

## Определение теплофизических и структурно-механических характеристик водных экстрактов из плодово-ягодного сырья

**Е.В. Андреева**, elpetrovicheva1970@gmail.com  
д-р техн. наук **И.Ю. Алексанян**, 16081960igor@gmail.com  
д-р техн. наук **А.Х.-Х. Нугманов**, albert909@yandex.ru  
*Астраханский государственный технический университет  
414056, Россия, Астрахань, ул. Татищева, 16*

Исследовали теплофизические, структурно-механические и теплообменные параметры водного экстракта из ягод тутового дерева как объекта обезвоживания с целью последующего изучения процессов концентрирования и сушки этого раствора для установления рациональных режимных параметров и эффективных методов воздействия на кинетику и интенсивность теплообмена. Конечным продуктом комплексного исследования будет порошковый натуральный краситель, потребительское качество которого в значительной степени определяется его теплофизическими, структурно-механическими и теплообменными параметрами, прогнозирование которых необходимо при анализе влияния внутренних процессов теплообмена на интенсивность распылительного обезвоживания и на процессы формо- и структурообразования порошкообразного продукта. Для исследований применялись различные расчетные и физические методы. Пикнометрическим методом были найдены величины плотности, а по зондовому экспресс методу выявлены теплофизические характеристики, в том числе с использованием принципа аддитивности и закономерностей их варьирования. Расчетным путем определены величины коэффициента теплоотдачи при сушке материала при конвективном энергоподводе, опираясь на опытные данные. Полученные значения комплекса влияющих на процесс сушки параметров, а также закономерности их варьирования в рациональных температурных и влажностных интервалах необходимы для рационального проектирования процессов удаления влаги из сушильного оборудования. Доказана эффективность применения представленных в работе методик, т.к. последующее математическое моделирование сушки исследуемого водного экстракта показало достаточную для инженерных расчетов относительную погрешность (менее 5%) в сравнении с натурными экспериментами на реальной лабораторной сушильной установке.

**Ключевые слова:** процессы теплообмена; свойства веществ и материалов; теплофизические и структурно-механические характеристики; параметры сушки экстракта; плоды черного тута (шелковицы).

DOI: 10.17586/2310-1164-2020-10-3-27-35

## Determination of thermophysical and structural-mechanical characteristics of aqueous extracts from fruit and berry raw materials

**Elena V. Andreeva**, elpetrovicheva1970@gmail.com  
**Ph. D. Igor Yu. Aleksanian**, 16081960igor@gmail.com  
**Ph. D. Albert H.-H. Nugmanov**, albert909@yandex.ru  
*Astrakhan State Technical University,  
16, Tatishcheva str., Astrakhan, 414056, Russia*

This article presents studies of the thermophysical, structural-mechanical, and heat exchange parameters of an aqueous extract from mulberry berries as an object of dehydration with the aim of further studying the processes of concentration and drying of this solution to establish their rational operating parameters and effective methods of influencing the kinetics and intensity of heat and mass transfer. The end product of a comprehensive study will be a natural powder dye, the consumer quality of which is largely determined by its thermophysical, structural-mechanical, and heat exchange parameters. They are necessary to predict when analyzing the influence of internal processes of heat and moisture transfer on the intensity of spray dehydration and on the processes of shape and structure formation of a powder product. In carrying out the above studies, various calculation and physical methods were used. The density values were found by the pycnometric method, and the thermophysical characteristics were revealed using the express probe method, including using the principle of additivity and the laws of their variation. The values of the heat transfer coefficient during drying of the material with convective energy supply were calculated on the basis of the obtained experimental data. The obtained values of the complex of parameters affecting the drying process, as well as the patterns of their variation in rational temperature and humidity ranges, are necessary for the rational design of moisture removal processes and drying equipment. The

**effectiveness of the application of those techniques that are presented in the work has been proven, since subsequent mathematical modeling of the drying of the investigated aqueous extract showed a relative error adequate for engineering calculations (less than 5%) in comparison with field experiments on a real laboratory drying plant.**

**Keywords:** heat and mass transfer processes; properties of substances and materials; determination of thermophysical and structural-mechanical characteristics; extract drying parameters; fruits of black mulberry (mulberry).

## Введение

Зрительное восприятие человеком пищевой продукции и особенно ее цветовая естественность, нормируется потребительскими свойствами к ней, которая может быть утрачена в процессе промышленной переработки, что можно отнести к труднорешаемым проблемам пищевого производства. Но утраченная естественная окраска может быть восстановлена, а продукции возвращена потребительская привлекательность за счет применения в различных технологиях переработки сельскохозяйственного сырья натуральных пищевых красителей [1–3]. Натуральные красители получают из природных источников и в качестве материала для получения красителей чаще всего используют растительное сырье в виде лепестков цветов, ягод, плодов, овощей, корнеплодов, листьев растений и, в том числе, отходов их переработки [4, 5].

К таким ресурсам относятся и плоды черного тута (шелковицы), природные запасы которых позволяют их заготавливать не только для локальных потребностей региона, но и в масштабе всей страны [6]. Изучению продуктов переработки плодов черного тута, в частности, процессам экстрагирования из них целевых компонентов, концентрирования соков и совершенствованию кулинарных технологий посвящен ряд работ [7, 8], однако литературные данные по экспериментальному определению теплофизических (ТФХ) и структурно-механических (СМХ) характеристик на настоящий момент отсутствуют. Все преимущества порошковых натуральных красителей в значительной степени определяются их СМХ, ТФХ и теплообменными параметрами, прогнозирование которых возможно при анализе влияния внутренних процессов теплообмена на интенсивность распылительного обезвоживания и на процессы формо- и структурообразования единичной составляющей порошкообразного продукта [9]. Это обуславливает актуальность результатов исследований, приведенных в данной публикации, т.к. комплекс этих характеристик необходим для рационального проектирования процессов выпаривания соков и экстрактов и их сушки.

Таким образом, целью работы является изучение теплофизических, структурно-механических и теплообменных параметров водного экстракта из ягод тутового дерева, как объекта обезвоживания.

## Объекты и методы исследования

В качестве сырьевого объекта исследования являются плоды шелковицы или тутового дерева (тутовник), которые в условиях Астраханской области созревают неодновременно, поэтому период сбора можно начинать с конца мая и продолжать до начала июля [7]. Более ранние сборы ягод можно производить в Камызякском, Икрянинском и Володарском районах области, а затем – Красноярском, Наримановском и Харабалинском. Целесообразно ягоды шелковицы собирать в состоянии ее технической зрелости, т.к. до проведения операции по их переработке они успевают доспеть. В зрелых ягодах происходит увеличение содержания антоцианов в 2–7 раз по сравнению с незрелыми плодами [7, 9].

В качестве основного объекта исследования является водный экстракт из выжимок зрелых ягод шелковицы черных сортов. Определяющим параметром в ракурсе цели исследования служит плотность продукта  $\rho$ , которая для термолабильных водных экстрактов в пределах варьирования температуры ( $T$ ) от 273 до 363 К меняется мало, вследствие чего достаточно осуществить опытное определение  $\rho$  пикнометрическим способом [10, 11].

В процессе распылительной сушки из водного экстракта получается порошковый продукт, при этом плотностные характеристики исходного и конечного материала будут разные, вследствие различного содержания в них влаги. В этом случае будет достаточно экспериментально определить плотность исходного экстракта и конечного продукта, а значение промежуточной плотности, с допустимой для инженерных расчетов точностью, можно будет найти, если линейно аппроксимировать искомую характеристику между крайними ее значениями, которые соответствуют начальному раствору

и полученному из него порошку.

По описанному в публикации [12] комплексному экспресс-методу, учитывая величину критерия Фурье, можно найти все ТФХ экстракционного раствора из ягод тутовых выжимок, обусловленного объемными долями образца и термоинерционностью термодатчика в момент времени  $\tau_{max}$ , когда скорость нагревания термодатчика  $\theta_{max}$  для отфильтрованного раствора принимает максимальное значение.

Эксперимент повторялся не менее пяти раз, данные сводились в таблицу и, согласно методике [12, 13], производился расчет необходимых теплофизических характеристик для объекта исследования, учитывая, что теплоемкость  $c$ , как и  $\rho$ , подчиняется свойству аддитивности. Теплопроводность  $\lambda$ , которая не является аддитивным параметром на основе анализа, проведенного для жидких пищевых продуктов, может быть рассчитана по теоретической формуле, представленной ниже, а температуропроводность  $a$  является комплексной величиной вышеназванных трех, поэтому их целесообразно получить в виде зависимости расчетным путем [14, 15]. Таким образом, зная теплоемкость воды  $c_{воды}$  и теплоемкость смеси  $c_M$  при фиксированной влажности  $W$ , находим для абсолютно сухого вещества величину  $c_{с.о}$  смеси и при произвольной  $W \cdot c_{с.о}$  рассчитываем из следующего равенства

$$c_{с.о} = \frac{c_M - c_{воды} \cdot W}{C},$$

где  $C$  – относительная доля сухого остатка в образце, причем  $C = 1 - W$ .

Коэффициент теплопроводности определяем по эмпирической формуле

$$\lambda = \frac{B}{\alpha} \rho(W), \tag{1}$$

где  $B$  – постоянная, которая определяется видом жидкости и содержанием в ней сухих веществ [15];

$\rho$  – плотность экстракта, г/см<sup>3</sup>;

$\alpha \approx 1,8$  – коэффициент, характеризующий степень ассоциации [15].

$$B_{поп} = \frac{A_T \cdot c_M \cdot \rho^{\frac{1}{3}}}{M^{\frac{1}{3}}}, \tag{2}$$

где  $A_T = 0,428 \cdot 10^{-3}$  – инвариант, который определяется температурой жидкости и не зависит от ее вида [15];

$M$  – молярная масса жидкости.

Использование формулы (1) необходимо по причине того, что при нахождении ТФХ для маловлажных образцов оперативный ввод зонда в образец является серьезным препятствием при использовании экспресс-метода. В этом случае, зная значения коэффициента теплопроводности для исследуемого сырья при влажности 85 и 83%, достаточно вычислить искомую величину при влажности 8%, и построить аппроксимированную кривую, проходящую через эти точки. В выражении (1) коэффициент  $B$ , обобщенный для жидких пищевых продуктов, необходимо скорректировать для исследуемого экстракта введя поправочный коэффициент  $B_{поп}$ , определенный путем корреляции эмпирически полученного параметра и рассчитанного по формуле (2) при одинаковых влажностях [15].

### Результаты и их обсуждение

На рисунке 1 представлены фотографии водного экстракта, имеющего концентрацию сухих веществ 15% и полученного из него порошка влагоудалением с влажностью 8%.



Рисунок 1 – Фотографии водного экстракта и полученного из него порошка  
 Figure 1. Photos of an aqueous extract and the powder obtained from it

Результат экспериментальных исследований по определению плотностных характеристик водного экстракта и порошкового продукта представлен в таблице 1.

Таблица 1. Плотность водного экстракта и сухого пищевого красителя  
 Table 1. Density of water extract and dry food coloring

Наименование	Плотность $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	Концентрация сухих веществ, %
Водный экстракт из выжимок ягод тутовника	1056 ± 3	15
Порошок, полученный методом распылительной сушки водного экстракта	1667 ± 3	92

На рисунке 2 показана в графическом виде закономерность изменения физической  $\rho$  образца, построенная по двум крайним точкам (таблица 1), для интервалов варьирования  $T$  273÷363 К и  $W$  от 0,08 до 0,85 кг/кг. На величину  $\rho$  влияет химический компонентный состав и, в основном,  $W$ . Ясно, что при снижении  $W$  растет  $\rho$  образца.

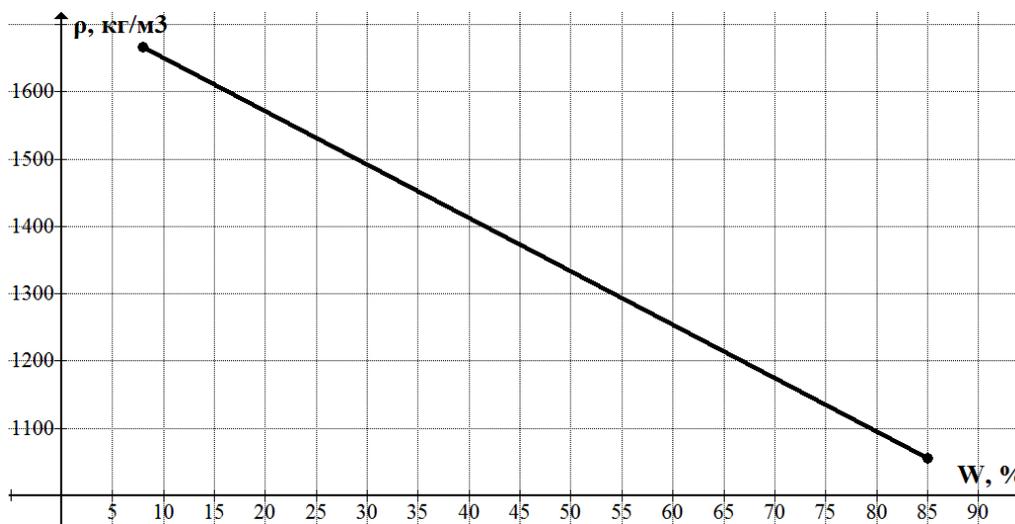


Рисунок 2 – Закономерность варьирования  $\rho$  при изменении  $W$  в пределах варьирования  $T$  273÷363 К  
 Figure 2. Regularity of variation of  $\rho$  when changing  $W$  within the range of variation  $T$  273÷363 К

Зависимость плотности от влажности материала представлена математически в линейном виде в пределах варьирования следующих параметров:  $0,08 \leq W \leq 0,85$  кг/кг и  $T$  от 273 до 363 К

$$\rho = -7,935W + 1730,5.$$

В итоге для водного экстракта при его концентрации 15% определены величины  $\rho$  и его ТФХ сведены в таблице 2.

Таблица 2. Данные по экспериментальному определению ТФХ водного экстракта  
 Table 2. Data on the experimental determination of TPC for an aqueous extract

$C$ , %	$c_m$ , Дж/(кг·К)	$a \cdot 10^8$ , м <sup>3</sup> /с	$\lambda$ , Вт/(м·К)
15 ± 0,3	3911 ± 10	≈ 13,36	0,552 ± 0,005

Дальнейшее исследование ТФХ водного экстракта предполагает выявление их зависимостей от влажности в диапазоне  $0,08 \leq W \leq 0,85$  кг/кг, в частности, для удельной теплоемкости необходимо понимать значение теплоемкости сухого остатка  $c_{с.о}$  экстракта, которое рассчитывается, используя правило аддитивности. В итоге получаем

$$c_{с.о} = \frac{3911 - 4183 \cdot 0,85}{0,15} = 2369 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$$

График на рисунке 3 является аппроксимацией закономерности варьирования  $c_m$  объекта исследования в интервале  $T$  273÷363 К и  $W$  от 0,08 до 0,85 кг/кг.

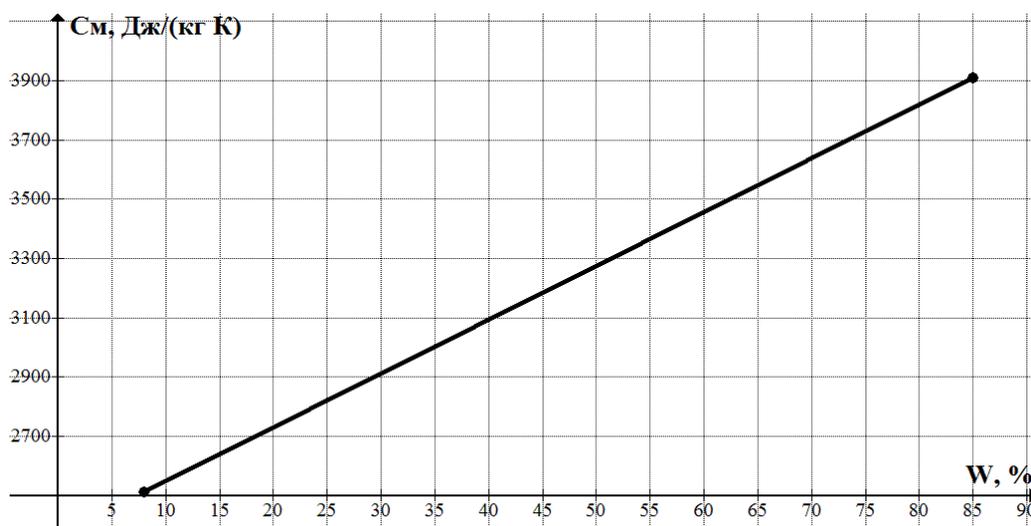


Рисунок 3 – Закономерность варьирования  $C_M$  объекта исследования в интервале температур 273÷363 К  
 Figure 3. Regularity of variation of  $C_M$  for the research object in the temperature range 273÷363 K

Результат аппроксимации теплоемкости в зависимости от влажности для  $0,08 \leq W \leq 0,85$  кг/кг в пределах варьирования  $T$  273 до 363К имеет вид

$$c_M = 18,14W + 2368,85.$$

Рассчитаем поправочный коэффициент  $B_{\text{поп}}$  для исследуемого материала при его конечной влажности 8%, используя соотношение (2), при этом  $B_{\text{поп}} = 0,487$ . Рассчитаем коэффициент теплопроводности для исследуемого материала при его конечной влажности 8%, используя соотношение (1), при этом  $\lambda = 0,451 \frac{\text{Вт}}{\text{м}\cdot\text{К}}$ .

На рисунке 4 представлен график параболической зависимости коэффициента  $\lambda$  для объекта исследования в пределах варьирования  $T$  273÷363 К и  $W$  от 0,08 до 0,85 кг/кг.

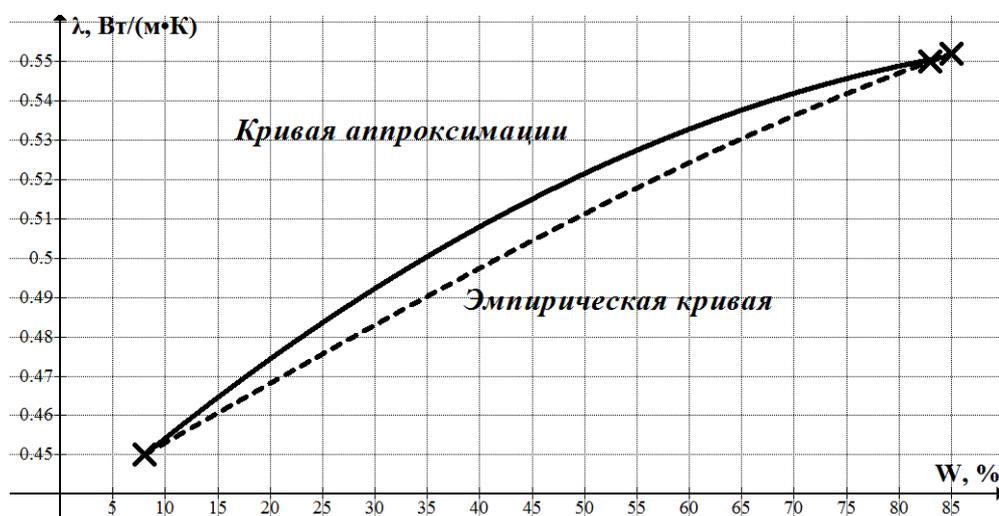


Рисунок 4 – Закономерность варьирования  $\lambda$  объекта исследования в интервале температур 273÷363 К  
 Figure 4. Regularity of variation of  $\lambda$  for the research object in the temperature range 273÷363 K

График является аппроксимацией закономерности варьирования  $\lambda$  объекта исследования в интервале  $T$  273÷363 К и  $W$  от 0,08 до 0,85 кг/кг

$$\lambda = 0,00234W - 1,1 \cdot 10^{-5}W^2 + 0,432.$$

Параметр  $a$  в заданных пределах варьирования  $W$  находим по следующему уравнению

$$a(W) = \frac{\lambda(W)}{c(W)\rho(W)}, \tag{3}$$

График на рисунке 5 является аппроксимацией закономерности (3) варьирования  $a$  объекта исследования в интервале  $T$  273÷363 К и  $W$  от 0,08 до 0,85 кг/кг.

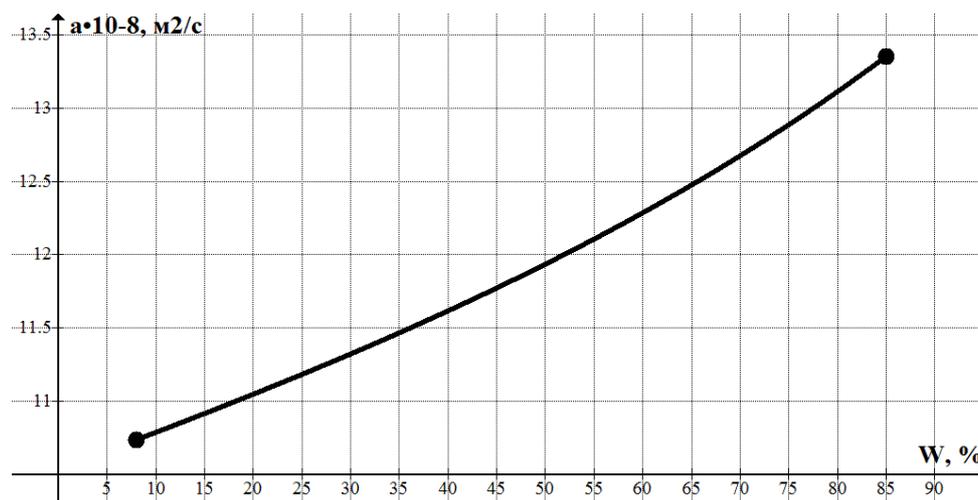


Рисунок 5 – Закономерность варьирования  $\alpha$  объекта исследования в интервале температур 273÷363 K  
 Figure 5. Regularity of variation of  $\alpha$  for the research object in the temperature range 273÷363 K

Выявление рациональных режимных параметров процедуры обезвоживания водных экстрактов и габаритов аппаратов для ее проведения опирается на расходные соотношения при контакте образца и теплоносителя в варьируемых технико-технологических условиях формирования газок капельной бинарной среды [16, 17]. основополагающими расчетными соотношениями в данном случае служат балансовые материальные и термические уравнения, кинетические и статические соотношения, опирающиеся на три основных термодинамических закона [17, 18]. Данные соотношения включают параметры кинетики обмена тепловой энергией и веществом, в частности, коэффициенты тепло-  $\alpha$  и массоотдачи  $\beta$ , точное определение которых, несмотря на множество работ, посвященных этому вопросу, вызывает значительные трудности [18, 19].

Минимальные величины  $\alpha$  наблюдаются в случаях теплообмена с газообразными средами, к примеру, воздухом  $\alpha = 10 \div 50 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ , а при контакте с жидкими средами, в частности, с водой, они возрастают до  $\alpha = 200 \div 10000$ . Интенсивность обмена тепловой энергией при движении теплоносителя относительно капли высушиваемого материала, которое может быть организовано по прямоточному и противоточному принципам, обусловлено формой, габаритами, исходной  $T$  и ТФХ дисперсных частичек, а также физическими параметрами сушильного агента и его  $T$ .

С целью нахождения  $\alpha$  в стационарном режиме, при трансфере агента параллельно образцу с низкой  $\lambda$  в пределах  $0,13 \div 1,7 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ , опираясь на опытные данные и их обработку рядом ученых [16–18] эмпирически получено соотношения для расчета критерия Нуссельта

$$\text{Nu} = 0,123 \text{Re}^{0,83},$$

где  $\text{Nu} = \frac{\alpha l_3}{\lambda_{\text{ж}}}$  ( $l_3$  – эквивалентная величина диаметра капли;  $\lambda_{\text{ж}}$  – коэффициент теплопроводности теплоносителя);

$$\text{Re} = \frac{\rho v l_3}{\mu_{\text{ж}}} \quad (\rho v \text{ – массовая скорость теплоносителя; } \mu_{\text{ж}} \text{ – коэффициент динамической вязкости}).$$

Выражение можно трансформировать для упрощения нахождения  $\alpha$  при изменении интенсивности трансфера теплоносителя и определения его рациональной  $T$  в вид

$$\alpha = 0,123 \lambda_{\text{ж}} l_3^{-0,17} \left( \frac{\rho}{\mu_{\text{ж}}} \right)^{0,83} v^{0,83}. \quad (4)$$

В соотношении (4) значения теплофизических величин  $\lambda_{\text{ж}}$ ,  $\rho$  и  $\mu_{\text{ж}}$  для теплоносителя (воздух) известны [20], а эквивалентный размер  $l_3$  берется из технических данных на небулайзер, используемый в экспериментальных исследованиях кинетики сушки. Ниже в таблице 3 представлены численные значения  $\lambda_{\text{ж}}$ ,  $l_3$ ,  $\rho$  и  $\mu_{\text{ж}}$  для сушильного агента и образца при варьировании его  $T$ .

Таблица 3. Значения величин  $\lambda_{ж}$ ,  $l_3$ ,  $\rho$  и  $\mu_{ж}$  для теплоносителя и высушиваемого материала  
 Table 3. Values of  $\lambda_{ж}$ ,  $l_3$ ,  $\rho$  and  $\mu_{ж}$  for the heat carrier and the material to be dried

$t, ^\circ\text{C}$	$\lambda_{ж}, \text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$	$\mu_{ж}, \text{Па}\cdot\text{с}$	$\rho, \text{кг}/\text{м}^3$	$l_3, \text{мкм}$
120	$3,34\cdot 10^{-2}$	$22,8\cdot 10^{-6}$	0,898	10
130	$3,42\cdot 10^{-2}$	$23,3\cdot 10^{-6}$	0,876	10
140	$3,49\cdot 10^{-2}$	$23,7\cdot 10^{-6}$	0,854	10

Учитывая, что величины, входящие в соотношение (4), зависят от температуры теплоносителя, то для упрощения его применения резонно определить соотношения, в которые вводится обобщенный комплекс  $K_\alpha = 0,123\lambda_{ж}l_3^{-0,17}\left(\frac{\rho}{\mu_{ж}}\right)^{0,83}$  и представить (4) в номограммной форме, что даст возможность оперативно получать искомые величины без расчета.

В таблице 4 сведены величины  $K_\alpha$  для варьируемых  $T$  воздушной среды.

Таблица 4. Величины  $K_\alpha$  для варьируемой  $T$  сушильного агента  
 Table 4. Values of  $K_\alpha$  for varying  $T$  drying agent

$t, ^\circ\text{C}$	120	130	140
$K_\alpha$	189,6	186,8	183,9

На рисунке 6 представлена номограмма для графического определения теплоотдачи капель водного экстракта в пределах варьирования  $T$  393÷413 K и интенсивности трансфера сушильного агента от 0,3 до 0,6 м/с, которые рекомендованы в публикациях [16, 17].

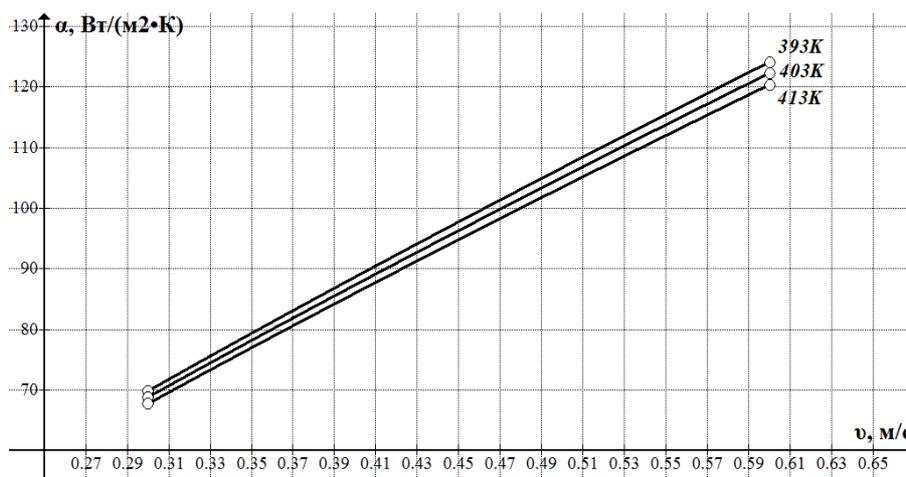


Рисунок 6 –  $\alpha \sim v$  – номограмма для  $T$  в пределах 120÷140°С  
 Figure 6.  $\alpha \sim v$  – nomogram for  $T$  within 120÷140°С

### Выводы

Научная новизна проведенных исследований заключается в том, что определены и математически обобщены в виде эмпирических уравнений теплофизические, структурные и физико-химические характеристики полученных водных растворов и концентратов в реальных влажностных и температурных диапазонах проведения сушки с учетом данных литературных источников. Полученные в процессе выполнения работы результаты и их практическая реализация позволят на следующих этапах разработки технологии натуральных антоциановых красителей экспериментально изучить и проанализировать кинетические закономерности обезвоживания исследованного экстракта и провести их математическую аппроксимацию. В итоге решив численные математические модели сушки водного экстракта, реализовав серию экспериментальных исследований по получению сухого конечного продукта и количественного определения в нем антоцианов, появится возможность представить важные для пищевой отрасли рекомендации и сведения, необходимые при расчетах и рациональном проведении процессов тепломассообмена переработки подобных объектов. В частности, сведения, касающиеся влияния температуры сушильного агента и продолжительности распылительной сушки на конечное содержание антоцианов в полученном натуральном пищевом красителе.

Надеемся, что, таким образом, у практических работников пищевой отрасли будет дополнительная возможность повысить качественные показатели извлекаемых из растительного сырья колорантов, скорость применяемых в технологии процессов, а также сократить энергозатраты при сушке водных экстрактов.

### Литература

- Collins P., Timberlake C. Recent developments of natural food colors. *Overseal Foods*. 1993, no. 6, pp. 32–38.
- Касумов М.А., Мусаев В.Р., Амиров В.А. Пищевые красители из растительного сырья // Пищевая промышленность. 1990. № 6. С. 48–49.
- Кацерикова Н.В., Ильина Н.Г. Природные пигменты в качестве пищевых добавок (обзор) // Пищевая промышленность. 1998. № 4. С. 18–19.
- Holton T.A., Cornish E.C. Genetics and biochemistry of antocyanin biosynthesis. *The Plant Cell*. 1995, V. 7, no. 7, pp. 1071–1083.
- Болотов В.М., Шичкина Е.С., Саввин П.Н., Хрипушин В.В. Особенности технологии совместного извлечения каротиноидных и антоциановых пигментов // Вестник ВГУИТ. 2012. № 2. С. 110–112.
- Особенности выращивания шелковицы в средней полосе, правила ухода [Электронный ресурс] // Goodgrunt, 2018. URL: <https://goodgrunt.ru/derevya/shelkovica-v-srednej-polose.html> (Дата обращения 17.05.2020).
- Шерьшева Ю.В., Сентюрова Л.Г., Касимова Н.Б. Краситель из плодов тутового дерева // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2018. № 5-2. С. 301–305.
- Зияева С.Ф., Васина С.М. Способ получения концентрата сока из шелковицы // Апробация. 2015. № 1. С. 13–15.
- Макаревич А.М. Функции и свойства антоцианов растительного сырья // Труды БГУ. 2009. Т. 4. С. 147–157.
- Скулкина Н.А., Колчанова С.Г., Вилисова Е.А., Студенок С.И., Черняк В.Г. Определение плотности вещества. Екатеринбург: Урал. федерал. ун-т, 2016. 31 с. [Электронный ресурс]. URL: <https://works.doklad.ru/view/V3ANngEk73s.html> (Дата обращения: 02.07.2020).
- Гаузнер С.И., Кивилис С.С., Осокина А.П., Павловский А.Н. Измерение массы, объема и плотности. М.: Изд-во стандартов, 1972. 623 с.
- Красников В.В., Панин А.С., Скверчак В.Д. Метод комплексного определения теплофизических характеристик вязких жидких, пастообразных и мелкодисперсных материалов // Известия вузов СССР. Пищевая технология. 1976. № 2. С. 138.
- Панин А.С., Скверчак В.Д. Экспресс-метод определения коэффициента теплопроводности пастообразных и мелкодисперсных материалов // Известия вузов СССР. Пищевая технология. 1974. № 1. С. 140–143.
- Гинзбург А.С., Громов М.А. Теплофизические характеристики картофеля, овощей и плоды. М.: Агропромиздат, 1987. 272 с.
- Гинзбург А.С., Красовская Г.И. Теплофизические характеристики пищевых продуктов. М.: Пищевая промышленность, 1980. 288 с.
- Долинский А.А., Малецкая К.Д. Распылительная сушка. В 2 т. Т. 2. Теплотехнологии и оборудование для получения порошковых материалов. Киев: Академперіодика, 2015. 390 с.
- Долинский А.А., Малецкая К.Д. Распылительная сушка. В 2 т. Т. 1. Теплофизические основы. Методы интенсификации и энергосбережения. Киев: Академперіодика, 2011. 376 с.
- Касаткин А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии. М.: Альянс, 2005. 753 с.
- Исаченко В.Л., Осипова В.А., Сукомел А.Е. Теплопередача. М.: Энергия, 1975. 458 с.
- Физические свойства воздуха: плотность, вязкость, удельная теплоемкость [Электронный ресурс] // Termalinfo, справочные данные. URL: <http://thermalinfo.ru/svoystva-gazov/gazovye-smesi/fizicheskie-svoystva-vozduha-plotnost-vyazkost-teploemkost-entropiya> (дата обращения 26.07.2020).

### References

- Collins P., Timberlake C. Recent developments of natural food colors. *Overseal Foods*. 1993, no. 6, pp. 32–38.
- Kasumov M.A., Musaev V.R., Amirov V.A. Food colors from vegetable raw materials. *Food Industry*. 1990, no. 6, pp. 48-49 (*In Russian*).
- Kacerikova N.B., Ilyina N.G. Natural pigments as food additives (review). *Food Industry*. 1998, no. 4, pp. 18–19 (*In Russian*).
- Holton T.A., Cornish E.C. Genetics and biochemistry of antocyanin biosynthesis. *The Plant Cell*. 1995, V. 7, no. 7, pp. 1071–1083.
- Bolotov V.M., Shichkina E.S., Savvin P.N., Khripushin V.V. Features of the technology of joint extraction of carotenoid and anthocyanin pigments. *Vestnik VSUIT*. 2012, no. 2, pp. 110–112 (*In Russian*).

6. Features of growing mulberry in the middle lane, care rules. *Goodgrunt*. 2018. URL: <https://goodgrunt.ru/derevya/shelkovic-a-v-srednej-polose.html> (Accessed 17.05.2020) (In Russian).
7. Sherysheva Yu.V., Sentyurova L.G., Kasimova N.B. Dye from mulberry tree. *International Journal of Applied and Fundamental Research*. 2018, no. 5-2, pp. 301–305 (In Russian).
8. Ziyaeva S.F., Vasina S.M. Method of obtaining juice concentrate from mulberry. *Approbation*. 2015, no. 1(28), pp. 13–15 (In Russian).
9. Makarevich A.M. Functions and properties of anthocyanins of plant raw materials. *Proceedings of BSU*. 2009, no. 4, pp. 147–157 (In Russian).
10. Skulkina N.A., Kolchanova S.G., Vilisova E.A., Studenok S.I., Chernyak V.G. Measurement of density of solids by pycnometric method. Ekaterinburg, Ural Federal University Publ., 2016. 31 p. URL: <https://works.doklad.ru/view/V3AHngEk73s.html>. (Accessed 02.07.2020) (In Russian).
11. Gauzner S.I., Kivilis S.S., Osokina A.P., Pavlovsky A.N. *Measurement of mass, volume and density*. Moscow, Publishing house of standards, 1972. 623 p (In Russian).
12. Krasnikov V.V., Panin A.S., Skverchak V.D. Method of complex determination of thermophysical characteristics of viscous liquid, pasty and finely dispersed materials. *Proceedings of the USSR Universities. Food technology*. 1976, no. 2, pp. 138 (In Russian).
13. Panin A.S., Skverchak V.D. Express-method for determining the thermal conductivity coefficient of pasty and finely dispersed materials. *Proceedings of the USSR Universities. Food technology*. 1974, no. 1, pp. 140–143 (In Russian).
14. Ginzburg A.S. Gromov M.A. *Thermophysical characteristics of potatoes, vegetables and fruits*. Moscow, Agropromizdat Publ., 1987. 272 p. (In Russian).
15. Ginzburg A.S., Krasovskaya G.I. Thermophysical characteristics of food products. Moscow, Food industry Publ., 1980. 288 p. (In Russian).
16. Dolinsky A.A., Maletskaya K.D. Spray drying, 2 V. V. 2. *Heat technology and equipment for the production of powder materials*. Kiev, Akadempriodika Publ., 2015. 390 p. (In Russian).
17. Dolinsky A.A. Maletskaya K.D. Spray drying. V. 1. *Thermophysical Foundations. Methods of intensification and energy saving*. Kiev, Akadempriodika Publ., 2011. 376 p. (In Russian).
18. Kasatkin A.G. *Basic processes and devices of chemical technology: a textbook for universities*. Moscow, Alliance Publ., 2005. 753 p. (In Russian).
19. Isachenko V.L., Osipova V.A., Sukomel A.E. *Heat transfer*. Moscow, Energiya Publ., 1975. 458 p. (In Russian).
20. Physical properties of air: density, viscosity, specific heat. URL: <http://thermalinfo.ru/svoystva-gazov/gazovye-smesi/fizicheskie-svoystva-vozduha-plotnost-vyazkost-teploemkost-entropiya> (Accessed 26.07.2020), (In Russian).

Статья поступила в редакцию 12.08.2020