

УДК 633.854.78

## Осциллирующий режим сушки шинкованной моркови инфракрасным излучением\*

Канд. техн. наук Демидов С.Ф.<sup>1</sup>, д-р техн. наук Вороненко Б.А.,  
д-р техн. наук Пеленко В.В., канд. техн. наук Демидов А.С., Еловик Д.К.  
<sup>1</sup>demidovserg@mail.ru  
Университет ИТМО  
191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9

*Главной особенностью процесса сушки растительного сырья является ограничение по температуре. Под воздействием высоких температур происходят химические изменения, которые приводят к распаду комплексов липидов с белками и углеводами, происходит окислительный распад витаминов и других биологически активных веществ, денатурация белков, меняется естественная окраска, запах и вкус, понижается способность набухать и удерживать воду, сухие продукты становятся менее стойкими в хранении. Одним из способов интенсификации процесса сушки растительного сырья является применение инфракрасного излучения выделенной длины волны, позволяющего исключить перегрев материала и проводить процесс сушки в более "мягком" температурном режиме, обеспечивая сохранение всех качеств исходного продукта. Данное исследование посвящено осциллирующему режиму процесса сушки слоя шинкованной моркови инфракрасным излучением выделенной длины волны при постоянном электроподводе в зависимости от технологических и конструктивных параметров проведения процесса.*

**Ключевые слова:** шинкованная морковь, инфракрасное излучение, сушка, влагосодержание, температура, плотность теплового потока.

---

## Oscillatory mode of drying shredded carrots by infrared radiation\*

Ph.D. Demidov S.F.<sup>1</sup>, D.Sc. Voronenko B.A., D.Sc. Pelenko V.V.,  
Ph.D. Demidov A.S., Elovik D.K.  
<sup>1</sup>demidovserg@mail.ru  
ITMO University  
191002, Russia, St. Petersburg, Lomonosov str., 9

*The main feature of the drying process plant raw material is temperature limited. Under high temperature chemical changes occur that lead to the disintegration of the complexes of lipids with proteins and carbohydrates, the oxidative decomposition of vitamins and other biologically active substances, denaturation of proteins, changing the natural coloring, odor and taste, reduced ability to swell and retain water, dry products are less stable in storage. One of the ways to intensify the process of drying the plant raw material is the use of infrared radiation dedicated wavelength, eliminates overheating of the material and to conduct the drying process in the "softer" temperature mode, ensuring the preservation of all the qualities of the original product. This study focuses on the oscillating regimes of drying process layer of shredded carrots isolated infrared wavelength at constant elektropodvode depending on technological and design parameters of the process.*

**Keywords:** shredded carrots, infrared radiation drying, the moisture content, temperature and heat flux.

---

\*НИР финансируется из централизованных средств Университета ИТМО в 2014 г.

Наименование темы НИР: «Разработка ресурсосберегающих технологий и машинно-аппаратурного обеспечения производства высококачественных сухих мелкодисперсных продуктов из сырья растительного происхождения»

Главной особенностью процесса сушки растительного сырья является ограничение по температуре. Под воздействием высоких температур происходят химические изменения, которые приводят к распаду комплексов липидов с белками и углеводами, происходит окислительный распад витаминов и других биологически активных веществ, денатурация белков, меняется естественная окраска, запах и вкус, понижается способность набухать и удерживать воду, сухие продукты становятся менее стойкими в хранении [1,2,3]. Показателем термоустойчивости растительного сырья принято считать максимально допустимую температуру нагрева его в процессе сушки. На основании литературных источников [4,5] при конвективной сушке температура объекта сушки должна быть не выше 60<sup>0</sup>С, а температура теплоносителя с учётом тепловых потерь не выше 70-80<sup>0</sup>С.

Необходимо учитывать не только максимальную температуру продукта, но и скорость доведения его до этой температуры, время выдержки продукта при максимальной температуре. Скорость нагрева и обезвоживания продуктов при различных методах сушки зависит от их теплофизических, массообменных характеристик и движущей силы процесса. Движущей силой переноса влаги могут быть градиенты концентрации влаги, температуры, осмотического давления, общего давления внутри тела и другие.

Одним из способов интенсификации процесса сушки растительного сырья является применение инфракрасного излучения выделенной длины волны, позволяющего исключить перегрев материала и проводить процесс сушки в более "мягком" температурном режиме, обеспечивая сохранение всех качеств исходного продукта [6,7,8]. Это происходит из-за снижения температуры испарения влаги при инфракрасном излучении.

Технологический процесс сушки шинкованной моркови инфракрасным излучением без предварительного отжима, подсушивания можно организовать при постоянном энергоподводе и при прерывном энергоподводе. При постоянном энергоподводе инфракрасный нагреватель включенным остается в течение всего процесса сушки. При прерывном энергоподводе происходит чередование периодов включения и отключения инфракрасного нагревателя, можно регулировать среднее значение мощности ИК-нагревателя и управлять процессом в зависимости от функциональных требований и закономерностей тепломассопереноса. Эти методы сушки используются только для достижения предельно допустимой температуры для данного продукта.

Данная статья посвящена исследованию осциллирующего режима процесса сушки слоя шинкованной моркови инфракрасным излучением выделенной длины волны при постоянном электроподводе в зависимости от технологических и конструктивных параметров проведения процесса.

Исследования процесса сушки шинкованной моркови были проведены на экспериментальном стенде [9,10, 11].

В сушильной камере установлены инфракрасные излучатели с отражателями. В качестве генераторов ИК - излучения применены линейные кварцевые излучатели диаметром 0.012 м с функциональной керамической оболочкой [12]. ИК - излучатели установлены сверху и снизу относительно сетчатого поддона с подложкой из нержавеющей сетки с шагом 2 мм, который может перемещаться с помощью направляющих в вертикальном направлении. На подложку из нержавеющей сетки помещается продукт. Перемещение поддона позволяет регулировать расстояние между инфракрасными излучателями и поддоном. Обдув слоя шинкованной моркови осуществлялось вентилятором ВН-2МиРОО, скорость воздуха составляла 0,35 м/с.

Для снятия температурных полей в объектах сушки используются хромель-алюмелевые ТХА 9419-23 термопары градуировки ХА<sub>94</sub> с диаметром проволоки 6·10<sup>-4</sup> м.



**Рис. 1. Фото экспериментального стенда**

Измерение температуры поверхности облучаемого материала производится при помощи дистанционного неконтактного инфракрасного термометра RaytekMiniTemp МТ6.

Измеритель температуры ИТ-2 в комплекте с преобразователями плотности теплового потока и ТХА (ХА94)термопарами используется в качестве устройства автоматизированного сбора и обработки информации.

Убыль массы шинкованной моркови в процессе сушки измеряется устройством автоматического взвешивания, разработанного на базе электронных аналитических весов GF-600.

Для измерения влажности шинкованной моркови используется анализатор влажности ЭЛВИЗ-2.

Толщина частицы шинкованной моркови составляло 2-3мм.

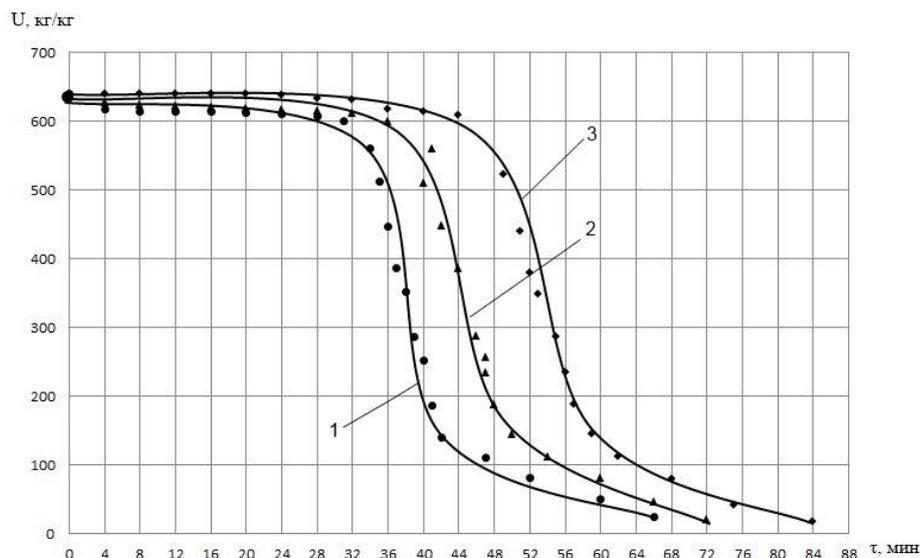
Проведены экспериментальные исследования процесса сушки слоя шинкованной моркови высотой 15-35 мм в осциллирующем режиме до конечного среднего влагосодержания  $\bar{U}=12,0$  кг/кг при плотности теплового потока  $3,75$  кВт/м<sup>2</sup> и при достижении температуры на поверхности слоя продукта  $54 - 55^{\circ}\text{C}$ , при плотности теплового потока  $3,55$  кВт/м<sup>2</sup> и при достижении температуры на поверхности слоя продукта  $52 - 53^{\circ}\text{C}$  включался вентилятор для охлаждения температуры на поверхности слоя продукта до  $40 - 42^{\circ}\text{C}$ .

На рисунках 2,3 представлены графики зависимости среднего влагосодержания шинкованной моркови от времени  $t$  и основных влияющих факторов.

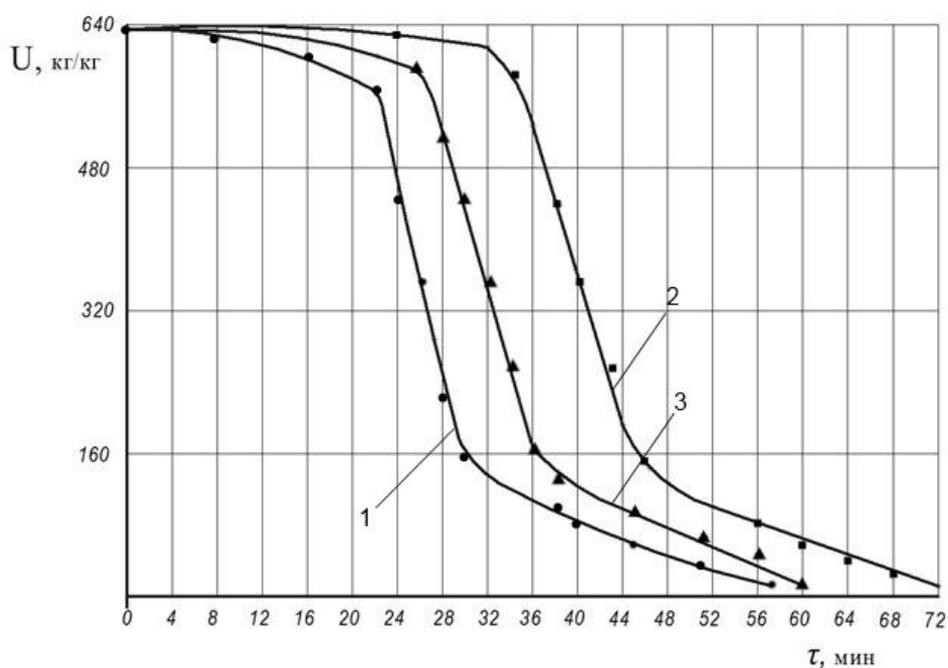
В начале процесса сушки шинкованной моркови количество влаги имеет максимальное значение и она в основном механически связана с материалом, инфракрасным излучением в период интенсивного нагрева большая часть ее будет удалена в первых циклах процесса с минимальными затратами энергии на совершение работы по отрыву влаги от сухого вещества.

Низкие температуры ведут к увеличению продолжительности процесса инфракрасной сушки для нагрева материала до достижения предельной температуры нагрева.

Высокая скорость нагрева в процессе сушки шинкованной моркови может привести не только к быстрому удалению влаги, но и сложным необратимым химическим изменениям, в результате которых потеряются питательные вещества и витамины.



**Рис. 2. Кривые процесса сушки инфракрасным излучением шинкованной моркови высотой слоя 15 мм (кривая 1), высотой слоя 25 мм (кривая 2), высотой слоя 35 мм (кривая 3), при плотности теплового потока  $3,55 \text{ кВт/м}^2$  и скорости воздуха обдува  $0,25-0,35 \text{ м/с}$**



**Рис. 3. Кривые процесса сушки инфракрасным излучением шинкованной моркови высотой слоя 15 мм (кривая 1), высотой слоя 25 мм (кривая 3), высотой слоя 35 мм (кривая 2), при плотности теплового потока  $3,75 \text{ кВт/м}^2$  и скорости воздуха обдува  $0,25-0,35 \text{ м/с}$**

Быстрое повышение температуры свыше 60 °С шинкованной моркови при инфракрасной сушки приводит к потере витамина С, что ухудшает его технологические свойства. Значительный температурный градиент, противоположный градиенту влагосодержания, отрицательно влияет на структурно-механические свойства продукта.

При двухстороннем ИК-облучении шинкованной моркови в период непрерывного нагрева при осциллирующем режиме подводится теплота, необходимая для испарения влаги, возникают перепады температур и влагосодержаний, в то время как перепады влагосодержания малы. В результате этого влага под воздействием градиента температур перемещается по направлению потока тепла внутрь слоя шинкованной моркови, расположенной на сетчатом поддоне из нержавеющей стали, что вызывает увеличение влагосодержания в середине слоя. Одновременно происходит испарение влаги с нижнего и верхнего слоев поверхностей шинкованной поверхности, что увеличивает градиент влагосодержания, направленный к центру продукта, а поток влаги под действием градиента влагосодержания направлен к поверхностным слоям продукта. Этот перенос влаги и испарение на поверхностях создают все возрастающий перепад влагосодержания по толщине слоя. В результате этого величина градиента влагосодержания становится уже больше градиента температур. Тогда направление потока влаги изменяется на обратное и влага перемещается из внутреннего слоя к открытой поверхности, что вызывает постепенное увеличение влагосодержания на поверхности.

При достижении температуры верхнего слоя продукта 54-55°С включается вентилятор для обдува слоя. В процессе обдува в продукте возникает перепад температур между внутренними и поверхностными слоями шинкованной моркови, в результате чего образуется градиент температуры, вектор которого направлен из глубинных слоев шинкованной моркови к поверхностным слоям. Это совпадает с направлением вектора выхода свободной влаги из продукта на его поверхность. Чем больше разность температур между глубинными слоями и его поверхностными слоями, тем выше температурный градиент, тем сильнее напор свободной влаги из глубины продукта на его поверхность. Этим достигается необходимое условие интенсификации процесса удаления влаги и получения продукта с качественными показателями по сохранности витамина 'С'. На стадии охлаждения целесообразно минимальную температуру задавать в диапазоне 30-35°С, но более низкие температуры ведут к увеличению продолжительности процесса сушки и затрат энергии на нагрев продукта для достижения предельной температуры.

Получены наилучшие параметры проведения осциллирующего режима процесса сушки слоя шинкованной моркови инфракрасным излучением выделенной длины волны при постоянном электроподводе в зависимости от технологических и конструктивных параметров проведения процесса.

Разработаны исходные требования и техническое задание на промышленную установку для сушки шинкованной моркови в осциллирующем режиме.

### Список литературы

1. Кац З.А. Производство сушеных овощей, картофеля и плодов.- М.: Пищевая промышленность, 1976.-47с.
2. Гуляев В.Н., Кац З.А. Справочник технолога пищевого концентратного и овощесушильного производства. –М.: Легкая и пищевая промышленность , 1984.-488с.
3. Гинзбург А.С. Сушка пищевых продуктов.- М.: Пищепромиздат, 1960- 683 с.
4. Гинзбург А.С. Основы теории и техники сушки пищевых продуктов.- М.:Агропромиздат, 1985.-335с.

5. Васильев В.Н., Куцакова В.Е., Фролов С.В. Технология сушки основы тепло-и массопереноса. Санкт-Петербург: ГИОРД, 2013.-224с.

6. Демидов С.Ф., Ободов Д.А., Вороненко Б.А. Кинетика сушки морской капусты инфракрасным излучением // Процессы и аппараты пищевых производств. 2012. №1.

7. Демидов С.Ф., Вороненко Б.А., Ободов Д.А. Математическое описание совместного тепломассопереноса при инфракрасном нагреве морской капусты // Процессы и аппараты пищевых производств. 2012. № 2.

8. Демидов С.Ф., Вороненко Б.А., Ободов Д.А. Сушка морских водорослей инфракрасным излучением // Научный журнал НИУ ИТМО. Серии «Процессы и аппараты пищевых производств». 2014. №2.

9. Патент 2463538 Российская Федерация, МПК F26B 3/30. Многоярусная камера инфракрасной сушки [Текст] / Ободов Д.А., Демидов С.Ф., Вороненко Б.А., Пеленко В.В.; заявитель и патентообладатель Ободов Д.А.- №2010151818/06; заявл.17.10.2010; опубл.10.10.2012, Бюл.№28.

10. Вороненко Б.А., Демидов А.С., Демидов С.Ф. Аналитическое решение дифференциальных уравнений тепло- и влагопереноса при инфракрасном нагреве масличных семян // Процессы и аппараты пищевых производств. 2012. №1.

11. Демидов А.С., Вороненко Б.А., Демидов С.Ф. Сушка семян подсолнечника инфракрасным излучением // Новые технологии. – 2011. – Вып.№3. – С.25-30.

12. Ободов Д.А., Демидов С.Ф., Вороненко Б.А. Источники инфракрасного излучения с энергоподводом для термообработки пищевых продуктов // Процессы и аппараты пищевых производств. 2011. №1.

## References

1. Kats Z.A. Production of dried vegetables, potatoes and fruits.- M.: Pishchevaya promyshlennost', 1976.-47 p.

2. Gulyaev V.N., Kats Z.A. Reference book of the technologist of pishchekontsentratny and ovoshchesushilny production. –M.: Legkaya i pishchevaya promyshlennost' , 1984.-488 p.

3. Ginzburg A.S. Drying of foodstuff.- M.: Pishchepromizdat, 1960- 683 p.

4. Ginzburg A.S. Bases of the theory and technology of drying of foodstuff.- M.:Agropromizdat, 1985.- 335 p.

5. Vasil'ev V.N., Kutsakova V.E., Frolov S.V. Tekhnologiya of drying of a basis warm and mass transfer. Sankt-Peterburg: GIORD, 2013.-224 p.

6. Demidov S.F.,Obodov D.A., Voronenko B.A. Kinetik of drying of sea cabbage infrared radiation // *Protsessy i apparaty pishchevykh proizvodstv*. 2012. №1.

7. Demidov S.F., Voronenko B.A., Obodov D.A. The mathematical description of a joint heatmass transfer at infrared heating of sea cabbage // *Protsessy i apparaty pishchevykh proizvodstv*. 2012. № 2.

8. Demidov S.F., Voronenko B.A., Obodov D.A. Drying of seaweed infrared radiation // *Nauchnyi zhurnal NIU ITMO. Serii «Protsessy i apparaty pishchevykh proizvodstv»*. 2014. № 2.

9. Patent 2463538 Rossiiskaya Federatsiya, MPK F26V 3/30. Mnogoyarusnaya kamera infrakrasnoi sushki [Tekst] / Obodov D.A., Demidov S.F., Voronenko B.A., Pelenko V.V.; zayavitel' i patentoobladatel' Obodov D.A.- №2010151818/06; zayavl.17.10.2010; opubl.10.10.2012, Byul. № 28.

10. Voronenko B.A., Demidov A.S., Demidov S.F. The analytical solution of the differential equations warm and moisture transfer at infrared heating of oilseeds // *Protsessy i apparaty pishchevykh proizvodstv*. 2012. № 1.

11. Demidov A.S., Voronenko B.A., Demidov S.F. Drying of seeds of sunflower infrared radiation // *Novye tekhnologii*. – 2011. – Vyp.№3. – P.25-30.

12. Obodov D.A., Demidov S.F., Voronenko B.A. Sources of infrared radiation with a power supply for heat treatment of foodstuff // *Protsessy i apparaty pishchevykh proizvodstv*. 2011. №1.