

пособие для вузов / А. А. Яблонский, В. М. Никифорова. – 15-е изд., стер. – Москва: КНОРУС, 2010. – 608 с. – Текст: непосредственный.

References

1. Abdulnatipov, M. G. Vliyaniye sposobov vneseniya mineralnykh udobreniy na rost i razvitiye rasteniy // Izvestiya Dagestanskogo GAU. 2019. No. 4 (4). – S. 65-67.

2. Irmulatov, B.R. O perspektivakh pretsizionnogo upravleniya produktivnostyu pshenitsy v usloviyakh severnogo Kazakhstana / B.R. Irmulatov, K.K. Abdullaev, A.A. Komarov, V.V. Yakushev // Selskokhozyaystvennaya biologiya. – 2021. – Т. 56. – No. 1. – S. 92-102.

3. Chekusov, M. S. Vozdelyvanie pshenitsy v zavisimosti ot sposoba poseva i vneseniya azotnykh udobreniy / M.S. Chekusov, A.A. Kem, E.M. Mikhaltsov i dr // Sibirskiy vestnik selskokhozyaystvennoy nauki. – 2022. – Т. 52. – No. 1. – S. 90-99.

4. Okunev, G.A. Resursosberegayushchie tekhnologii – rezerv povysheniya effektivnosti zemledeliya / G.A. Okunev, N. A. Kuznetsov, S.S. Kanatpaev // APK Rossii. – 2017. – Т. 24. – No. 1. – S. 136-141.

5. Tsimmerman, M.Z. Rabochie organy pochvoobrabatyvayushchikh mashin / M.Z. Tsimmerman. – Moskva: Mashinostroenie, 1978. – 295 s.

6. Vorokosov, I.V. Obosnovanie konstruktivnykh parametrov pochvoobrabatyvayushchego orudiya dlya predposevnoy obrabotki pochvy i poseva zernovykh kultur // Vestnik Kurganskoй GSKHA. – 2017. – No. 1 (21). – S. 72-74.

7. Yablonskiy, A.A. Kurs teoreticheskoy mekhaniki: statika, kinematika, dinamika: uchebnoye posobie dlya vuzov / A.A. Yablonskiy, V.M. Nikiforova. – 15-е изд., стер. – Москва: КНОРУС, 2010. – 608 с.



УДК 633.2.043.2:631.363.32

DOI: 10.53083/1996-4277-2026-260-6-76-85

**С.В. Брагинец, О.Н. Бахчевников,
В.И. Пахомов, Д.А. Максак**
S.V. Braginet, O.N. Bakhchevnikov,
V.I. Pakhomov, D.A. Maksak

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА СВЧ-КОНВЕКТИВНОЙ СУШКИ ЗЕЛЕННОЙ МАССЫ ЛЮЦЕРНЫ В ВЕРТИКАЛЬНОЙ УСТАНОВКЕ

SIMULATION OF THE UHF CONVECTIVE DRYING PROCESS OF ALFALFA HERBAGE IN A VERTICAL DRYER

Ключевые слова: СВЧ-сушка, зеленая масса, вакуум, вертикальная сушильная установка, радиопрозрачный шнек, каротин, математическое моделирование, тепломассоперенос.

Разработана и валидирована физико-математическая модель процесса СВЧ-конвективной сушки измельченной зеленой массы люцерны в вертикальной установке при пониженном давлении 60-80 кПа. Модель предназначена для прогнозирования динамики влагоудаления, температурных полей и потерь каротина при комбинированном воздействии СВЧ-излучения и вакуума. В отличие от однокомпонентных подходов учитывается морфологическая неоднородность сырья: отдельно описаны листовая (65%) и стеблевая (35%) фракции с различной кинетикой тепломассопереноса и диэлектрическими свойствами. Листья и стебли аппроксимированы, соответственно, пластинами и цилиндрами, что позволило количественно описать асинхронность их

сушки и перераспределение СВЧ-энергии. В модель включено уравнение термической деградации каротина, зависящее от температуры листьев и влагосодержания, что обеспечило прогнозирование сохранности питательной ценности продукта. Установлено, что разница температур между фракциями достигает 1,9-5,6°C, а между центральной и периферийной зонами камеры – 2,5-3,5°C. Максимальная температура материала составляет 89°C, при этом температура листьев не превышает 87,1-91,2°C, что ограничивает деградацию каротина. Конечная влажность продукта изменяется в диапазоне 20,5-29,6%, при этом разница влажности листьев и стеблей составляет 2,7-7,9%. Время экспозиции материала в камере варьирует от 220 до 580 с в зависимости от частоты вращения шнека (5-12 об/мин.). Оптимальный диапазон 7-10 об/мин. обеспечивает конечную влажность листьев 20,1-21,8%, стеблей – 23,8-25,9% и потери каротина не более 3,9-5,1%. Валидация модели показала коэффициент детерминации 0,987,

относительную погрешность расчета влажности до 1,7% и потерь каротина до 0,5%. Результаты создают основу для инженерного проектирования высокоэффективных СВЧ-конвективных сушильных установок.

Keywords: *UHF drying, herbage, vacuum, vertical drying unit, radio-transparent screw conveyor, carotene, mathematical modeling, heat and mass transfer.*

A physics-based mathematical model of UHF convective drying of chopped alfalfa herbage in a vertical dryer under reduced pressure (60–80 kPa) was developed and validated. The model forecasts moisture removal kinetics, temperature fields, and carotene losses under combined microwave heating and vacuum conditions. Unlike single-component approaches, it accounts for morphological heterogeneity by separately describing leaf (65%) and stem (35%) fractions with distinct heat and mass transfer kinetics and dielectric properties. Leaves and stems were represented as flat plates and

cylinders enabling quantification of asynchronous drying and redistribution of absorbed microwave energy. A kinetic equation for thermal carotene degradation dependent on leaf temperature and moisture content was incorporated to assess product quality. The temperature difference between fractions reaches 1.9–5.6°C, while the radial gradient within the chamber is limited to 2.5–3.5°C. The maximum material temperature is 89°C with leaf temperature not exceeding 87.1–91.2°C which constrains carotene degradation. The final moisture content ranges from 20.5% to 29.6% with a leaf–stem difference of 2.7–7.9%. Residence time varies from 220 to 580 s depending on screw rotation speed (5–12 rpm). The optimal range of 7–10 rpm ensures leaf moisture of 20.1–21.8%, stem moisture of 23.8–25.9%, and carotene losses below 3.9–5.1%. Model validation demonstrated high accuracy with a coefficient of determination of 0.987, relative moisture prediction error below 1.7%, and carotene loss error within 0.5%. The results provide a basis for engineering design of efficient microwave-convective drying systems.

Брагинец Сергей Валерьевич, д.т.н., вед. науч. сотр., ФГБНУ «Аграрный научный центр «Донской», г. Зерноград, Ростовская обл., Российская Федерация, e-mail: sbraginets@mail.ru.

Бахчевников Олег Николаевич, к.т.н., ст. науч. сотр., ФГБНУ «Аграрный научный центр «Донской», г. Зерноград, Ростовская обл., Российская Федерация, e-mail: oleg-b@list.ru.

Пахомов Виктор Иванович, д.т.н., член-корр. РАН, директор, ФГБНУ «Аграрный научный центр «Донской», г. Зерноград, Ростовская обл., Российская Федерация, e-mail: vniizk30@mail.ru.

Максак Дмитрий Андреевич, аспирант, ФГБНУ «Аграрный научный центр «Донской», г. Зерноград, Ростовская обл., Российская Федерация, e-mail: maksak.1998@mail.ru.

Braginets Sergey Valerevich, Dr. Tech. Sci., Leading Researcher, Agricultural Research Center “Donskoy”, Zernograd, Rostov Region, Russian Federation, e-mail: sbraginets@mail.ru.

Bakchevnikov Oleg Nikolaevich, Cand. Tech. Sci., Senior Researcher, Agricultural Research Center “Donskoy”, Zernograd, Rostov Region, Russian Federation, e-mail: oleg-b@list.ru.

Pakhomov Viktor Ivanovich, Dr. Tech. Sci., Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Director, Agricultural Research Center “Donskoy”, Zernograd, Rostov Region, Russian Federation, e-mail: vniizk30@mail.ru.

Maksak Dmitriy Andreevich, post-graduate student, Agricultural Research Center “Donskoy”, Zernograd, Rostov Region, Russian Federation, e-mail: maksak.1998@mail.ru.

Введение

Зеленая масса люцерны является источником каротина в кормопроизводстве, но по причине высокой влажности (70–85%) требует сушки [1]. Традиционные методы конвективной сушки при атмосферном давлении вызывают интенсивную термическую деградацию каротина под действием высокой температуры [2, 3].

Перспективным решением проблемы является применение методов сушки, сочетающих преимущества разных физических принципов обезвоживания [4, 5]. СВЧ-сушка обеспечивает объемный нагрев материала за счет диссипации электромагнитной энергии во влажном сырье, что ускоряет процесс удаления влаги [6]. Но при

атмосферном давлении интенсивное воздействие СВЧ приводит к термическому разрушению каротина. Поддержание в сушильной камере пониженного давления позволяет снизить температуру кипения, что обеспечивает условия для лучшей сохранности каротина [7].

Экспериментальные исследования, выполненные в Аграрном научном центре «Донской», подтвердили эффективность применения СВЧ-вакуумной сушки для заготовки зеленой массы люцерны. Применение вакуума (абсолютное давление 70 кПа) в сочетании с СВЧ-излучением позволило достичь удаления влаги со скоростью, в 2,5–3 раза превышающей показатели сушки при атмосферном давлении, при

этом потери каротина составили всего 5-10% [8, 9].

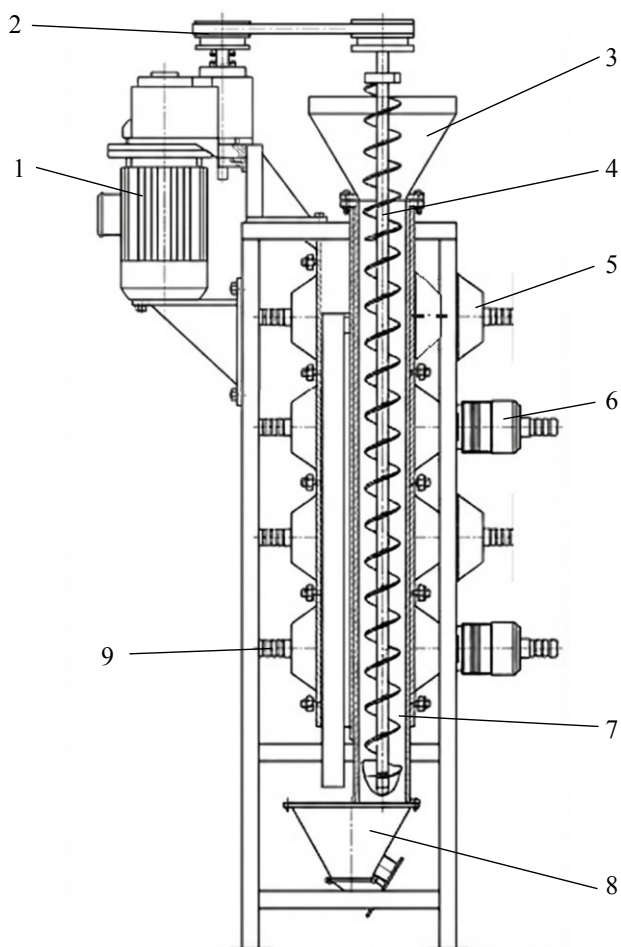


Рис. Вертикальная установка для СВЧ-конвективной сушки зеленой массы:
 1 – электродвигатель; 2 – привод;
 3 – загрузочный бункер; 4 – вертикальный шнек;
 5 – модуль конвективной сушки;
 6 – модуль СВЧ-нагрева; 7 – сушильная камера;
 8 – выгрузной бункер;
 9 – штуцер вакуумпровода

На основе этих результатов была разработана установка для СВЧ-сушки с горизонтальной сушильной камерой, состоящей из чередующихся модулей конвективной сушки и СВЧ-нагрева (патент РФ № 2620462): конвективные модули удаляли поверхностную влагу, а СВЧ-модули при пониженном давлении эффективно удаляли связанную влагу из внутренних слоев.

Проверка этой установки выявила ее ограничения. Основным недостатком явилась низкая производительность, вызванная необходимостью создания механического подпора для перемещения сырья по горизонтальной камере. Невозможность размещения металлических деталей в зоне действия СВЧ исключала применение

транспортирующего шнека по всей длине камеры, что ограничивало возможность регулирования скорости перемещения материала.

Для устранения описанных недостатков горизонтальной установки была разработана вертикальная установка для СВЧ-конвективной сушки зеленой массы (рис.).

Установка является модульной: она содержит пары поочередно расположенных модулей СВЧ-вакуумной и конвективной сушки. Чтобы обеспечить необходимое время экспозиции материала в поле СВЧ, в камере установлен вертикальный шнек с регулируемой скоростью вращения.

Вертикальная установка должна обеспечить эффективную сушку зеленой массы, в частности листьев и стеблей люцерны, при пониженном давлении с начальной влажности 70-80 % до конечной 25-30%.

Цель исследования – разработка и валидация математической модели процесса СВЧ-конвективной сушки зеленой растительной массы при пониженном давлении в вертикальной установке.

Объекты и методы

Для описания процесса сушки зеленой массы в вертикальной СВЧ-конвективной установке разработали физико-математическую модель, описывающую процессы теплопередачи, массопереноса и диссипации электромагнитной энергии в растительном материале при комбинированном воздействии СВЧ-излучения и вакуума. Модель базируется на законах сохранения энергии и массы с учетом специфики вертикальной компоновки установки и гравитационного перемещения материала [10, 11].

Ставилась задача – выполнить прогнозирование динамики влагоудаления и распределения температуры в зависимости от параметров и режимов работы.

В модели учтено вертикальное движение материала: скорость сырья определяется гравитацией и торможением шнеком, что влияет на время его экспозиции в сушильной камере вертикальной установки.

Важным отличием новой модели является учет неоднородности зеленой массы люцерны: она состоит из частиц тонких листьев (пластины) и объемных стеблей (цилиндры), имеющих разную влажность, плотность и диэлектрические свойства.

Численное решение системы уравнений математической модели выполняли методом конечных элементов в программе COMSOL Multiphysics 6.0. Для дискретизации по времени использовали неявную схему интегрирования. Решение нелинейной системы уравнений осуществляли итерационным методом Ньютона. Для решения соответствующих линейных систем использовали прямой разреженный решатель PARDISO.

Объект исследования – измельченная листо-стебельная масса люцерны (*Medicago sativa* L.) с начальной влажностью 70-80% (на общую массу). Массовая доля листьев – 65%, стеблей – 35%. Материал измельчали до размера частиц 5-15 мм [10]. Диэлектрические свойства сырья при разных значениях влажности и температуры принимали по данным B.L. Shrestha [12, 13].

Валидацию математической модели выполняли на данных, полученных при сушке зеленой массы люцерны на наборе ограниченном экспериментов. Экспериментальная установка для валидации представляла собой вертикальную сушильную камеру высотой 3 м, оснащенную тремя парами модулей и шнеком из полиамида с регулируемой частотой вращения 5-15 об/мин. СВЧ-нагрев обеспечивали тремя магнетронами общей мощностью 30 кВт. В СВЧ-модулях поддерживали абсолютное давление 60-80 кПа.

Для достижения требуемой конечной влажности материала предполагается производить несколько проходов сырья через установку (циклов сушки).

Измерение влажности материала осуществляли по ГОСТ 27548-97, температуру материала контролировали с помощью пирометра. Содержание каротина определяли по ГОСТ 28968-91.

Для оценки адекватности модели использовали критерии согласия Пирсона χ^2 и коэффициент детерминации R^2 . Адекватность модели считали подтвержденной при $R^2 > 0,95$ и уровне значимости $p < 0,05$ для критерия χ^2 .

Результаты и обсуждение

Для адекватного математического описания процесса сушки измельченной зеленой массы люцерны (*Medicago sativa* L.) необходимо учесть ее морфологическую неоднородность. Для этого необходимо перейти к двухкомпонентной математической модели.

Представим элементарный объем обрабатываемого материала dV как смесь двух фракций с

массовыми долями ω_l (листья) и ω_s (стебли), где $\omega_l + \omega_s = 1$. Листья (фракция l) аппроксимируются пластиной толщиной $2\sigma_l$. Стебли (фракция s) аппроксимируются цилиндром радиусом R_s .

Общее влагосодержание системы определяется балансовым уравнением:

$$M_{total} = \omega_l M_l + \omega_s M_s, \quad (1)$$

где M_{total} – общее влагосодержание материала, кг воды/кг сухого вещества;

ω_l и ω_s – массовые доли листьев и стеблей в сухом веществе;

M_l и M_s – влагосодержание листьев и стеблей, кг воды/кг сухого вещества.

Скорость перемещения фракций материала вдоль вертикальной оси сушильной камеры z задается дозирующим шнеком и описывается уравнением:

$$u(z) = \varphi \cdot s \cdot n / 60, \quad (2)$$

где φ – коэффициент заполнения межвиткового пространства;

s – шаг витка шнека, м;

n – частота вращения шнека, об/мин.

Влагосодержание каждой фракции изменяется в зависимости от интенсивности испарения под действием СВЧ-поля и внешнего массообмена [14, 15].

Уравнения массового баланса для каждой фракции имеют вид:

$$\frac{dM_l}{d\tau} = -\frac{I_{v,l}}{\rho_{d,l}}; \quad (3)$$

$$\frac{dM_s}{d\tau} = -\frac{I_{v,s}}{\rho_{d,s}}, \quad (4)$$

где τ – время, с;

$I_{v,l}$, $I_{v,s}$ – объемная интенсивность испарения влаги из листьев и стеблей, кг/(м³·с);

$\rho_{d,l}$, $\rho_{d,s}$ – плотность абсолютно сухого вещества листьев и стеблей, кг/м³.

Изменение общего влагосодержания материала в элементарном объеме:

$$\frac{dM_{total}}{d\tau} = \omega_l \frac{dM_l}{d\tau} + \omega_s \frac{dM_s}{d\tau}. \quad (5)$$

Интенсивность испарения в условиях вакуума обусловлена градиентом общего давления [16]. Пути фильтрации пара существенно отличаются в зависимости от морфологии тканей [17], поэтому уравнение Дарси модифицировано с учетом формы частиц:

$$I_{v,l} = A_l \frac{k_l}{\mu} \rho_p \frac{P_{int,l} - P_{cham}}{\delta_l}; \quad (6)$$

$$I_{v,s} = A_s \frac{k_s}{\mu} \rho_p \frac{P_{int,s} - P_{cham}}{R_s}, \quad (7)$$

где A_l , A_s – удельная площадь поверхности листьев и стеблей, м²/м³;

k_l , k_s – коэффициенты проницаемости листьев и стеблей, м²;

μ – динамическая вязкость водяного пара, Па·с;

ρ_p – плотность водяного пара, кг/м³;

$P_{int,l}$, $P_{int,s}$ – внутреннее избыточное давление пара в тканях листьев и стеблей, Па; P_{cham} – абсолютное давление в камере, Па;

σ_l – характерная толщина слоя (половина толщины листа), м;

R_s – характерная толщина слоя (радиус стебля), м.

Давление пара в критических точках внутри тканей связано с температурой уравнением Клаузиуса-Клапейрона:

$$P_{int,i} = P_{sat}(T_i) \cdot \exp\left(\frac{-\Delta H_{ads}}{R_{univ} T_i}\right), \quad (8)$$

где $P_{int,i}$ – парциальное давление водяного пара в порах и капиллярах материала (в i -том расчетном слое), Па;

$P_{sat}(T_i)$ – давление насыщенного пара при текущей температуре T_i , Па;

H_{ads} – энергия связи влаги с материалом, Дж/моль;

R_{univ} – универсальная газовая постоянная Дж/(моль·К).

Удельная поглощаемая мощность СВЧ-энергии $P_{mw,i}$ распределяется между фракциями пропорционально их диэлектрическим потерям ε'' , которые зависят от текущей влажности:

$$P_{mw,i} = 2\pi f \varepsilon_0 \varepsilon_i''(M_i, T_i) E^2, \quad (9)$$

где i – индекс фракции (l, s);

f – частота электромагнитного поля, Гц;

ε_0 – универсальная диэлектрическая постоянная, Ф/м;

$\varepsilon_i''(M_i, T_i)$ – коэффициент диэлектрических потерь i -той фракции;

E – напряженность электрического поля, В/м.

В данной модели учтено, что $\varepsilon''_s > \varepsilon''_l$ из-за большего объема свободной воды в стебле. Это важно, так как при снижении влажности листьев значение их диэлектрических потерь будет снижаться быстрее, чем у стеблей ε''_s , что приведет к перераспределению поглощения СВЧ-энергии в пользу более влажных стеблей в конце сушки,

что предотвратит перегрев уже обезвоженных листьев.

Поскольку листья и стебли нагреваются и сохнут с разной скоростью, уравнение теплового баланса необходимо записать для каждой фракции отдельно, добавив конвективный теплообмен между фракциями и внутрикамерной средой:

$$\rho_l c_{pl} \frac{dT_l}{d\tau} = P_{mw,l} - r \cdot I_{v,l} - \alpha_l A_l (T_l - T_{air}); \quad (10)$$

$$\rho_s c_{ps} \frac{dT_s}{d\tau} = P_{mw,s} - r \cdot I_{v,s} - \alpha_s A_s (T_s - T_{air}), \quad (11)$$

где ρ_l , ρ_s – плотность влажных листьев и стеблей, кг/м³;

$c_{p,l}$, $c_{p,s}$ – удельная теплоемкость влажных листьев и стеблей, Дж/(кг·К);

T_l , T_s – температура листьев и стеблей, К;

T_{air} – температура паровоздушной среды в камере, К;

r – удельная теплота парообразования, Дж/кг;

α_l , α_s – эффективные коэффициенты теплоотдачи от фракций к паровоздушной среде, Вт/(м²·К);

A_l , A_s – удельная площадь поверхности листьев и стеблей в единице объема слоя, м²/м³.

Использование отдельных уравнений тепло- и массопереноса для листьев и стеблей позволит точно прогнозировать момент, когда листья уже достигли заданной влажности, а стебли еще остаются сырыми.

Учет деградации каротина является ключевым индикатором адекватности модели, так как именно его сохранность определяет кормовую ценность продукта. При сушке процесс разрушения каротина имеет сложный характер, зависящий от температуры, влажности и парциального давления кислорода [17].

Для количественной оценки качества продукта в модель интегрировано дифференциальное уравнение кинетики термической деградации каротина:

$$\frac{dC}{d\tau} = -\eta_p \cdot k_0 \cdot \exp\left(-\frac{E_a}{R_{univ} T_l}\right) \cdot \exp(b \cdot M_l) \cdot C, \quad (12)$$

где C – текущая концентрация каротина в материале, мг/кг;

η_p – поправочный коэффициент, учитывающий снижение окислительной деградации в условиях вакуума ($P_{cham} < P_{atm}$);

E_a – энергия активации процесса термической деградации каротина, Дж/моль;

k_0 – предэкспоненциальный множитель, зависящий от структуры растительной ткани, c^{-1} ;

T_l – температура листьев, К;

b – эмпирический коэффициент, отражающий влияние активности воды на доступность каротина для окисления.

Для люцерны наиболее критичной является температура листьев, так как в них сосредоточено 80-90% каротина. Поскольку температура листа T_l в СВЧ-поле растет быстрее на начальном этапе, уравнение (12) позволяет оптимизировать мощность СВЧ-излучения так, чтобы

температура не превышала критических значений.

Данная модифицированная модель позволяет перейти от эмпирического подбора режимов сушки к точному расчету времени экспозиции в вертикальной камере, обеспечивая равномерную конечную влажность обеих фракций при сохранении каротина.

Была выполнена валидация разработанной модели СВЧ-сушки на экспериментальных данных. Результаты сравнения экспериментальных и расчетных значений влажности зеленой массы после сушки представлены в таблице 1.

Таблица 1

Сравнение экспериментальных и расчетных значений конечной влажности люцерны при различных режимах СВЧ-конвективной сушки

Частота вращения шнека, об/мин.	Абсолютное давление воздуха в СВЧ-модулях, кПа	Экспериментальная общая влажность, %	Расчетная общая влажность, %	Относительная погрешность, %	Расчетная влажность листьев M_l , %	Расчетная влажность стеблей M_s , %	Разность влажности стеблей и листьев $M_s - M_l$, %
7	60	20,5	20,8	+1,5	19,1	24,2	5,1
7	70	21,8	21,5	-1,4	19,7	25,1	5,4
7	80	23,2	23,0	-0,9	20,9	27,1	6,2
10	60	23,8	24,2	+1,7	21,9	28,7	6,8
10	70	25,1	24,8	-1,2	22,3	29,4	7,1
10	80	26,5	26,3	-0,8	23,5	31,4	7,9
12	60	26,9	27,3	+1,5	24,3	32,7	8,4
12	70	28,2	27,8	-1,4	24,7	33,3	8,6
12	80	29,6	29,4	-0,7	26,0	35,4	9,4

Анализ данных таблицы 1 показывает, что относительная погрешность расчета влажности не превышает 1,7%, что подтверждает адекватность раздельного моделирования для фракций люцерны. Коэффициент детерминации R_2 составил 0,987. Анализ данных демонстрирует высокую точность двухкомпонентной модели: абсолютная погрешность определения общей влажности не превышает 0,4%, а влажности фракций – 0,6%. Учет неоднородности материала позволил впервые количественно обосновать оптимальные режимы, при которых листья и стебли достигают целевой влажности почти синхронно (разница по влажности $\leq 7,1\%$ при $n = 7-10$ об/мин.), что невозможно было прогнозировать в однокомпонентной модели.

Обнаружен эффект перераспределения СВЧ-энергии: по мере высыхания листьев мощность поглощается более влажными стеблями, что минимизирует риск перегрева листовой массы.

Сравнение экспериментальных и расчетных значений температуры зеленой массы в разных зонах сушильной камеры представлено в таблице 2.

Данные таблицы 2 демонстрируют точность математической модели в предсказании температуры нагрева материала и эффективность вертикальной установки в обеспечении равномерного распределения температуры по сечению сушильной камеры благодаря перемешиванию сырья шнеком.

Наблюдаемая разница температур между центральной и периферийной зонами камеры (2,5-3,5°C) обусловлена радиальным затуханием СВЧ-поля, но интенсивное перемешивание шнеком существенно снижает ее по сравнению с теоретическим значением без перемешивания (~8-10°C). Максимальная температура материала 89°C достигается на высоте 1,6 м, где происходит интенсивное испарение связанной влаги. Снижение температуры в нижней части камеры

(2,0-2,8 м) объясняется уменьшением влагосодержания материала и снижением интенсивности фазового перехода влаги.

Абсолютное отклонение экспериментальных значений от расчетных не превышает 1,2°C для центральной зоны и 1,8°C для периферийной

зоны, что подтверждает адекватность математической модели.

Использование отдельных уравнений теплового баланса (10), (11) позволило смоделировать разницу температур листьев и стеблей в процессе сушки (табл. 3).

Таблица 2

Распределение температуры зеленой массы люцерны по высоте вертикальной сушильной камеры СВЧ-установки при частоте вращения шнека 10 об/мин. и абсолютном давлении 70 кПа

Высота сушильной камеры, м	Расчетная средняя температура по поперечному сечению, °C	Экспериментальная температура в центральной зоне, °C	Экспериментальная температура в периферийной зоне, °C	Отклонение температуры центральной зоны от расчетной, °C	Отклонение температуры периферийной зоны от расчетной, °C
0,0	35,0	34,8	35,2	-0,2	+0,2
0,4	52,5	51,8	53,5	-0,7	+1,0
0,8	71,0	70,2	72,8	-0,8	+1,8
1,2	84,5	83,5	86,2	-1,0	+1,7
1,6	89,0	87,8	90,5	-1,2	+1,5
2,0	87,5	86,5	89,0	-1,0	+1,5
2,4	84,0	83,2	85,5	-0,8	+1,5
2,8	83,0	82,5	84,2	-0,5	+1,2

Таблица 3

Распределение расчетных температур фракций люцерны по высоте в центральной зоне вертикальной сушильной камеры СВЧ-установки при частоте вращения шнека 10 об/мин. и абсолютном давлении 70 кПа

Высота сушильной камеры, м	Расчетная средняя температура (взвешенная), °C	Расчетная температура листьев T_l , °C	Расчетная температура стеблей T_s , °C	Разница температур фракций $T_s - T_l$, °C
0,0	35,0	34,7	35,8	1,1
0,4	52,5	51,4	54,9	3,5
0,8	71,0	69,7	73,6	3,9
1,2	84,5	82,8	87,9	5,1
1,6	89,0	87,1	92,7	5,6
2,0	87,5	86,0	90,7	4,7
2,4	84,0	82,9	86,4	3,5
2,8	83,0	81,9	85,3	3,4

Анализ данных таблицы 3 демонстрирует преимущество двухкомпонентной модели: расчет показывает, что температура листьев остается на 1,9-5,6°C ниже температуры стеблей благодаря перераспределению СВЧ-энергии на нагрев более влажных стеблей ($\epsilon''_s > \epsilon''_l$). Максимум $T_l = 87,1^\circ\text{C}$ на высоте 1,6 м лежит значительно ниже критической зоны деградации каротина [17], что невозможно было количественно обосновать в однокомпонентной модели. Радиальное перемешивание материала шнеком сни-

жает разницу между центральной и периферийной зонами сушильной камеры до 2,5-3,5°C, обеспечивая равномерность нагрева обеих фракций.

Ключевым преимуществом модели является возможность прогнозирования потерь каротина на основе уравнения кинетики его деградации (12) (табл. 4).

Данные таблицы 4 подтверждают точность модели в прогнозировании сохранности каротина. Учет температуры именно листьев (80-90%

каротина) позволил приблизить расчетные данные к экспериментальным. Максимальная температура листьев не превысила 91,2°C, что гарантирует сохранность каротина на уровне 95,5-96,0%. Абсолютная погрешность расчета потерь каротина не превышает 0,5%, что свидетель-

ствует о корректности интеграции уравнения деградации (12) и учета температуры листовой фракции.

Частота вращения шнека n СВЧ-установки является ключевым параметром управления процессом сушки (табл. 5).

Таблица 4

Сравнение экспериментальных и расчетных потерь каротина при СВЧ-вакуумной сушке зеленой массы люцерны

Режим сушки (частота вращения шнека, об/мин/абсолютное давление, кПа)	Экспериментальные потери каротина, %	Расчетные потери каротина, %	Абсолютная погрешность, %	Максимальная температура листьев, °С
7/60	5,5	5,1	-0,4	86,8
7/80	7,1	6,6	-0,5	91,2
10/60	4,4	4,1	-0,3	87,1
10/80	6,0	5,6	-0,4	89,4
12/60	4,3	4,0	-0,3	88,3
12/80	5,7	5,2	-0,5	90,7

Таблица 5

Влияние частоты вращения шнека СВЧ-установки на время экспозиции, конечную влажность фракций и потери каротина (абсолютное давление 60 кПа)

Частота вращения шнека n , об/мин.	Время экспозиции, т, с	Конечная влажность листьев M_l , %	Конечная влажность стеблей M_s , %	Потери каротина, %	Комментарий
5	520-580	17,5	21,0	6,2-6,5	Пересушка листьев
7	370-420	20,1	23,8	4,8-5,1	Оптимально
10	260-310	21,8	25,9	3,9-4,2	Лучший баланс
12	220-260	24,5	29,5	4,1-4,4	Недосушка стеблей

Оптимальный диапазон значений частоты вращения шнека 7-10 об/мин. обеспечивает лучшее качество сушки, так как при $n < 7$ об/мин. листья пересыхают и перегреваются (рост потерь каротина), а при $n > 12$ об/мин. стебли не успевают достичь нужной влажности. В рекомендуемом диапазоне (7-10 об/мин.) потери каротина не превышают 5% при равномерной конечной влажности продукта. При $n = 7-10$ об/мин. разница $M_l - M_s$ составляет 2,7-4,1%, что улучшает равномерность сушки зеленой массы и качество готового продукта.

Таким образом, новая математическая модель, учитывающая разделение зеленой массы на листья и стебли, не только обеспечит точность прогнозирования, но и позволит обосновать параметры СВЧ-установки, обеспечивающие синхронизацию сушки разнородных фракций и высокую сохранность каротина.

Заключение

Основным результатом стало создание двухкомпонентной физико-математической модели, в которой листья и стебли люцерны рассматривают как фракции с разными влагосодержанием, диэлектрическими свойствами и кинетикой тепло- и массопереноса. Такой подход позволил перейти от усредненного описания процесса к более точному моделированию реальной физики обезвоживания растительного материала.

Разработана и валидирована физико-математическая модель процесса СВЧ-конвективной сушки зеленой растительной массы при пониженном давлении в вертикальной установке, отдельно описывающая кинетику обезвоживания листьев и стеблей люцерны, их диэлектрические свойства и температуру.

Результаты моделирования и валидации подтверждают гипотезу о том, что игнорирование морфологической неоднородности зеленой массы люцерны в предыдущих математических моделях приводило к усреднению значений параметров, не отражающему реальную физику процесса. Переход к отдельному анализу фракций позволил выявить важные закономерности СВЧ-конвективного обезвоживания. Это дало возможность математически описать асинхронность процесса сушки, обусловленную различием в свойствах фракций.

Установлено, что именно морфологическая неоднородность люцерны является причиной асинхронности ее сушки. Листья прогреваются и обезвоживаются быстрее стеблей. В то же время стебли дольше сохраняют влагу и поглощают СВЧ-энергию на более поздних стадиях. Учет этого позволил обосновать перераспределение энергии между фракциями и показать, что по мере высыхания листьев основная доля СВЧ-нагрева смещается к более влажным стеблям. Тем самым снижается риск перегрева листьев, где сосредоточен каротин.

Особую значимость имеет интеграция в модель уравнения кинетики деградации каротина. Этот показатель определяет кормовую ценность продукта, поэтому прогноз потерь каротина является ключевой задачей моделирования. Разработанная модель пригодна не только для описания влагопереноса и тепловых процессов, но и для оценки качества продукта.

Экспериментальная проверка подтвердила целесообразность перехода от горизонтальной схемы к вертикальной компоновке сушильной камеры. Применение радиопрозрачного вертикального шнека улучшило равномерность распределения СВЧ-энергии. Рациональным признан режим работы при частоте вращения шнека 7-10 об/мин. и давлении 60-70 кПа. В этих условиях достигается баланс между интенсивностью удаления влаги, равномерностью нагрева и сохранностью каротина.

Разработанная модель позволяет перейти от эмпирического подбора режимов к инженерному расчету параметров сушильной установки. Полученные данные подтверждают возможность создания вертикальной СВЧ-конвективной установки для сушки зеленой массы люцерны с производительностью 52-55 кг/ч и высокими показателями сохранности каротина.

Библиографический список

References

1. Du J., Sun Z., Chen Z. (2025). Design and experiment of drying equipment for alfalfa bales. *Agriculture*. 15. 2000. DOI: 10.3390/agriculture15192000.
2. Babu A.K., Kumaresan G., Aroul V.A., et al. (2018). Review of leaf drying: Mechanism and influencing parameters, drying methods, nutrient preservation, and mathematical models. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 90. 536-556. DOI: 10.1016/j.rser.2018.04.002.
3. Karayilanli E., Ayhan V. (2016). Investigation of feed value of alfalfa (*Medicago sativa* L.) harvested at different maturity stages. *Legume Research – An International Journal*. 39(2). 237-247. DOI: 10.18805/lr.v0iOF.9292.
4. Zhang W., Cen H., Guo W., et al. (2025). A review of alfalfa drying technology and equipment throughout the whole process. *Applied Sciences*. 15(22). 12268. DOI: 10.3390/app152212268.
5. Kaplan M., Çetin N., Çiftci B., et al. (2025). Comparison of drying methods for biochemical composition, energy aspects, and color properties of alfalfa hay. *Biomass Conversion and Biorefinery*. 15(7). 10331-10346. DOI: 10.1007/s13399-024-05920-8.
6. Farhang A., Hosinpour A., Darvishi H., et al. (2010). Accelerated drying of alfalfa (*Medicago sativa* L.) by microwave dryer. *Global Veterinaria*. 5(3). 158-163.
7. An N., Li D., Wang L.J., et al. (2024). Factors affecting energy efficiency of microwave drying of foods: an updated understanding. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 64(9). 2618-2633. DOI: 10.1080/10408398.2022.2124947.
8. Sile J.A., González-Tello P., Martín M.A., et al. (2015). Kinetics of alfalfa drying: simultaneous modelling of moisture content and temperature. *Biosystems Engineering*. 129, 185-196. DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2014.10.007.
9. Praveena B.A., Lokesh N., Santhosh N., et al. (2022). A comprehensive review of emerging additive manufacturing (3D printing technology): Methods, materials, applications, challenges, trends and future potential. *Materials Today: Proceedings*. 52. 1309-1313. DOI: 10.1016/j.matpr.2021.11.059.
10. Schmidt F., Graf B., Hinrichs J., et al. (2022). Continuous microwave-assisted extrusion for high moisture texturized foods: A feasibility study. *Innovative Food Science & Emerging*

Technologies. 78. 103020. DOI: 10.1016/j.ifset.2022.103020.

11. Darvishi H. (2012). Mathematical modeling, moisture diffusion and energy consumption in thin layer drying of alfalfa. *Middle-East Journal of Scientific Research*. 12(4). 511-516. DOI: 10.5829/idosi.mejsr.2012.12.4.1700.

12. Shrestha B.L., Wood H.C., Sokhansanj S. (2011). Microwave dielectric properties of alfalfa leaves from 0.3 to 18 GHz. *IEEE Transactions on instrumentation and measurement*. 60(8). 2926-2933. DOI: 10.1109/TIM.2011.2121270.

13. Shrestha B.L., Wood H.C., Tabil L., et al. (2017). Microwave permittivity-assisted artificial neural networks for determining moisture content of chopped alfalfa forage. *IEEE Instrumentation & Measurement Magazine*. 20(3). 37-42. DOI: 10.1109/MIM.2017.7951691.

14. Chauhan P.D., Gadani D.H., Rana V.A. (2024). Effect of moisture content variation on die-

lectric properties of various plant leaves at microwave frequencies. *Scientific Reports*. 14(1). 13204. DOI: 10.1038/s41598-024-64266-3.

15. Arabhosseini A., Huismanb W., Müller J. (2011). Modeling of desorption of Alfalfa (*Medicago sativa*) stems and leaves. *Industrial Crops and Products*. 34. 1550-1555. DOI: 10.1016/j.indcrop.2011.05.018.

16. Gao X., Xuan C., Tang Z., et al. (2025). A dynamic drying process: Mathematical modeling and energy consumption optimization of alfalfa bales using hot air drying. *Renewable Energy*. 246. 122961. DOI: 10.1016/j.renene.2025.122961.

17. Cui Z.W., Xu S.Y., Sun D.W. (2004). Effect of microwave-vacuum drying on the carotenoids retention of carrot slices and chlorophyll retention of Chinese chive leaves. *Drying Technology*. 22(3). 563-575. DOI: 10.1081/DRT-120030001.



УДК 664.143:537.3

DOI: 10.53083/1996-4277-2026-260-6-85-91

Г.Б. Узунов, И.Б. Плотников, К.Б. Плотников
G.B. Uzunov, I.B. Plotnikov, K.B. Plotnikov

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПРОЦЕССА КОНЦЕНТРИРОВАНИЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ ОМИЧЕСКОГО НАГРЕВА ПРИ ПЕРЕРАБОТКЕ ПЛОДОВ ОБЛЕПИХИ

IMPROVEMENT OF CONCENTRATION PROCESS USING OHMIC HEATING IN SEA BUCKTHORN PROCESSING

Ключевые слова: омический нагрев, прямой электронагрев, концентрирование, выпаривание, сгущение, плоды облепихи, вакуум-выпарной аппарат, электропроводность, удельная электропроводность, энергоэффективность.

На данный момент существует высокая конкурентность на рынке среди малых и средних фермерских хозяйств. Для повышения конкурентоспособности малых фермерских предприятий следует осуществлять переработку продукции у себя на предприятиях, за счёт этого существенно повышать рентабельность производства. Фермерские хозяйства, которые работают в области выращивания плодов облепихи, могут перерабатывать её в желейный мармелад. Основной единицей производства данного типа продукции является вакуум-выпарной аппарат. Данная единица отличается высокой стоимостью, и в связи с этим затруднён процесс внедрения полного цикла на малых предприятиях. Внедрение новых технологий, таких как омический нагрев с це-

люю концентрирования масс, является актуальным. Однако на данный момент нет результатов исследований по электропроводности желейной массы при её прямом нагреве в аппаратах, работающих под вакуумом. В качестве объекта исследования выступал аппарат омического нагрева, работающий под вакуумом. В результате приведённых исследований установлена зависимость электропроводности перерабатываемого продукта от температуры при различной напряженности электрического поля (10-25 В/см), которая описывается полиномом 4-й степени. При этом было установлено, что в начале кипения наблюдается резкое снижение электропроводности, что связано с образованием «сухих пятен» на электродах вследствие скопления пузырьков пара. Данное явление существенно повышает электрическое сопротивление и снижает электропроводность системы. Полученные значения могут лечь в основу управляющих систем автоматизации, разрабатываемых вакуум-выпарных аппаратов с применением прямого нагрева продукта для малых