ISNN 3030-3907

2026/2
VOLUME 4

DEVELOPMENT OF SCIENCE

ILMIY JURNAL



Development of science

Ilmiy jurnal

2026/2 VOLUME 4

ISSN 3030 -3907

Ilmiy jurnal OAK rayosatining 2024 yil 27 sentabrdagi 361-son qaroriga asosan 02.00.00 kimyo fanlari hamda 2025 yil 12 fevral 367- son qaroriga asosan 05.00.00 texnika fanlari bo‘yicha falsafa doktori (PhD) va fan doktori (DSc) ilmiy darajasiga talabgorlarning dissertatsiya ishlari yuzasidan dissertatsiyalari asosiy ilmiy natijalarini chop etish tavsiya etilgan milliy ilmiy nashrlar ro‘yxatiga kiritilgan.

BOSH MUHARRIR:
Temirov Alisher Hoshim o‘g‘li – texnika fanlari falsafa doktori (PhD),Dotsent.
TAHRIRIYAT KENGASH RAISI:
Fozilov Sadriddin Fayzullayevich – texnika fanlari doktori, professor
TAHRIRIYAT KENGASH A’ZOLARI

TEXNIKA FANLARI/ TECHNICAL SCIENCES/ ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

Bozorov G‘ayrat Rashidovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor
Abdurahmonov Olim Rustamovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor
Adizov Bobur Zamirovich
O‘zbekiston Respublikasi Fanlar akademiyasi Umumiy va noorganik kimyo instituti, professor
Hayitov Ruslan Rustamjonovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor
Jumayev Qayum Karimovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
Berdiyev Dorob Murodovich
Islom Karimov nomidagi Toshkent Davlat Texnika Universiteti, professor
Maxmudov Rafiq Amonovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
Tilloyev Lochin Ismatilloyevich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Raxmonov Qahramon Sanakulovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Barakayev Nusratullo Rajabovich
Islom Karimov nomidagi Toshkent Davlat Texnika Universiteti, professor.
Jo‘rayev Xayrullo Fayziyevich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
Panoyev Erali Rajabboyevich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Ataullayev Sherzod Nabiullyevich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Murodov Malik Negmurodovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Axmedova Ozoda Bahronovna
Islom Karimov nomidagi Toshkent Davlat Texnika Universiteti.
Safarov Bahri Jumayevich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Xaydarov Axtam Amonovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Safarov Jasur Alijon o‘g‘li
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.

KIMYO FANLARI/ CHEMICAL SCIENCES/ ХИМИЧЕСКИЕ НАУКИ

Axmedov Voxid Nizomovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor
Umarov Baqo Bafoyevich
Buxoro Davlat Universiteti, professor
Kodirov Abduaxad Abduraximovich
Qarshi davlat Universiteti, professor
Qurbonov Mingniqul Jumagulovich
Qarshi davlat Universiteti, dotsent
Turemuratov Sharibay Naurizbaevich
O‘zbekiston Respublikasi Fanlar akademiyasi Qoraqalpog‘iston bo‘limi Bosh ilmiy kotibi, professor
Tursunov Kaxor Shonazarovich
Qarshi davlat Universiteti, professor
Do‘stov Hamro
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor
Panoyev Nodir Shavkatovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Olimov Bobur Bahodir o‘g‘li
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Kasimov Sherzod Abduazimovich
Termiz Davlat Universiteti, professor.
Aliqulov Rustam Valiyevich
Termiz Davlat Universiteti, professor
Tropov Xamza Tursunovich
Samarqand Davlat Universiteti, professor

IQTISODIYOT FANLARI/ ECONOMICS/ ЭКОНОМИЧЕСКИЕ НАУКИ

Nizamov Aslitdin Badreddinovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
Boboyev Akmal Choriyevich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
Ergashxojayeva Shaxnoza Djasurovna
Toshkent davlat iqtisodiyot universiteti, professor
Saidaxmedova Nodira Ilxomovna
Toshkent davlat iqtisodiyot universiteti, professor
Muxsinov Bekzod Toxirovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Shakarov Qulmat Ashirovich
Renessans ta'lim universiteti,dotsent.
Jumaeva Zulfiya Qayumovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Norova Salomat Yusupovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Avezova Shaxnoza Maxmudjonovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Jalilov Jamshid G‘anijonovich
Toshkent davlat iqtisodiyot universiteti, dotsent
Xasanova Gulruh Djumanazarovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.

PEDAGOGIKA FANLARI/ PEDAGOGICAL SCIENCES / ПЕДАГОГИЧЕСКИЕ НАУКИ

Siddiqova Sadoqat G‘afforovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Zoyirov Erkin Xalilovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, DSc, professor
Gaffarov Feruz Hasanovich
Puchon Universiteti, *professor*
Ruziyev Davron Yuldashevich
Buxoro Davlat Universiteti, professor
Muradova Firuza Rashidovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
Yunusova Gulandon Samiyevna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
To‘xtayeva Zebo Sharifovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
Navro‘zova Gulchixra Nigmatovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Uzoqova Laylo Polvonovna
Buxoro muhandislik – texnologiya instituti, dotsent.
To‘raqulova Marjona Qiyom qizi
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Muradova Zarina Rashidovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Murodov Sanjar Aslonovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Shodiyev Jahongir Jo‘raqulovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent
Gaffarov Laziz Hasanovich
Buxoro muhandislik – texnologiya instituti, dotsent.

Tahririyat a’zolarning to‘liq ro‘yxati jurnalning www.devos.uz saytida keltirilgan.

Tahririyat hay’ati a’zolarining tarkibini o‘zgartirish hamda qo‘shimcha kiritish yoki tahririyat a’zoligidan chiqarish bosh muharrir tomonidan amalga oshiriladi.

ISSN 3030-3907

Development of science ilmiy jurnali 2024 yil 15 aprel kuni №256445 sonli guvohnoma bilan Davlat ro‘yxatidan o‘tgan.

To‘plam elektron ko‘rinishda (pdf formatida) mualliflarga taqdim etiladi. To‘plamga kiritiladigan maqolalarning mazmuni, ulardagi statistik ma’lumotlar va me’yoriy hujjatlarning to‘g‘riligiga hamda har qanday fikr - mulohazalarga mualliflarning o‘zlari mas’ul hisoblanadilar. Talablarga javob bermaydigan maqolalar to‘plamga kiritilmaydi. Tashkiliy qo‘mita maqola matnini qisqartirish, qisman tuzatish kiritish, seksiyalarga joylashtirish huquqiga ega.

ISSN 3030-3907

НОВЫЙ ПОДХОД К МАТЕМАТИЧЕСКОМУ МОДЕЛИРОВАНИЮ ПРОЦЕССА КОМБИНИРОВАННОЙ (УЗ+ИК) ПЕРЕРАБОТКИ СУШКИ КОКОНОВ ТУТОВОГО ШЕЛКОПРЯДА

Fu Yaqin
Zhejiang Sci-Tech University
Д.И.Самандаров
Ташкентский государственный технический университет
Д.Д.Душанова
Ташкентский государственный технический университет
Ж.Э.Сафаров
Ташкентский государственный технический университет
Ш.А.Султанова
Ташкентский государственный технический университет
А.Б.Усенов
Ташкентский государственный технический университет

Аннотация. В данной работе разработана совмещённая математическая модель инфракрасно-ультразвуковой сушки коконов тутового шелкопряда, интегрирующая нестационарную теплопроводность, ультразвуково-интенсифицированную диффузию влаги (увеличение эффективного коэффициента до 65%) и кинетику термического умерщвления по закону Аррениуса. Численное моделирование методом конечных элементов демонстрирует сокращение времени умерщвления на 35–40% и снижение энергозатрат на 15–20% при повышенной тепловой однородности процесса.

Ключевые слова: инфракрасно-ультразвуковая сушка, умерщвление куколок, коконы, тепло- и массоперенос, математическое моделирование, метод конечных элементов, кинетика Аррениуса, энергоэффективность процесса.

Annotatsiya. Ushbu ishda ipak qurti g‘umbaklarini infraqizil-ultratovush yordamida quritishning nostatsionar issiqlik o‘tkazuvchanlik, ultratovush yordamida jadallashtirilgan namlik diffuziyasi (samarali koeffisiyentning 65% gacha oshishi) hamda Arrenius qonuni bo‘yicha termik jonsizlantirish kinetikasini integratsiyalovchi matematik modeli ishlab chiqilgan. Chekli elementlar usuli bilan raqamli modellashtirish jarayonida issiqlikning bir jinsliligi oshganda jonsizlantirish vaqtining 35-40% ga va energiya sarfining 15-20% ga kamayishini ko‘rsatadi.

Kalit so‘zlar: infraqizil-ultratovush quritish, g‘umbaklarni o‘ldirish, pillalar, issiqlik va massa almashinuvi, matematik modellashtirish, chekli elementlar usuli, Arrenius kinetikasi, jarayonning energiya samaradorligi.

ISSN 3030-3907

Abstract. This paper presents a combined mathematical model of infrared-ultrasonic drying of silkworm cocoons, integrating non-stationary heat conduction, ultrasound-intensified moisture diffusion (increasing the effective coefficient to 65%), and the kinetics of thermal killing according to the Arrhenius law. Numerical modelling using the finite element method demonstrates a 35–40% reduction in killing time and a 15–20% reduction in energy consumption with increased thermal uniformity of the process.

Keywords: infrared-ultrasonic drying, pupal killing, cocoons, heat and mass transfer, mathematical modelling, finite element method, Arrhenius kinetics, process energy efficiency.

ВВЕДЕНИЕ

Умерщвление куколок тутового шелкопряда внутри коконов является ключевым технологическим этапом производства натурального шелка. Сохранение жизнеспособности куколки приводит к разрушению непрерывности коконной нити в процессе метаморфоза, что сопровождается ее разрывами, снижением механической прочности и ухудшением товарных характеристик шелка-сырца. В связи с этим контролируемое термическое умерщвление перед операцией размотки коконов является обязательным промышленным требованием, определяющим стабильность качества продукции [1].

Традиционные методы умерщвления основаны на конвективной сушке горячим воздухом или обработке насыщенным водяным паром. Однако данные технологии характеризуются рядом существенных недостатков, включая неравномерность температурного распределения в объеме кокона, повышенное удельное энергопотребление, значительную продолжительность процесса и риск термического повреждения белковой структуры шелка. Избыточный нагрев может вызывать частичную денатурацию фиброина, изменение его надмолекулярной организации и, как следствие, снижение разрывной нагрузки, эластичности и ухудшение цветовых показателей волокна [2].

В последние годы особое внимание уделяется комбинированным методам физического воздействия, направленным на интенсификацию процессов тепло- и массопереноса. Совместное применение инфракрасного (ИК) излучения и ультразвука (УЗ) рассматривается как перспективное направление повышения эффективности умерщвления и сушки. Инфракрасное излучение обеспечивает направленный объемный нагрев с регулируемой глубиной проникновения энергии, способствуя формированию более равномерного температурного поля внутри кокона.

ISSN 3030-3907

Ультразвуковое воздействие инициирует микромеханические колебания и акустические эффекты, усиливающие внутреннюю диффузию влаги, уменьшающие диффузионные сопротивления и способствующие разрушению клеточных структур куколки (рис. 1) [3].

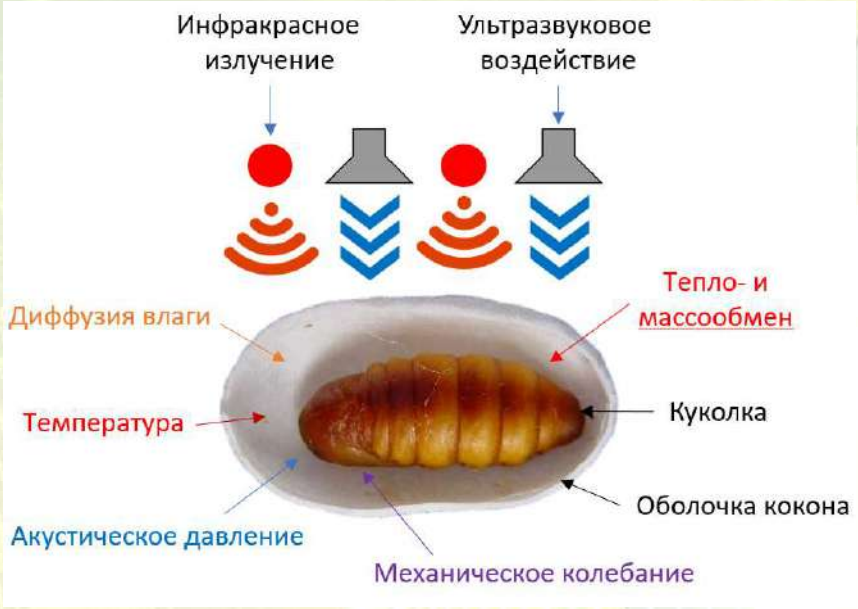


Рис. 1. Процесс комбинированного воздействия инфракрасного излучения и ультразвука на куколки шелкопряда

Несмотря на наличие экспериментальных данных, подтверждающих ускорение кинетики сушки и повышение эффективности процесса при комбинированной обработке ИК+УЗ, до настоящего времени отсутствует комплексная математическая модель, адекватно описывающая сопряженные процессы теплопереноса, влагопереноса и акустического воздействия в системе «кокон – куколка». Недостаточная разработанность теоретической базы ограничивает возможности оптимизации технологических параметров и затрудняет промышленное масштабирование данной технологии [4].

Целью настоящего исследования является разработка усовершенствованной математической модели, описывающей комбинированный процесс инфракрасно-ультразвуковой сушки, предназначенный для умерщвления куколок тутового шелкопряда внутри коконов. Предлагаемая модель ориентирована на комплексное описание сопряжённых процессов теплопереноса, влагопереноса и термической деструкции биологических тканей в пористой структуре кокона.

Разрабатываемая модель учитывает следующие ключевые аспекты:

• нестационарную теплопроводность в пористой сферической среде с внутренними источниками тепла, обусловленными поглощением инфракрасного излучения;

ISSN 3030-3907

• диффузию влаги с использованием эффективного коэффициента диффузии, модифицированного с учётом ультразвукового воздействия (акустическое разрыхление структуры и снижение диффузионных сопротивлений);

• кинетику термического умерщвления биологических тканей, описываемую температурно-зависимыми параметрами (в том числе по типу аррениусовской зависимости);

• граничные условия тепло- и массопереноса на поверхности кокона с учётом конвективного теплообмена и удаления влаги в окружающую среду.

Предлагаемая модель формирует теоретическую основу для параметрической оптимизации технологического процесса, включая выбор рациональной мощности ИК-излучения, частоты и амплитуды ультразвукового воздействия, а также продолжительности обработки. Это создаёт предпосылки для повышения энергетической эффективности процесса, обеспечения гарантированного умерщвления куколок и сохранения структурно-механических свойств шелкового волокна при промышленном масштабировании технологии.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Физические допущения. Кокон тутового шелкопряда рассматривается как однородное пористое сферическое тело радиуса R, включающее шелковую оболочку и внутреннюю куколку. В модели приняты следующие допущения:

1. Среда считается изотропной и теплофизически однородной.
2. Теплоперенос внутри кокона осуществляется преимущественно за счёт теплопроводности.
3. Массоперенос влаги описывается законом диффузии Фика.
4. Инфракрасное излучение моделируется как объёмный источник тепловыделения.
5. Ультразвуковое воздействие учитывается через изменение эффективного коэффициента диффузии влаги.

Теплофизические параметры среды зависят от температуры, однако в первом приближении принимаются постоянными для обеспечения численной устойчивости расчётов [5].

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r^2}\frac{\partial}{\partial r}\left(kr^2\frac{\partial T}{\partial r}\right) + Q_{\text{ИК}} \quad (1)$$

где $T(r,t)$ – температура (К); ρ – плотность (кг/м³); c – удельная теплоемкость (Дж/кг·К); k – теплопроводность (Вт/м·К); Q_{IR} – объемное тепловыделение за счет поглощения ИК-излучения.

ISSN 3030-3907

Поглощение инфракрасного излучения в объёме кокона моделируется как внутренний источник тепла, распределённый по глубине проникновения излучения. Интенсивность излучения убывает по экспоненциальному закону в соответствии с законом Бугера–Ламберта [6]:

$$Q_{\text{ИК}}(r) = \beta I_0 e^{-\beta r} \quad (2)$$

где β – коэффициент поглощения материала; I_0 – плотность падающего ИК-излучения на поверхности кокона.

Перенос влаги внутри кокона описывается нестационарным уравнением диффузии в сферической системе координат (3) [7]:

$$\frac{\partial W}{\partial t} = \frac{1}{r^2}\frac{\partial}{\partial r}\left(D_{\text{эфф.}} r^2 \frac{\partial W}{\partial r}\right) \quad (3)$$

где $W(r,t)$ – содержание влаги; $D_{\text{эфф.}}$ – эффективный коэффициент диффузии.

Модель усиления ультразвуком. Под воздействием ультразвука в пористой структуре кокона возникают микромеханические колебания, приводящие к снижению внутреннего диффузионного сопротивления и повышению подвижности влаги. В результате происходит интенсификация массопереноса за счёт акустического разрыхления структуры и локальных градиентов давления.

Эффективный коэффициент диффузии влаги представляется в виде функциональной зависимости от параметров ультразвукового воздействия следующим образом [8]:

$$D_{\text{эфф.}} = D_0(1 + k_{\text{уз}} A^2 f) \quad (4)$$

где D_0 – базовый коэффициент диффузии; A – акустическая амплитуда; f – частота ультразвука; $k_{\text{уз}}$ – эмпирический коэффициент усиления.

Эта формула описывает физическое усиление переноса влаги под воздействием волн акустического давления.

Кинетика термического умерщвления. Термическое умерщвление куколок подчиняется кинетике первого порядка, описываемой уравнением Аррениуса [9]:

$$\frac{dN}{dt} = -k(T)N \quad (5)$$

$$k(T) = k_0 exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \quad (6)$$

где N – концентрация жизнеспособных клеток; E_a – энергия активации; R – универсальная газовая постоянная.

Полная инактивация происходит, когда $\frac{N}{N_0} \leq 10^{-6}$ [10]

Граничные и начальные условия.

Начальные условия:

ISSN 3030-3907

$$T(r,0) = T_0 \quad (7)$$

$$W(r,0) = W_0 \quad (8)$$

Граничные условия на поверхности $r = R$:

$$-k\frac{\partial T}{\partial r} = h(T_s - T_\infty) \quad (9)$$

$$D_{\text{эфф.}}\frac{\partial W}{\partial r} = \beta_m(W_s - W_\infty) \quad (10)$$

Численное решение. Связанная система дифференциальных уравнений в частных производных решалась методом конечных элементов (МКЭ) с использованием неявной схемы Эйлера для аппроксимации по времени. Проведённый анализ независимости результатов от параметров расчётной сетки подтвердил устойчивость и сходимость численного решения. Параметрические исследования выполнялись в диапазонах: мощность ИК-излучения - 2–4 кВт, частота ультразвука - 20–40 кГц, продолжительность воздействия - 300–900 с.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Распределение температуры. Результаты моделирования показывают, что инфракрасное излучение обеспечивает интенсивный нагрев поверхности кокона с последующим постепенным распространением тепла к центральной зоне. При отсутствии ультразвукового воздействия сохраняются выраженные температурные градиенты, что приводит к неравномерности прогрева.

При комбинированном воздействии ИК+УЗ температура в центральной области повышается на 18–25 % быстрее. Одновременно наблюдается снижение температурных перепадов по радиусу, что свидетельствует об улучшении тепловой однородности вследствие интенсификации внутреннего перераспределения энергии [11].

Кинетика удаления влаги. Снижение влагосодержания во времени носит экспоненциальный характер. Под воздействием ультразвука эффективный коэффициент диффузии $D_{\text{эфф.}}$ возрастает на 40–65%, что приводит к сокращению продолжительности сушки на 30–45%. Интенсификация массопереноса снижает вероятность локального перегрева поверхности и обеспечивает более равномерное обезвоживание внутреннего объёма кокона.

Эффективность умерщвления. Анализ на основе кинетической модели Аррениуса показывает, что полное термическое умерщвление куколок достигается при превышении температурой центральной зоны порогового значения 65–70 °C в течение достаточного времени экспозиции [12].

При использовании только инфракрасного излучения необходимая степень умерщвления достигается за 750–900 с. В условиях

ISSN 3030-3907

комбинированного воздействия ИК+УЗ процесс завершается за 450–600 с, что соответствует сокращению продолжительности обработки на 35–40%.

Энергоэффективность. Общее энергопотребление процесса определяется суммарной мощностью источников ИК-излучения и ультразвука с учётом времени воздействия. Сокращение продолжительности обработки при комбинированной технологии обеспечивает снижение удельных энергетических затрат при сохранении требуемой степени умерщвления и качества шелкового волокна. Таким образом общее потребление энергии [13]:

$$E = P_{\text{ИК}}t + P_{\text{УЗ}}t \qquad (11)$$

Несмотря на дополнительную ультразвуковую мощность, сокращение времени воздействия дает чистую экономию энергии на 15–20 %.

Логика валидации модели. Поведение разработанной модели согласуется с известными экспериментальными данными: акустическая интенсификация приводит к увеличению коэффициента диффузии влаги, объёмный характер инфракрасного нагрева способствует снижению температурных градиентов, а комбинированная обработка обеспечивает ускорение процесса при одновременном уменьшении риска термической деградации шелкового волокна.

Безразмерный анализ. Для обобщения результатов и оценки относительного влияния тепловых и диффузионных процессов проведён безразмерный анализ модели. Введены характерные критерии подобия, включая число Фурье (Fo), число Био (Bi)и модифицированное диффузионное число Фурье для влагопереноса. Безразмерная форма уравнений позволяет определить соотношение между внутренними и поверхностными сопротивлениями тепло- и массопереносу, а также количественно оценить вклад ультразвуковой интенсификации в общий механизм сушки и умерщвления [14].

Число Фурье:

$$F_o = \frac{\alpha t}{R^2} \qquad (12)$$

Число Биота:

$$Bi = \frac{hR}{k} \qquad (13)$$

Предлагаемое значение ультразвукового числа:

$$Lu = k_{\text{уз}}A^2 f \qquad (14)$$

В данном исследовании представлен критерий Lu как новый критерий усиления звука [15].

ВЫВОДЫ

ISSN 3030-3907

Разработана усовершенствованная совмещённая математическая модель инфракрасно-ультразвуковой сушки коконов тутового шелкопряда, интегрирующая нестационарную теплопроводность, ультразвуково-интенсифицированную диффузию влаги и кинетику термического умерщвления. Результаты моделирования показали, что ультразвуковое воздействие повышает эффективный коэффициент диффузии до 65 %, а комбинированная технология ИК+УЗ сокращает продолжительность умерщвления на 35–40 % при снижении энергозатрат на 15–20 % и одновременном улучшении тепловой однородности. Предложенная модель обеспечивает научно обоснованную основу для оптимизации технологических параметров и проектирования промышленных комбинированных установок, а дальнейшие исследования целесообразно направить на трёхмерное мультифизическое моделирование и экспериментальную верификацию в производственных условиях.

ЛИТЕРАТУРА

1. Самандаров Д.И., Усенов А.Б., Султанова Ш.А., Сафаров Ж.Э. История и современное состояние переработки коконов в Азии // Development of science. 2025. Т. 2, № 9. С. 429–435.
2. Holdsworth S.D., Simpson R. Food Engineering Series: Thermal Processing of Packaged Foods. New York: Springer, 2007. p. 312.
3. Samandarov D.I. Energy-Efficient Technologies for Drying Mulberry Silkworm Cocoons using Infrared Radiation // Technical science and innovation. 2024. № 4. pp. 13-19.
4. Rahman M.S. Food Properties Handbook. 2nd ed. Boca Raton: CRC Press, 2009. p. 875.
5. Лыков А.В. Теория теплопроводности. – М.: Высшая школа, 1967. 599 с.
6. Crank J. The Mathematics of Diffusion. 2nd ed. Oxford: Clarendon Press, 1975. p. 414.
7. Incropera F.P., DeWitt D. P. Fundamentals of Heat and Mass Transfer. 6th ed. New York: Wiley, 2007. p. 997.
8. Самандаров Д.И., Султанова Ш.А., Сафаров Ж.Э. Исследования комбинированной сушки коконов тутового шелкопряда // Universum: технические науки. Москва, 2024. № 1(118). С. 10–14.
10. Arrhenius S. Über die Reaktionsgeschwindigkeit bei der Inversion von Rohrzucker durch Säuren. Zeitschrift für Physikalische Chemie. 1889. Bd. 4. pp. 226–248.
11. Самандаров Д.И., Усенов А.Б., Султанова Ш.А., Сафаров Ж.Э., Душанова Д.Д. Экспериментальное исследование сушки коконов тутового шелкопряда

ISSN 3030-3907

с использованием инфракрасного и ультразвукового воздействия // Universum: технические науки : электрон. научн. журнал. 2026. № 1(142).
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. pp. 1239–1255.
13. Datta A. K. Porous media approaches to studying simultaneous heat and mass transfer in food processes. Journal of Food Engineering. 2007. Vol. 80. pp. 80–95.
14. Cárcel J.A., Benedito J., Rosselló C., Mulet A. Influence of ultrasound intensity on mass transfer in drying. Journal of Food Engineering. 2007. Vol. 78. pp. 472–479.
15. Tao Y., Sun D.W. Enhancement of food processes by ultrasound: A review // Ultrasonics Sonochemistry. 2015. Vol. 27. pp. 577–588.
16. Awad T.S., Moharram H.A., Shaltout O.E., Asker D., Youssef M.M. Applications of ultrasound in food processing. Food Research International. 2012. Vol. 48. pp. 410–427.

ISSN 3030-3907