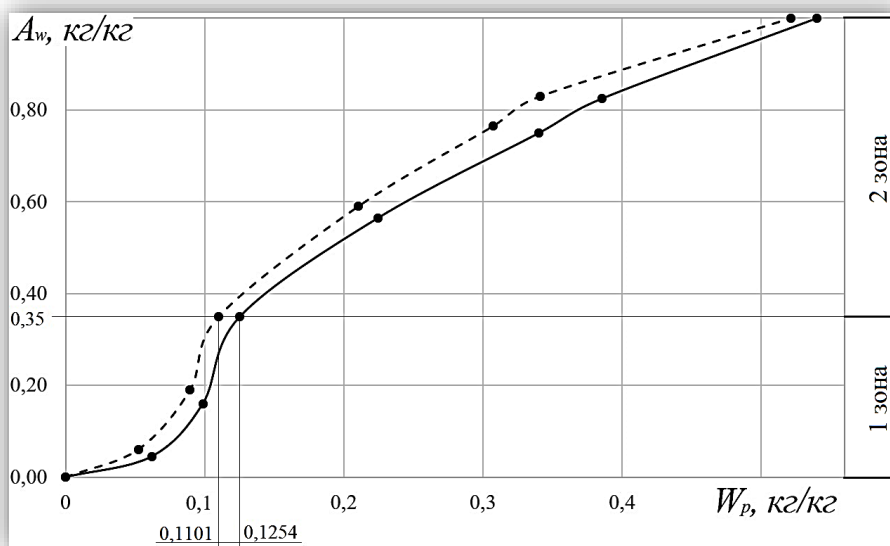


Рисунок 1 – Равновесные сорбционные зависимости для мякоти томата при $T = 313$ К (---) и $T = 293$ К (—)

Figure 1. Equilibrium sorption curves for tomato pulp at $T = 313$ K (---) and $T = 293$ K (—)

Полученные кривые имеют классическую S-образную форму (II тип по классификации BET), что типично для большинства пищевых коллоидно-капиллярных материалов растительного происхождения: влагосодержание W_p монотонно возрастает с ростом A_w , при этом наблюдается пологий участок при малых значениях A_w и резкий подъем при $A_w > 0,6$ кг/кг. Аналогичный характер кривых – сигмоидальный, с четко выраженными зонами мономолекулярной адсорбции, полимолекулярной адсорбции и капиллярной конденсации, зафиксирован в ряде других аналогичных работ, в том числе, для ломтиков свежего томата при температурах $303\text{--}333$ К [21] и для высушенных солнечной сушкой

томатов при температурах 303–333 К [22]. Вместе с тем в исследовании порошка томата черри, полученного путем сублимационной сушки [23], авторы зафиксировали изотерму J-образной формы (тип III по классификации ИЮПАК), что, вероятно, объясняется специфической микропористой структурой лиофилизированного продукта с малой внешней удельной поверхностью и высокой долей аморфных компонентов – результатом, принципиально отличающимся от настоящей работы. Следует отметить, что форма изотермы напрямую зависит от способа предварительной обработки сырья: конвективная и радиационно-конвективная сушка, примененная в настоящем исследовании, лучше сохраняет исходную волокнистую структуру клеточной стенки и капиллярно-пористую морфологию томатной матрицы, что и обуславливает характерный S-образный профиль.

Согласно полученным в настоящей работе данным, повышение температуры при одинаковых значениях A_w сопровождается снижением W_p (рисунок 1), что термодинамически закономерно: возрастание температуры уменьшает сорбционную емкость и изостерическую теплоту сорбции. Эффект температуры наиболее заметен при средних значениях A_w , что согласуется с данными литературы [15, 21, 22].

Путем зонной аппроксимации экспериментальных данных (коэффициент достоверности $R^2 = 0,999$) получена аналитическая зависимость уровня активности воды A_w от влагосодержания и температуры мякоти томата:

$$A_w(W_p, T) = \begin{cases} (a_1T + b_1)W_p^3 + (c_1T + d_1)W_p^2 + (e_1T + f_1)W_p + (gT + h), & 0 \leq A_w \leq 0,35, \\ (a_2T + b_2)W_p^2 + (c_2T + d_2)W_p + (e_2T + f_2), & 0,35 \leq A_w \leq 1,0. \end{cases} \quad (8)$$

Значения параметрических коэффициентов приведены в таблице 2.

Таблица 2. Параметрические коэффициенты зависимости A_w от влагосодержания и температуры мякоти томата

Table 2. Parametric coefficients of dependence of A_w on moisture content and temperature of tomato flesh

Коэффициент	Значение коэффициента ($0 \leq A_w \leq 0,35$)	Коэффициент	Значение коэффициента ($0,35 \leq A_w \leq 1,00$)
a_1	8,991	a_2	-0,05533
b_1	$-2,374 \cdot 10^3$	b_2	14,88
c_1	-0,7741	c_2	0,03106
d_1	$2,061 \cdot 10^2$	d_2	-6,627
e_1	$5,076 \cdot 10^2$	e_2	$1,160 \cdot 10^{-4}$
f_1	-14,05	f_2	0,01402
g	$2,058 \cdot 10^{-15}$	–	–
h	$-600,5 \cdot 10^{-15}$	–	–

Анализ формы изотерм позволил выделить три зоны связывания влаги [2, 3]:

- ✓ зона I ($W_p \leq W_k$) — мономолекулярная адсорбция: влага удерживается за счет электростатических взаимодействий с полярными центрами клеточных стенок и пектинового матрикса. Энергия ее связи максимальна;
- ✓ зона II ($W_k < W_p < W_e$) — полимолекулярная адсорбция: молекулы воды ориентированы и поляризованы первично адсорбированным слоем;
- ✓ зона III ($W_e \leq W_p \leq W_g$) — преимущественно капиллярная конденсация и осмотическое связывание: влага заполняет объем микро- и макрокапилляров, тепловой эффект приближается к теплоте конденсации свободной воды.

Численные значения характерных влагосодержаний, определенных по методике Г.К. Филоненко, представлены в таблице 3.

Таблица 3. Гигроскопические характеристики мякоти томата, высушенной радиационно-конвективной переменной сушкой

Table 3. Hygroscopic characteristics of tomato flesh dried by radiation-convective alternating drying

T , К	W_g , кг/кг	W_e , кг/кг	W_k , кг/кг
293	0,540	0,340	0,099
313	0,521	0,307	0,089

Одной из ключевых гигроскопических характеристик, определяемых при анализе изотерм сорбции, является влажность мономолекулярного слоя W_k . Для настоящей работы установлено $W_k = 0,099$ кг/кг при $T = 293$ К и $W_k = 0,089$ кг/кг при $T = 313$ К. С ростом температуры от 293 до 313 К гигроскопическая влажность W_g снижается с 0,540 до 0,521 кг/кг, а W_k – с 0,099 до 0,089 кг/кг, что свидетельствует о снижении общей сорбционной емкости при повышении температуры и согласуется с закономерностями, установленными для других растительных материалов, в том числе вяленых ломтиков томата [15], порошка томатной пульпы [24], долек томата конвективной сушки [25], свежих томатов [21], ломтиков томата, подвергнутых осмотической дегидратации в растворах соли и сахарозы [26]. Диапазон равновесной влажности гигроскопической области ($W_p \leq W_g$) $W_g = 0,521–0,540$ кг/кг, коррелирует с представленными в работах [21, 22] характеристическими точками изотерм сорбции, отражающими переход от структурной к капиллярной влаге. Сопоставление полученных значений W_k с данными литературы представлено в таблице 4.

Таблица 4. Сравнение значений влажности мономолекулярного слоя томатных продуктов по данным различных источников

Table 4. Comparison of the moisture content of the monomolecular layer of tomato products according to various sources

Объект исследования	Способ обработки	T , К	W_k , кг/кг	Модель	Источник
дольки томата (мякоть)	радиационно-конвективная сушка	293–313	0,089–0,099	аппроксимация по Филоненко	настоящая работа
ломтики томата	вяление на солнце	288–308	0,147–0,161	mGAB	[15]
ломтики томата	осмотическая дегидратация в растворах соли и сахарозы	298	0,1707	GAB	[26]
порошок томата черри	сублимационная сушка	298	0,143 (адсорбция)/ 0,164 кг/кг (десорбция)	GAB	[23]
дольки томата	конвективная сушка	293–313	0,119–0,205	GAB	[25]
порошок томатной пульпы	распылительная сушка	293–343	0,200–0,213	GAB	[24]

Полученные в настоящей работе значения W_k находятся в нижней части диапазона, опубликованного для различных томатных продуктов. В частности, для порошка, полученного путем сублимационной сушки томата черри [23], рассчитанные с помощью модели GAB значения W_k составляют 0,143 кг/кг (адсорбция) и 0,164 кг/кг (десорбция). Для ломтиков томата, прошедших осмотическое обезвоживание, значения W_k составило 0,1707 кг/кг при 25°C [26]. Для вяленых томатов расчет влажности мономолекулярного слоя осуществлялся при помощи модифицированной модели GAB (mGAB), в результате $W_k = 0,147–0,161$ кг/кг [15]. Более высокими значениями влажности мономолекулярного слоя (0,200–0,213 г/г) обладает порошок, полученный путем распылительной сушки томатной пульпы [24], что, вероятно, объясняется значительно большей удельной поверхностью мелкодисперсных частиц после распылительной сушки, а также насыщенностью поверхности частиц гидрофильными группами. В сравнении с этим предварительная радиационно-конвективная сушка и удаление кожицы и пульпы с семенами в настоящей работе сформировали продукт с более плотной и менее гигроскопичной структурой матрикса, что закономерно снижает емкость мономолекулярного слоя.

Подстановка аппроксимирующей функции (8) в соотношения (1)–(3) позволила получить зависимости свободной, связанной и внутренней энергий влаги от ее равновесного содержания (рисунок 2).

Рассчитанные значения изменений энтальпии ΔH , энтропии ΔS и свободной энергии ΔG сорбции отрицательны во всем исследованном диапазоне W_p , что соответствует физической природе процесса и согласуется с данными для других пищевых биополимерных систем [2, 3, 27].

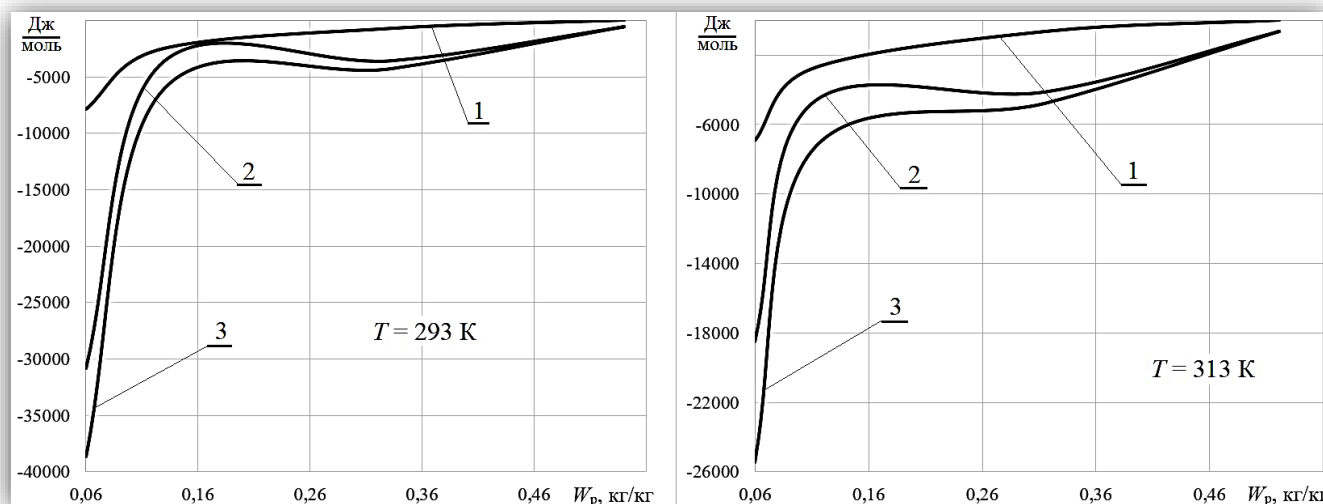


Рисунок 2 – Изменение свободной (1), связанной (2) и внутренней энергий (3) в зависимости от равновесной влажности для различных температур мякоти томата

Figure 2. Changes in free (1), bound (2), and internal energies (3) as a function of equilibrium moisture content for different tomato pulp temperatures

Отрицательные значения ΔH отражают экзотермический характер сорбции: при связывании молекул воды с поверхностью и в поровом пространстве томатной матрицы выделяется теплота. Отрицательная энтропия ΔS указывает на упорядочение системы при переходе молекул воды из свободного состояния в адсорбированное. Отрицательные значения ΔG свидетельствуют о термодинамической самопроизвольности процесса сорбции при выбранных условиях [2, 3]. Модуль всех термодинамических функций возрастает по мере снижения влагосодержания, что отражает увеличение прочности связи влаги с матриксом при переходе от капиллярной к адсорбционной зоне.

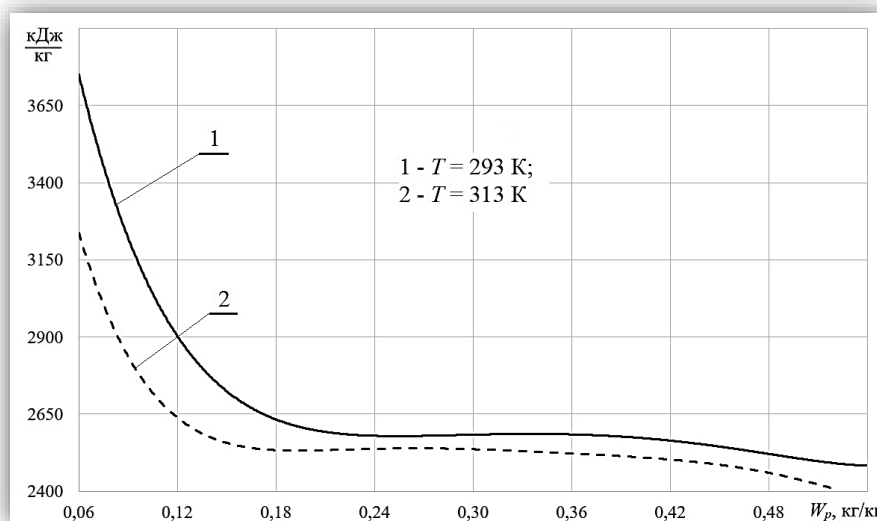


Рисунок 3 – Зависимости общей удельной тепловой энергии испарения воды от равновесной влажности для различных температур мякоти томата

Figure 3. Dependence of the total specific heat of vaporisation on the equilibrium moisture content for different tomato pulp temperatures

Подстановка аппроксимирующей зависимости (8) в выражения (4)–(7) позволила получить искомые зависимости общей удельной тепловой энергии парообразования воды $r(W_p, T)$ из мякоти томата (рисунок 3). В области низкого влагосодержания (зона мономолекулярного и полимолекулярного адсорбционного слоя) значения r существенно превышают теплоту парообразования свободной воды r' – за счет значительной составляющей $r_{см}$, отражающей высокую энергию десорбции молекул воды с гидрофильных центров пектинового матрикса и клеточных стенок. По мере увеличения влагосодержания

вклад составляющей $r_{\text{см}}$ снижается, а суммарная теплота парообразования приближается к значению r' , соответствующему свободной воде [2, 3]. Это позволяет сформулировать следующие практические выводы для организации сушки томатного сырья:

- на начальной стадии (удаление свободной и части капиллярной влаги) энергетические затраты определяются преимущественно теплотой парообразования свободной воды и нагревом продукта;
- на завершающей стадии, в гигроскопическом диапазоне, удельные тепловые затраты возрастают, что требует компромисса между интенсивностью теплоподвода и риском деградации термолабильных компонентов – ликопина, витамина С [2, 3].

Полученные зависимости $r(W_p, T)$ целесообразно применять при разработке многостадийных режимов конвективной и радиационно-конвективной сушки с дифференцированным теплоподводом по стадиям.

Заключение

В работе исследованы гигроскопические свойства мякоти томатов статическим тензометрическим методом Ван Бамелена. По экспериментальным данным построены изотермы сорбции при $T = 293$ и 313 К, имеющие S-образный характер (II тип по ВЕТ), типичный для коллоидно-капиллярных пищевых материалов. Выделены зоны мономолекулярной, полимолекулярной адсорбции и капиллярной конденсации; определены характерные влагосодержания W_k , W_e и W_g для обеих температур, которые могут использоваться в качестве ориентиров при установлении конечной влажности сушеного продукта. Нижняя граница безопасного хранения сушеной томатной мякоти ($A_w < 0,35$, что соответствует $W_p \leq W_k$) согласуется с общепринятым в литературе критерием $A_w < 0,3-0,4$ для предотвращения микробиологического роста и химических реакций [15, 22].

На основе уравнения Гиббса – Гельмгольца получены обобщенные функциональные зависимости для свободной, связанной и внутренней энергии влаги, а также общей удельной тепловой энергии парообразования воды из томатной мякоти как функций ее равновесного влагосодержания и температуры. Установлено, что наибольшие удельные тепловые затраты на влагоудаление связаны с удалением прочно адсорбционно-связанной влаги при низком содержании воды, тогда как в области повышенного влагосодержания суммарная удельная теплота парообразования приближается к значению для свободной воды. Полученные теоретические зависимости могут применяться при проектировании рациональных режимов конвективной и радиационно-конвективной сушки томатов, выборе предельной влажности продукта на стадии стабилизации и при энергетической оценке перспективных высокоинтенсивных способов сушки томатного сырья.

Литература

1. Широков Е.П., Полегаев В.И. Хранение и переработка продукции растениеводства с основами стандартизации и сертификации. Ч. 1. Картофель, плоды, овощи. М.: Колос, 1999. 254 с.
2. Алексанян И.Ю., Буйнов А.А. Высокоинтенсивная сушка пищевых продуктов. Пеносушка. Теория. Практика. Моделирование. Астрахань: Изд-во АГТУ, 2004. 380 с.
3. Максименко Ю.А. Развитие научно-практических основ и совершенствование процессов сушки растительного сырья в диспергированном состоянии: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Астрахань: АГТУ, 2016. 44 с.
4. Остриков А.Н., Гаджиева А.М., Касьянов Г.И. Комплексная технология переработки томатного сырья // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. 2015. № 1. С. 12–17. DOI: 10.20914/2310-1202-2015-1-12-17
5. Алтухов И.В., Быкова С.М. Влияние режимов импульсной инфракрасной обработки и сушки томатов на биотехнические условия нагрева // Вестник КрасГАУ. 2019. № 10. С. 132–138
6. Афонькина В.А., Попов В.М., Левинский В.Н. Результаты исследований качественных показателей процесса ИК-сушки томатов с установлением сроков хранения // Вестник КрасГАУ. 2018. № 4. С. 174–180
7. Микаберидзе М.Ш. Интенсификация сушки томатных продуктов // Глобальная наука и инновация 2020: Центральная Азия. 2020. Т. 5. № 10. С. 66–70. DOI: 10.5281/zenodo.16108436
8. Maan A.A., Nazir A., Khan M.K.I., Ahmad T. Microwave-vacuum drying of tomato: impact on physicochemical properties and antioxidant activity. *J Food Process Preserv.* 2023, V. 47, no. 2, article e17305. DOI: 10.1111/jfpp.17305
9. Bhatkar N.S., Shinde P., Shelke R.R. Spray drying of tomato juice: effect of carrier agents on lycopene retention. *Food Bioprod Process.* 2021, V. 126, pp. 22–31. DOI: 10.1016/j.fbp.2020.11.004
10. Yang X., Zhao Y., Zhang M., Mujumdar A.S. Effect of combined infrared radiation and hot air drying on the quality attributes of tomato slices. *Dry Technol.* 2022, V. 40, no. 13, pp. 2696–2710. DOI: 10.1080/07373937.2021.2013018

11. Ахмедов Б.Б., Сафаров Ж.Э., Султанова Ш.А. Современные технологии сушки томатов – сравнительный анализ методов // *Universum: технические науки*. 2025. № 10. С. 13–16.
12. Rahman M.M., Joardder M.U.H., Karim M.A. A micro-level transport model for plant-based food materials during drying. *Chemical Engineering Science*. 2018, V. 187, pp. 1–15. DOI: 10.1016/j.ces.2018.04.060
13. Rahman M.M., Joardder M.U.H., Karim M.A. Non-destructive investigation of cellular level moisture distribution and morphological changes during drying of a plant-based food material. *Biosystems Engineering*. 2018, V. 169, pp. 126–138. DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2018.02.007
14. Джуреев Х.Ф., Мизомов М.С. Статика процесса сушки специй: ключевые параметры и влияние на качество. *IQRO Indexing*. 2024. Т. 10. № 1. С. 277–280
15. Nayab A.K., Valík L., Acai P. Sorption isotherm modelling of dried tomatoes. *Czech Journal of Food Sciences*. 2024, V. 42, no. 1, pp. 21–30. DOI: 10.17221/109/2023-CJFS
16. Topkaya C., Karagoz A. Moisture sorption isotherm and thermodynamic analysis of egg powders dried by foam-mat-assisted refractance window drying. *JSFA*. 2024, V. 104, no. 14, pp. 8646–8654. DOI: 10.1002/jsfa.13692.
17. Surh J., Kwon Y.-J., Park J. Sorption isotherms and thermodynamic characteristics of gelatin powder extracted from whitefish skin: mathematical modeling approach. *Foods*. 2024, V. 13, no. 1, article 92. DOI: 10.3390/foods13010092.
18. de Oliveira T., Sousa E.P., Gonçalves F.J., Costa M.P., Honorato F.A., Rocha A.P. Thermodynamic properties of moisture sorption of soybean (*Glycine max* L.) grains. *Acta Scientiarum. Agronomy*. 2025, V. 47, no. 1, article e70140. DOI: 10.4025/actasciagron.v47i1.70140.
19. Alim A., Aisa H.A., Yili A., Zhao G. Moisture sorption isotherms, thermodynamic properties and sorption properties of walnut flavor microcapsules. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*. 2024, V. 23, no. 3, article Alim24307. DOI: 10.24275/rmiq/Alim24307
20. Дяченко В.П., Алексанян И.Ю., Максименко Ю.А., Дяченко Э.П. Способ сушки томатов: патент 2862686 С1 Российская Федерация. 2026. Бюл. № 15. 8 с.
21. Ben Mariem S., Ben Mabrouk S. Moisture sorption isotherms and isosteric heats of sorption of tomato slices. *American Journal of Renewable and Sustainable Energy*. 2015, V. 1, no. 3, pp. 140–155.
22. Loumani A., Larbi A.A., Mediani A., Braham Chaouch W., Moungar H., Tigani C., Meriama F., Djaber A., Bekada A.M.A. Experimental measurement of isothermal sorption, microbiological and physicochemical analysis of dried tomatoes cultivated in Adrar, Algeria. *IJDNE*. 2020, V. 15, no. 5, pp. 721–728. DOI: 10.18280/ijdne.150514
23. Liu H., Zhong Y., Li Z., Li J., Lin L., Zhou W. Water sorption characteristics and glass transition temperature of freeze-dried cherry tomatoes. *Food Science*. 2015, V. 36, no. 23, pp. 95–99. DOI: 10.7506/spkx1002-6630-201523018
24. Goula A.M., Karapantsios T.D., Achilias D.S., Adamopoulos K.G. Water sorption isotherms and glass transition temperature of spray dried tomato pulp. *Journal of Food Engineering*. 2008, V. 85, no. 1, pp. 73–83. DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2007.07.015
25. Akanbi C.T., Adeyemi R.S., Ojo A. Drying characteristics and sorption isotherm of tomato slices. *Journal of Food Engineering*. 2006, V. 73, no. 2, pp. 157–163. DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2005.01.015
26. Ferradji A., Aït Chaouche F. S., Belhachat D., Malek A. Optimization of osmotic dehydration of tomatoes slices in salt and sucrose solutions using response surface methodology. *Revue des Énergies Renouvelables*. 2015, V. 18, no. 4, pp. 539–549. DOI: 10.54966/jreen.v18i4.528
27. Seth D., Dash K.K., Mishra H.N., Deka S.C. Thermodynamics of sorption isotherms and storage stability of spray dried sweetened yoghurt powder. *JFST*. 2018, V. 55, no. 10, pp. 4139–4147. DOI: 10.1007/s13197-018-3340-6

References

1. Shirokov E.P., Polegaev V.I. *Storage and processing of crop production with the basics of standardization and certification*. Part 1. Potatoes, Fruits, Vegetables. Moscow, Kolos Publ. 1999, 254 p. (In Russian)
2. Aleksanyan I.Yu., Buinov A.A. *High-intensity drying of food products. Foam-mat drying. 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 for plant raw materials in the dispersed state. *Expended abstract of Doctor's thesis*. Astrakhan. 2016. 44 p. (In Russian)
4. Ostrikov A.N., Gadzhieva A.M., Kasyanov G.I. Complex processing technology of tomato raw materials. *Proceedings of the Voronezh State University of Engineering Technologies*. 2015, no. 1, pp.12–17. DOI: 10.20914/2310-1202-2015-1-12-17. (In Russian)
5. Altukhov I.V., Bykova S.M. The influence of pulse infrared processing and drying of tomatoes at biotechnical conditions of heating. *Bulletin of KSAU*. 2019, no.10, pp.132–138. (In Russian)
6. Afonkina V.A., Popov V.M., Levinsky V.N. The results of investigation of qualitative indicators of the process of infrared drying of tomatoes and storage time setting. *Bulletin of KSAU*. 2018, no. 4, pp.174–180. (In Russian)
7. Mikaberidze M.Sh. Intensification of drying of tomato products. *Global Science and Innovations: Central Asia 2020*. 2020, V. 5, no. 10, pp. 66–70. DOI: 10.5281/zenodo.16108436. (In Russian)
8. Maan A.A., Nazir A., Khan M.K.I., Ahmad T. Microwave-vacuum drying of tomato: impact on physicochemical properties and antioxidant activity. *J Food Process Preserv*. 2023, V. 47, no. 2, article e17305. DOI: 10.1111/jfpp.17305
9. Bhatkar N.S., Shinde P., Shelke R.R. Spray drying of tomato juice: effect of carrier agents on lycopene retention. *Food Bioprod Process*. 2021, V. 126, pp. 22–31. DOI: 10.1016/j.fbp.2020.11.004
10. Yang X., Zhao Y., Zhang M., Mujumdar A.S. Effect of combined infrared radiation and hot air drying on the quality attributes of tomato slices. *Dry Technol*. 2022, V. 40, no. 13, pp. 2696–2710. DOI: 10.1080/07373937.2021.2013018

11. Akhmedov B.B., Safarov J.E., Sultanova Sh.A. Modern tomato drying technologies – comparative analysis of methods. *Universum: Technical Sciences*. 2025, no. 10, pp. 13–16. DOI: 10.32743/UniTech.2025.139.10. (In Russian)
12. Rahman M.M., Joardder M.U.H., Karim M.A. A micro-level transport model for plant-based food materials during drying. *Chemical Engineering Science*. 2018, V. 187, pp. 1–15. DOI: 10.1016/j.ces.2018.04.060
13. Rahman M.M., Joardder M.U.H., Karim M.A. Non-destructive investigation of cellular level moisture distribution and morphological changes during drying of a plant-based food material. *Biosystems Engineering*. 2018, V. 169, pp. 126–138. DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2018.02.007
14. Dzhuraev Kh.F., Mizomov M.S. Statics of the spice drying process: key parameters and impact on quality. *IQRO Indexing*. 2024, V. 10, no. 1, pp. 277–280. (In Russian)
15. Nayab A.K., Valík L., Acai P. Sorption isotherm modelling of dried tomatoes. *Czech Journal of Food Sciences*. 2024, V. 42, no. 1, pp. 21–30. DOI: 10.17221/109/2023-CJFS
16. Topkaya C., Karagoz A. Moisture sorption isotherm and thermodynamic analysis of egg powders dried by foam-mat-assisted refractance window drying. *JSFA*. 2024, V. 104, no. 14, pp. 8646–8654. DOI: 10.1002/jsfa.13692
17. Surh J., Kwon Y.-J., Park J. Sorption isotherms and thermodynamic characteristics of gelatin powder extracted from whitefish skin: mathematical modeling approach. *Foods*. 2024, V. 13, no. 1, article 92. DOI: 10.3390/foods13010092
18. de Oliveira T., Sousa E.P., Gonçalves F.J., Costa M.P., Honorato F.A., Rocha A.P. Thermodynamic properties of moisture sorption of soybean (*Glycine max* L.) grains. *Acta Scientiarum. Agronomy*. 2025, V. 47, no. 1, article e70140. DOI: 10.4025/actasciagron.v47i1.70140
19. Alim A., Aisa H.A., Yili A., Zhao G. Moisture sorption isotherms, thermodynamic properties and sorption properties of walnut flavor microcapsules. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*. 2024, V. 23, no. 3, article Alim24307. DOI: 10.24275/rmiq/Alim24307
20. Diachenko V.P., Aleksanian I.Yu., Maksimenko Yu.A., Diachenko E.P. Method of drying tomatoes. Patent RF, no. 2 862 686 C1. 2026.
21. Ben Mariem S., Ben Mabrouk S. Moisture sorption isotherms and isosteric heats of sorption of tomato slices. *American Journal of Renewable and Sustainable Energy*. 2015, V. 1, no. 3, pp. 140–155.
22. Loumani A., Larbi A.A., Mediani A., Braham Chaouch W., Moungar H., Tigani C., Meriama F., Djaber A., Bekada A.M.A. Experimental measurement of isothermal sorption, microbiological and physicochemical analysis of dried tomatoes cultivated in Adrar, Algeria. *IJDNE*. 2020, V. 15, no. 5, pp. 721–728. DOI: 10.18280/ijdne.150514
23. Liu H., Zhong Y., Li Z., Li J., Lin L., Zhou W. Water sorption characteristics and glass transition temperature of freeze-dried cherry tomatoes. *Food Science*. 2015, V. 36, no. 23, pp. 95–99. (In Chinese). DOI: 10.7506/spkx1002-6630-201523018
24. Goula A.M., Karapantsios T.D., Achilias D.S., Adamopoulos K.G. Water sorption isotherms and glass transition temperature of spray dried tomato pulp. *Journal of Food Engineering*. 2008, V. 85, no. 1, pp. 73–83. DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2007.07.015
25. Akanbi C.T., Adeyemi R.S., Ojo A. Drying characteristics and sorption isotherm of tomato slices. *Journal of Food Engineering*. 2006, V. 73, no. 2, pp. 157–163. DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2005.01.015
26. Ferradji A., Ait Chaouche F. S., Belhachat D., Malek A. Optimization of osmotic dehydration of tomatoes slices in salt and sucrose solutions using response surface methodology. *Revue des Énergies Renouvelables*. 2015, V. 18, no. 4, pp. 539–549. DOI: 10.54966/jreen.v18i4.528
27. Seth D., Dash K.K., Mishra H.N., Deka S.C. Thermodynamics of sorption isotherms and storage stability of spray dried sweetened yoghurt powder. *JFST*. 2018, V. 55, no. 10, pp. 4139–4147. DOI: 10.1007/s13197-018-3340-6

Информация об авторах

Вячеслав Павлович Дяченко – аспирант кафедры технологических машин и оборудования

Игорь Юрьевич Алексанян – д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры технологических машин и оборудования

Юрий Александрович Максименко – д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры технологических машин и оборудования

Эдуард Павлович Дяченко – канд. техн. наук, старший аналитик отдела аналитики научно-технических проектов и мер государственной поддержки

Information about the authors

Vyacheslav P. Dyachenko, Postgraduate Student, Department of Technological Machines and Equipment

Igor Yu. Aleksanyan, DSci (Eng), Professor, Professor of the Department of Technological Machines and Equipment

Yuri A. Maksimenko, DSci (Eng), Professor, Professor of the Department of Technological Machines and Equipment

Eduard P. Dyachenko, PhD (Eng), Senior Analyst of the Department of Analysis of Scientific and Technical Projects and Government Support Measures

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflicts of interests

Статья поступила в редакцию 28.04.2026

Одобрена после рецензирования 05.06.2026

Принята к публикации 08.06.2026

The article was submitted 28.04.2026

Approved after reviewing 05.06.2026

Accepted for publication 08.06.2026