**DOI 10.33952/2542-0720-2020-2-22-81-96**
УДК 631.365.23:533.9.082.74:66.047.3

Пахомов В. И., Брагинец С. В., Бахчевников О. Н., Рухляда А. И.

# ОБОСНОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ КОМБИНИРОВАННОЙ СУШКИ ЛЮЦЕРНЫ, СОЧЕТАЮЩЕЙ ДОСТОИНСТВА СВЧ-ВАКУУМНОГО И КОНВЕКТИВНОГО МЕТОДОВ ОБЕЗВОЖИВАНИЯ

ФГБНУ «Аграрный научный центр “Донской”»

***Реферат.*** *Разработка энергосберегающих технологий сушки кормовых трав, обеспечивающих сохранность каротина является актуальной задачей в технологии подготовки высококачественных кормов для животноводства. Цель исследований – разработка энергосберегающей технологии комбинированной сушки зеленой люцерны, сочетающей применение методов СВЧ (сверхвысокочастотной) и конвективной сушки. Исследования проводили в 2019–2020 гг. в Зерноградском районе Ростовской области. Объектом исследования являлся технологический процесс сушки растительной массы кормовых трав, в частности люцерны. Разработана комбинированная технология сушки люцерны, осуществляемая в два этапа. На первом этапе производится сушка предварительно измельченной и уплотненной до объемной плотности 150–300 кг/м$^3$ листостебельной массы СВЧ-излучением частотой 915 МГц с мощностью, обеспечивающей интенсивность нагрева от 1 °С до 10 °С в секунду. Сушка выполняется при пониженном атмосферном давлении при температуре 120–140 °С до достижения влажности 25–30 %. В ходе второго этапа сушка частично обезвоженных растительных частиц и испарение влаги до достижения влажности 10–15 % производится методом конвективной сушки нагретым воздухом при температуре не выше 60 °С. На основе известных закономерностей процесса сушки выполнено теоретическое обоснование состава и порядка выполнения операций технологического процесса комбинированной сушки и рациональных параметров их осуществления. В результате экспериментов установлено, что для СВЧ-вакуумной сушки люцерны рациональна температура 120–140 °С. Технология комбинированной сушки обеспечивает минимальное снижение содержания каротина после сушки – не более 15 %, и в процессе хранения в течение шести месяцев – не более 45 %. Технология комбинированной сушки, включающая последовательно выполняемые операции СВЧ-вакуумной и конвективной сушки, позволяет максимально сохранить каротин в процессе сушки и хранения растительной массы, снизить энергоемкость процесса обезвоживания люцерны и уменьшить себестоимость заготовки кормов.*

***Ключевые слова:*** *СВЧ-сушка, конвективная сушка, комбинированная сушка, вакуум, люцерна посевная (Medicago sativa L.), удаление влаги, каротин, хранение.*

## Введение

В настоящее время в России актуальной задачей является обеспечение полноценного кормления сельскохозяйственных животных. Рациональный метод решения этой задачи – использование дешевого местного растительного сырья [1]. Для России доступным источником растительного протеина, каротина и витаминов, позволяющим сократить использование дорогостоящего покупного белкового сырья (соевого шрота, рыбной муки и другого), являются кормовые травы, такие как люцерна, клевер, донник и эспарцет. Ведущее место среди них занимает люцерна посевная (*Medicago sativa* L.), в листьях и стеблях которой содержится 17–19 % протеина и до 200 мг/кг каротина [2].

Недостаток люцерны как кормового сырья, препятствующий ее сохранению в течение длительного времени – значительная исходная влажность (от 60 % до 80 %) [3].

Поэтому листостебельную массу люцерны сушат до влажности 10–15 %. Метод естественной сушки люцерны для получения сена находит все меньшее применение из-за его большой продолжительности и малой производительности [4]. Заменой процессу естественной сушки стала интенсивная технология, предусматривающая измельчение листостебельной массы люцерны, ее высокотемпературную конвективную сушку и гранулирование [5]. Но недостатком этой технологии является значительное снижение содержания каротина и витаминов под действием высокой температуры [6]. Тот же недостаток характерен и для конвективной сушки других растений. Помимо этого, по причине малой теплопроводности зеленых растений, в частности люцерны, конвективная сушка имеет большую продолжительность, что негативно влияет на сохранность каротина и других питательных веществ [7]. На заключительном этапе сушки при значительном снижении влажности растительного сырья его теплопроводность и электропроводность снижаются в еще большей степени, что приводит к увеличению энергоемкости процесса.

Для преодоления этого недостатка предложены различные технологические решения. Наиболее эффективным из них является сушка растительных материалов, в частности люцерны, под действием СВЧ-излучения [7, 8]. Этот метод позволяет на порядок ускорить обезвоживание листостебельной массы, что способствует большей сохранности каротина и других питательных веществ [9]. Но способ СВЧ-сушки имеет существенный недостаток, заключающийся в том, что без своевременного отвода выделяемой из растений влаги, обеспечить который естественная вентиляция не может, эффективность обработки микроволновым излучением снижается, а ее продолжительность возрастает [10], что может приводить к излишнему высушиванию растительной массы, сопровождающемуся разрушением питательных веществ [11]. Эффективность СВЧ-сушки на ее завершающем этапе снижается также из-за уменьшения коэффициента поглощения микроволнового излучения растительным материалом при снижении его влажности [10]. Помимо этого, оборудование для СВЧ-обработки имеет высокую стоимость. Для ускорения процесса СВЧ-сушки и повышения эффективности предложено сочетать его с другими методами обработки, а именно конвективной сушкой [12] или воздействием пониженного атмосферного давления (вакуума) [13]. Достоинства этих методов сушки растений показаны на рисунке 1.

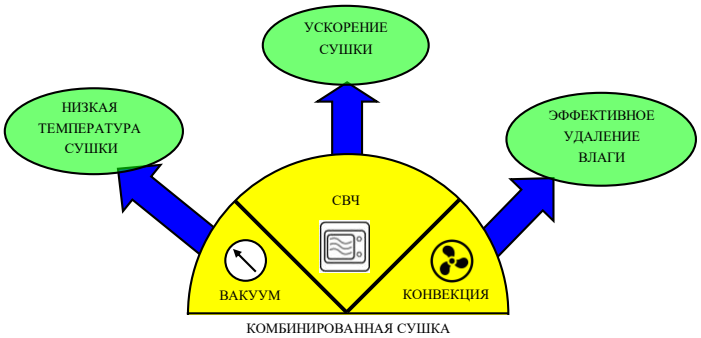



**Рисунок 1 – Достоинства различных методов сушки растений**

Различные ученые проводили экспериментальные исследования СВЧ-сушки и комбинированной СВЧ-сушки растений. Они установили, что эффективность СВЧ-сушки повышается при ее осуществлении при пониженном атмосферном давлении (вакууме) [14], так как это способствует более интенсивному выделению влаги из растений, а закипание содержащейся в них воды при более низкой температуре позволяет повысить сохранность каротина [15].

Также проводили исследования по комбинированной сушке растительных

материалов СВЧ-излучением и конвективным нагревом горячим воздухом [16]. Сравнение на основе экспериментальных данных показало большую эффективность этого способа сушки по сравнению с обезвоживанием только СВЧ-излучением благодаря своевременному удалению влаги из сушильной камеры [17]. В тоже время среди исследователей нет единого мнения об оптимальном сочетании этих двух видов воздействия на растительные материалы. Если одни ученые предлагают сочетать эти воздействия, производя их одновременно [17, 18], то другие предпочитают двухэтапное поочередное их действие [19, 20]. Но при этом также нет единого мнения об очередности применения разных методов сушки [13, 21].

Таким образом, вопрос оптимальной последовательности выполнения технологических операций при комбинированной сушке зеленых растений, в частности люцерны, остается нерешенным.

**Цель исследований** – разработка энергосберегающей технологии комбинированной сушки зеленой люцерны, сочетающей применение методов СВЧ и конвективной сушки, теоретическое и экспериментальное обоснование рациональной последовательности составляющих её технологических операций и параметров их осуществления.

**Материалы и методы исследований**

Исследования выполнены в 2019–2020 гг. в ФГБНУ «Аграрный научный центр “Донской”» (Зерноградский район Ростовской области).

Объектом исследования являлся технологический процесс сушки растительной массы кормовых трав, в частности люцерны. При этом изучены не только технологические, но и системные закономерности и качества объекта исследования [22], а именно: многофункциональность организации объекта, поэтапное преобразование объекта, комплексность [23].

Методы исследования: системный анализ и синтез технологического процесса [24] комбинированной сушки зеленой люцерны. Осуществлен системный анализ технологического процесса сушки зеленой массы люцерны, определены его достоинства и недостатки. Произведен синтез новой рациональной технологической схемы комбинированной сушки люцерны, лишенной выявленных недостатков.

Разработку технологии комбинированной сушки зеленой люцерны выполняли в два этапа. На первом этапе на основе ранее установленных отечественными и зарубежными учеными и авторами статьи закономерностей процессов сушки растений разработана технологическая схема комбинированной сушки люцерны. На этом этапе выполнено теоретическое обоснование очередности осуществления технологических операций и рациональных параметров их выполнения на основе известных теоретических положений и опытных данных. На втором этапе выполнены экспериментальные исследования, заключавшиеся в практической проверке элементов (операций) разработанной технологической схемы и уточнении параметров их выполнения. При этом также использованы результаты ранее выполненных авторами исследований.

Уборку люцерны (*Medicago sativa* L.) осуществляли в Ростовской области в начале сентября 2019 г. (третий укос). Ее начальная влажность составила 75–80 %. После естественной сушки в поле влажность люцерны снизилась до 60–65 %. Содержание каротина в люцерне перед сушкой составляло 110–115 мг/кг. Непосредственно перед комбинированной сушкой листостебельную массу механически измельчили до размера частиц 10–20 мм.

Экспериментальные исследования проводили на опытной установке для комбинированной СВЧ-сушки растительной массы [25]. Опытная установка включает составную сушильную камеру, состоящую из последовательно размещенных камеры СВЧ-вакуумной сушки и камеры конвективной сушки (рисунок 2).

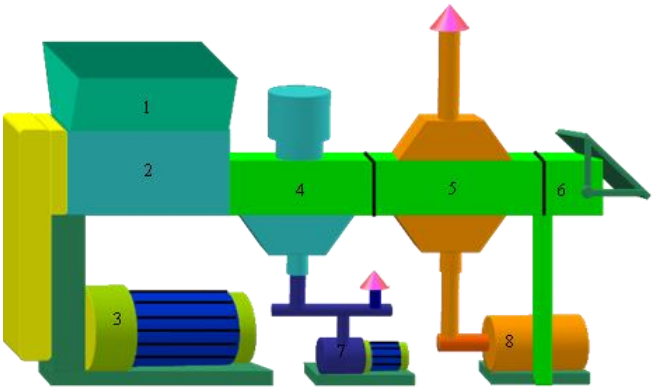



**Рисунок 2 – Опытная установка для комбинированной СВЧ-сушки растительной массы (патент RU 2620462)**

***Примечание.*** *1 – загрузочный бункер; 2 – уплотнительная камера; 3 – электропривод; 4 – камера СВЧ-сушки; 5 – камера конвективной сушки; 6 – камера подпора; 7 – вакуум-насос; 8 – электрокалорифер с вентилятором.*

Камера СВЧ-сушки соединена с конденсационной камерой и вакуум-насосом, а камера конвективной сушки – с электрокалорифером и вентилятором. Камера конвективной сушки снабжена отводом в вытяжную вентиляцию. Установка включает также загрузочный бункер со шнеками и уплотнительную камеру, а также камеру подпора, предназначенные для регулирования плотности растительной массы.

При выполнении экспериментов по определению сравнительной эффективности способов сушки люцерны в опытной установке отключали неиспользуемые камеры, то есть использовали только камеру СВЧ-вакуумной сушки или только камеру конвективной сушки, либо же обе камеры последовательно.

Влажность люцерны определяли методом полного высушивания, при этом образцы массой 10 г выдерживали в течение 24 ч в сушильном шкафу при температуре 105 °С до стабилизации массы. Влажность определяли как удельное содержание воды в общей массе растений, выраженное в процентах. Образцы взвешивали на весах с погрешностью не более 0,1 г. Интенсивность сушки определяли как изменение влажности люцерны за определенный промежуток времени при прохождении через установку комбинированной сушки.

Опытная установка для комбинированной СВЧ-сушки рассчитана на единовременную обработку 2 кг растительной массы, то есть в каждой ее камере в данный момент времени может подвергаться обработке такое количество люцерны.

Содержание каротина в люцерне определяли методом хроматографии в тонком слое сорбента [26, 27]. Содержание каротина определяли как отношение его массы в мг к массе сухого вещества люцерны в кг.

Температуру нагрева частиц люцерны в процессе сушки измеряли оптическим пирометром на выходе сушильной установки, давление воздуха в камере СВЧ-сушки – вакуумметром.

Скорость обезвоживания люцерны в процессе сушки определяли как изменение ее влажности в процентах за единицу времени (относительно первоначального уровня влажности растительной массы).

Высушенную люцерну хранили в непрозрачных пластиковых мешках в закрытом отапливаемом помещении при температуре 18–20 °С в течение шести месяцев (180 дней) с сентября 2019 г. по март 2020 г. Каждые 30 дней из нее отбирали пробы и определяли содержание в них каротина.

В ходе экспериментальных исследований в качестве основного критерия эффективности различных способов сушки люцерны принято содержание каротина в

высушенной люцерне и степень его разрушения в процессе обезвоживания и последующего хранения.

## Результаты и их обсуждение

**Технология комбинированной сушки.** Для решения поставленной задачи разработана комбинированная технология сушки люцерны [28]. Согласно разработанной технологической схеме комбинированная сушка осуществляется в два этапа. На первом этапе производится сушка предварительно измельченной и уплотненной листостебельной массы СВЧ-излучением, причем она выполняется при пониженном атмосферном давлении (вакууме). В ходе второго этапа обработка частично обезвоженных растительных частиц и испарение влаги производится методом конвективной сушки нагретым воздухом.

Для осуществления предлагаемой технологии скошенную зеленую люцерну подсушивают под действием солнечного излучения до влажности 60–65 %.

На предварительном этапе листостебельную массу люцерны механически измельчают до размера частиц не более 10 мм и уплотняют до объемной плотности 150–300 кг/м$^3$, после чего перемещают в камеру СВЧ-сушки сушильной установки.

В ходе первого этапа выполнения технологии производят сушку зеленой растительной массы, в ходе которой осуществляют ее кратковременную обработку СВЧ-излучением частотой 915 МГц с мощностью, обеспечивающей интенсивность нагрева от 1 °С до 10 °С в секунду, до температуры 120–140 °С. В сушильной камере во время сушки поддерживается пониженное атмосферное давление 60 кПа. Выделяемый в процессе сушки водяной пар конденсируется в конденсационной камере. Растительную массу дозируют при загрузке в сушильную установку таким образом, чтобы обеспечить ее нагрев с приведенными выше параметрами.

После этого частично обезвоженную зеленую растительную массу влажностью 25–30 % перемещают в камеру конвективной сушки сушильной установки, где осуществляют второй этап сушки, в ходе которого производят ее досушивание до конечной влажности 10–15 % и удаляют потоком нагретого воздуха воду с поверхности частиц, а водяной пар за пределы установки, причем температуру растительной массы поддерживают на уровне не выше 60 °С. По достижении требуемой конечной влажности 10–15 % сушку прекращают, а высушенную растительную массу выгружают из сушильной установки. Высушенная растительная масса люцерны может быть подвергнута гранулированию.

Схема разработанного технологического процесса комбинированной сушки люцерны приведена на рисунке 3.

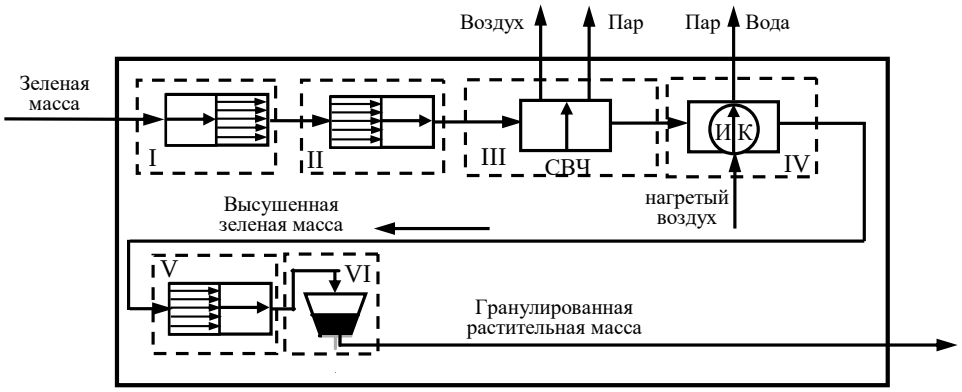



**Рисунок 3 – Схема технологического процесса комбинированной сушки люцерны**

***Примечание.*** *I – измельчение зеленой массы; II – уплотнение измельченной зеленой массы; III – СВЧ-вакуумная сушка; IV – конвективная сушка и отвод влаги; V – гранулирование высушенной растительной массы; VI – хранение высушенной растительной массы.*

Ниже приведен пример осуществления предлагаемой технологии.

Предварительно подсушенную зеленую массу люцерны влажностью 60–65 % и массой 2 кг измельчают до размера частиц не более 10 мм и загружают в сушильную установку. Зеленую массу уплотняют до объемной плотности 200–300 кг/м$^3$ и перемещают в камеру СВЧ-обработки. Затем осуществляют ее обработку СВЧ-излучением частотой 915 МГц с мощностью 800 Вт, обеспечивающей интенсивность нагрева 8–10 °С в секунду, в течение 5 мин. Конечная температура обрабатываемой зеленой массы люцерны составляет 120–130 °С, а остаточная влажность – 25–30 %. В сушильной камере во время сушки поддерживают пониженное атмосферное давление 60 кПа.

Зеленую массу перемещают в камеру конвективной сушки сушильной установки и производят ее досушивание и испарение выделившейся в ходе первого этапа влаги. Их производят потоком нагретого воздуха температурой 50–60 °С, обеспечивающим поддержание температуры растительной массы не выше 60 °С в течение 20 мин. В процессе конвективной сушки проводят досушивание частиц растений, удаляют потоком нагретого воздуха воду с поверхности частиц, а водяной пар через систему вентиляции выводят за пределы установки. Конечная влажность высушенной люцерны составляет 10–15 %. Высушенную растительную массу люцерны выгружают из сушильной установки и направляют на гранулирование или на хранение.

**Обоснование параметров и режимов технологии комбинированной сушки.** Выбор очередности, содержания этапов и параметров выполнения предлагаемой технологии сушки люцерны обусловлены следующими факторами.

Использование предварительно механически измельченной до размера частиц не более 10 мм листостебельной массы обосновано тем, что при таком размере частиц обеспечивается их эффективное уплотнение до объемной плотности 150–300 кг/м$^3$. Уплотнение же измельченной зеленой массы люцерны перед сушкой до объемной плотности 150–300 кг/м$^3$ обосновано тем, что это повышает эффективность действия на нее СВЧ-излучения [29], что выражается в снижении значения коэффициента стоячей волны напряжения (КСВН), а также в повышении общей производительности процесса сушки [30, 31]. Это позволяет сократить продолжительность воздействия СВЧ-излучения, предотвратить перегрев растительной массы и снизить тем самым потери каротина [30]. Значения объемной плотности зеленой массы менее 150 кг/м$^3$ увеличивают значение КСВН до 2,0 и более, что вызывает снижение КПД СВЧ-генератора и создает возможность выхода его из строя [29]. Увеличение объемной плотности более 300 кг/м$^3$ вызывает механическое выделение сока из растительной массы, что приводит к снижению содержания каротина.

Применение кратковременной обработки люцерны СВЧ-излучением частотой 915 МГц с удельной мощностью, обеспечивающей интенсивность нагрева от 1 °С до 10 ºС в секунду, до температуры 120–140 °С обосновано тем, что при интенсивном нагреве до этой температуры продолжительностью не более 5 мин почти не происходит разрушение каротина. Предположительно, это происходит потому, что под влиянием СВЧ-излучения нагревается, в основном, содержащаяся в растительных частицах вода, тогда как вещества, находящиеся в твердой форме, в частности каротин, нагреваются менее интенсивно [32].

Применение генератора СВЧ-излучения мощностью 800 Вт обосновано тем, что увеличение мощности СВЧ-излучения повышает интенсивность обезвоживания и сокращает продолжительность сушки [32], но увеличивает затраты энергии. Поэтому принято значение мощности 800 Вт, как обеспечивающее повышение интенсивности сушки без значительных энергозатрат. Следует отметить, что при увеличении производительности сушильной установки и, соответственно, количества единовременно обрабатываемой в ней зеленой массы, требуется и увеличение

количества СВЧ-генераторов (магнетронов).

Применение СВЧ-излучения частотой 915 МГц обосновано тем, что с увеличением частоты излучения уменьшается диэлектрическая проницаемость высушиваемого материала, что отрицательно влияет на качество и продолжительность сушки [31, 32].

Уровень пониженного давления (вакуума) при СВЧ-сушке, равный 60 кПа, обоснован тем, что более низкое давление может привести к нарушению внутренней структуры растительной ткани, что приведет к неравномерному выделению влаги и ухудшению качества готового продукта [13].

Принятые значения параметров СВЧ-сушки обеспечивают протекание в растительных клетках процесса электроплазмолиза [33], что является необходимым условием их эффективного обезвоживания [34]. Согласно теории электроплазмолиза, изменения в биохимическом составе клеток растений вызваны коагуляцией внутриклеточной протоплазмы под действием СВЧ-излучения и удержанием связанных частиц, содержащих каротин, клеточными стенками при удалении влаги из клеток [35]. В результате электроплазмолиза в клетках высушиваемых растений происходит изомеризация каротина, вызывающая переход β-каротина в α-каротин, что уменьшает его доступность для выведения из клетки вместе с выделяемой влагой и окисления его кислородом, что снижает потери каротина при хранении высушенной растительной массы.

Поэтому хорошую сохранность каротина при СВЧ-сушке зеленых растений можно объяснить коагуляцией протоплазмы в их клетках и удерживанием связанных частиц каротина клеточными мембранами при прохождении через них воды в процессе сушки [29]. В результате воздействия СВЧ-излучения на растительную ткань биологическая активность протоплазмы клеток прекращается, что способствует увеличению проницаемости их мембран для влаги [34, 36]. Электроплазмолиз, в отличие от термоплазмолиза, при интенсивном нагреве не вызывает полного разрушения клеточных стенок, но способствует разделению протоплазмы клеток на крупные частицы, которые легко задерживаются клеточными мембранами при истечении через них воды [35]. При СВЧ-сушке прекращается метаболическая активность растительных клеток, в результате чего исчезают препятствия для протекания процесса высушивания [37, 38]. Благодаря этому исключаются потери каротина с выделяемым соком, а скорость влагоотдачи из растительных частиц значительно увеличивается.

Интенсивность нагрева от 1 °С до 10 °С в секунду обусловлена тем, что при меньших ее значениях не происходит электроплазмолиз в растительных клетках и не обеспечивается выделение из них влаги [36, 39], интенсивность же нагрева более 10 °С в секунду вызывает излишнее высушивание и подгорание растений.

Осуществление СВЧ-сушки при пониженном давлении воздуха (вакууме) обосновано тем, что при этом снижается температура кипения воды, содержащейся в растительной массе [41], благодаря чему обеспечивается большая сохранность каротина [7]. При нагреве внутри растительных частиц происходит повышение давления, приводящее к удалению воды и водяного пара через капилляры и поры [39, 40]. Пониженное давление воздуха в сушильной камере способствует еще большей интенсификации этого процесса [39].

Осуществление процесса СВЧ-вакуумной сушки до уровня влажности 25–30 % обосновано тем, что основной объем свободной влаги удален из растительных тканей и можно переходить к досушке растительной массы конвективным способом.

Поддержание температуры растительной массы при конвективной сушке нагретым воздухом на уровне не выше 60 °С обосновано тем, что при таком температурном режиме не происходит значительное снижение содержания

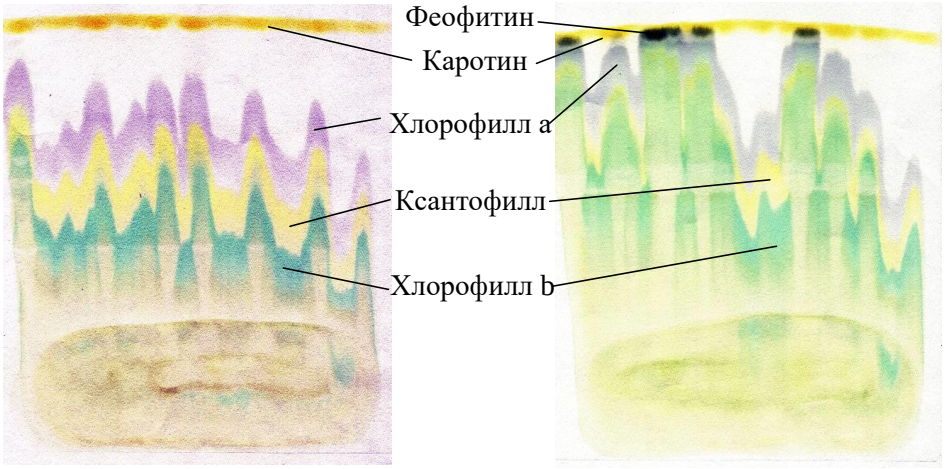
каротина [41]; также использование потока нагретого воздуха с температурой, обеспечивающей поддержание температуры растительной массы на уровне не выше 60 °С, достаточно для эффективного удаления воды и водяных паров из камеры конвективной сушки сушильной установки [20, 42], а ее увеличение выше этого значения приводит к значительным затратам энергии.

Последовательность применения различных методов сушки (сначала СВЧ + вакуум, затем конвективная сушка) обоснована тем, что при СВЧ-обработке по мере снижения влажности растительной массы степень поглощения СВЧ-излучения уменьшается, что вызывает падение интенсивности теплопередачи [17, 43]. Это снижает эффективность сушки и увеличивает ее продолжительность [20, 44], а также может повысить температуру растительной массы до неприемлемого уровня [15, 45, 46]. Поэтому на заключительном этапе обезвоживания люцерны рационально выполнять конвективную сушку. Также применение конвективной сушки нагретым воздухом на втором этапе обусловлено необходимостью эффективного удаления с поверхности растительных частиц выделившейся в ходе первого этапа воды и отвода водяного пара за пределы сушильной установки.

На основе анализа научных данных сделан вывод о том, что для энергоэффективной сушки растений с высокой влажностью, к которым относится люцерна, необходимо объединить в рамках одного технологического процесса последовательно выполняемые СВЧ- и конвективную сушки. Их последовательное действие на высушиваемое растительное сырье позволяет снизить затраты энергии на завершающем этапе его обезвоживания.

**Экспериментальная проверка элементов технологии комбинированной сушки.** Для подтверждения эффективности применения СВЧ-вакуумной сушки с целью обеспечения длительной сохранности высушенной зеленой массы получены хроматограммы содержания каротина в листьях и стеблях люцерны до и после сушки (рисунок 4).

Сравнение хроматограмм образцов люцерны до (рисунок 4а) и после СВЧ-вакуумной сушки (рисунок 4б) показало, что в растительных клетках после обработки верхняя полоса оранжево-желтого цвета, соответствующая β-каротину, сместилась к желтому цвету, соответствующему менее активному α-каротину.




а б

**Рисунок 4 – Хроматограммы содержания каротина и других пигментов в зеленой массе люцерны**

***Примечание.*** *а – до СВЧ-сушки; б – после СВЧ-сушки.*

Это экспериментально подтверждает теоретические положения, согласно которым под воздействием СВЧ-излучения в клетках растений происходит изомеризация каротина, вызывающая превращение β-каротина в α-каротин, менее подверженный окислению кислородом воздуха при длительном хранении.

Для обоснования рационального температурного режима СВЧ-вакуумной сушки выполнены экспериментальные исследования зависимости содержания каротина в высушенной люцерне от температуры обработки, результаты которых представлены на рисунке 5.

Экспериментальные данные подтвердили, что содержание каротина в листостебельной массе люцерны снижается при увеличении температуры СВЧ-сушки. Сделан вывод, что температурный диапазон 120–140 °С является рациональным для СВЧ-вакуумной сушки люцерны по причине минимального снижения содержания каротина.

Выполнены сравнительные экспериментальные исследования сохранности каротина в листостебельной массе люцерны непосредственно после сушки различными способами (таблица 1).

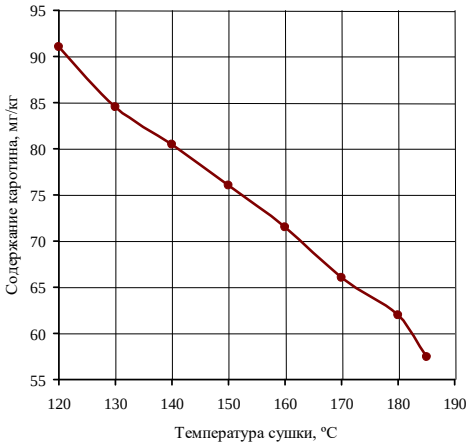



**Рисунок 5 – Зависимость содержания каротина в высушенной люцерне от температурного режима СВЧ-вакуумной сушки**

**Таблица 1 – Результаты экспериментальных исследований сохранности каротина в растительной массе люцерны после сушки различными способами (исходное содержание каротина до сушки – 113 ± 1 мг/кг)**

| Способ сушки | Содержание каротина после сушки, мг/кг | Снижение содержания каротина по сравнению с исходным, % |
|---|---|---|
| СВЧ + вакуум | 90,0 ± 1,1 | 20,0 ± 0,5 |
| Конвективная сушка 70 °С | 74,0 ± 0,9 | 34,5 ± 0,6 |
| Комбинированная сушка (СВЧ + вакуум, затем конвективная 50–60 °С) | 96,0 ± 1,2 | 15,0 ± 0,3 |

Их результаты свидетельствуют, что комбинированный двухэтапный способ сушки люцерны является более эффективным, чем сушка только одним из представленных в таблице 1 методов.

Для определения оптимального диапазона для осуществления сушки люцерны СВЧ-излучением исследовали динамику изменения интенсивности СВЧ-вакуумной сушки по мере уменьшения влажности высушиваемого растительного сырья. Об изменении интенсивности СВЧ-сушки судили по изменению скорости обезвоживания люцерны (рисунок 6).

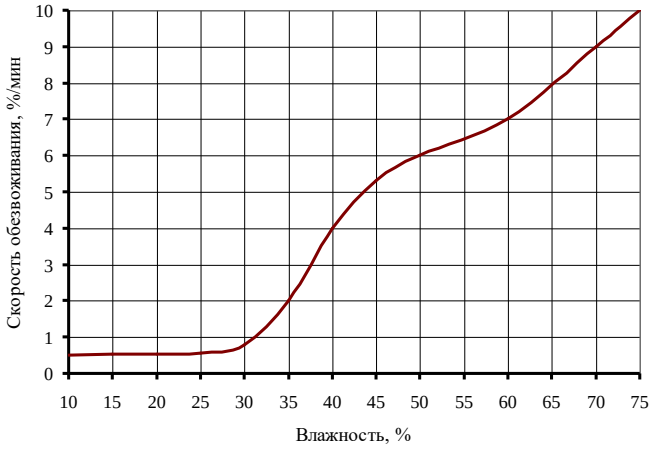



**Рисунок 6 – Зависимость скорости обезвоживания листостебельной массы люцерны в процессе СВЧ-вакуумной сушки от ее влажности**

Установлено, что по мере уменьшения влажности люцерны снижается и интенсивность сушки. Но такая динамика наблюдается лишь при уровне влажности выше 25–30 %. По достижении этой величины скорость обезвоживания стабилизируется. Это свидетельствует о завершении удаления содержащейся в листостебельной массе свободной влаги и начале процесса удаления связанной влаги, что требует значительных затрат энергии.

Этот факт подтверждает, что на заключительном этапе обезвоживания применение СВЧ-сушки нерационально, так как приводит к большим затратам энергии.

Проведены исследования по установлению влияния способа сушки люцерны на сохранность каротина при длительном хранении. По итогам составлена таблица 2, в которой представлена информация о содержании каротина в растительной массе люцерны непосредственной после сушки и динамика его изменения в процессе последующего хранения в течение шести месяцев. Графическое отображение установленных закономерностей изменения содержания каротина представлено на рисунке 7.

**Таблица 2 – Результаты экспериментальных исследований сохранности каротина после сушки различными способами и при последующем хранении растительной массы люцерны (содержание каротина до сушки – 113 ± 1 мг/кг)**

| Способ сушки | Содержание каротина, мг/кг | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | продолжительность хранения, мес. | | | | | | |
| | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| Конвективная сушка при температуре 70 °С | 74,0 ± 0,8 | 70,1 ± 0,8 | 66,3 ± 0,7 | 62,1 ± 0,7 | 57,3 ± 0,6 | 49,2 ± 0,6 | 41,1 ± 0,5 |
| Комбинированная сушка: СВЧ-вакуумная сушка и последующая конвективная сушка при температуре менее 60 °С | 91,0 ±1,0 | 83,1 ± 0,9 | 78,5 ± 0,85 | 76,2 ± 0,8 | 73,0 ± 0,8 | 70,4 ± 0,8 | 67,6 ± 0,8 |

В результате экспериментальных исследований установлено, что применение комбинированного способа сушки обеспечивает бóльшую сохранность каротина в растительной массе люцерны, чем традиционный метод конвективной сушки.

Установлено, что за шесть месяцев (180 дней) содержание каротина в высушенной комбинированной сушкой люцерне снизилось на 25,7 %. В тоже время содержание каротина в высушенной методом только конвективной сушки люцерне

снизилось за шесть месяцев (180 дней) на 44,5 %, при этом в последние два месяца снижение было более интенсивным, тогда как при комбинированной сушке содержание каротина уменьшалось более равномерно.

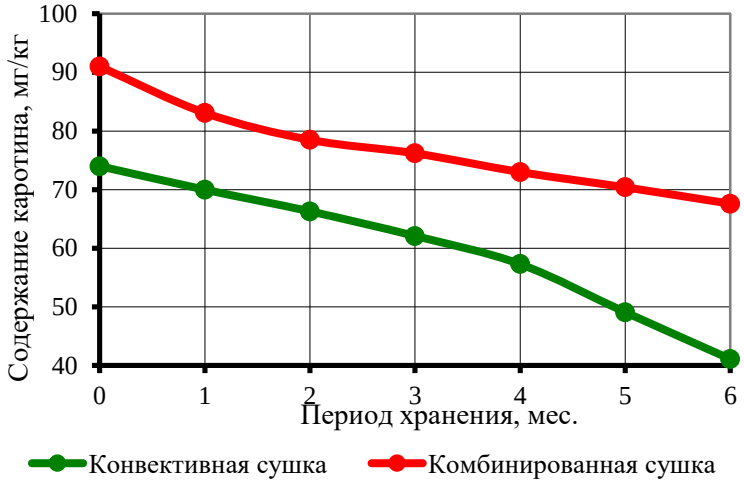



**Рисунок 7 – Зависимость содержания каротина в растительной массе люцерны после ее сушки различными способами от продолжительности хранения**

Результаты проведенного эксперимента доказывают, что применение технологии комбинированной сушки обеспечивает хорошую сохранность содержащегося в высушенной люцерне каротина во время ее хранения в зимний период.

## Выводы

Результаты экспериментальных исследований подтвердили обоснованность принятого состава и порядка выполнения операций технологического процесса комбинированной сушки люцерны и рациональных параметров их осуществления, определенных на основе известных теоретических положений.

Технология комбинированной сушки, включающая последовательно выполняемые операции СВЧ-вакуумной и конвективной сушки, является перспективной для осуществления промышленной сушки зеленой массы люцерны посевной, а также других кормовых трав. Она позволяет максимально сохранить в их составе каротин как в процессе сушки растительной массы, так и в продолжение ее хранения. Сочетание СВЧ-вакуумной и конвективной сушки в рамках единого технологического процесса позволяет снизить энергоемкость процесса обезвоживания люцерны и, соответственно, уменьшить себестоимость заготовки кормов.

## Литература

1. Шевцов А. А., Дранников А. В., Коротаева А. А. Анализ инновационной привлекательности использования вегетативной массы растений в комбикормах // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. 2013. № 1. С. 224–226.

2. Elgersma A., Soegaard K., Jensen S. K. Vitamin contents in forage herbs // Aspects of Applied Biology. 2012. No. 115. P. 75–80.

3. Xianzhe Z., Lan Y., Jianying W., Hangfei D. Process analysis for an alfalfa rotary dryer using an improved dimensional analysis method // International Journal of Agricultural and Biological Engineering. 2009. Vol. 2. No. 3. P. 76–82.

4. Mulle C. J. C., Cruywage C. W., Du Toi F. J., Both J. A. The drying rate and chemical composition of field and artificially dried lucerne hay // South African Journal of Animal Science. 2008. Vol. 38. No. 4. P. 350–354.

5. Gallego A., Hospido A., Moreira M. T., Feijoo G. Environmental assessment of dehydrated alfalfa production in Spain // Resources, Conservation and Recycling. 2011. Vol. 55. No. 11. P. 1005–1012.

6. 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.

7. 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.

8. Darvishi H. Mathematical modeling, moisture diffusion and energy consumption in thin layer drying of alfalfa // Middle-East Journal of Scientific Research. 2012. Vol. 12. No. 4. P. 511–16.

9. Jancik F., Kubelkova P., Kubat V., Koukolova M., Homolka P. Effects of drying procedures on chemical composition and nutritive value of alfalfa forage // South African Journal of Animal Science. 2017. Vol. 47. No. 1. P. 96–101.

10. 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.

11. 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.

12. Zhang M., Chen H., Mujumdar A. S., Tang J., Miao S., Wang Y. Recent developments in high-quality drying of vegetables, fruits, and aquatic products // Critical Reviews in Food Science and Nutrition. 2017. Vol. 57. No. 6. P. 1239–1255.

13. Zielinska M., Ropelewska E., Xiao H. W., Mujumdar A. S., Law C. L. Review of recent applications and research progress in hybrid and combined microwave-assisted drying of food products: Quality properties // Critical Reviews in Food Science and Nutrition. Latest articles. 2019. С. 1–53.

14. Sufer O., Palazoglu T. K. Microwave-vacuum drying of pomegranate arils (*Punica granatum* L. cv. Hicaznar): Effect on quality and nutrient content // Journal of Food Processing and Preservation. 2019. Vol. 43. No. 9. Art. No. e14085. DOI: 10.1111/jfpp.14085.

15. Goreshnev M., Litvishko E. Math modeling of vacuum conductive timber drying // Advanced Materials Research. 2014. No. 1040. P. 478–483.

16. 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.

17. Pu Y. Y., Sun D. W. Combined hot-air and microwave-vacuum drying for improving drying uniformity of mango slices based on hyperspectral imaging visualisation of moisture content distribution // Biosystems Engineering. 2017. Vol. 156. P. 108–119.

18. Zhou X., Ramaswamy H., Qu Y., Xu R., Wang S. Combined radio frequency-vacuum and hot air drying of kiwifruits: Effect on drying uniformity, energy efficiency and product quality // Innovative Food Science & Emerging Technologies. 2019. Vol. 56. Art. No. 102182. DOI: 10.1016/j.ifset.2019.102182.

19. Ferenczi S., Cserhalmi Z., Visnyei B., Szucs V., Czukor B. Effect of operational parameters of microwave vacuum drying combined with hot-air pre-drying to physical, sensory, and nutritional properties of dried apple snack // Acta Alimentaria. 2017. Vol. 46. No. 2. P. 152–161.

20. Chua L. Y. W., Chua B. L., Figiel A., Chong C. H., Wojdylo A., Szumny A., Lech K. Characterisation of the convective hot-air drying and vacuum microwave drying of Cassia alata: Antioxidant activity, essential oil volatile composition and quality studies // Molecules. 2019. Vol. 24. No. 8. P. 16–25.

21. Onwude D. I., Hashim N., Chen G. Recent advances of novel thermal combined hot air drying of agricultural crops // Trends in Food Science & Technology. 2016. Vol. 57. С. 132–145.

22. Виноград Э. Г. Методологический аппарат системного исследования // Социогуманитарный вестник. 2013. № 1. С. 144–159.

23. Виноград Э. Г. Учет системных закономерностей в инженерном мышлении и проектировании // Социогуманитарный вестник. 2014. № 1. С. 141–154.

24. Виноград Э. Г., Захарова Л. М., Плосконосова Е. А., Храпцова Т. А. Учет системных закономерностей при разработке технологии молочного напитка, обогащенного // Техника и технология пищевых производств. 2016. Т. 41. № 2. С. 21–27.

25. Патент РФ № 2620462 «Установка комбинированной сушки зеленой растительной массы». 22.05.2017.

26. 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 β-carotene in vegetables // Food Chemistry. 2006. Vol. 95. No. 2. P. 328–336.

27. Чечета О. В., Сафонова Е. Ф., Сливкин А. И. Методика определения каротиноидов методом хроматографии в тонком слое сорбента // Сорбционные и хроматографические процессы. 2008. Т. 8. № 2. С. 320–326.

28. Патент РФ № 2629109 «Способ сушки зеленых растительных материалов с использованием СВЧ-обработки». 24.08.2017.

29. Rogov I. A. Biological aspects of microwaves food's technologies // Electronic Processing of Materials. 2000. No. 5. P. 115–125.

30. Shrestha B. L., Wood H. C., Tabil L., Baik O. D., Sokhansanj S. Microwave permittivity-assisted artificial neural networks for determining moisture content of chopped alfalfa forage // IEEE Instrumentation & Measurement Magazine. 2017. Vol. 20. No. 3. P. 37–42.

31. Shrestha B. L., Wood H. C., Sokhansanj S. Microwave dielectric properties of alfalfa leaves from 0.3 to 18 GHz // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. 2011. Vol. 60. No. 8. P. 2926–2933.

32. 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.

33. Botosan N. I., Bologa M. K., Berzoi S. E. Intensification and optimization of heat treatment of raw vegetable matter by electroplasmolysis // Surface Engineering and Applied Electrochemistry. 2007. Vol. 43. No. 1. P. 53–58.

34. Gachovska T. K., Adedeji A. A., Ngadi M. O. Influence of pulsed electric field energy on the damage degree in alfalfa tissue // Journal of Food Engineering. 2009. Vol. 95. No. 4. P. 558–563.

35. Ciobanu V. G. Foundations of energetics of electroplasmolysis of vegetable raw materials // Surface Engineering and Applied Electrochemistry. 2008. Vol. 44. No. 1. P. 55–59.

36. Ngadi M. O., Bazhal M. I., Raghavan G. S. V. Engineering aspects of pulsed electroplasmolysis of vegetable tissues // Agricultural Engineering International: CIGR Journal. 2003. Vol. 5. P. 1–10.

37. Бородин И. Ф., Шарков Г. А., Горин А. Д. Применение СВЧ-энергии в сельском хозяйстве. М.: ВНИИТЭИагропром, 1987. 56 с.

38. Motavali A., Najafi G. H., Abbasi S., Minaei S., Ghaderi A. Microwave-vacuum drying of sour cherry: comparison of mathematical models and artificial neural networks // Journal of Food Science and Technology. 2013. Vol. 50. No. 4. P. 714–722.

39. Горешнев М. А., Секисов Ф. Г. Исследование динамики влагоудаления при сушке комбинированной методом в вакууме // Ползуновский альманах. 2010. № 2. С. 257–259.

40. Dak M., Pareek N. K. Effective moisture diffusivity of pomegranate arils under going microwave-vacuum drying // Journal of Food Engineering. 2014. Vol. 122. P. 117–121.

41. Chua L. Y. W., Chua L. Y. W., Chua B. L., Figiel A., Chong C. H., Wojdylo A., Szumny A., Choong T. S. Y. Antioxidant activity, and volatile and phytosterol contents of Strobilanthes crispus dehydrated using conventional and vacuum microwave drying methods // Molecules. 2019. Vol. 24. No. 7. P. 1397. DOI: 10.3390/molecules24071397.

42. Giri S. K., Prasad S. Drying kinetics and rehydration characteristics of microwave-vacuum and convective hot-air dried mushrooms // Journal of Food Engineering. 2007. Vol. 78. No. 2. P. 512–521.

43. Kantrong H., Tansakul A., Mittal G. S. Drying characteristics and quality of shiitake mushroom undergoing microwave-vacuum drying and microwave-vacuum combined with infrared drying // Journal of Food Science and Technology. 2014. Vol. 51. No. 12. P. 3594–3608.

44. Heindl A. G. W., Muller J. Microwave drying of medicinal and aromatic plants // Stewart Postharvest Review. 2007. Vol. 3. No. 4. P. 1–6.

45. Wojdylo A., Figiel A., Lech K., Nowicka P., Oszmianski 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.

46. Трубилин Е. И., Виневский Е. И. Энергоемкость сушки растительного сырья: проблемы и пути решения // Технический оппонент. 2019. № 1. С. 48–53.

## References

1. Shevtsov A. A., Drannikov A. V., Korotaeva A. A. Analysis of innovation attractiveness of plants vegetative growth in compound feed // Proceedings of the Voronezh State University of Engineering Technologies. 2013. No. 1. P. 224–226.

2. Elgersma A., Soegaard K., Jensen S. K. Vitamin contents in forage herbs // Aspects of Applied Biology. 2012. No. 115. P. 75–80.

3. Xianzhe Z., Lan Y., Jianying W., Hangfei D. Process analysis for an alfalfa rotary dryer using an improved dimensional analysis method // International Journal of Agricultural and Biological Engineering. 2009. Vol. 2. No. 3. P. 76–82.

4. Mulle C. J. C., Cruywage C. W., Du Toi F. J., Both J. A. The drying rate and chemical composition of field and artificially dried lucerne hay // South African Journal of Animal Science. 2008. Vol. 38. No. 4. P. 350–354.

5. Gallego A., Hospido A., Moreira M. T., Feijoo G. Environmental assessment of dehydrated alfalfa production in Spain // Resources, Conservation and Recycling. 2011. Vol. 55. No. 11. P. 1005–1012.

6. 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.

7. 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.

8. Darvishi H. Mathematical modeling, moisture diffusion and energy consumption in thin layer drying of alfalfa // Middle-East Journal of Scientific Research. 2012. Vol. 12. No. 4. P. 511–16.

9. Jancik F., Kubelkova P., Kubat V., Koukolova M., Homolka P. Effects of drying procedures on chemical composition and nutritive value of alfalfa forage // South African Journal of Animal Science. 2017. Vol. 47. No. 1. P. 96–101.

10. 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.

11. 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.

12. Zhang M., Chen H., Mujumdar A. S., Tang J., Miao S., Wang Y. Recent developments in high-quality drying of vegetables, fruits, and aquatic products // Critical Reviews in Food Science and Nutrition. 2017. Vol. 57. No. 6. P. 1239–1255.

13. Zielinska M., Ropelewska E., Xiao H. W., Mujumdar A. S., Law C. L. Review of recent applications and research progress in hybrid and combined microwave-assisted drying of food products: quality properties // Critical Reviews in Food Science and Nutrition. 2019. P. 1–53.

14. Sufer O., Palazoglu T. K. Microwave-vacuum drying of pomegranate arils (*Punica granatum* L. cv. Hicaznar): effect on quality and nutrient content // Journal of Food Processing and Preservation. 2019. Vol. 43. No. 9. Art. No. e14085. DOI: 10.1111/jfpp.14085.

15. Goreshnev M., Litvishko E. Math modeling of vacuum conductive timber drying // Advanced Materials Research. 2014. No. 1040. P. 478–483.

16. 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.

17. Pu Y. Y., Sun D. W. Combined hot-air and microwave-vacuum drying for improving drying uniformity of mango slices based on hyperspectral imaging visualisation of moisture content distribution // Biosystems Engineering. 2017. Vol. 156. P. 108–119.

18. Zhou X., Ramaswamy H., Qu Y., Xu R., Wang S. Combined radio frequency-vacuum and hot air drying of kiwifruits: effect on drying uniformity, energy efficiency and product quality // Innovative Food Science & Emerging Technologies. 2019. Vol. 56. Art. No. 102182. DOI: 10.1016/j.ifset.2019.102182.

19. Ferenczi S., Cserhalmi Z., Visnyei B., Szucs V., Czukor B. Effect of operational parameters of microwave vacuum drying combined with hot-air pre-drying to physical, sensory, and nutritional properties of dried apple snack // Acta Alimentaria. 2017. Vol. 46. No. 2. P. 152–161.

20. Chua L. Y. W., Chua B. L., Figiel A., Chong C. H., Wojdylo A., Szumny A., Lech K. Characterisation of the convective hot-air drying and vacuum microwave drying of Cassia alata: Antioxidant activity, essential oil volatile composition and quality studies // Molecules. 2019. Vol. 24. No. 8. Art. No. 1625.

21. Onwude D. I., Hashim N., Chen G. Recent advances of novel thermal combined hot air drying of agricultural crops // Trends in Food Science & Technology. 2016. Vol. 57. P. 132–145.

22. Vinogray E.G. Methodological apparat of a system research // Social and Humanitarian Bulletin. 2013. No. 1. P. 144–159.

23. Vinogray E.G. The accounting of system regularities in engineering thinking and design // Social and Humanitarian Bulletin. 2014. No. 1. P. 141–154.

24. Vinogray E. G., Zakharova L. M., Ploskonosova E. A., Khraptsova T. A. System patterns in development of enriched milk beverage technology// Food Processing: Techniques and Technology. 2016. Vol. 41. No. 2. P. 21–27.

25. Patent RU No. 2620462 “Setting the combined drying green plant mass”. 22.05.2017.

26. 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 β-carotene in vegetables // Food Chemistry. 2006. Vol. 95. No. 2. P. 328–336.

27. 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.

28. Patent RU No. 2629109 “Method for drying green vegetable materials with use of microwave treatment”. 24.08.2017.

29. Rogov I. A. Biological aspects of microwaves food’s technologies // Electronic Processing of Materials. 2000. No. 5. P. 115–125.

30. Shrestha B. L., Wood H. C., Tabil L., Baik O. D., Sokhansanj S. Microwave permittivity-assisted artificial neural networks for determining moisture content of chopped alfalfa forage // IEEE Instrumentation & Measurement Magazine. 2017. Vol. 20. No. 3. P. 37–42.

31. Shrestha B. L., Wood H. C., Sokhansanj S. Microwave dielectric properties of alfalfa leaves from

0.3 to 18 GHz // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. 2011. Vol. 60. No. 8. P. 2926–2933.

32. 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.

33. Botosan N. I., Bologa M. K., Berzoi S. E. Intensification and optimization of heat treatment of raw vegetable matter by electroplasmolysis // Surface Engineering and Applied Electrochemistry. 2007. Vol. 43. No. 1. P. 53–58.

34. Gachovska T. K., Adedeji A. A., Ngadi M. O. Influence of pulsed electric field energy on the damage degree in alfalfa tissue // Journal of Food Engineering. 2009. Vol. 95. No. 4. P. 558–563.

35. Ciobanu V. G. Foundations of energetics of electroplasmolysis of vegetable raw materials // Surface Engineering and Applied Electrochemistry. 2008. Vol. 44. No. 1. P. 55–59.

36. Ngadi M. O., Bazhal M. I., Raghavan G. S. V. Engineering aspects of pulsed electroplasmolysis of vegetable tissues // Agricultural Engineering International: CIGR Journal. 2003. Vol. 5. P. 1–10.

37. Borodin I. F., Sharkov G. A., Gorin A. D. Application of a microwave energy in agriculture. Moscow: VNIITEIagroprom, 1987. 56 p.

38. Motavali A., Najafi G. H., Abbasi S., Minaei S., Ghaderi A. Microwave-vacuum drying of sour cherry: comparison of mathematical models and artificial neural networks // Journal of Food Science and Technology. 2013. Vol. 50. No. 4. P. 714–722.

39. Goreshnev 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.

40. Dak M., Pareek N. K. Effective moisture diffusivity of pomegranate arils under going microwave-vacuum drying // Journal of Food Engineering. 2014. Vol. 122. P. 117–121.

41. Chua L. Y. W., Chua L. Y. W., Chua B. L., Figiel A., Chong C. H., Wojdylo A., Szumny A., Choong T. S. Y. Antioxidant activity, and volatile and phytosterol contents of *Strobilanthes crispus* dehydrated using conventional and vacuum microwave drying methods // Molecules. 2019. Vol. 24. No. 7. Art. No. 1397. DOI: 10.3390/molecules24071397.

42. Giri S. K., Prasad S. Drying kinetics and rehydration characteristics of microwave-vacuum and convective hot-air dried mushrooms // Journal of Food Engineering. 2007. Vol. 78. No. 2. P. 512–521.

43. Kantrong H., Tansakul A., Mittal G. S. Drying characteristics and quality of shiitake mushroom undergoing microwave-vacuum drying and microwave-vacuum combined with infrared drying // Journal of Food Science and Technology. 2014. Vol. 51. No. 12. P. 3594–3608.

44. Heindl A. G. W., Muller J. Microwave drying of medicinal and aromatic plants // Stewart Postharvest Review. 2007. Vol. 3. No. 4. P. 1–6.

45. Wojdylo A., Figiel A., Lech K., Nowicka P., Oszmianski 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.

46. Trubilin E. I., Vinevskii E. I. Energy intensity of drying of plant raw material: problems and solutions // Technical opponent. 2019. No. 1. P. 48–53.

UDC 631.365.23:533.9.082.74:66.047.3

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

## JUSTIFICATION OF THE TECHNOLOGY OF ALFALFA COMBINED DRYING JOINING ADVANTAGES OF MICROWAVE-VACUUM AND CONVECTIVE METHODS OF DEHYDRATION

***Summary.*** *Development of energy-saving technologies of fodder herbs drying ensuring carotene retention is the urgent task. The purpose of the research was to develop energy-saving technology for the combined drying of green alfalfa using methods of microwave and convective drying. The studies were conducted in 2019–2020 in the Zernogradsky district of the Rostov region, Russia. Technological process of drying plant mass of forage crops, in particular alfalfa, was the research object. Combined technology of two-phase alfalfa drying was developed. At the first stage, pre-cut and compacted to a bulk density of 150–300 kg/m$^{-3}$ leaf-stem mass was dried by microwave radiation with a frequency of 915 MHz with a power providing heating intensity from 1 to 10 °C per second. The plant mass was dried at reduced atmospheric pressure at a temperature of 120–140 °C until moisture content of 25–30 % was reached. During the second stage, drying of partially dehydrated plant fragments and evaporation of moisture to a content of 10–15 % was*

*carried out by the method of convective drying by heated air no higher than 60 °C. Theoretical justification of the composition and the order of operations of the combined drying and the rational parameters of their implementation was made based on the known regularities of the drying process. As a result of experiments, it was found that temperature of 120–140 °C is rational for microwave-vacuum drying of alfalfa. Combined drying technology provides minimum reduction of carotene content after drying – no more than 15 %; during storage period of 6 months – no more than 45 %. Combined drying that includes sequentially performed microwave-vacuum and convective drying operations allows saving maximum carotene both during plant mass drying and storage. It additionally allows reducing energy consumption during alfalfa dehydration and costs on storing forage.*

***Keywords:*** *microwave-vacuum alfalfa (Medicago sativa L.), drying, hot-air drying, combined drying, vacuum, moisture elimination, carotene, storage.*

Пахомов Виктор Иванович, доктор технических наук, заместитель директора по науке по механизации и электрификации, ФГБНУ «Аграрный научный центр “Донской”»; 347740, Россия, Ростовская область, г. Зерноград, ул. Ленина, 14; e-mail: vniptim@gmail.com.

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

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

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

Pakhomov Viktor Ivanovich, Dr. Sc. (Tech.), deputy director for science of mechanization and electrification, SSE Agricultural Research Center “Donskoy”; 14 Lenina St., Zernograd, Rostov Region, 347740, Russia; e-mail: vniptim@gmail.com.

Braginets Sergey Valeryevich, Cand. Sc. (Tech.), leading scientific worker of the vegetable feedstock processing Department, structural unit SKNIIMESH, SSE Agricultural Research Center “Donskoy”; 14 Lenina St., Zernograd, Rostov Region, 347740, Russia; e-mail: braginets@mail.ru.

Bakhchevnikov Oleg Nikolayevich, Cand. Sc. (Tech.), scientific worker of the vegetable feedstock processing Department, structural unit SKNIIMESH, SSE Agricultural Research Center “Donskoy”; 14 Lenina St., Zernograd, Rostov Region, 347740; Russia, e-mail: oleg-b@list.ru.

Rukhlyada Artem Igorevich, junior researcher of the vegetable feedstock processing Department, structural unit SKNIIMESH, SSE Agricultural Research Center “Donskoy”; 14 Lenina St., Zernograd, Rostov Region, 347740, Russia; e-mail: Ruhlada1990@yandex.ru.

*Дата поступления в редакцию – 22.04.2020.*
*Дата принятия к печати – 06.06.2020.*