

4. Mattox D. M. The foundations of vacuum coating technology, Norwich, N.Y.: Noyes Publications, 2003. – 150 p.
5. Roikh I. L., Koltunova L. N., and Fedosov S. N., Vacuum Deposition of Protective Coatings on Steel. – M.: Mashinostroenie, 1976. – 368 p.
6. Harsha, K.S.S. Principles of Physical Vapor Deposition of Thin Films, Elsevier, Great Britain, 2006. - 1176 p.
7. Dushman S. and Lafferty J. M. Scientific Foundations of Vacuum Technique, Fifth Edition, New York, John Wiley & Sons Inc, 2002, 808 p.
8. Bacaksiz E., Basol B.M., Altunbaş M., et al Effects of substrate temperature and post-deposition anneal on properties of evaporated films // Thin Solid Films, 2007. – Vol. 515. – No. 5. – P.3079–3084.

Отримано редакцією .06.2013 р.

УДК 66.047

**АКУЛИЧ А.В., д-р. техн. наук, професор, ГОСТИНЩИКОВА Л.А., ст. преподаватель**  
 УО «Могилевский государственный университет продовольствия», г. Могилев, Республика Беларусь  
**ИССЛЕДОВАНИЕ КИНЕТИКИ ПРОЦЕССА СУШКИ ЯГОДНОГО**  
**СЫРЬЯ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ СПОСОБАХ ЭНЕРГОПОДВОДА**

Сделан обзор существующих методов расчета кинетики процесса сушки. Экспериментально получены кривые сушки и скорости сушки черники, красной и черной смородины при различных способах энергоподвода (конвективный, конвективный с прокальванием, конвективный с ИК-излучением). Дан анализ и математическая обработка результатов экспериментов. Получены зависимости, описывающие кинетику сушки различных ягод.

**Ключевые слова:** конвективный энергоподвод, ИК-излучение, ягодное сырье, кривые сушки и скорости сушки, кинетика сушки.

A review of existing methods for the drying kinetics calculating is done. Drying curves and drying rate curves of blueberries, red and black currant are experimentally obtained for different methods of energy supply (convection, convection with piercing, convective IR radiation). The analysis and mathematical treatment of the experiments results are done. The dependences which describe drying kinetics of different berries are obtained.

**Keywords:** convective energy supply, IR radiation, berry raw materials, the curves of drying and drying rate, drying kinetics.

В настоящее время многие сельскохозяйственные предприятия Республики Беларусь специализируются на выращивании и сборе различных ягод. Большая их часть либо экспортируется в другие страны, либо подвергается заморозке. Сушка, как метод переработки ягод практически не применяется. Однако существует множество направлений использования высушенного ягодного сырья, одним из которых является производство из сушеных ягод тонкодисперсных порошков и дальнейшее их применение в качестве биологически активных пищевых добавок, красителей и ароматизаторов.

На предприятиях кондитерской промышленности используются сушеные ягоды импортного производства. Поэтому сушка ягод в промышленных масштабах на территории Республики Беларусь позволит не только расширить ассортиментный перечень выпускаемой кондитерскими предприятиями продукции, но и решит вопрос импортозамещения.

Использование известных способов сушки ягод сопровождается рядом недостатков: большая продолжительность сушки, невозможность использования высоких температур воздуха ввиду вероятности перегрева и пригорания ягод, потеря витаминов и биологически-активных веществ, образование пленки на поверхности ягод, затрудняющей процесс испарения влаги.

Поэтому актуально проведение теоретических и экспериментальных исследований кинетики сушки ягод с целью выбора наиболее рационального способа

подвода энергии и проведения процесса, а также создания необходимой экспериментальной базы для разработки уточненной методики инженерного расчета сушильных процессов.

На основе литературного обзора изучены методы расчета кинетики сушки различных материалов, а именно А. В. Лыкова, В.В. Красникова, Г.К. Филоненко, Б.С. Сажина, А.В. Акулича и др.

Установлено, что метод А.В. Лыкова, основанный на замене действительной кривой сушки, имеющей сложный вид, прямой линией, описывается уравнением

$$-\frac{dW}{dt} = K \cdot (W - W_p) = \chi \cdot N \cdot (W - W_p), \quad (1)$$

где  $W$ ,  $W_p$  – текущая и равновесная влажности материала, %;

$t$  – время сушки, с;

$\chi$  – относительный коэффициент сушки, зависящий от свойств материала и его начальной влажности;

$K$  – коэффициент сушки,  $\chi^{-1}$  (зависит от режима сушки и прямо пропорционален скорости сушки в первый период  $N$ ).

Г.К. Филоненко установил, что кривые сушки, полученные при разных режимах, совмещаются в одну общую кривую, если их перестроить в системе координат: скорость сушки  $dW/dt$  – приведенная скорость сушки  $\psi$  [1]. Последняя представляет собой отношение скорости сушки в любой момент к скорости сушки в первый период  $N$ . В.В. Красников в своей работе дал развитие метода А. В. Лыкова, предложив рассчитывать второй период сушки по зонам, в каждой из которых зависимость скорости сушки и влажности линейна [1]. В работе [2, 3] предложено обобщенное уравнение для расчета кинетики сушки материалов в аппаратах с активной гидродинамикой

$$dW / dt = -K \cdot (A - W)^m \cdot (W - B)^n, \quad (2)$$

где  $A$  и  $B$  – начальная и конечная влажность материала;  $m$  и  $n$  – показатели степени, выбираемые для каждого конкретного случая.

Однако все эти методы применимы только для периода постоянной и падающей скорости сушки, или при кусочно-линейной аппроксимации функции по частям.

На основе теоретических и экспериментальных исследований кинетики сушки ягод установлено, что

ягоды при сушке претерпевают период прогрева при попадании в сушильную камеру из окружающей среды. Период прогрева может составлять от нескольких минут до нескольких часов, в зависимости от температуры сушильного агента. При учете периода прогрева ягод на кривой сушки появляются две точки перегиба, соответствующие началу и окончанию периода постоянной скорости сушки. Поэтому для математического описания таких кривых требуется разработка нового метода расчета.

Применительно к сушке ягод на основе метода А. В. Лыкова и уравнения  $K = \alpha \cdot t^n$  в работе получе-

на функция (3), которая описывает кинетику сушки растительных материалов на всем интервале времени

$$-\frac{dW}{dt} = \alpha \cdot t^n \cdot (W - W_p), \quad (3)$$

где  $\alpha$ ,  $n$  – константы, определяющие темп изменения скорости сушки.

Уравнение (3) при начальном условии  $W(0)=W_H$  имеет следующее решение

$$W_t = W_p + (W_H - W_p) \cdot \exp(-a \cdot t^b), \quad (4)$$

где  $a = \alpha / (n+1)$ ;  $b = n+1$ ;

Таблица 1

Кинетика сушки ягод при различных способах энергоподвода

Наименование ягоды	Способ энергоподвода	Время сушки t, мин	Начальная влажность ягоды $W_0$ , %	Равновесная влажность ягоды $W_p$ , %	Максимальная скорость сушки $^{-1}$ (dW/dt) max, мин
Черника	конвективный с естественной циркуляцией сушильного агента	360	71,5	12,5	0,366
Черника	конвективный с принудительной циркуляцией сушильного агента	270	72,3	13	0,394
Черника	конвективный с предварительным прокалыванием и принудительной циркуляцией сушильного агента	240	72,35	12,96	0,4
Черника	конвективный с ИК-излучением	210	72	12	0,487
Красная смородина	конвективный с естественной циркуляцией сушильного агента	390	74,3	12,4	0,298
Красная смородина	конвективный с принудительной циркуляцией сушильного агента	285	74	12,9	0,36
Красная смородина	конвективный с предварительным прокалыванием и принудительной циркуляцией сушильного агента	255	74,7	12,5	0,431
Красная смородина	конвективный с ИК-излучением	225	74,7	12,5	0,48
Черная смородина	конвективный с естественной циркуляцией сушильного агента	405	76	12,5	0,37
Черная смородина	конвективный с принудительной циркуляцией сушильного агента	300	75,2	12,9	0,413
Черная смородина	конвективный с предварительным прокалыванием и принудительной циркуляцией сушильного агента	270	75,46	12,9	0,43
Черная смородина	конвективный с ИК-излучением	240	75,2	12,7	0,515

Для проведения исследований кинетики сушки ягодного сырья созданы экспериментальные установки для: конвективного энергоподвода с естественной циркуляцией сушильного агента [4], конвективного энергоподвода с принудительной циркуляцией сушильного агента и ИК-излучением [5], конвективного энергоподвода с предварительным прокалыванием и принудительной циркуляцией сушильного агента [6].

На рисунках 1 и 2 приведены кривые сушки и скорости сушки черники (экспериментальные и расчетные) при различных способах энергоподвода и температуре сушильного агента 70<sup>0</sup>С, а результаты исследо-

ваний процесса сушки различных ягод приведены в таблице 1.

Из анализа результатов исследований можно сделать вывод о преимуществах сушки при конвективном энергоподводе с ИК-излучением по сравнению с сушкой другими способами: снижение продолжительности процесса и повышение скорости сушки.

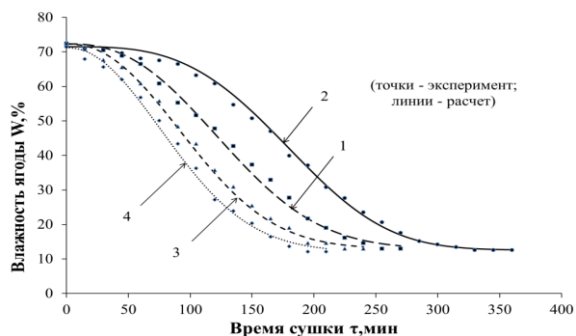


Рис. 1. Кривые сушки черники при различных способах энергоподвода

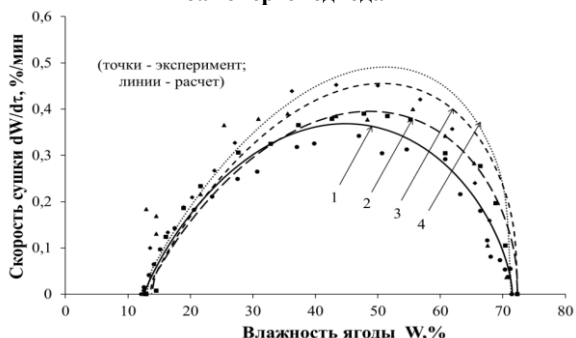


Рис. 2. Кривые скорости сушки черники при различных способах энергоподвода

1 – конвективный энергоподвод с естественной циркуляцией сушильного агента;

2 – конвективный энергоподвод с принудительной циркуляцией сушильного агента;

3 – конвективный энергоподвод с предварительным прокальванием и принудительной циркуляцией сушильного агента;

4 – конвективный энергоподвод с ИК-излучением.

Осуществлена математическая обработка кривых сушки и получены зависимости, описывающие кинетику сушки ягод с погрешностью не более 4%, которые приведены в таблице 2.

На основе полученных результатов определены показатели эффективности процесса сушки ягод с применением конвективного энергоподвода и ИК-излучения по сравнению с другими способами, которые приведены в таблице 3.

Анализируя данные таблиц и графиков, можно сделать вывод о значительных преимуществах сушки при конвективном энергоподводе с ИК-излучением по сравнению с сушкой другими способами: снижение продолжительности процесса на 25-42%; повышение скорости сушки на 19-38%.

Общим результатом работы является разработка на основе теоретических и экспериментальных исследований нового рационального способа подвода энергии и проведения сушки ягод с применением конвективного энергоподвода и ИК-излучения. Применение данного способа позволяет снизить продолжительность процесса и повысить его скорость.

Таблица 2

Описание кинетики сушки ягодного сырья

Наименование ягоды	Способ энергоподвода	Зависимость, описывающая кривую сушки
Черника	- конвективный с естественной циркуляцией сушильного агента	$W(\tau) = 12,57 + 59 \cdot \exp(-3 \cdot 10^{-8} \cdot \tau^{3,25})$
	- конвективный с принудительной циркуляцией сушильного агента	$W(\tau) = 12,96 + 59,4 \cdot \exp(-4,3 \cdot 10^{-6} \cdot \tau^{2,46})$
	- конвективный с предварительным прокальванием и принудительной циркуляцией сушильного агента	$W(\tau) = 12,96 + 59,4 \cdot \exp(-24 \cdot 10^{-6} \cdot \tau^{2,22})$
	- конвективный с ИК-излучением	$W(\tau) = 12,06 + 59,27 \cdot \exp(-68,7 \cdot 10^{-6} \cdot \tau^{2,059})$
Красная смородина	- конвективный с естественной циркуляцией сушильного агента	$W(\tau) = 12,43 + 61,9 \cdot \exp(-1,16 \cdot 10^{-6} \cdot \tau^{2,55})$
	- конвективный с принудительной циркуляцией сушильного агента	$W(\tau) = 12,9 + 61,1 \cdot \exp(-38,4 \cdot 10^{-6} \cdot \tau^{2,04})$
	- конвективный с предварительным прокальванием и принудительной циркуляцией сушильного агента	$W(\tau) = 12,5 + 62,2 \cdot \exp(-26 \cdot 10^{-6} \cdot \tau^{2,19})$
	- конвективный с ИК-излучением	$W(\tau) = 12,5 + 62,2 \cdot \exp(-19,6 \cdot 10^{-6} \cdot \tau^{2,34})$
Черная смородина	- конвективный с естественной циркуляцией сушильного агента	$W(\tau) = 12,61 + 63,4 \cdot \exp(-1,12 \cdot 10^{-6} \cdot \tau^{2,64})$
	- конвективный с принудительной циркуляцией сушильного агента	$W(\tau) = 12,9 + 62,3 \cdot \exp(-4,35 \cdot 10^{-6} \cdot \tau^{2,47})$
	- конвективный с предварительным прокальванием и принудительной циркуляцией сушильного агента	$W(\tau) = 12,9 + 62,6 \cdot \exp(-103 \cdot 10^{-6} \cdot \tau^{1,93})$
	- конвективный с ИК-излучением	$W(\tau) = 12,7 + 62,5 \cdot \exp(-736 \cdot 10^{-6} \cdot \tau^{1,5})$

Таблиця 3

Показатели эффективности процесса сушки ягод с применением конвективного энергоподвода и ИК-излучения по сравнению с другими способами

Наименование ягоды	Способ сушки	Время сушки t, мин	Экономия времени по сравнению со способом 1, %	Максимальная скорость сушки dW/dt, %/мин	Увеличение скорости сушки по сравнению со способом 1, %
Черника	1	360	-	0,366	-
	2	270	25	0,394	7,7
	3	240	33,3	0,4	9,2
	4	210	41,7	0,487	33
Черная смородина	1	405	-	0,37	-
	2	300	25,9	0,413	11,6
	3	270	33,3	0,43	16,2
	4	240	40,7	0,515	39,2
Красная смородина	1	390	-	0,298	-
	2	285	26,9	0,36	20,8
	3	255	34,6	0,431	44,6
	4	225	42,3	0,48	61

## □ Список литературы:

1. Гинзбург, А.С. Основы техники и теории сушки пищевых продуктов [Текст] / А.С. Гинзбург. – М.: Пищевая промышленность, 1973. – 528 с.
2. Акулич, А.В. Разработка высокоэффективных аппаратов с управляемой гидродинамикой для сушки и улавливания в химической и текстильной промышленности [Текст] / А.В. Акулич // Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. – М.: Московская текстильная академия, 1999.
3. Акулич, А.В. Исследование процесса сушки пищевых дисперсных материалов в вихревых аппаратах с одновременной их сепарацией [Текст] / А.В. Акулич // Тезисы докладов и сообщений 5-го Минского международного форума по тепло-и массообмену. – ММФ-2004, 24-28 мая 2004 г., Минск. – т. 2. – с. 199-201.
4. Левьюк, Л. Н. Разработка технологии получения пищевых порошков из фруктов и ягод [Текст] / Л.Н. Левьюк, Л.А. Изотова // Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности: материалы респ. науч.-технич. конф. асп., магистр. и студ., Могилев, 27 янв. 2005 г. / Бел.-Рос. ун-т.; редкол.: И. С. Сазонов [и др.]. – Могилев, 2005. – С. 270.
5. Акулич, А.В. Исследование кинетики сушки различных ягод при комбинированном энергоподводе с ИК-излучением [Текст] / А.В. Акулич, Л.А. Гостинщикова // Хранительна наука, техника и технологии 2011: труды науч. конф. с междунар. уч-м, Пловдив, 14-15 окт. 2011 / Ун-т по хранит. технологии; редкол.: Г. Вълчев [и др.] – Пловдив, 2011. – Т. LVIII. – Ч. 3. – С. 441 – 446.
6. Способ сушки ягод и устройство для его осуществления: 14956 Респ. Беларусь / В.А. Шуляк, Л.А. Изотова; заявитель Мог. гос. ун-т продовольствия. // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2011. – № 5. – С. 60-61.

Отримано редакцією .06.2013 р.

УДК 697.1

**КАСЬЯНОВ Г.И., д-р техн. наук, профессор, КОЧЕРГА А.В., доцент, РОХМАНЬ С.В., аспирант**  
**ФГБОУ ВПО «Кубанский государственный технологический университет», г. Краснодар, Россия**  
**ЭНЕРГОАУДИТ ПРЕДПРИЯТИЙ, ПЕРЕРАБАТЫВАЮЩИХ**  
**СЫРЬЕ ЖИВОТНОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ**

Представлены предложения по проведению энергоаудита на предприятиях, перерабатывающих сырье животного происхождения (мясокомбинатах, молокозаводах и рыбзаводах). Отражены цели проведения аудита. Даны предложения по оформлению результатов энергоаудита. Приведены энергосберегающие технологии.

**Ключевые слова:** водоснабжение, отопление, газоснабжение, природные ресурсы, нормы технологического проектирования, энергоресурсы, энергоаудит, технологии энергосбережения.

Suggestions for animal raw material processing enterprises (meat, milk and fish processing plants) energy audit have been represented. Purposes of the audit have been reflected. Suggestions for energy audit results paper work have been represented.

**Keywords:** water supply, heating, gas supply, resources of nature, regulations of technological design, energy resources, energy saving technologies.

Предприятия, перерабатывающие сырье животного происхождения, являются значительными потребителями энергоресурсов, в том числе по электроснабжению, водоснабжению, водоотведению, отоплению, газоснабжению, вентиляции, кондиционированию воздуха.

Водоснабжение, отопление и газоснабжение основаны на использовании природных ресурсов, природные запасы которых ограничены, что вызывает и требует к себе экономное хозяйственное отношение. В этой связи важна разработка научно обоснованных норм потребления воды, газа, тепла, внедрение и использование новейших образцов оборудования и линий, обеспечивающих высокий уровень технологических процессов в перерабатывающей промышленности.