

DOI: 10.25637/TVAN2018.04.11.

УДК 631.365.23:533.9.082.74:66.047.3

Пахомов В. И.<sup>1</sup>, Бахчевников О. Н.<sup>2</sup>, Брагинец С. В.<sup>2</sup>, Рухляда А. И.<sup>2</sup>

## РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПРОЦЕССА СВЧ-ВАКУУМНОЙ СУШКИ ЛЮЦЕРНЫ

<sup>1</sup>ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет»;

<sup>2</sup>ФГБНУ «Аграрный научный центр «Донской»»

**Реферат.** *Тема сохранности каротина в люцерне в ходе СВЧ-вакуумной сушки и при хранении исследована недостаточно. Цель исследований – изучить процесс СВЧ-вакуумной сушки зеленой люцерны в сушильном аппарате непрерывного действия для определения параметров, обеспечивающих максимальную сохранность каротина в процессе сушки и хранения. Исследования проводили в 2017–2018 гг. в Зерноградском районе Ростовской области. Основным предмет исследований – сохранность каротина в процессе СВЧ-сушки люцерны и ее хранения. Содержание каротина определяли методом хроматографии в слое сорбента. Применен экспериментальный аппарат для СВЧ-вакуумной сушки, способный выполнять сушку растительных материалов в непрерывном режиме. Установлено, что СВЧ-вакуумная сушка обеспечивает хорошую сохранность каротина в процессе сушки люцерны и в процессе хранения высушенной люцерны. Результаты экспериментов демонстрируют, что содержание каротина в люцерне, высушенной методом СВЧ-вакуумной сушки, в несколько раз превышает содержание каротина в люцерне, высушенной методом солнечной сушки. Для предотвращения излишнего разрушения каротина наиболее эффективен режим СВЧ-вакуумной сушки люцерны с минимальной температурой нагрева – 120–140 °С. Малый уровень разрушения каротина в процессе СВЧ-сушки объясняется тем, что применение вакуума позволяет осуществлять сушку при более низкой температуре. За период хранения (180 дней) содержание каротина в высушенной методом СВЧ-вакуумной сушки люцерне снизилось только на 25,5 %, что значительно ниже, чем в люцерне, высушенной методом солнечной сушки. Малый уровень разрушения каротина в течение хранения высушенной люцерны, предположительно, объясняется изомеризацией каротина, снижающей его окисление, под действием СВЧ-излучения. Сделан вывод о том, что метод СВЧ-вакуумной сушки является перспективным для организации промышленной сушки кормовых и лекарственных трав.*

**Ключевые слова:** СВЧ-сушка, вакуум, удаление влаги, каротин, люцерна посевная *Medicago sativa L.*, растительные материалы, хранение.

### Введение

Люцерна посевная (*Medicago sativa L.*) – одна из ведущих кормовых трав. Она содержит большое количество ценных питательных веществ – протеина и каротина [1, 2].

Скошенную листостебельную массу люцерны подвергают сушке до влажности 8–10 % для сохранения в зимний период [3]. Основным препятствием для сохранения питательной ценности высушенной люцерны является разрушение под действием высокой температуры, создаваемой при сушке, питательных веществ, особенно каротина [4].

Ранее убранный люцерну сушили непосредственно в поле под действием солнечного излучения [5, 6], но в настоящее время данный метод мало используется по причине большой продолжительности сушки [7] и резкого снижения содержания каротина [8]. Наиболее распространенным способом промышленной сушки является конвективная высокотемпературная сушка [6, 7]. Но недостаток этого способа – разрушение значительной части каротина под действием высокой температуры [8].

Предложены различные методы сушки растительных материалов, в том числе люцерны [9]. Наиболее эффективным из них является метод СВЧ-сушки, так как в процессе ее осуществления нагревается не растительная ткань, а содержащаяся в ней вода [6, 10, 11]. СВЧ-сушка также обеспечивает хорошую сохранность каротина и других питательных веществ по причине малой продолжительности нагрева [10, 12]. При нагреве растительных материалов внутри их частиц происходит повышение давления, приводящее к интенсивному удалению воды и водяного пара через капилляры и поры [13]. Поэтому процесс СВЧ-сушки может быть эффективным только при своевременном удалении образующегося водяного пара, причем естественная вентиляция не обеспечивает выполнение этого условия [14, 15]. Обеспечить эффективный отвод выделяющихся водяных паров возможно путем создания в сушильной камере пониженного атмосферного давления (вакуума) [16, 17].

Установлено, что СВЧ-вакуумная сушка эффективна для отвода влаги из растительных материалов [15, 17]. Но экспериментальных исследований СВЧ-вакуумной сушки люцерны не проводили. Комбинированное воздействие СВЧ-излучения и вакуума является, по нашему мнению, перспективным для сушки люцерны [18]. При пониженном атмосферном давлении снижается температура кипения воды, содержащейся в растительных материалах [15, 18, 19, 20]. Поэтому сушку возможно осуществлять при более низкой температуре, что предположительно обеспечит большую сохранность каротина в люцерне и других растениях. Но тема разрушения каротина в процессе СВЧ-сушки зеленых растений мало исследована.

Содержание каротина, как и его сохранность в течение зимнего периода – важный показатель качества высушенной люцерны [4, 21]. Необходимо отметить, что вопрос сохранности каротина в высушенной СВЧ-сушкой люцерне при ее длительном хранении исследован недостаточно.

Недостаток современных аппаратов для СВЧ-сушки – порционное высушивание растительного материала и многократное повторение цикла сушки [6, 9]. При такой технологии масштабирование результатов лабораторных исследований по СВЧ-сушке для промышленности является проблематичным [13]. Поэтому для эффективной промышленной СВЧ-сушки необходимо разработать сушильный аппарат непрерывного действия.

**Цель исследований** – изучить процесс СВЧ-вакуумной сушки зеленой люцерны в сушильном аппарате непрерывного действия для определения параметров, обеспечивающих максимальную сохранность каротина в процессе сушки и дальнейшего хранения.

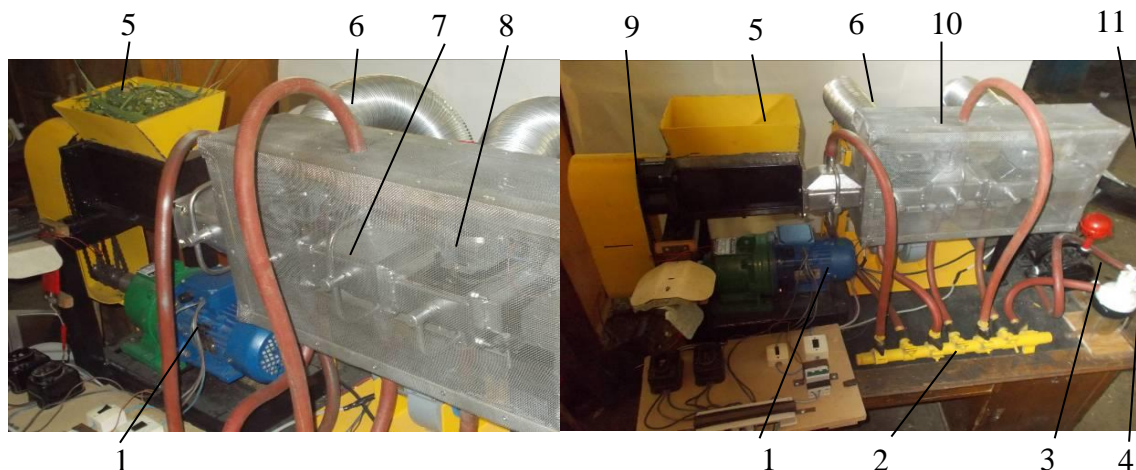
#### **Материалы и методы исследований**

Исследования проводили в 2017–2018 гг. в зерноградском районе Ростовской области. Основным предметом исследований – сохранность каротина в процессе СВЧ-сушки люцерны. Также изучена сохранность каротина в процессе хранения высушенной люцерны.

Люцерна убрана в начале сентября 2017 г. (третий укос). Она имела начальную влажность 75–80 %. Содержание каротина в люцерне перед сушкой составляло 113 мг/кг. Непосредственно перед сушкой листостебельная масса была механически измельчена до размера частиц 10–20 мм.

На рисунке 1 показан разработанный в АНЦ “Донской” экспериментальный аппарат для СВЧ-вакуумной сушки растительных материалов, способный выполнять сушку растительных материалов в непрерывном режиме. Конструкция аппарата защищена патентом [22]. Аппарат состоит из загрузочного бункера со шнеками, электропривода и сушильной камеры. Сушильная камера состоит из соединенных секций, в каждой из которых установлен магнетрон с волноводом и штуцер,

соединенный шлангом с вакуумным насосом. В процессе сушки частицы люцерны движутся по сушильной камере под действием создаваемого шнеками загрузочного бункера давления подпора, регулируемого перемещением заслонки. Частицы люцерны при движении по сушильной камере подвергаются действию СВЧ-излучения. Испаряемая влага удаляется из камеры вместе с воздухом под действием вакуумного насоса.



**Рисунок 1 – Экспериментальный аппарат для СВЧ-вакуумной сушки растительных материалов**

*Примечание.* 1. Электродвигатель; 2. Вакуумный коллектор; 3. Вакуумный насос; 4. Фильтр; 5. Загрузочный бункер; 6. Устройство для охлаждения магнетронов; 7. Сушильная камера; 8. Магнетроны; 9. Привод; 10. Барьер для защиты персонала от СВЧ-излучения; 11. Выгрузной лоток.

Сушку измельченной люцерны проводили при постоянной потребляемой мощности СВЧ-генератора сушильного аппарата 800 Вт и частоте излучения 2450 МГц. Температура нагрева люцерны изменялась в пределах от 120 до 185 °С. Влажность высушенной люцерны составляла 14–15 %. В сушильной камере создавалось пониженное атмосферное давление 80 кПа ( $\pm 1$  %). Плотность люцерны в сушильной камере поддерживалась на уровне 220 кг/м<sup>3</sup> ( $\pm 5$  %).

Производительность сушильного аппарата изменяли методом изменения частоты вращения шнеков его загрузочного бункера под действием частотного преобразователя. При увеличении производительности аппарата соответственно сокращалось время нахождения частиц люцерны в его сушильной камере и уменьшалась температура их нагрева.

Температуру нагрева частиц люцерны в процессе СВЧ-сушки измеряли оптическим пирометром на выходе сушильной камеры аппарата.

Влажность люцерны определяли методом высушивания образцов массой 10 г в сушильном шкафу при температуре 105 °С до стабилизации массы (в течение 24 ч) [23]. Влажность измеряли как удельное содержание воды в общей массе люцерны, выраженное в процентах. Образцы взвешивали с точностью до 0,1 г. Интенсивность сушки измеряли как изменение влажности люцерны за время ее прохождения через одну секцию сушильной камеры.

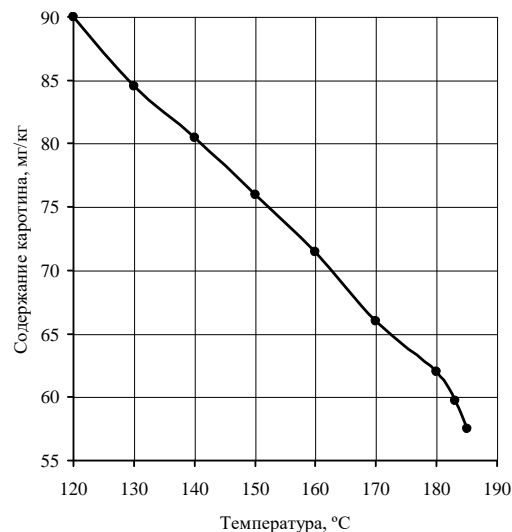
Содержание каротина в люцерне определяли методом хроматографии в тонком слое сорбента [24, 25]. Содержание каротина измеряли как отношение его массы в мг к массе сухого вещества люцерны в кг.

Высушенную при температуре 125 °С люцерну хранили в непрозрачных пластиковых мешках в закрытом отапливаемом помещении при температуре 15–20 °С

в течение 180 дней: с 15 сентября 2017 г. по 13 марта 2018 г. Каждые 30 дней отбирали пробы и определяли содержание каротина. Для сравнения определяли содержание каротина в высушенной солнечной сушкой люцерне, которая хранилась в аналогичных условиях.

### Результаты и их обсуждение

На рисунке 2 представлены результаты экспериментальных исследований по определению зависимости содержания каротина в высушенной люцерне от температуры ее нагрева в процессе СВЧ-вакуумной сушки. Они соответствуют результатам более ранних исследований [4, 8, 12], согласно которым степень разрушения каротина увеличивается при увеличении температуры сушки. Температура 120–140 °С является рациональной для СВЧ-вакуумной сушки люцерны посевной, так как при этом режиме наблюдается минимальное уменьшение содержания каротина. Например, при температуре сушки 125 °С содержание каротина в высушенной люцерне снижается на 23 % по сравнению с содержанием каротина в зеленой люцерне. При температуре сушки от 120 до 180 °С зависимость содержания каротина в высушенной люцерне от температуры нагрева практически линейная. При температуре нагрева более 180 °С скорость разрушения каротина значительно увеличивается.

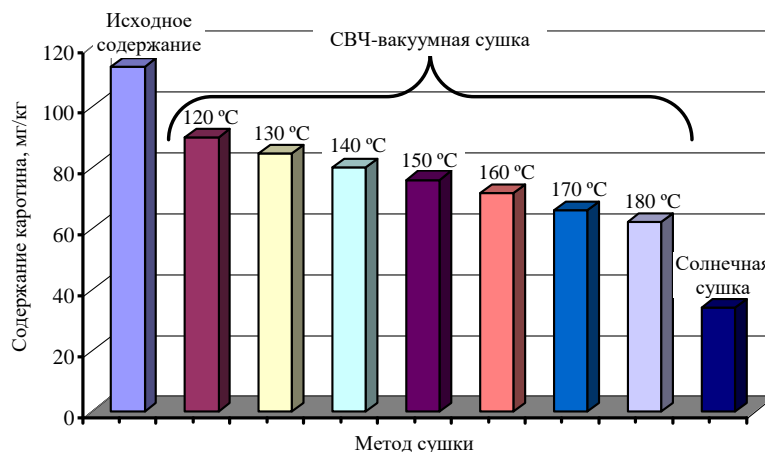


**Рисунок 2 – Зависимость содержания каротина в высушенной люцерне от температуры СВЧ-вакуумной сушки**

Рисунок 3 иллюстрирует зависимость содержания каротина в высушенной люцерне от метода и температуры сушки. Результаты экспериментов демонстрируют, что содержание каротина в люцерне, высушенной методом СВЧ-вакуумной сушки, в несколько раз превышает содержание каротина в люцерне, высушенной методом солнечной сушки.

Установлено, что для предотвращения излишнего разрушения каротина наиболее эффективен режим СВЧ-вакуумной сушки люцерны с минимальной температурой нагрева – 120–140 °С.

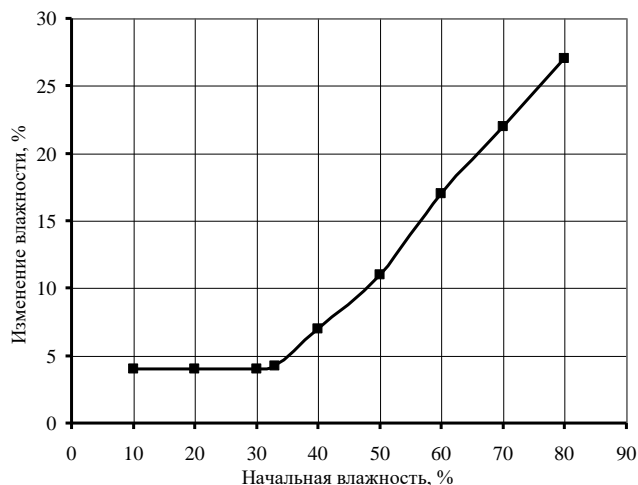
На рисунке 4 показано изменение содержания влаги в высушиваемой люцерне в зависимости от начальной влажности зеленой люцерны. Этот график показывает зависимость интенсивности процесса СВЧ-сушки от исходной влажности высушиваемого растительного материала.



**Рисунок 3 – Зависимость содержания каротина в высушенной люцерне от метода и температуры сушки**

Установлено, что при уменьшении начальной влажности зеленой люцерны снижается интенсивность ее сушки, определяемая как изменение влажности люцерны за время ее прохождения через одну секцию сушильной камеры. При уменьшении начальной влажности люцерны ниже уровня 32–33 % дальнейшего снижения интенсивности сушки не происходит, и она остается постоянной, так как при этом начинается удаление химически связанной влаги [26]. Для осуществления этого процесса необходимо значительное количество энергии. Но мощность экспериментального сушильного аппарата недостаточна для удаления химически связанной влаги.

Аппарат для СВЧ-вакуумной сушки работает в непрерывном режиме. Измельченная зеленая люцерна движется через сушильную камеру, подвергаясь нагреву. Температура нагрева зависит от времени нахождения частиц люцерны в сушильной камере, которое определяется производительностью сушильного аппарата.

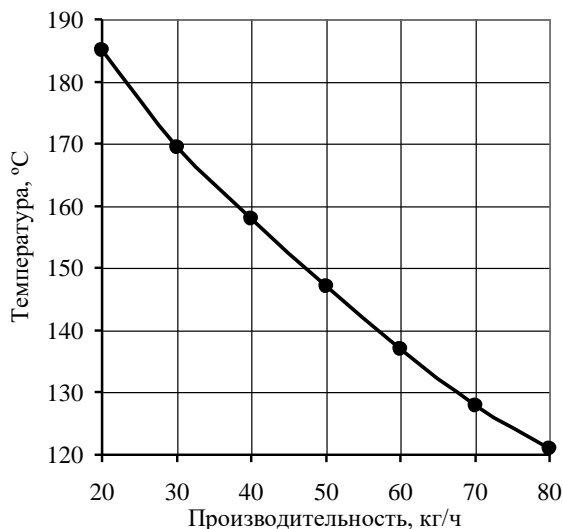


**Рисунок 4 – Изменение влажности люцерны при СВЧ-вакуумной сушке в зависимости от исходной влажности зеленой люцерны**

На рисунке 5 показана зависимость температуры СВЧ-вакуумной сушки люцерны от производительности сушильного аппарата. Установлено, что при увеличении производительности сушильного аппарата снижается температура

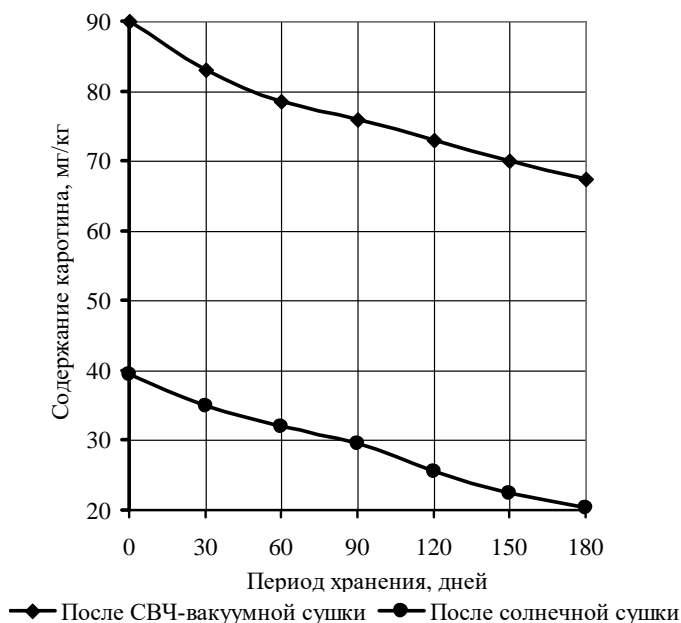


нагрева частиц люцерны. Оптимальная температура нагрева люцерны – 120–140 °С достигается при производительности аппарата 60–80 кг/ч. При такой производительности время СВЧ-сушки люцерны не превышает 5 с. Результаты эксперимента, показанные на рисунке 5, необходимо учитывать при масштабировании экспериментального сушильного аппарата для промышленного применения.



**Рисунок 5 – Зависимость температуры СВЧ-вакуумной сушки люцерны от производительности сушильного аппарата**

На рисунке 6 показан график изменения содержания каротина в высушенной люцерне в течение ее хранения в зимний период. Установлено, что за 180 дней содержание каротина в высушенной методом СВЧ-вакуумной сушки люцерне снизилось на 25,5 %. Содержание каротина в высушенной методом солнечной сушки люцерне снизилось за 180 дней на 48,1 %.



**Рисунок 6 – Изменение содержания каротина в высушенной люцерне в процессе хранения**

Содержание каротина в высушенной методом СВЧ-вакуумной сушки люцерне наиболее интенсивно снижалось в период 0–60 дней с начала хранения (на 12,8 %). В продолжение периода 60–180 дней с начала хранения содержание каротина уменьшилось на 12,7 % по сравнению с начальным. Содержание каротина в высушенной методом солнечной сушки люцерне снижалось более равномерно в течение всего периода хранения 0–180 дней.

Результаты данного эксперимента доказывают, что применение метода СВЧ-вакуумной сушки обеспечивает хорошую сохранность каротина в высушенной люцерне в течение зимнего периода хранения.

Результаты экспериментов подтвердили эффективность метода СВЧ-вакуумной сушки для обезвоживания растительного сырья. Новым экспериментальным результатом является установление факта высокой сохранности каротина при СВЧ-сушке зеленых растений, в частности люцерны.

Низкий уровень разрушения содержащегося в люцерне каротина в процессе СВЧ-сушки (см. рисунки 2 и 3) объясняется тем, что применение вакуума позволяет осуществлять сушку при более низкой температуре. Малый уровень разрушения каротина в течение периода хранения высушенной люцерны (см. рисунок 6), предположительно, объясняется его изомеризацией, вызывающей превращение  $\beta$ -каротина в  $\alpha$ -каротин, что снижает его окисление кислородом воздуха. Факт снижения интенсивности сушки при уменьшении начальной влажности зеленой люцерны (см. рисунок 4) возможно, объясняется тем, что при малой величине начальной влажности начинается удаление из растительных тканей химически связанной влаги [26].

#### Выводы

Применение метода СВЧ-вакуумной сушки обеспечивает хорошую сохранность каротина в высушенной люцерне не только в процессе сушки и непосредственно после нее, но и в течение всего зимнего периода ее хранения. Температура 120–140 °С является рациональной для СВЧ-вакуумной сушки люцерны, так как при этом режиме наблюдается минимальное уменьшение содержания в ней каротина. За период хранения 180 дней содержание каротина в высушенной методом СВЧ-вакуумной сушки люцерне снизилось только на 25,5 %, что значительно ниже, чем в люцерне, высушенной методом солнечной сушки. Метод СВЧ-вакуумной сушки с использованием аппарата непрерывного действия является перспективным для организации промышленной сушки зеленой массы люцерны посевной, а также других кормовых и лекарственных трав.

#### Литература

1. Шевцов А. А., Дранников А. В., Дерканосова А. А., Коротаева А. А. Вегетативная масса растений, как нетрадиционный источник протеина // Актуальная биотехнология. 2013. № 1. С. 38–40.
2. Elgersma A., Soegaard K., Jensen S. K. Vitamin contents in forage herbs // Aspects of Applied Biology. 2012. No. 115. P. 75–80.
3. Muller C. J. C., Cruywagen C. W., du Toit F. J., Botha J. A. The drying rate and chemical composition of field and artificially dried lucerne hay (Short communication) // South African Journal of Animal Science. 2008. Vol. 38. No. 4. P. 350–354.
4. Park Y. W., Anderson M. J., Walters J. L., Mahoney A. W. Effects of processing methods and agronomic variables on carotene contents in forages and predicting carotene in alfalfa hay with near-infrared-reflectance spectroscopy 1, 2 // Journal of Dairy Science. 1983. Vol. 66. No. 2. P. 235–245.
5. Rotz C. A., Chen Y. Alfalfa drying model for the field environment // Transactions of the ASAE. 1985. Vol. 28. No. 5. P. 1686–1691.
6. Farhang A., Hosinpour A., Darvishi H., Khoshtaghaza M. H., Tavakolli Hashtjin T. Accelerated drying of Alfalfa (*Medicago sativa* L.) by microwave dryer // Global Veterinaria. 2010. Vol. 5. No. 3. P. 158–163.
7. Adapa P. K., Schoenau G. J., Tabil L. G., Arinze E. A., Singh A. K., Dalai A. K. Customized and value-added high quality Alfalfa products: A new concept // Agricultural Engineering International: CIGR Journal. 2007. Vol. 9. P. 1–28.

8. Suvarnakuta P., Devahastin S., Mujumdar A. S. Drying kinetics and  $\beta$ -carotene degradation in carrot undergoing different drying processes // *Journal of Food Science*. 2005. Vol. 70. No. 8. P. 520–526.
9. Moses J. A., Norton T., Alagusundaram K., Tiwari B. K. Novel drying techniques for the food industry // *Food Engineering Reviews*. 2014. Vol. 6. No. 3. P. 43–55.
10. Rogov I. A. Biological aspects of microwaves food's technologies // *Electronic processing of materials*. 2000. No. 5. P. 115–125.
11. Figiel A. Drying kinetics and quality of beetroots dehydrated by combination of convective and vacuum-microwave methods // *Journal of Food Engineering*. 2010. Vol. 98. No. 4. P. 461–470.
12. Cui Z. W., Xu S. Y., Sun D. W. Effect of microwave-vacuum drying on the carotenoids retention of carrot slices and chlorophyll retention of Chinese chive leaves // *Drying Technology*. 2004. Vol. 22. No. 3. P. 563–575.
13. Zhang M., Tang J. M., Mujumdar A. S., Wang S. Trends in microwave related drying of fruits and vegetables // *Trends in Food Science & Technology*. 2006. Vol. 17. No. 10. P. 524–534.
14. Wojdyło A., Figiel A., Lech K., Nowicka P., Oszmiański J. Effect of convective and vacuum-microwave drying on the bioactive compounds, color, and antioxidant capacity of sour cherries // *Food and Bioprocess Technology*. 2014. Vol. 7. No. 3. P. 829–841.
15. Goreshev M. A., Kazarin A. N., Lopatin V. V., Sekisov F. G., Smerdov O. V. Combined timber drying method // *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. 2013. Vol. 86. No. 2. P. 336–339.
16. Goreshev M., Litvishko E. Math modeling of vacuum conductive timber drying // *Advanced Materials Research*. 2014. No. 1040. P. 478–483.
17. Zielinska M., Michalska A. Microwave-assisted drying of blueberry (*Vaccinium corymbosum* L.) fruits: Drying kinetics, polyphenols, anthocyanins, antioxidant capacity, colour and texture // *Food Chemistry*. 2016. Vol. 212. P. 671–680.
18. Cai Y., Hayashi K. Contribution of evaporation from transverse sections to drying rate during radio-frequency/vacuum drying // *Journal of the Japan Wood Research Society*. 2002. Vol. 48. No. 2. P. 73–79.
19. Горешнев М. А., Секисов Ф. Г. Исследование динамики влагоудаления при сушке комбинированной методом в вакууме // *Ползуновский альманах*. 2010. № 2. С. 257–259.
20. Антипов С. Т., Казарцев Д. А., Журавлев А. В., Виниченко С. А. Исследование кинетики сушки плодов черной смородины в вакуум-аппарате с СВЧ-энергоподводом // *Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий*. 2013. № 4 (58). С. 26–30.
21. Bruhn J. C., Oliver J. C. Effect of storage on tocopherol and carotene concentrations in alfalfa hay // *Journal of Dairy Science*. 1978. Vol. 61. No. 7. P. 980–982.
22. Пат. 2620462 Российская Федерация МПК F26B 9/06, F26B 3/347, F26B 3/06, F26B 25/06. Установка комбинированной сушки зеленой растительной массы / Пахомов В. И., Брагинец С. В., Бахчевников О. Н., Рухляда А. И., Дровалев А. В.; заявитель и патентообладатель ФГБНУ «Аграрный научный центр «Донской» № 2015150664; заявл. 25.11.2015; опубл. 25.05.2017, Бюл. № 15.
23. Bennamoun L., Chen Z., Salema A. A., Afzal M. T. Moisture diffusivity during microwave drying of wastewater sewage sludge // *Transactions of the ASABE*. 2015. Т. 58. № 2. С. 501–508.
24. Barba A. O., Hurtado M. C., Mata M. S., Ruiz V. F., De Tejada M. L. S. Application of a UV-vis detection-HPLC method for a rapid determination of lycopene and  $\beta$ -carotene in vegetables // *Food Chemistry*. 2006. Vol. 95. No. 2. P. 328–336.
25. Чечега О. В., Сафонова Е. Ф., Сливкин А. И. Методика определения каротиноидов методом хроматографии в тонком слое сорбента // *Сорбционные и хроматографические процессы*. 2008. Vol. 8. No. 2. P. 320–326.
26. Gachovska T. K., Ngadi M., Oluka S., Raghavan V. Electro-plasmolysis of alfalfa mash // *19th IEEE Pulsed Power Conference (PPC)*. 2013. P. 1–6.

## References

1. Shevtsov A. A., Drannikov A. V., Derkanosova A. A., Korotaeva A. A. Vegetative mass of plants as untraditional source of protein // *Aktualnaya biotekhnologia*. 2013. No. 1. P. 38–40.
2. Elgersma A., Soegaard K., Jensen S. K. Vitamin contents in forage herbs // *Aspects of Applied Biology*. 2012. No. 115. P. 75–80.
3. Muller C. J. C., Cruywagen C. W., du Toit F. J., Botha J. A. The drying rate and chemical composition of field and artificially dried lucerne hay (Short communication) // *South African Journal of Animal Science*. 2008. Vol. 38. No. 4. P. 350–354.
4. Park Y. W., Anderson M. J., Walters J. L., Mahoney A. W. Effects of processing methods and agronomic variables on carotene contents in forages and predicting carotene in alfalfa hay with near-infrared-reflectance spectroscopy 1, 2 // *Journal of Dairy Science*. 1983. Vol. 66. No. 2. P. 235–245.
5. Rotz C. A., Chen Y. Alfalfa drying model for the field environment // *Transactions of the ASAE*. 1985. Vol. 28. No. 5. P. 1686–1691.
6. Farhang A., Hosinpour A., Darvishi H., Khoshtaghaza M. H., Tavakoli Hashtjin T. Accelerated drying of Alfalfa (*Medicago sativa* L.) by microwave dryer // *Global Veterinaria*. 2010. Vol. 5. No. 3. P. 158–163.
7. Adapa P. K., Schoenau G. J., Tabil L. G., Arinze E. A., Singh A. K., Dalai A. K. Customized and value-added high quality Alfalfa products: A new concept // *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*. 2007. Vol. 9. P. 1–28.



8. Suvarnakuta P., Devahastin S., Mujumdar A. S. Drying kinetics and  $\beta$ -carotene degradation in carrot undergoing different drying processes // Journal of Food Science. 2005. Vol. 70. No. 8. P. 520–526.
9. Moses J. A., Norton T., Alagusundaram K., Tiwari B. K. Novel drying techniques for the food industry // Food Engineering Reviews. 2014. Vol. 6. No. 3. P. 43–55.
10. Rogov I. A. Biological aspects of microwaves food's technologies // Electronic processing of materials. 2000. No. 5. P. 115–125.
11. Figiel A. Drying kinetics and quality of beetroots dehydrated by combination of convective and vacuum-microwave methods // Journal of Food Engineering. 2010. Vol. 98. No. 4. P. 461–470.
12. Cui Z. W., Xu S. Y., Sun D. W. Effect of microwave-vacuum drying on the carotenoids retention of carrot slices and chlorophyll retention of Chinese chive leaves // Drying Technology. 2004. Vol. 22. No. 3. P. 563–575.
13. Zhang M., Tang J. M., Mujumdar A. S., Wang S. Trends in microwave related drying of fruits and vegetables // Trends in Food Science & Technology. 2006. Vol. 17. No. 10. P. 524–534.
14. Wojdyło A., Figiel A., Lech K., Nowicka P., Oszmiański J. Effect of convective and vacuum–microwave drying on the bioactive compounds, color, and antioxidant capacity of sour cherries // Food and Bioprocess Technology. 2014. Vol. 7. No. 3. P. 829–841.
15. Goreshev M. A., Kazarin A. N., Lopatin V. V., Sekisov F. G., Smerdov O. V. Combined timber drying method // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. 2013. Vol. 86. No. 2. P. 336–339.
16. Goreshev M., Litvishko E. Math modeling of vacuum conductive timber drying // Advanced Materials Research. 2014. No. 1040. P. 478–483.
17. Zielinska M., Michalska A. Microwave-assisted drying of blueberry (*Vaccinium corymbosum* L.) fruits: Drying kinetics, polyphenols, anthocyanins, antioxidant capacity, colour and texture // Food Chemistry. 2016. Vol. 212. P. 671–680.
18. Cai Y., Hayashi K. Contribution of evaporation from transverse sections to drying rate during radio-frequency/vacuum drying // Journal of the Japan Wood Research Society. 2002. Vol. 48. No. 2. P. 73–79.
19. Goreshev M. A., Sekisov F. G. Research of dehumidification dynamics when drying by a combined method in a vacuum // Polzunovsky Almanac. 2010. No. 2. P. 257–259.
20. Antipov S. T., Kazartsev D. A., Zhuravlev A. V., Vinichenko S. A. Investigation of the kinetics of black currant berries drying inside the vacuum apparatus with microwave energy supply // Proceedings of the Voronezh State University of Engineering Technologies. 2013. No. 4 (58). P. 26–30.
21. Bruhn J. C., Oliver J. C. Effect of storage on tocopherol and carotene concentrations in alfalfa hay // Journal of Dairy Science. 1978. Vol. 61. No. 7. P. 980–982.
22. Patent 2620462 Russian Federation MPK F26B 9/06, F26B 3/347, F26B 3/06, F26B 25/06. / Pakhomov V. I., Braginets S. V., Bakhchevnikov O. N., Rukhlyada A. I., Drovalev A. V.; applicant and patent holder FSBSI «Agrarian research center “Donskoy”». No. 2015150664; appl. 25.11.2015; publ. 25.05.2017, Bull. No. 15.
23. Bennamoun L., Chen Z., Salema A. A., Afzal M. T. Moisture diffusivity during microwave drying of wastewater sewage sludge // Transactions of the ASABE. 2015. Vol. 58. No. 2. P. 501–508.
24. Barba A. O., Hurtado M. C., Mata M. S., Ruiz V. F., De Tejada M. L. S. Application of a UV–vis detection-HPLC method for a rapid determination of lycopene and  $\beta$ -carotene in vegetables // Food Chemistry. 2006. Vol. 95. No. 2. P. 328–336.
25. Checheta O. V., Safonova E. F., Slivkin A. I. Technique of determination of carotenoids by a chromatography method in a thin layer of a sorbent // Sorption and Chromatographic Processes. (Sorbtsionnye i Khromatograficheskie Protsessy). 2008. Vol. 8. No. 2. P. 320–326.
26. Gachovska T. K., Ngadi M., Oluka S., Raghavan V. Electro-plasmolysis of alfalfa mash // 19th IEEE Pulsed Power Conference (PPC). 2013. P. 1–6.

UDC 631.365.23:533.9.082.74:66.047.3

Pakhomov V. I., Braginets S. V., Bakhchevnikov O. N., Rukhlyada A. I.

### RESULTS OF THE EXPERIMENTAL STUDY ON ALFALFA MICROWAVE-VACUUM DRYING PROCESS

**Summary.** *The subject of carotene retention in an alfalfa during microwave-vacuum drying and in case of storage is investigated insufficiently. A research objective was to conduct the pilot studies of a green alfalfa microwave-vacuum drying process in the continuous drying apparatus for determining the parameters ensuring the maximum carotene retention during the drying and storage. Studies were conducted in 2017–2018 in Zernogradsky district of Rostov region. Carotene retention during the alfalfa microwave-vacuum drying and its storage were the subject of the research. Carotene content was determined by a chromatography method in a sorbent thin layer. The test apparatus for microwave-vacuum drying capable to dry plant materials in the continuous mode was used. We identified that microwave-vacuum drying ensures good carotene retention both in the*

*drying process of green alfalfa and during storage of the dried one. Results of experiments showed that the carotene content in alfalfa which is dried up by the method of microwave-vacuum drying several times exceeds the carotene content in alfalfa which is dried up by the method of solar drying. Carotene retention in microwave-vacuum drying process was the main object of this research. For preventing excessive carotene destruction, the mode of microwave-vacuum drying of an alfalfa at a minimum temperature of heating 120–140 °C was the most effective. Low level of carotene destruction in microwave-vacuum drying process was interpreted by the fact that use of vacuum allows realizing drying at a lower temperature. Carotene content in alfalfa which was dried up by the method of microwave-vacuum drying during the storage period of 180 days decreased only by 25,5 % that is much lower, than in the alfalfa which was dried up by the method of solar drying. Low level of carotene destruction during storage of the dried alfalfa hypothetically was interpreted by the isomerization of carotene reducing its oxidation. The method of microwave-vacuum drying is perspective for the organization of industrial drying of forage and medicinal herbs.*

**Keywords:** *microwave drying, vacuum, moisture elimination, carotene, alfalfa Medicago sativa L., plant materials, storage.*

Пахомов Виктор Иванович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой технологии и оборудовании переработки продукции АПК, ФГБОУ ВО «Донской государственной технической университет»; 344000, Россия, Ростовская обл., г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1; e-mail: vniptim@gmail.com.

Бахчевников Олег Николаевич, кандидат технических наук, научный сотрудник отдела переработки продукции растениеводства, структурное подразделение «СКНИИМЭСХ», ФГБНУ «Аграрный научный центр «Донской»»; 347740, Россия, Ростовская обл., г. Зерноград, ул. Ленина, 14; e-mail: oleg-b@list.ru.

Брагинец Сергей Валерьевич, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник отдела переработки продукции растениеводства, структурное подразделение «СКНИИМЭСХ», ФГБНУ «Аграрный научный центр «Донской»»; 347740, Россия, Ростовская обл., г. Зерноград, ул. Ленина, 14; e-mail: sbraginet@mail.ru.

Рухляда Артем Игоревич, младший научный сотрудник отдела переработки продукции растениеводства, структурное подразделение «СКНИИМЭСХ», ФГБНУ «Аграрный научный центр «Донской»»; 347740, Россия, Ростовская обл., г. Зерноград, ул. Ленина, 14; e-mail: Ruhlada1990@yandex.ru.

Pakhomov Viktor Ivanovich, Dr. Sc. (Tech.), professor, head of the Department of Technologies and equipment for processing production of agriculture, Don State Technical University; 1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, Rostov Region, 344000, Russia; e-mail: vniptim@gmail.com.

Bakhchevnikov Oleg Nikolayevich, Cand. Sc. (Tech.), researcher of the Vegetable Feedstock Processing Department, structural unit SKNIIMESH, Agricultural Scientific Centre Donskoy; 14, Lenin Str., Zernograd, Rostov Region, 347740, Russia; e-mail: oleg-b@list.ru.

Braginets Sergey Valerievich, Cand. Sc. (Tech.), leading researcher of the Vegetable Feedstock Processing Department, structural unit SKNIIMESH, Agricultural Scientific Centre Donskoy; 14, Lenin Str., Zernograd, Rostov Region, 347740, Russia; e-mail: braginet@mail.ru.

Rukhlyada Artem Igorevich, junior researcher of the Vegetable Feedstock Processing Department, structural unit SKNIIMESH, Agricultural Scientific Centre Donskoy; 14, Lenin Str., Zernograd, Rostov Region, 347740, Russia; e-mail: Ruhlada1990@yandex.ru.

*Дата поступления в редакцию – 01.09.2018.*

*Дата принятия к печати – 03.10.2018.*