

## ИДЕНТИФИКАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ СУШКИ

**Г.И. КАСЬЯНОВ, Е.В. ИНОЧКИНА**

*Кубанский государственный технологический университет,  
350072, Российская Федерация, г. Краснодар, ул. Московская, 2;  
электронная почта: g\_kasjanov@mail.ru;*

В составе комбинированных пищевых изделий перспективно использование обезвоженных продуктов из плодов, ягод, обладающих высокими функциональными свойствами. Актуальность исследований заключается в создании и использовании БАВ растительного сырья для создания или обогащения адекватных, рациональных и лечебно-профилактических продуктов питания, увеличения выпуска и улучшения качества продукции с помощью низкотемпературной сушки, использования вторичных растительных ресурсов.

**Ключевые слова:** сушка, математическая модель, электромагнитное поле, сушильная установка.

Большой вклад в теорию и практику обезвоживания растительного сырья внесли учёные-исследователи А.В. Лыков, А.С. Гинзбург, В.И. Муштаев, П.А. Ребиндер, П.Д. Лебедев, К.Г. Филоненко, И.Т. Кретов, С.Т. Антипов, Б.С. Сажин, Ю.И. Шишацкий, А.А. Шевцов, А.Н. Остриков, Б.И. Леончик, В.Е. Кузанов, С.П. Рудобашта, А.А. Гухман, В.В. Красников, М.Ф. Казанский, А.А. Долинский, П.Г. Романков и другие. Однако, до настоящего времени традиционные способы сушки требуют совершенствования, с целью получения высококачественных пищевых добавок и материалов.

Сублимационная сушка, широко применяемая для таких материалов в пищевой и химико-фармацевтической промышленности, несмотря на неоспоримые преимущества, имеет существенные недостатки, связанные с длительностью процесса и его энергоёмкостью. Выполненный автором аналитический обзор литературы показал, что наиболее полно данным требованиям отвечает двухступенчатая сушка, первой ступенью которой является сверхкритический метод сушки, физическая сущность которого заключается в использовании в качестве сушильного агента диоксида углерода в сверхкритическом состоянии. Второй ступенью комбинированного способа является досушивание материала в импульсной СВЧ-вакуумной установке.

Применение предложенного автором комбинированного способа сушки для интенсификации процесса удаления влаги из плодов и овощей, является перспективным направлением для обезвоживания термолабильных материалов. Однако, несмотря на некоторый экспериментальный и теоретический опыт, накопленный в России по этому направлению, задача физического и математического моделирования комбинированного способа сушки представляет, как научный, так и практический интерес.

**Цель и задачи работы** заключается в экспериментальном и теоретическом исследовании применимости комбинированного способа сушки фруктового и овощного сырья, с последующим его использованием в целевых продуктах.

В соответствии с поставленной целью решались следующие задачи:

- исследование сорбционно-структурных свойств фруктового и овощного сырья;
- определение теплофизических характеристик фруктового и овощного сырья с различным влагосодержанием;
- изучение кинетических закономерностей интенсивной сушки в среде сверхкритического диоксида углерода;
- разработка математической модели процессов обезвоживания растительного материала способом импульсной СВЧ-сушки;
- разработка методики расчета процессов тепломассопереноса при комбинированной сушке;
- обогащение продуктов специализированного назначения фруктовыми и овощными порошками;

#### **Характеристика объектов и методов исследования.**

Определены наиболее пригодные для сушки сорта дыни (сорта Сельчанка), сахарной свеклы (сорта Кубанский МС 81), черной смородины (сорта Экзотика), топинамбура (сорта Диетический) и тыквы мускатной (сорта Жемчужина).

Растительные рыбы: белый амур (*Stenopharyngodonidella* Val.), белый толстолобик (*Hypophthalmichthys molitrix* Val.) и мойва (*Mallotus villosus*).

Сухие пищевые добавки из плодов дыни, смородины, тыквы, корнеплодов сахарной свёклы и топинамбура, а также продукты, обогащенные разработанными пищевыми добавками. CO<sub>2</sub>-экстракты лимнофилы ароматной, перца длинного и тмина.

Таблица 1 – Химический состав выбранного для исследований сырья

Вид исследуемого сырья	Содержание, %								
	Сухие вещества	Гликемический индекс	Жир	Белок	Сахара	Вит. С мг%	Зола	Пектиновых веществ,	Средняя масса плода, кг
Дыня	9	13	0,3	0,6	6,8	20,0	0,6	0,8	3,1
Свекла сахарная	14	30	0,1	1,5	9,6	20,0	1,0	0,7	0,5
Смородина черная	6,7	15	0,4	1,0	7,8	70	0,9	0,9	0,003
Топинамбур	19	20	0,1	2,1	12,7	6,0	1,4	0,7	0,09
Тыква	8,2	15	0,1	1,0	4,5	8,0	0,6	1,2	3,7

При выполнении работы были использованы современные стандартные методики исследований химических, биохимических, микробиологических, органолептических исследований. Массовую долю сахаров определяли по ГОСТ 8756.13.87, сухих веществ по ГОСТ 28561-90, содержание витаминов и микроэлементов – по прописям Госфармакопеи.

Качество пищевых добавок определяли по ТУ 10.048549-074-98, с учетом подлинности, отсутствия примесей и оценке числовых показателей - плотности, угла вращения, кислотного числа, показателя преломления. Исследования выполнены автором на сертифицированных приборах Центра коллективного пользования Института пищевой и перерабатывающей промышленности КубГТУ.

### **Промежуточные и основные результаты исследований.**

Описаны технологические особенности производства пищевых добавок из плодов и овощей, анализ которых позволил выявить стадии с наибольшим выходом продукта. Основным объектом исследования выбрана стадия обезвоживания плодов и овощей.

Данный процесс проводится способом сверхкритической  $\text{CO}_2$ -сушки за счет удаления значительного количества влаги углекислым газом при давлении до 30 МПа и температуре до 55 °С. осуществляется путем подачи подготовленного овощного сырья в сушильную камеру с псевдооживленным слоем инертной насадки. Интенсивное истирание овощей на поверхности насадки и высокая температура термообработки обуславливают потери, связанные с уносом влаги из сырья и инактивацией ферментов, интенсивно проходящих при температуре более 50 °С. Предложены рациональные способы сушки термолабильного овощного сырья. Более подробно рассмотрен новый  $\text{CO}_2$ -сверхкритический способ сушки, физическая сущность которого заключается в повышении растворимости паров воды в сверхкритическом  $\text{CO}_2$ . Досушивали сырьё обработкой в электромагнитном поле частотой 2400-3000 МГц и длине волны от 12 до 10 см.

Такая организация процесса позволяет активировать молярный перенос влаги в материале и значительно повысить интенсивность сушки.

Описаны результаты экспериментальных исследований теплофизических свойств плодов и овощей как объектов сушки, включающих гранулометрический состав высушиваемого материала, сорбционно-структурные характеристики порошкообразных овощей, теплофизические свойства порошков, коэффициенты внутреннего массопереноса в мякоти овощей – потенциалопроводность и относительный коэффициент термодиффузии.

Сорбционно-структурные характеристики овощей, с учётом объема пор и его распределения по радиусам, определяли с помощью адсорбционного метода, описанных экспериментальными изотермами сорбции-десорбции.

Экспериментальные данные охарактеризуют материал с переходнопористой объемной долей микропор 4,3 %, с наличием переходных пор – 95,7 %. При исследовании равновесия влаги для температур от 0 до 60 °С удалось получить уравнение, как максимальное гигроскопическое влагосодержание материала зависит от температуры:

$$U_{\text{м.г.}} = 2,540 - 3,919 \cdot 10^{-2} \cdot t + 6,580 \cdot 10^{-4} \cdot t^2 - 6,561 \cdot 10^{-6} \cdot t^3 \quad 1)$$

и равновесного влагосодержания материала от температуры и относительной влажности сушильного агента

$$U_p = \frac{a' \varphi^{0,5} + b' \varphi + c' \varphi^{1,5}}{1 + d' \varphi^{0,5} + e' \varphi + (f' + g') \varphi^{1,5}}, \quad 2)$$

где  $a', b', c', d', e', f', g'$  – опытные коэффициенты политермы десорбции, зависящие от температуры.

Теплофизические характеристики овощей определяли комплексным способом, основанным на уравнениях теплопроводности для неограниченного цилиндра с граничными условиями первого рода, в зависимости от времени. Обработка экспериментальных данных позволила получить следующие корреляционные зависимости тепловых коэффициентов от влагосодержания материала в интервале температур 1,6÷51 °С и влагосодержаний  $U = 0,1025 \div 4,0123$  кг/кг:

зависимость коэффициента теплопроводности

$$\lambda = 0,06 + 0,01e^{-0,5 \left( \frac{U-3,023}{0,134} \right)^2}; \quad 3)$$

коэффициента температуропроводности

$$a = \frac{5,555 - 1,254U^2 + 0,077U^4}{1 - 0,213U^2 + 0,011U^4 + 1,54 \cdot 10^{-4} U^6} \cdot 10^{-8}; \quad 4)$$

коэффициента теплоемкости объектов сушки

$$C = 782,96 + 19,687U. \quad 5)$$

Коэффициент потенциалопроводности плодов и овощей планируемой влажности  $a_m$  определяли путем анализа кривых сушки.

Относительный коэффициент термодиффузии зависит от влагосодержания и температуры:

$$\delta = -0,01350 + 1,199 \cdot 10^{-3} \cdot (t + 6)^{0,5} + \frac{0,04422 - 1,665 \cdot 10^{-3} \cdot t + 6,604 \cdot 10^{-5} \cdot t^2 - 1,226 \cdot 10^{-6} \cdot t^3 + 7,562 \cdot 10^{-7} \cdot t^4}{1 + \left[ \frac{U - (2,540 - 3,919 \cdot 10^{-2} \cdot t + 6,580 \cdot 10^{-4} \cdot t^2 - 6,561 \cdot 10^{-6} \cdot t^3) \cdot 6}{1,404 - 0,01427 \cdot t + 1,074 \cdot 10^{-4} \cdot t^2 - 1,417 \cdot 10^{-6} \cdot t^3} \right]}$$

при температуре  $t = 0 \div 60$  °С и влагосодержании:  $U = 0 \div 3,0$  кг/кг.

Результаты экспериментальных исследований по двухстадийной сушке плодов и овощей позволили обосновать выбор способа второго этапа обезвоживания материала - использование вакуумного способа СВЧ-сушки.

Полученные кривые сушки и температурные кривые при конвективном нагреве использовались для идентификации параметров модели с помощью модифицированного коэффициента массоотдачи и коэффициента теплоотдачи.

Составлен алгоритм совместного решения газодинамической модели и модели взаимосвязанного влаго- и теплопереноса на последовательно протекающих стадиях прогрева овощного сырья и сброса давления.

В работе приведены экспериментальные данные по сверхкритической сушке и идентификация параметров ее математической модели. Спрогнозирована теоретическая возможность обезвоживания плодового и овощного сырья в среде инертного газа способом молекулярной эмиссии. Разработана конструкция компактной сушильной установки, позволяющая одновременно сушить разнородные виды сырья. Обоснован выбор технологических приемов подготовки сырья к сушке. Новизна работы заключается в установлении рациональных режимов удаления влаги из сырья с использованием в качестве сушильного агента диоксида углерода. Для обезвоживания ломтиков овощей и пюреобразной массы предложен режим сушки: температура процесса 35-65 °С, продолжительность процесса 1,0-1,5 часа. Установлено изменение содержания сахаров в образцах сырья в период

сушки. Получена зависимость содержания и потерь витамина С в образцах продуктов от температуры и продолжительности нагрева. Для сверхкритической сушки определены оптимальные режимы влагоудаления из овощного сырья, подтвержденные экспериментально полученным коэффициентом диффузии с температурой теплоносителя 40...60 °С, продолжительность процесса 30...60 мин до 40–50%-го содержания влаги.

Обосновано применение сверхкритического газа для досушки овощного сырья при температуре теплового агента до 50 °С, что позволяет сохранить исходные питательные вещества сырья. Установка редуктора на выходе сушильного барабана предупреждает разбрызгивание питательных веществ при резком перепаде давления. Качественные показатели продуктов сверхкритической сушки с учетом органолептических, физико-химических показателей, не отличаются по степени перевариваемости и усвояемости от исходных продуктов. При этом удастся сохранить в продукте полиненасыщенные жирные кислоты, незаменимые аминокислоты, витамины, минеральные вещества и другие важные показатели пищевой ценности продуктов. Новая технология обезвоживания плодов и овощей позволяет сохранять характерный для продуктов аромат и вкус. Образцы продуктов сверхкритической сушки обладают пористой структурой и высокой абсорбционной способностью.

С целью определения возможности применения данного метода был поставлен ряд опытов по изучению его отдельных стадий. Опыты проводились на специально созданной лабораторной установке (рис. 1).

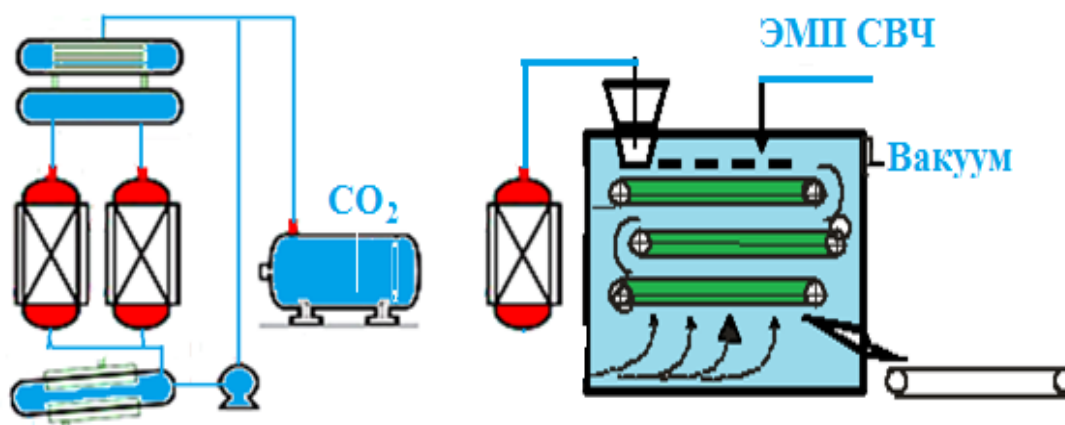


Рисунок 1 – Схема экспериментальной установки

В результате были получены кривые сушки и температурные кривые по

толщине материала при сушке сбросом давления и конвективном нагреве овощей при различных значениях температуры и начального влагосодержания материала, температуры воздуха и остаточного давления в системе (в случае сушки сбросом давления).

**Заключение и выводы.** Экспериментальные исследования заключались в осуществлении процессов сушки на стадии «унос влаги из сырья диоксидом углерода – сброс давления», что обеспечивало максимальное удаление влаги без явлений термодеструкции. На этом этапе плодое и овощное сырьё прогревалось диоксидом углерода до 50 °С и давлении до 40 МПа. В самой сушильной камере температура углекислого газа вначале составляла 65 °С, а затем постепенно снижалась до 40 °С на последних. Организация процесса CO<sub>2</sub>-сушки при таких режимных параметрах позволяет обезвоживать плодое или овощное пюре толщиной 5 см до промежуточной влажности 40 % за 25-39 мин. CO<sub>2</sub>-обработка сырья включает 20 циклов конвективного нагрева материала – удаления влаги. Высушенный до состояния промежуточной влажности материал представляет собой пористую массу, которая передаётся на дальнейшее обезвоживание в вакуумную СВЧ-установку, с величиной вакуума 200 Па и температуре 40-45 °С.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Иночкина, Е.В. Совершенствование технологии конвективной СВЧ-сушки плодов. //Известия вузов. Пищевая технология, № 5-6, 2014. – С. 62-65.
2. Иночкина, Е.В., Зотова Л.В. Технология получения сушеных пищевых добавок из плодов. – В сб. матер. междун. научно-практ. конф. «Устойчивое развитие, экологически безопасные технологии и оборудование для переработки пищевого сельскохозяйственного сырья; импортоопережение». – 21 июня 2016 г. – Краснодар: КубГТУ, 2016. – С. 274-277.
3. Силинская, С.М., Иночкина, Е.В. Технология и экономика переработки семян амаранта. //Известия вузов. Пищевая технология, № 5-6, 2015. – Деп. в ВИНТИ 02.11.2015, №183-В2015. – 12с.

## REFERENCES

1. Inochkina, E.V. Sovershenstvovanie tekhnologii konvektivnoy SVCH-sushki plodov. //Izvestiya vuzov. Pishchevaya tekhnologiya, № 5-6, 2014. – S. 62-65.



2. Inochkina, E.V., Zotova L.V. Tekhnologiya polucheniya sushenykh pishchevykh dobavok iz plodov. – V sb. mater. mezhdun. nauchno-prakt. konf. «Ustoychivoe razvitie, ekologicheski bezopasnye tekhnologii i oborudovanie dlya pererabotki pishchevogo selskokhozyaystvennogo syrya; importooperezhenie». – 21 iyunya 2016 g. – Krasnodar: KubGTU, 2016. – S. 274-277.

3. Silinskaya, S.M., Inochkina, E.V. Tekhnologiya i ekonomika pererabotki semyan amaranta. //Izvestiya vuzov. Pishchevaya tekhnologiya, № 5-6, 2015. – Dep. v VINITI 02.11.2015, №183-V2015. – 12s.

## *IDENTIFICATION PARAMETERS OF THE MATHEMATICAL MODEL OF DRYING*

**G.I. KASYANOV, E.V. INOCHKINA**

*Kuban State Technological University,*

*2, Moskovskaya st., Krasnodar, Russian Federation, 350072; e-mail: g\_kasjanov@mail.ru;*

As part of the combined food products promising use of dehydrated foods from fruits, berries, having high functional properties. The relevance of research is the creation and use of biologically active substances of plant materials to create or enrich an adequate, rational and preventive foods, increase output and improve product quality by using low-temperature drying, use of secondary plant resources.

**Key words:** drying, mathematical model of the electromagnetic field, drying plant