

# Влияние микроволновой вакуумной частичной дегидратации на качество овощей

Д-р техн. наук В.С. КОЛОДЯЗНАЯ, К.Н. ЛЕБЕДЕВА  
СПбГУИПТ,

канд. техн. наук В.А. ИВАНОВ

Санкт-Петербургский электротехнический университет

**A possibility of hydrofreezing of vegetables on the example of red pepper of the sort Spirit and carrots roots of the sort Nandrin was assessed. Partial dehydration was carried out in a microwave vacuum installation «Musson-2». It was established that the evaporation of 30 – 50 % water from plant tissue of vegetables from their initial mass by the microwave vacuum method did not lead to quality deterioration, including negative structural changes.**

Для удаления влаги из пищевых продуктов многие исследователи предлагают высокотемпературный нагрев, осмос, сублимацию, инфракрасное и микроволновое излучение. Известны достоинства и недостатки этих способов.

Одним из основных и перспективных направлений использования микроволновой энергии является сушка продовольственного сырья и пищевых продуктов.

Метод микроволновой вакуумной дегидратации, впервые использованный во Франции в 1985 г. для концентрирования цитрусового сока [8], имеет много преимуществ: это быстрый, объемный, однородный, не требующий передачи тепла нагрев [6, 9, 19, 22, 25, 26, 27]. Кроме того, он создает за счет потока быстро испаряющегося пара [20] внутреннее давление [22], которое сохраняет нативную форму продукта и ускоряет миграцию влаги к поверхности. Повышение температуры продукта ограничивается точкой кипения воды при пониженном давлении. Вакуум также замедляет окислительные реакции [13], несколько повышает скорость обезвоживания [16], позволяет получить хорошие микробиологические показатели дегидрируемых материалов. Благодаря этому улучшаются цвет, вкус, структура, пищевая ценность [6, 7, 13, 14] и регидратационные характеристики материала [4].

Важным представляется обоснование технологических параметров микроволновой вакуумной частичной дегидратации, таких, как подводимая удельная мощность, давление, форма и размер частиц сырья, количество загружаемого сырья в камеру в зависимости от структурно-механических свойств, химического состава и диэлектрических характеристик растительной ткани.

Известно, что необходимым условием поглощения микроволновой (МВ) энергии материалом является наличие в нем молекул-диполей, например молекул воды [12]. Другие компоненты пищевых продуктов также способны поглощать микроволновую энергию, но сравнительно менее интенсивно [21].

Овощи с высоким начальным влагосодержанием поглощают МВ энергию быстро и эффективно до тех пор, пока содержат влагу [23]. При накоплении молекулой воды некоторой энергии она обрывает имеющиеся связи с соседними молекулами и удаляется из продукта в виде пара. Существует два основных механизма превращения МВ энергии в тепло: вращение диполей и ионизация [11]. Для промышленной дегидратации используются волны с частотой 915...2450 МГц [15, 22]. При частоте 2450 МГц электромагнитное поле проникает внутрь продукта на несколько сантиметров (до 10 см) со всех сторон.

На кафедре радиотехнической электроники СПбГЭТУ разработана простейшая математическая модель процесса микроволновой вакуумной частичной дегидратации [1, 2, 3].

В условиях МВ вакуумного обезвоживания уравнение теплового баланса может быть записано без слагаемых, соответствующих лучистому и конвективному теплообмену:

$$P_m \cdot dt = C_{dm} m_{dm} dT_{dm} + C_{H_2O} m_{H_2O} (t) dT_{H_2O} - r \cdot dm, \quad (1)$$

где  $P_m$  – МВ мощность, подводимая к дегидрируемому материалу;

$C_{dm}$ ,  $m_{dm}$  – теплоемкость и масса сухого остатка дегидрируемого материала соответственно;

$dT_{dm}$  – нагрев сухого остатка;

$C_{H_2O}$  – теплоемкость воды;

$m_{H_2O}$  — масса оставшейся воды в материале;

$dT_{H_2O}$  — нагрев воды;

$r$  — удельная теплота испарения воды;

$dm$  — масса испаренной воды за время  $dt$ .

Из уравнения (1) видно, что МВ мощность расходуется на нагрев сухого остатка и воды в материале и на испарение этой воды.

При расчете процесса микроволновой вакуумной дегидратации капиллярно-пористого сырья с клеточным строением следует учитывать наличие в нем свободной и слабосвязанной влаги.

Процесс испарения свободной влаги, сосредоточенной в капиллярах и межклеточном пространстве, мало отличается от процесса испарения со свободной поверхности.

В свою очередь, испарение слабосвязанной влаги, сосредоточенной в клетках, существенно отличается от испарения со свободной поверхности и очень критично к плотности потока микроволновой мощности. При этом большое значение имеют теплофизические свойства дегидратируемого материала, такие, как теплопроводность, теплоемкость, коэффициенты термовлагодиффузии и т.п.

Интегрально процесс дегидратации достаточно полно характеризуется кривой дегидратации, представляющей зависимость массы материала  $m_\Sigma$  от времени  $t$  (рис. 1).

Так как при частичной дегидратации не удаляется из продуктов связанный водой, то в рамках предложенной модели рассмотрим участки I и II.

Для участка I, где происходит преимущественно нагрев:

$$P_m \cdot dt = C_{eff} m_\Sigma dT, \quad (2)$$

где  $m_\Sigma = m_{dm} + m_{H_2O}$ ;

$C_{eff}$  — эффективная теплоемкость влажного продукта в начале процесса обезвоживания при условии равенства температуры продукта и содержащейся в нем воды.

Участок II (период постоянной скорости сушки) соответствует водонасыщенному состоянию материала, когда убыль влаги за счет испарения компенсируется ее поступлением из внутренних слоев. Влага может мигрировать к поверхности продукта как в виде жидкости, так и в виде пара. При наличии в капиллярно-пористом теле температурных градиентов жидкость будет перемещаться от более нагретых мест к менее нагретым.

На участке II, когда скорость испарения постоянна, первым и вторым членами уравнения (1) можно пренебречь, так как  $dT_{dm} = dT_{H_2O} \equiv 0$ :

$$P_m \cdot dt = -r \cdot dm. \quad (3)$$

После интегрирования получаем:

$$m_\Sigma = m_0 - (P/r)(t - t_0), \quad (4)$$

где  $m_0$  — начальная масса продукта;

$t_0$  — время начала испарения воды из продукта.

Главным фактором, определяющим вид кривой  $m_\Sigma(t)$ , являются величина и характер изменения подводимой мощности  $P_m$ . На рис. 2 представлены кривые дегидратации сладкого перца при разной мощности  $P_m$  (от 180 до 600 Вт) в МВ вакуумной камере [2].

Очевидно, что чем выше уровень микроволновой мощности, тем активнее убыль массы [4, 18].

Параметры дегидратации определяют качественные, и прежде всего регидратационные характеристики обезвоживаемого сырья, и включа-

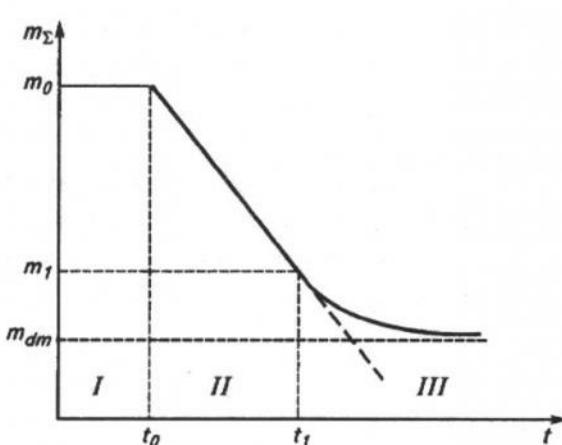


Рис. 1. Кривая дегидратации влагосодержащего материала с клеточной структурой:  
I — нагрев; II — испарение преимущественно свободной и частично слабосвязанной влаги; III — испарение слабосвязанной и связанной влаги

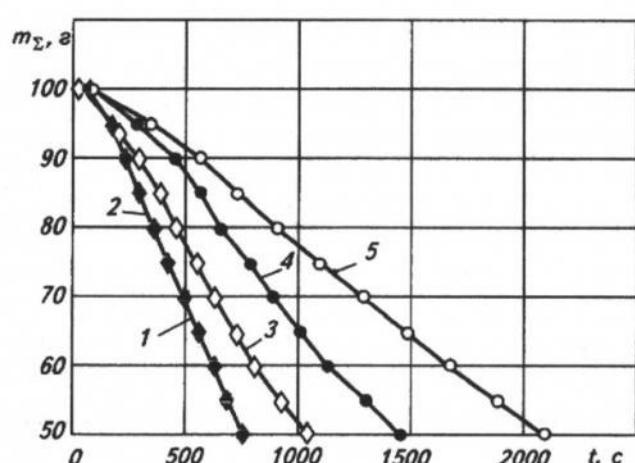


Рис. 2. Кривые частичной дегидратации лука при различной микроволновой мощности:  
1 —  $P_1 = 600$  Вт; 2 —  $P_2 = 480$  Вт; 3 —  $P_3 = 360$  Вт;  
4 —  $P_4 = 240$  Вт; 5 —  $P_5 = 180$  Вт

ют в себя: частоту излучения, величину и характер изменения подводимой мощности, уровень вакуума и процесс внешнего массообмена, толщину образца.

Показано, что регидратационная способность овощей частичной МВ вакуумной дегидратации положительно коррелирует с микроволновой мощностью и отрицательно – с давлением и толщиной образца [22]. Чем выше подводимая МВ мощность, тем сильнее внутреннее напряжение [23]. Интенсивное поглощение МВ энергии вызывает быстрое испарение воды в виде потока пара [20], таким образом ускоряя дегидратацию и предотвращая усадку благодаря развитию сил, недостаточных для разрушения структуры, но защищающих ее от затвердевания [17]. С понижением уровня вакуума ускоряются дегидратация и образование пор в условиях вакуума [16]. Чем меньше толщина образца, тем быстрее миграция влаги, скорость дегидратации и соответственно регидратации. От того, насколько быстро удаляются от поверхности материала образуемые при фазовом превращении водяные пары, будет зависеть и интенсивность сушки.

Обезвоженные в микроволновом поле в вакууме образцы меньше изменяются в объеме по сравнению с образцами, полученными классической сушкой [17], и имеют лучшие регидратационные характеристики.

Данное исследование проводилось в рамках разработки технологии микроволновой вакуумной частичной дегидратации и замораживания овощей.

На основании литературных данных по дегидро-замораживанию различных растительных материалов объектами исследования были выбраны плоды сладкого перца сорта Spirit и корнеплоды моркови сорта Нандрин, существенно отличающиеся между собой по морфологии, структурно-механическим и теплофизическими свойствам, что позволило дать объективную оценку возможности применения дегидро-замораживания для отдельных видов растительных материалов.

После подготовки овощи резали, тщательно перемешивали и полученную среднюю пробу разделяли на опытные и контрольные партии.

Опытные партии частично дегидратировали в микроволновой вакуумной установке (МВУ) «Муссон-2» (разработана в СПбГЭТУ, изготовитель ООО «Ингредиент», СПб.).

Основываясь на литературных данных о количестве удаляемой влаги  $W_d$  при частичной дегидратации различных овощей, принят интервал  $30 \leq W_d \leq 50\%$  от начальной массы сырья.

Использовали следующие наиболее эффективные значения параметров процесса частичной дегидратации: давление в камере 50...60 мм рт. ст., скорость вращения контейнера 1,5...2,0 об/мин, удельная подводимая мощность 160...320 Вт/кг, максимальная загрузка в контейнер 2/3 его объема, форма нарезки: перец – пластинки 10×10 мм, морковь – кубики с ребром 10 мм.

Исследуемые показатели качества определяли в свежих, частично дегидратированных овощах.

Содержание восстановленной формы аскорбиновой кислоты определяли методом Tilman's, органических кислот в пересчете на яблочную – титрометрическим методом, моно- и дисахаридов – цианидным методом, пектиновых веществ – карбазольным методом, каротиноидов – спектрофотометрическим методом на СФ-46, активность пероксидазы, фенолоксидазы – микрометодом Д.М.Михлина и З.С.Броневицкой, каталазы – методом Баха – Опарина. Влажность определяли стандартным методом высушивания до постоянной массы, растворимые сухие вещества и свободную влагу – рефрактометрически.

Критерием структурных изменений были выбраны показатели изменения массы при кулинарной обработке и влажности варенных образцов.

Для сравнительной оценки содержания исследуемых компонентов в образцах с разной влажностью все показатели рассчитывались на сухое вещество.

Данные анализировали методами математической статистики с нахождением доверительного интервала при вероятности 95 %. Эксперименты проводили в 3 – 5-кратной повторности. Математическую обработку результатов экспериментов проводили с помощью Microsoft Excel.

Изменение содержания основных компонентов химического состава и влажностных характеристик в процессе частичной дегидратации приведены в таблице.

Содержание восстановленной формы L-аскорбиновой кислоты (АК) в процессе микроволновой вакуумной частичной дегидратации снижается на 4,7 и 4,8 % при удалении 29,1 и 48,6 % влаги соответственно в результате обратимого перехода АК в дегидроаскорбиновую кислоту. Отчасти потеря АК, как и других составляющих клеточного сока, связана с очень высоким показателем отделения клеточного сока плодов сладкого перца при механическом воздействии во время резки [5] и вращения в контейнере при обезвоживании. Это является результатом присутствия в нем пектолитических ферментов, образующихся при созревании [24], а также наличия большего количества свободной влаги.

Показатель	Морковь			Перец		
	свежая	$W_d = 30\%$	$W_d = 50\%$	свежий	$W_d = 30\%$	$W_d = 50\%$
Влажность, %	89,9	85,1	80,4	92,8	89,1	85,2
Влагосодержание, %	893	571	410	1279	817	576
Растворимые сухие вещества, % сахарозы	8,0	12,8	18,5	10,4	11,9	16,9
Свободная влага, %	—	—	—	90,1	68,2	48,6
Аскорбиновая кислота, мг/100 г	—	—	—	2460	2343	2341
$\beta$ -Каротин, %	0,26	0,27	0,24	—	—	—
Органические кислоты, %	0,77	0,63	0,78	3,41	2,85	2,65
Моно- и дисахариды, %	85,0	80,8	83,3	62,7	61,1	65,3
Активность ФО, мл 0,01н. $Y_2$ /г	0	8,7	8,2	137,9	27,5	9,5
Активность ПО, мл 0,01н. $Y_2$ /г	12,9	0	0	0	0	0
Активность КА, мл 0,1н. $KMnO_4$ /г	57,4	38,7	28,7	65,5	15,8	4,4
Пектиновые вещества, %	23,32	22,24	21,17	—	—	—
Изменение массы при гидротермической обработке, %	—4,20	19,37	45,31	—12,87	8,18	21,90
Влажность вареных образцов, %	89,49	87,53	86,51	91,68	89,92	87,86

Под воздействием пектолитических ферментов протопектин, обуславливающий твердость плодов, переходит в растворимый пектин, который остается в соке овощей. Стабильность АК несколько увеличивается при дегидратации в кислой среде.

В процессе частичной микроволновой вакуумной дегидратации содержание каротина изменяется очень незначительно, что свидетельствует о сравнительной устойчивости провитамина А к режимам использованного вида технологической обработки. Кроме того, его потери частично компенсируются переходом каротиноидов в форму  $\beta$ -каротина под воздействием СВЧ-излучения.

При помещении обезвоженного образца в воду клеточные стенки поглощают воду и затем благодаря естественной упругости клеточной структуры при диффузии воды во внутренние полости клетки приобретают первоначальную форму [10]. Влажность опытных вареных образцов сладкого перца и моркови после частичной дегидратации в среднем ниже соответственно на 2,2% ( $W_d = 30\%$ ) и на 3,7% ( $W_d = 50\%$ ) по сравнению с контролем. Это говорит о влиянии предварительной обработки на понижение регидратации при варке, что связано с некоторым ухудшением гидрофильтральных свойств растительной ткани, обусловленным изме-

нением качественного и количественного состава пектиновых веществ различных фракций и ослаблением связей между клетками. Однако эта незначительная разница во влажности не вызвала ухудшение органолептических показателей частично дегидратированных вареных овощей по сравнению со свежими.

После частичной дегидратации содержание органических кислот несколько уменьшается, что можно объяснить интенсификацией дыхания исследуемых овощей в процессе обработки, сопровождающейся окислением органических кислот до  $CO_2$  и  $H_2O$ . Кислоты быстрее расходуются при дыхании, чем сахара, так как они непосредственно вовлекаются в окислительные превращения, тогда как сахара должны быть предварительно фосфорилированы.

После частичной дегидратации активность исследованных ферментов снижается, причем наиболее значительно в более дегидратированных образцах. По-видимому, этому способствует изменение pH цитоплазмы клеток, как следствие удаления влаги.

Снижение количества моно- и дисахаридов происходит вследствие гидролиза и активного дыхания перца и моркови. При низкой температуре дегидратации ( $\approx 45\ldots 50^{\circ}C$ ) ферменты, участвующие в

процессе дыхания, не денатурированы и катализируют окисление углеводов и органических кислот, являющихся субстратом дыхания. Более высокое содержание сахаров в частично дегидратированных образцах овощей ( $W_d = 50\%$ ), возможно, связано с гидролизом пектина и гемицеллюлозы в процессе микроволновой вакуумной дегидратации.

Установлено, что испарение 30 – 50% воды микроволновым вакуумным способом из растительной ткани овощей от их начальной массы не приводит к ухудшению качества, в том числе к негативным структурным изменениям.

### Список литературы

1. Иванов В.А., Парамоненко С.Г. Математическое моделирование процессов теплопереноса при микроволновой обработке материалов // Материалы 58-й науч.-техн. конф. – СПб.: СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2003.
2. Розанов С.В. Исследование процессов массо- и теплопереноса в различных средах под воздействием микроволнового излучения и разработка энергосберегающих микроволновых технологий и установок промышленного применения: Автoref. дис. канд. техн. наук. – СПб.: СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2004.
3. Розанов С.В., Парамоненко С.Г. Исследование процесса вакуумного микроволнового обезвоживания пищевых продуктов // Тез. доклада Междунар. науч.-техн. конф. «Ресурсосберегающие технологии пищевых производств». – СПб., 1998.
4. Al-Duri B., McIntyre S. Comparison of Drying Kinetics of Foods Using a Fan-Assisted Convection Oven, a Microwave Oven and a Combined Microwave/Convection Oven // Journal of Food Engineering, 15. 1991.
5. Biekman E.S.A., Van Den Boogaard G.J.P.M., Krebers B., Schijvens E.P.H.M. Effects of pre-treatment on shelf-life of fresh cut fruit and vegetables. In Proc. IIR-Comm. B2, C2, D1, D2/3. – Sofia, Bulgaria–1998/6.
6. Clary C.D. Use of Microwave Vacuum for Dehydration of Thomson Seedless Grapes // California Agricultural Technology Institute Research Bulletin #950405. California State University, Fresno, 1995.
7. Decareau R.V. Microwave Food Processing Equipment Throughout the World // Journal of Food Technology, 40(6). 1986.
8. Decareau, R. V. Microwaves in the Food Processing Industry. Academic Press, New York, NY. 1985.
9. Feng H., Tang J. Microwave and Spouted Bed Drying of Diced Apples: Effect of Drying Conditions on Drying Kinetics and Product Temperature // Proc. 33<sup>rd</sup> Microwave Power Symposium. International Microwave Power Institute. Manassas, V.A. 1998.
10. Gane R., Wager H.G. Plant Structure and Dehydration, In Proceedings of 1958 Conference on Fundamental Aspects of Dehydration in Foodstuffs, Society of Chemical Industries. 1958.
11. Garcia A., Bueno J.L. Improving energy efficiency in combined microwave-convective drying, Drying Technol., 16(3 – 5). 1998.
12. Grünberg M., Schuhman H., Schurhert H. Mikrowellen-erwärmung von Speisefetten und – ölen, ZFL, 43. 1992.
13. Gunasekaran S. Pulsed microwave-vacuum drying of food materials // Drying Technology 17(3). 1999.
14. <http://www.agsci.ubc.ca/fnh/courses/food301/water/waterq4.htm>
15. <http://www.uvox.se/eng/technology/technology1.htm>
16. Kiranoudis C.T., Tsami E., Maroulis Z.B. Microwave vacuum drying kinetics of some fruits // Drying technology 15(10). 1997.
17. Khraishen M.A.M., Cooper T.J.R., Magee T.R.A. Shrinkage Characteristics of Potatoes Dehydrated under Combined Microwave and Convective Air Conditions // Drying Technology 15(3&4). 1997.
18. Lefevre S. Microwave Drying of Porous Materials, Physical. 1981.
19. Lu L., Tang J., Ran X. Temperature and Moisture Changes During Microwave Drying of Sliced Food // Drying Technology, 17(3). 1999.
20. Lyons D.W., Hatcher J.D., Sunderland, J.E. Drying of a Porous Medium with Internal Heat Generation // International Journal of Heat Mass Transfer, 15, 897. 1972.
21. Mudgett R.E., Westphal W.B. Dielectric Behavior of an Aqueous Caution Exchanger // Journal of Microwave Power, 24. 1989.
22. Pappas C., Tsami E., Marinos-Kouris D. The effect of process conditions on the drying kinetics and rehydration characteristics of some MW-vacuum dehydrated fruits / Drying Technology 17(1&2). 1999.
23. Prabhanjan D.G., Ramaswamy H.S., Raghavan G.S.V. Microwave-Assisted Convective Air Drying of Thin Layer Carrots // Journal of Food Engineering, 25. 1995.
24. Priya S.K.M., Prabha T.N., Tharanathan R.N. Post harvest biochemical changes associated with the softening phenomenon in capsicum annuum fruits // Phytochemistry. Vol 42. № 4. 1996.
25. Torringa E.M., van Dijk E.J., Bartels P.V. Microwave Puffing of Vegetables: Modelling and Measurements // Proc. 31<sup>st</sup> Microwave Power Symposium. International Microwave Power Institute. Manassas, V.A. 1996.
26. Turner I.L., Rudolph V. Convective and Microwave Enhanced Drying of Glass Beads, Drying 92 b. 1991.
27. Turner I.W., Jolly P.G. The Modelling of Combined Microwave and Convective Drying of a Wet Porous Material // Drying Technology 9(5). 1991.