Solar Dryer with Integrated Energy Unit Korobka S.¹, Syrotyuk S.¹, Zhuravel D.², Boltianskyi B.², Boltianska L.²

¹Lviv National Agrarian University
Dublyany, Ukraine
²Dmytro Motornyi Tavria State Agrotechnological University
Melitopol, Ukraine

Abstract. The work is devoted to the issue of the rational use of the solar energy in the technological process of fruit drying based on the use of solar drying devices, which are applied in various sections of the agro-industrial centers of Ukraine. The aim of this research was intensification of the fruits drying process using the solar energy by combining an air collector and drying chamber into a single power unit. To achieve the aim the heat exchange diagnostic techniques with alternative potentials of diffusion and moisture transfer was developed. This technique differs from those existing for the heat exchange research in that it allows the intensity of the moisture evaporation from a unit of the material surface to be calculated, based on the synthesis of the moisture content and the irreversible major laws of processes of the heat exchange characteristics of the fruits drying using the solar dryer. The above model makes it possible to diagnose the heat exchange processes and analyze the mathematical model of the heat exchange processes. It also allows modeling the changeable diffusion and moisture transfer potentials based on the dependences obtained and for the purpose of a further application in the methods and devices development to control the strain-deformed state of the fruits during the drying process. The method is offered for the calculation of diffusion and moisture transfer during drying fruits in the solar dryer.

Keywords: technological process, convective drying, fruit, thermal energy, solar energy, heliodilator, diffusion, moisture transfer.

DOI: https://doi.org/10.52254/1857-0070.2021.2-50.06

UDC: 631.364:621.311.243

Uscător solar cu bloc de alimentare cu energie integrat Korobka S.V.¹, Sirotiuk S.V.¹, Juravel D.P.², Boltianskii B.V.², Boltianskaia L.A.²

 ¹Universitatea Naţională Agrară din Liov Dublyany, Ucraina
 ²Universitatea Agrotehnologică de Stat din Tavria Dmytro Motornyi Melitopol, Ucraina

Rezumat. Lucrarea este legată de problema utilizării raționale a energiei solare în procesul tehnologic de uscare a fructelor în baza instalatiilor de uscare solară care sunt utilizate în diferite sectoare ale complexului agroindustrial din Ucraina. Scopul acestui studiu constă în asigurarea intensificării procesului de uscare a fructelor folosind energia solară prin comasarea unui colector de aer și a unei camere de uscare într-un singur bloc de producere a energiei într-un uscător solar. Pentru a atinge acest obiectiv, a fost dezvoltată o metodologie pentru diagnosticarea proceselor de schimb de căldură cu potențiale variabile de difuzie și transfer de umiditate. Această tehnică diferă de metodele existente de studiere a proceselor de schimb de căldură prin aceea, că permite calcularea ratei de evaporare a umezelii dintr-o unitate de suprafață a materialului. Se propune o metodă pentru calcularea difuziei și a transferului de umiditate în timpul uscării fructelor într-un uscător solar. Cele mai semnificative rezultate ale lucrării sunt: metodele inginerești propuse pentru calcularea caracteristicilor principali de schimb de căldură ale proceselor de uscare a fructelor într-un uscător solar pentru a rezolva problema utilizării unor surse ecologice de energie termică în scopul îmbunătățirii procesului. Această schemă face posibilă fundamentarea metodelor de calculare a parametrilor cinetici și dinamici ai procesului, temperatura suprafeței materialului și dinamica procesului de difuzie în timpul procesului de uscare. Semnificația rezultatelor obținute constă în fundamentarea științifică și dezvoltarea recomandărilor pentru prezicerea proceselor de transfer de căldură și masă, atunci când se proiectează noi tipuri de uscătorii helio pentru uscarea fructelor.

Cuvinte-cheie: proces tehnologic, uscare convectivă, fructe, energie termică, energie solară, uscător solar, difuzie, transfer de umiditate.

© Коробка С.В., Сиротюк С.В., Журавель Д.П., Болтянский Б.В., Болтянская Л.А., 2021

Гелиосушилка с интегрированным энергетическим блоком Коробка С.В. 1 , Сиротюк С.В. 1 , Журавель Д.П. 2 , Болтянский Б.В. 2 , Болтянская Л.А. 2

¹Львовский национальный аграрный университет

Дубляны, Украина

²Таврический государственный агротехнологический университет имени Дмитрия Моторного Мелитополь, Украина

Аннотация. Работа посвящена вопросу рационального использования солнечной энергии в технологическом процессе сушки фруктов на основе солнечных сушильных установок, которые применяются в различных отраслях агропромышленного комплекса Украины. Целью данного исследования было интенсификация процесса сушки фруктов с использованием солнечной энергии путем объединения в единый энергетический блок в гелиосушилке воздушного коллектора и сушильной камеры. Для достижения данной цели были разработаны методика диагностики теплообменных процессов с переменными потенциалами диффузии и влагопереноса. Данная методика отличается от существующих методов исследования теплообменных процессов тем, что позволяет рассчитать интенсивность испарения влаги с единицы поверхности материала на основе синтеза влагосодержания, влажности и основных законов необратимых процессов теплообменных характеристик процессов сушки фруктов в гелиосушилке. Данная модель позволяет провести диагностику теплообменных процессов и выполнить анализ математической модели теплообменных процессов, а также реализовать моделирование сменных потенциалов диффузии и влагопереноса на основе полученных зависимостей относительно с целью дальнейшего использования при разработке методов и устройств для контроля напряженно-деформированого состояния фруктов во время сушки. Предложен метод расчета диффузии и влагопереноса во время сушки фруктов в гелиосушилке. Наиболее существенным результатом на основе выполненных исследований являются: предложенные инженерные методы расчета основных теплообменных характеристик процессов сушки фруктов в гелиосушилке с целью решения проблемы использования экологически чистых источников тепловой энергии. Такая схема позволяет обосновать методики расчета кинетических и динамических параметров процесса, температуры поверхности материала и поведение диффузии в процессе сушки. Значимость полученных результатов заключается в научном обосновании и выработке рекомендаций по прогнозированию тепломассообменных процессов, при проектировании новых типов гелиосушилок для сушки

Ключевые слова: технологический процесс, конвективная сушка, фрукты, тепловая энергия, солнечная энергия, гелиосушилка, диффузия, влагоперенос.

ВВЕДЕНИЕ

Для процесса сушки фруктов целесообразным является применение сушильных установок, использующих солнечную энергию [1-9]. В настоящее время сушки такого типа массово еще не используются в условиях личных крестьянских и фермерских хозяйств ЛКФХ. Это обуславливает актуальность выбора оптимальной конструкции сушилки, эффективное использование которой в условиях ЛКФХ возможно только на основании обоснования ее рациональных конструктивно-технологических параметров [10-13].

В условиях сельскохозяйственного производства Украины существует много вариантов и разновидностей конструктивных исполнений гелиотермических или солнечных сушильных агрегатов. Главными элементами энергетического блока этих агрегатов являются воздушный коллектор и сушильная камера. В частности, в работе [14] была разработана новая конструкция гелиосушилки тепличного типа для сушки фруктов. Кроме

этого, в работе исследован процесс конвективной сушки фруктов. На основании теоретических и экспериментальных исследований определены коэффициенты тепло- и массопередачи в зависимости от скорости движения теплоносителя, коэффициент внутренней диффузии влаги фруктов, а также установлена его зависимость от температуры. Однако не описано, как происходит кинетика и энергетика воздухообмена во время влаговыделения и удаления влажного теплоносителя с гелиосушилки.

Авторы в работах [15-18] разработали конструкции гелиосушилок туннельного и камерного типа. Обосновано численный метод решения математической модели расчета напряжений и распределения влаги в фруктах во время сушки и сформулированы задачи оптимизации этой модели. Предложен многоступенчатый режим конвективной сушки фруктов за счет решения задачи оптимизации. Однако разработать общий технологический режим сушки фруктов в гелиосушил-

ке невозможно, а только стабилизировать теплотехнические параметры теплоносителя в сушильной камере в ходе процесса сушки. Потому что во время сушки фруктов при влажности материала W% и массы m, кг теплотехнические параметры теплоносителя существенно зависят от физических параметров окружающей среды. В частности потока солнечной энергии, температуры и влажности воздуха, атмосферного давления, скорости и силы ветра. А их совпадение и повторяемость в течение двух последовательных периодов сушки продолжительностью 24 часа маловероятна.

В работе [19] проанализировали особенности процесса сушки фруктов, а именно яблок. Предложили конструкцию камерной конвективной гелиосушилки. Была обоснована целесообразность использования имитационного моделирования процесса сушки фруктов и его программная реализация. Однако в работе отсутствует оценка рабочих характеристик, а именно энергетических характеристик сушки при стандартных режимах солнечного освещения и типичных метеорологических условий. Обоснование лучших режимов работы гелиотермических сушильных агрегатов с обеспечением максимальной эффективности и интенсивности процесса сушки с минимальными энергетическими затратами является важной задачей. Поскольку сложность данного процесса обусловлена ходом взаимосвязанных параметров, а именно энергетических, кинетических, динамических, а также теплообменных процессов и высокой изменчивостью физических свойств фруктов.

Одновременно, остается мало исследуемым вопрос эффективности процесса сушки фруктов за счет использования солнечной энергии и сушильных аппаратов принцип работы, которых основан на ее использовании. В то же время большинство разработанных конструкций существующих гелиосушилок выполнено для стран с жарким климатом, а их принцип работы и процесс сушки исследованы в лабораторных условиях или с помощью имитационных моделей и компьютерного моделирования. Поэтому известные конструкции гелиосушилок потребуют модификации и усовершенствования с целью повышения эффективности работы в условиях умеренного континентального климата восточной Европы для уменьшения капитальных и эксплуатационных затрат.

Приведенные аргументы позволили определить основные направления повышения технологической и энергетической эффективности процесса сушки с использованием солнечной энергии. Отсутствие на рынке сушильных аппаратов такого типа формирует задачу разработки конструкции гелиосушилки с рациональными технологическими параметрами, которую можно было бы использовать для малых крестьянских хозяйств.

І. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Целью данного исследования является интенсификация процесса сушки фруктов с использованием солнечной энергии путем объединения в единый энергетический блок в гелиосушилке воздушного коллектора и сушильной камеры. Согласно поставленной цели необходимо было выполнить следующую задачу: исследовать технологический процесс сушки фруктов в гелиосушилке в зависимости от толщины нарезки и физических параметров окружающей среды.

ІІ. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для сушки растительного сырья, в частности фруктов, активно используют солнечную энергию. В частности, для зоны восточной Европы с умеренным континентальным климатом была разработана гелиосушилка (рис. 1 и 2), которая является активной системой использования солнечной энергии.

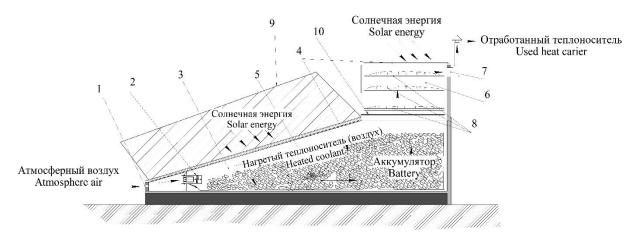
Степень насыщенности зависит от начальной влажности фруктов: если она выше 92,5% - 0,98÷1, если ниже 85% - 0,9÷0,92. При этом не учитывается максимально допустимая скорость прогрева и возможности объекта управления, что приводит к тому, что прогревание в одном случае необоснованно затянуто, а в другом - сокращено. Фрукты следует сушить так, чтобы при минимальной продолжительности этого процесса обеспечить нужное качество.

Для этого сушка происходит при определенном состоянии агента обработки (температура, степень насыщенности, давление), который определяется соответствующим режимом. Для исследования процесса сушки фруктов в гелиосушилке, аппарат был укомплектован измерительными средствами и датчиками (рис. 2).

Перед началом процесса, чтобы уменьшить негативное влияние градиента темпера-

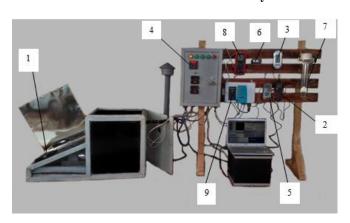
туры на распределение влаги во фруктах, ее обязательно прогревают. Прогревание материала до заданной температуры и повышение его скорости до некоторого максимального значения зависят главным образом от начальной температуры высушиваемого материала, его вида, параметров агента сушки. Имеющиеся методы определения продолжительности прогрева коллоидных капиллярно-

пористых материалов базируются на экспериментальных данных для условного материала. В современных сушильных камерах со скоростью циркуляции агента сушки через слой фруктов 2 м/с. Продолжительность прогрева фруктов принимается для укрупненных расчетов летом 1...1,5 ч, зимой 1,5...2 ч на каждые 10 мм толщины слоя фруктов [20].



1 - входной канал; 2 - вентилятор; 3 - воздуховод; 4 - воздушный коллектор; 5 — теплоаккумулирующий материал (галька) 6 -сушильная камера; 7 - вытяжной канал; 8 - решёта; 9 - зеркальный концентратор; 10 - заслонка.

Рис. 1. Технологическая схема гелиосушилки.¹



1 - пиранометр ПЕЛЕНГ СФ-06; 2 и 3 - термоанемометры UT 362 и Testo 425; 4 - регуляторизмеритель температуры PT-0102-8 с термосопротивлением Pt100; 5 - цифровой гигрометр WCM-1 с датчиком влажности EE HC 200; 6 - цифровой термогигрометр PT-0102 с термосопротивлением Pt1000; 7 - аспирационный психрометр Ассмана; 8 - цифровой мультиметр UT-70B; 9 - влагомер высушиваемого материала БФС-1А.

Рис. 2. Общий вид экспериментальной гелиосушилки с измерительными средствами и датчи- κ ами. 2

Для фруктов она повышается на 25%. Температуру агента обработки t_m во время прогрева поддерживают на 5-8 °С выше температуры первой степени режима сушки (но не более 100 °C).

После прогревания фруктов начинается

собственно процесс сушки. При условии, что начальная влажность фруктов выше предела гигроскопичности, из материала испаряется с постоянной скоростью, главным образом, свободная влага (подобно испарения с свободной поверхности), то есть за одинаковые

^{1,2}Appendix 1

63

промежутки времени удаляется одинаковое количество влаги. Этот период постоянной скорости сушки τ_2 характеризуется постоянной температурой материала.

В период падающей скорости сушки, который начинается с момента наступления критического влагосодержания U, скорость процесса определяется скоростью перемещения влаги из внутренних слоев к поверхности и непрерывно снижается, пока не дойдет до равновесного влагосодержания U_p . Тогда процесс прекращается.

Продолжительность второго и третьего периодов для различных материалов неодинакова. Более того, для тех же материалов отношение продолжительности периодов может быть разным и зависит от многих причин, в частности от определяющих размеров высушиваемого материала. При сушке фруктов в гелиосушилке продолжительность периода постоянной скорости незначительна и весь процесс сушки происходит главным образом в период падающей скорости [21].

Анализируя влагоперенос низкотемпературного процесса сушки коллоидных капиллярно-пористых тел с постоянными коэффициентами, А. В. Лыков предложил уравнение

$$\partial U / \partial \tau = a' \left(\nabla^2 U + \partial \nabla^2 t \right), \tag{1}$$

где a'- коэффициент влагопроводности; ∇ -оператор Лапласа; U - влагосодержание, кг/кг; δ - термоградиентный коэффициент; t - температура материала, °C.

Учитывая, что при конвективной сушке влияние температурного градиента незначительно, уравнение (1) можно записать так:

$$\partial U / \partial \tau = a' \left(\nabla^2 U \right). \tag{2}$$

Для периода постоянной скорости сушки в условиях равномерного начального распределения влаги в фруктах решения уравнения (2) принимает вид:

$$U = U_{0} - \frac{m}{R\rho_{b}} \times \left[\tau - \frac{R^{2} - 3x^{2}}{6k} + \frac{2R^{2}}{k} \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^{n} \frac{1}{\pi^{2} n^{2}} \cos \frac{n\pi x}{R} \exp\left(-n^{2} \pi^{2} \frac{k\tau}{R^{2}}\right) \right], \quad (3)$$

где k - коэффициент сушки, с⁻¹; ρ_b - базисная плотность материала, кг/м³; R - определяющий размер, м; m - интенсивность сушки, кг/(м²·с); n - коэффициент влаговыделений процесса сушки фруктов. При больших значениях времени сушки τ суммой можно пренебречь. На основании (3) средняя интегральная влажность W с параболическим распределением влаги по толщине слоя

$$W = W_0 - \frac{100m}{R\rho_L} = W_0 - N\tau, \qquad (4)$$

где $N=100m/(R\rho_{\rm o})$ –скорость сушки, %/с. Для периода падающей скорости сушки уравнения убыли влаги

$$W - W_{p} = \frac{A_{1}}{\mu_{1}} \times \left[(W_{n} - W_{p}) - \frac{1}{-2(W_{u} - W_{n})} \left(\frac{1}{HR} - \frac{1}{\mu_{1}^{2}} \right) \right] e^{-\mu_{1}^{2} \frac{k\pi}{R^{2}}},$$
 (5)

где W — начальная влажность высушиваемого материала, %; , W_n — влажность поверхности высушиваемого материала, %; W_u — влажность в центре высушиваемого материала, %; W_p — равновесная влажность, %; A_1 — коэффициент равновесны влажность поправки на многомерность; μ_I — характеристическое число; HR — массообменный критерий Био.

На основании приведенных уравнений П. С. Серговский вывел уравнение для определения времени сушки фруктов, при условии, что температура «влажного» термометра в течение процесса сушки изменяется в пределах 1-2 °C,

$$\tau = C_{\tau} \frac{KS_{1}^{2}}{a_{\mu}^{\prime} \cdot 10^{6}} CA_{p, \mu} A_{\phi} \lg \frac{W_{nou}}{W_{\kappa}}, \qquad (6)$$

где K — множитель, учитывающий соотношение единиц измерения; S_1 — толщина слоя фруктов, см; C_{τ} —поправка на многомерность; $a_{\mu}{}^1$ — коэффициент влагопроводности при температуре «влажного» термометра, м 2 /с; C — коэффициент замедления сушки в фруктах; $A_{p,\mu}{}^-$ коэффициент, учитывающий реверсивность циркуляции; $A_{\phi}{}^-$ коэффициент, зависящий от начального степени насыщенности; W_{nou} , $W_{\kappa}{}^-$ начальная и конечная влажность фруктов, %.

Некоторые режимы сушки предусматривают повышение температуры «влажного» термометра. В этом случае уравнение (6) не совсем удовлетворяет требования точности. Поэтому П. С. Серговским предложено три уравнения для каждой ступени режима сушки:

- первой
$$\tau = C_{\tau_1} \, \frac{65 S_1^2}{a_1' \cdot 10^6} \, C_1 A_{p, \imath_l} A_\phi \, lg \Bigg(0.81 \frac{W_{nov} - W_{p_1}}{W_{\kappa_1} - W_{p_1}} \Bigg) \, . \tag{7}$$

- второй

- третьей

Общее уравнение изменения влажности в фруктах:

$$W_{\tau} = \begin{cases} W_{nou} & \text{при } 0 \leq \tau \leq \tau_{nou} \\ W_{n} exp \left[-\alpha_{T} \left(\frac{25}{S_{1}} \right)^{1.25} \left(\frac{t_{c}}{65} \right) \left(\frac{1.5}{V} \right)^{0.6} \times \right] \\ \times (\tau - \tau_{n}) & \text{при } \tau \succ \tau_{n} \end{cases}$$

$$(10)$$

где α_T – коэффициент, фрукты, начальную влажность, ужесточение режима, конструкцию сушильной камеры; S_1 - толщина материала, мм; t_c - температура «сухого» термометра в конечной стадии сушки, °C; V - скорость движения агента сушки, м/с; τ_n - время прогрева, ч.

Используя (9), можно построить кривую убыли массы высушиваемого материала. Поскольку (10) получено при условии применения регулярного теплового режима, то ведение процесса сушки по убыли средней текущей влажности (убыли массы в соответствии с (10) позволит максимально сократить время сушки при заданных свойствах материала.

Анализ (10) показывает, что для интенсификации процесса нужно оптимизировать этап прогрева и разработать соответствующие устройства для реализации оптимальных законов управления на этапах прогрева и сушки.

Интенсифицировать процесс сушки можно сокращением периода прогрева материала и непосредственно сушки, что связано с разработкой оптимальных законов управления

режимом и устройств для реализации этих законов. Разработана инженерная методика определения параметров оптимального управления (процессом прогрева), устройства управления процессами сушки коллоидных капиллярно-пористых материалов относительно конкретного объекта. Полученные результаты, разработаны методы и устройства обобщены для широкого круга тепловых объектов. Как объект приняли эжекционнореверсивную (модернизированную) сушильную камеру периодического действия в гелиосушилке. Приведенный способ исследования был выгоден по следующим причинам. Сушильные камеры этого типа составляют четвертую часть всего объема камер в АПК [22]. Проблема интенсификации гидротермических процессов с сохранением свойств высушиваемого материала актуальна. Одним из возможных направлений интенсификации процесса является сокращение времени прогрева при соблюдении основных технологических требований.

В ранее проведенных исследованиях [23] алгоритмов оптимального управления процессом прогрева высушиваемого капиллярно-пористого материала за исходную координату принимали температуру воздуха в сушильной камере, а полученный алгоритм управления принимался для систем с выходом за температурой высушиваемого материала, то есть искусственно снижался порядок системы уравнений, описывающих объект управления. Такой подход не всегда правомерен при решении задач оптимального, по быстродействию, управления тепловыми объектами. Кроме того, в [24] только поставлена задача по взаимосвязям управляющих воздействий; с нарушением ограничений на одно из них предлагается переходить на другое. Однако жесткая связь, вызванная технологическими требованиями режима прогрева с постоянной влажностью, требует безусловного учета условий ограничения на эти два управляющие воздействия. Поэтому задача рассматривалась с учетом всех ограничений на управление и координаты состояния. Для управления процессами сушки фруктов слелует ориентироваться на использование систем автоматического регулирования с программным управлением по обобщенным параметрам, характеризующим состояние материала в процессе его гидротермической обработки - убыли средней текущей влажности, что позволит максимально сократить

время сушки с заданным качеством высушиваемого материала.

Таким образом, во время сушки большинства коллоидных капиллярно-пористых материалов можно выделить этап прогрева с постоянной влажностью материала и период собственно сушки с интенсивным испарением влаги из материала. Первый этап - вспомогательное, по времени он составляет 5-10% [24] всего цикла сушки. С длительностью процесса сушки от двух до тридцати часов время прогрева материала составляет 1 час. Поэтому решение задачи оптимального, по быстродействию, управления этапом прогревание с соблюдением основных технологических требований позволит сократить весь цикл и существенно снизить энергетические затраты на сушку единицы объема материала.

ІІІ. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЯ

Исследование технологического процесса сушки в гелиосушилке проводили в период созревания большинства фруктов - месяцы июль и август, когда обычно устанавливается устойчивая солнечная погода. В качестве высушиваемого материала выбрали яблоки сорта Семиричка, груши сортов Столовка, Кюре с начальной влажностью $W_n = 70,3...85,2\%$, нарезанных кружочками и дольками толщиной 6 мм, при разовой загрузке в гелиосушилку $m_{\phi} = 5,5$ кг.

В период натурных испытаний гелиосушилки погода удерживалась ясная, без осадков. Степень прозрачности атмосферы колебался в пределах от 0,72 до 0,86. Поток воздушных масс (ветер) колебался в пределах от 1,3 м/с до 2,8 м/с.

Сушка в гелиосушилке проводилась в течение t = 52 ч при неравномерной температуре потока воздуха и высушиваемого образца в режиме с непрерывным контролем его течения и почасовой регистрацией контролируемых параметров. Результаты измерений отображении соответствующими графическими материалами в виде временных зависимостей.

Почасовое взвешивания сырья позволяет получить временную зависимость скорости сушки, представить пропорциональной к ней величиной уменьшения массы dm/dt [25]:

$$\frac{dU}{dt} = \frac{d}{dt} \left(\frac{m}{m_c} \right) = \frac{1}{m_c} \frac{dm}{dt}.$$
 (11)

В случае почасовой регистрации $dt \rightarrow \Delta t = 1$ час = 3600 с

$$\frac{dU}{dt} \approx \frac{\Delta U}{\Delta t} = \frac{1}{m_c} \frac{\Delta m}{\Delta t} = \frac{1}{m_c} \frac{\Delta m}{3600} \sim const \cdot \Delta m \sim \Delta m. \quad (12)$$

Для наглядности, скорость сушки представлена диаграммой Δm , что позволяет выявить как общую тенденцию, так и особенности влаговыделения в виде периодических выбросов массы. Последние никак не коррелируют с соответствующими временными зависимостями температуры потока теплоносителя или его влажности. Вероятно, здесь имеют место процессы самоорганизации, обусловленные накоплением пары в полузакрытых капиллярах и ее скачкообразным прорывом наружу при превышении критического давления. Подобным физическим механизмом описывают пульсирующее выделение хлора при радиолизе щелочногалоидных кристаллов. В тонких нарезанных кружках сырья с незначительным путем потока пара к поверхности это явление более заметно, чем в массивных материалах (например, нарезанных дольками сырья), где внезапные прорывы пары гасятся системой разветвленных промежуточных капилляров.

Постепенное увеличение интервала между следующими пиками выбросов влаги - от 4...6 ч в начале сушки до 8 при приближении к равновесному состоянию можно объяснить углублением двухфазной зоны испарения. В частности, минимум интегрального показателя уменьшения влагосодержания $\Sigma \Delta m$ на 38 часов сушки (рис. 3, 4, 5) является результатом наложения двух неблагоприятных факторов - ночного уменьшения температуры теплоносителя и ростом его влажности (рис. 6, 7 соответствующих временных зависимостей), которые подавляют процессы парообразования и уменьшают вероятность выхода на поверхность. Поэтому момент разрядки избыточного давления смещается по фазе и растягивается во времени почти на 6 часов от 39 до 45 часов. Следующий пик влаговыделения наблюдается еще с длительным опозданием даже при дневном повышение температуры и солнечного подогрева. Такое увеличение между пиковым интервалом скорее всего можно объяснить увеличением эффективной площади испарения при фрагментации сплошной двухфазной зоны капиллярно-пористой среды.

Временные зависимости влагосодержания U(t) построены по результатам непосредственного измерения влаги и рассчитаны с использованием текущих значений потери массы высушиваемого материала. Первый подход может давать значительную погрешность из-за нестабильных условий взаимодействия чувствительного элемента (сенсора) с высушиваемого материалом. Зато точность расчета по второму методу зависит от методики определения сухой массы вещества.

Абсолютный метод определения сухой массы m_c требует длительного процесса влаговыделения в сухом воздухе, что нерационально с технологической точки зрения. Зато целесообразнее его рассчитать по результатам измерения массы и влагосодержанию материала, например, в состоянии равновесия с окружающим воздухом - после его многочасовой стабилизации. Тогда, согласно определению влагосодержания:

$$U = \frac{m}{m_c} = \frac{M - m_c}{m_c} \,, \tag{13}$$

где M — текущая масса фруктового сырья, кг.

Откуда:

$$m_c = \frac{M}{U+1}. (14)$$

Рассчитанное по данной методике значение влагосодержания является интегральной характеристикой, независимой от температуры или локальной влажности материала зоны измерительного сенсора. Состояние равновесия с внешней средой позволяет уменьшить погрешность измерения влажности за счет многократного повторения и усреднения. Поэтому масса и влагосодержание исследуемой сырья, составленного из одной тонкой пластины $(0,6\,$ мм) общей толщиной $L=0,0042\,$ м и предварительно стабилизированного при комнатной температуре составляли $m=4,9\,$ кг и U=11,1% соответственно:

$$m_c = \frac{M}{U+1} = \frac{4,90}{0.111+1} = 4,41 \,\text{K}\Gamma.$$
 (15)

График рассчитанного по потере массы текущего влагосодержания формой напоминает экспоненту, а соответствующая ей зависимость U(t)на отдельных стадиях процесса сушки близка к линейной (рис. 3 и 7). По-

следнее может быть признаком изменения кинетики процесса влагопереноса.

Как известно, сушки считают типичным процессом релаксации, при которой переувлажненная система стремится к равновесному состоянию, где диффузионные потоки внутрь и наружу уравновешиваются. Его интенсивность принято характеризовать коэффициентом эффективной диффузии, который в случае фруктового сырья связанный с избыточным влагосодержанием U- U_{eq} уравнением (8). Значение равновесного влагосодержания $U_{eq}=0.12$ кг/кг, принятое по состоянию на 53 час от начала сушки - через час после его прекращения, что необходимо для выравнивания влажности в объеме материала. Для уменьшения объема расчетов отношение избыточной влагоёмкости можно заменить отношением соответствующих избыточных масс воды в материале, которое вытекает из следующих соотношений:

$$\ln \frac{U - U_{eq}}{U_0 - U_{eq}} = \ln \frac{M / m_c - m_{eq} / m_c}{M_0 / m_c - m_{eq} / m_c} =$$

$$= \ln \frac{M - m_{eq}}{M_0 - m_{eq}} = \ln MR.$$
(16)

Значение этой величины, рассчитанные по измеренной прибором влажностью $\ln(MR)_U$ и отдельно по изменением массы пакета $\ln(MR)_m$, при расчетах предпочтение отдается более надежным данным по потере массы.

1)
$$U_{eq}$$
= 0,12; U_0 - U_{eq} = 0,6328;

2)
$$m_{eq} = 4.9 \text{ кг}; M_0 - m_{eq} = 2.83 \text{ кг}$$

Значение эффективной диффузии определены через тангенс угла наклона, используя соотношение, которое следует из уравнения (9):

$$D_{e\phi} = \frac{4L^2}{\sigma^2} \operatorname{tg}\alpha \,. \tag{17}$$

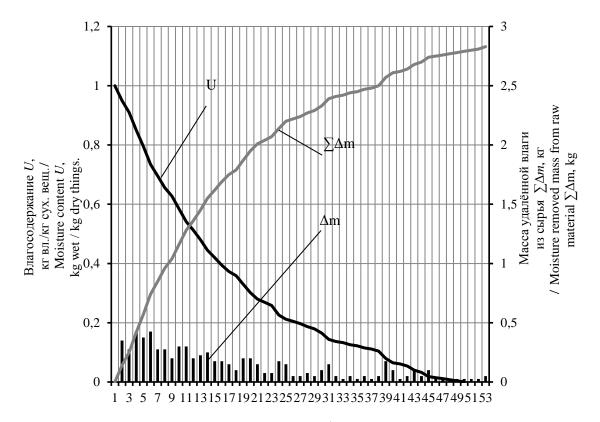
Наглядно значение tgα равно оценивается по отношению разницы ординат и абсцисс начала и конца линейной зависимости:

$$tg\alpha = \frac{\Delta(\ln MR)}{\Delta t} = \frac{2,20}{34,5.3600} = 1,77.10^{-5}.(18)$$

Поэтому значение эффективной диффузии в этом временном интервале равно:

$$D_{e\phi} = \frac{4 \cdot 0,0042^{2}}{\pi^{2}} \cdot 1,77 \cdot 10^{-5} =$$

$$= 7,15 \cdot 10^{-6} \cdot 1,77 \cdot 10^{-5} = 1,2655 \cdot 10^{-10} \,\mathrm{m}^{2}/\mathrm{c}.$$



Продолжительность процесса сушки τ , час / Duration of the drying process τ , hour

Рис. 3. Входные характеристики сушки фруктов.³

Соответствие указанного значения эффективной диффузии процесса сушки фруктов можно оценить непосредственным вычисления влагосодержания, например, по состоянию на 30 час сушки, используя формулу:

$$U = U_{eq} + \left[\left(U_0 - U_{eq} \right) \frac{8}{\pi^2} \exp \left(-\frac{\pi^2 D_{e\phi}}{4L^2} t \right) \right].$$

$$U = 0.12 + \left[(0.7528 - 0.12) \times \times \frac{8}{\pi^2} \exp \left(-\frac{\pi^2 \cdot 1, 2655 \cdot 10^{-10}}{4 \cdot (0.0042)^2} \cdot 30 \cdot 3600 \right) \right] = 0.12 + \left[0.6328 \cdot \exp \left(-1, 9117 \right) \right] = 0.2135.$$
(19)

Тогда как измеренная U=0,2110, что на 1,2% меньше и находится в пределах погрешности измерения. Если предположить, что температурная зависимость эффективной диффузии описывается известной формулой A_1 ³Appendix 1

$$D_{e\phi} = D_0 \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right),\tag{20}$$

то ее предэкспоненциальный множитель D_0 целесообразно оценить для случая средней температуры процесса (см. таблицу 1). $T=34.8~^{\circ}\mathrm{C}=307.8~\mathrm{K}$:

$$D_0 = D_{e\phi} \exp\left(\frac{E_a}{RT}\right) = 1,2655 \cdot 10^{-10} \exp\left(\frac{28956,2}{8,31 \cdot 307,8}\right) = 1,04 \cdot 10^{-5} \,\text{m}^2/\text{c}.$$
 (21)

Следовательно,

$$D_{e\phi}(T) = 1,04 \cdot 10^{-5} \exp(-3484,5/T).$$
 (22)

Однако рекомендациям по использованию этой формулы для прогнозирования момента достижения равновесного должно предшествовать ее экспериментальная проверка на наличие отсутствия перераспределения взносов движущих сил различных составляющих кинетических и динамических параметров процесса. Показано, что интенсификация процесса сушки должна базироваться на изучении теплофизических, свойствах фруктов,

³Appendix 1

как объекта сушки, и с непосредственной увязкой их с коэффициентами диффузии, теп-

ло- и влагообмена, энергией и формой связи влаги с материалом.

Таблица 1⁴ Сводные условия и результаты исследований сушки яблок и груш в гелиосушилке⁵

№ п/п	Дата. (Date)	Исследуемое сырье. (Investigated raw materials)	Продолжительность сушки. (Drying	Конфигу (Configu	урация.	Солнечная тепловая энергия. (Solar energy), kW·h / MJ
1	15–17.07	Яблоки. (Apples)	duration), h 50	+	+	37,8/136,8
2	15–21.07	Груши. (Pears)	119	_	_	-
3	28–31.07	Яблоки. (Apples)	74	_	_	34,2/123,1
4	7–10.08	Яблоки. (Apples)	77	_		30,7/110,5
5	10-12.08	Груши. (Pears)	50	+	+	31,2/74,8
6	15–17.08	Груши. (Pears)	50	+	+	23,0/81,3
7	31–3.09	Яблоки. (Apples)	98	_	_	26,6/95,8

Примечания: * - тепловой аккумулятор; ** - плоский зеркальный концентратор

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

При натурных испытаниях гелиосушилки определялись рабочие характеристики (энергетические характеристики разработанного сушильного аппарата, тепломассообменные характеристики процесса сушки фруктов) гелиосушилке при стандартных режимах солнечного освещения и типовых (сезонных) метеорологических условиях.

В период исследований среднедневные физические параметры окружающей среды были такими (см. рис. 5, 6, 7):

- 1. Температура воздуха $t_{ns} = 12...32$ °C.
- 2. Относительная влажность воздуха $\phi_{ns} = 12...84,5 \%$.
- 3. Энергетическая освещенность $E=100...988~{\rm Bt/m^2}$ для площади поглощающей поверхности $S=1,5~{\rm m^2}.$
- 4. Теплотехнические параметры теплоносителя (воздуха), поступающего в гелиосушилку, составляли: температура в дневное время (з 8^{00} до 21^{00} часов) $t_{ns}=15...71$ °C, в ночное время (з 22^{00} до 7^{00} часов) $t_{m}=50...14$ °C.
- 5. Скорость циркуляции теплоносителя (воздуха) $v_m = 1...3 \text{ м/c}$.
- 6. Относительная влажность теплоносителя (воздуха) $\phi_{tn} = 10.8...82,3$ %.

Пошаговой итерацией расчета результатов измерения интенсивности в течение 50

часов сушки установлено, что в течение трех дней на1,5 м 2 поверхности воздушного коллектора поступило $25,2\cdot 1,5=37,8$ кВт·ч или 136,8 МДж тепловой энергии. При испарении 2,792 кг влаги энергоотдача процесса составляет 10,7 кВт·ч/кг или 38,8 МДж/кг.

Фрукты, нарезанные толщиной 6 мм каждый собраны в один пакет с габаритными размерами (3 + решет) \times 6 \times 6 мм размещены в камере конвективной сушилки продолжительностью сушки τ = 52 ч до массы m = 4,9 кг и влажности U = 11,1%. После сушки, фрукты вынимают из сушильной камеры и дают выстояться продолжительностью τ = 6 ч для снятия внутренних деформации и растрескивания, влажности U = 8%. По этим величинами рассчитывали сухую массу материала m_c :

$$W = \frac{m_e}{m_e + m_c} = 0,08;$$

$$0.08 \cdot (m_e + m_c) = m_e;$$

$$m_e = 0.08 \cdot 4,41 = 0.3528;$$

$$m_c = 4,41 - 0.3528 = 4,0572.$$

Поэтому согласно расчетам, начальная масса воды m_{p0} в материале и его влажность W_{p0} находились на уровне:

^{4,5}Appendix 1

$$m_{\rm B0} + m_{\rm c} = 7,73 \text{ kg}; m_{\rm e0} = 7,73 - 4,0572 = 3,6728 \text{ kg}$$

$$W_{\rm p0} = \frac{m_{\rm e}}{m_{\rm e} + m_{\rm c}} = \frac{3,6728}{7,73} = 0,4751. \quad (23)$$

Зато измеренная влажность $W_{0 \epsilon u \mu u p} =$ 0,463 отличается от рассчитанной на 2,5%, что превышает погрешность стандартных влагомеров, обычно 1,5%. Расхождение скорее методическое, поскольку влажность наружного верхнего слоя фруктов со временем уменьшается быстрее внутренних. После уменьшения влажности до нормативного состояния разница влажности внутренних и внешних слоев стабилизируется на минимальном уровне. Поэтому определение сухой массы при нормативной влажности достоверные определенных по начальным или текущими данными на рис. 4.

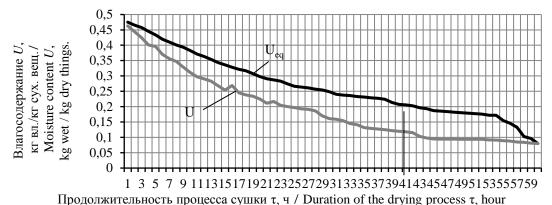


Рис. 4. Соотношение измеренной и рассчитанной текущей влажности материала: вертикальный отрезок разделяет режимы сушки.⁶

Разницу измеренной и рассчитанной по потере текущей массы можно объяснить условиями измерения в слое фруктов: чувствительный элемент прибора регистрирует влажность только верхнего слоя, который высыхает быстрее. После завершения принудительной сушки, происходит диффузное выравнивания остатков жидкой фазы по объему слоя, в результате чего поверхностная влажность уменьшается медленнее, относительно объемной. Поэтому достоверной характеристикой кинетики сушки следует принимать влажность, рассчитанную по потере массы материала.

Резкий рост потери массы после прекращения сушки на 53 часа (рис. 5, 6, 7) - чисто условное, поскольку для соблюдения производственного графика пришлось интенсифицировать процесс с целью достижения нормативной влажности W = 8% в пределах продолжительности сушки от 53 до 60 часов. С термодинамической точки зрения сушку можно принять как процесс релаксации переувлажненного материала в состояние равновесия с влажностью окружающей среды. Если механизм релаксации формально представить диффузией молекул воды и водяного пара пористой средой (биологической мембраной), то кинетику процесса можно описать через отношение избыточных текущего и начального влагосодержания:

$$MR = \frac{U - U_{eq}}{U_0 - U_{eq}} = \frac{8}{\pi^2} \exp\left(-\frac{\pi^2 D_{e\phi}}{4L^2} t_{eq}\right), \quad (24)$$

где MR - сокращение англоязычного термина «moistureratio» ((отношение влажности), хотя по физическим содержаниям этих величин [5, 25] его правильнее называть отношением влагосодержания U); $D_{e\phi}$ - коэффициент эффективной диффузии в ${\rm M}^2/{\rm c}$; L- толщина и материала в м; t_{eq} - продолжительность процесса релаксации в сек. до достижения материалом равновесного влагосодержания U_{eq} .

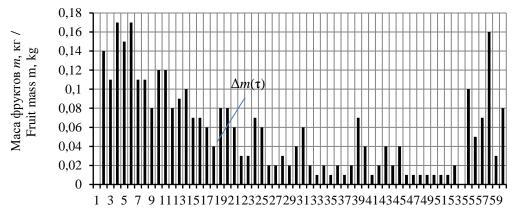
Поэтому выражение для расчета коэффициента эффективной диффузии $D_{e\phi}$ по экспериментально определенными переменными величинами получают после логарифми-

С графического сравнения измеренной и рассчитанной влажности следует, что, для уменьшения объема расчетов, отношение избыточных влагосодержаний можно заме-

⁶Appendix 1

нить отношением соответствующих избыточных масс воды в материале.

Расчеты логарифмического отношения во временном интервале процесса сушки приведены на рис. 8.



Продолжительность процесса сушки τ , ч/Duration of the drying process τ , hour

Рис. 5. Почасовая потеря массы фруктов в процессе сушки.⁷

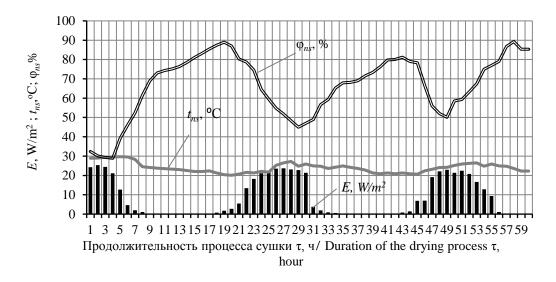


Рис. 6. Входные параметры процесса сушки фруктов в гелиосушилке.⁸

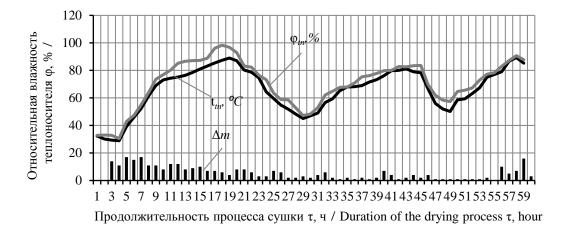
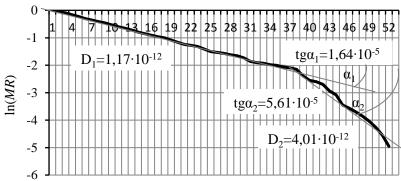


Рис. 7. Выходные параметры процесса сушки фруктов в гелиосушилке.⁹

7,8.9 Appendix 1



Продолжительность процесса сушки т, ч / Duration of the drying process т, hour

Рис. 8. Логарифмические временные зависимости относительной $(\ln U)$ и избыточной влажности $\ln(MR)$.

Равновесное значение массы высушиваемого тела $m_{eq} = 4.9$ кг определен по его устойчивому в течение нескольких часов значению, начиная с 52 часа процесса.

$$U_{p0} = \frac{m_e}{m_c} = \frac{3,6728}{4,0572} = 0,9053.$$
 (25)

Допустим, последнее значение массы материала 4,41 кг при удаленной массе воды $\Sigma(\Delta m)=2,36$ кг соответствует равновесной влажности W=20%. Тогда

$$W = \frac{m_e}{m_e + m_c} = \frac{m_e}{4,41} = 0,2.$$
 (26)

откуда $m_e = 0,2 \cdot 4,41 = 0,882$ кг.

Поэтому
$$m_c = 4.41 - 0.882 = 3.528$$
 кг.

При таком m_c начальная масса воды в материале $m_0 = 7.73 - 3.528 = 4.202$ кг. А начальное влагосодержание и влажность будут:

$$U = 4,202/3,528 = 1,191;$$

$$W = \frac{m_e}{m_e + m_e} = \frac{4,202}{7,73} = 0,544. \quad (27)$$

Значение эффективной диффузии в этом временном интервале равно:

$$D_{e\phi}(0:35) = \frac{4 \cdot 0,0042^{2}}{\pi^{2}} \cdot 1,77 \cdot 10^{-5} =$$

$$= 7.15 \cdot 10^{-6} \cdot 1,64 \cdot 10^{-5} = 1.17 \cdot 10^{-12} \,\text{m}^{2}/\text{c}.$$

Во временном интервале [3...5] включительно то:

$$D_{e\phi}(0:35) = \frac{4 \cdot 0,0042^{2}}{\pi^{2}} \cdot 4,57 \cdot 10^{-5} =$$

$$= 7,15 \cdot 10^{-6} \cdot 4,57 \cdot 10^{-5} = 3,26 \cdot 10^{-10} \,\mathrm{m}^{2}/\mathrm{c};$$

$$D_{e\phi}(0:35) = \frac{4 \cdot 0,0042^2}{\pi^2} \cdot 1,77 \cdot 10^{-5} =$$

$$= 7.15 \cdot 10^{-6} \cdot 5.61 \cdot 10^{-5} = 4.01 \cdot 10^{-12} \,\text{m}^2/\text{c}.$$

Приведенные расчеты позволяют утверждать, что перенос влаги внутри высушиваемого материала определяется не только величиной градиентов температуры и влагосодержания, но и коэффициентом диффузии D, который зависит от температуры и скорости теплоносителя в гелиосушилке и изменяется в пределах $0,17...4,01\cdot10^{-12}$ м²/с. В случае увеличения температуры теплоносителя в сушильной камере t_m от 20 до 60 °C коэффициент диффузии D возрастает, а с увеличением скорости теплоносителя v_m от 1 до 3 м/с - уменьшается нелинейно.

Таким образом, исследованные энергетические параметры, изменялись в диапазоне: физические параметры окружающей среды температура воздуха t_{ns} = 12...32 °C; относительная влажность

воздуха φ_{ns} = 26...86,8%; энергетическая освещенность E= 100...800 Вт/м². Теплотехнические параметры теплоносителя, поступавших в сушильную камеру, составляли: температура t_m = 15...71 °C; скорость циркуляции v_m от 1 до 3 м/с; относительная влажность менялась φ_m от 9,8 до 86%.

На основе сравнения полученных энергетических, кинетических и динамических параметров установлено, что при одинаковых параметрах теплоносителя, продолжительность сушки фруктов в гелиосушилке зависит только от прогнозируемого изменения факторов зависимых от погодных условий. Полученные данные влажности и массы высушиваемого материала позволяют прогнозировать процесс обезвоживания фрук-

тов с учетом воздухообмена в гелиосушилке при различных физических параметрах окружающей среды. Кроме этого, исследования кинетики и динамики сушки фруктов в гелиосушилке показали, что при правильном подходе к процессам тепло- и массообмена в условиях личных крестьянских хозяйствах процесс сушки можно значительно интенсифицировать.

Кроме этого, на основании анализа полученных данных установлено, что разработать общий технологический режим сушки фруктов в гелиосушилке невозможно, а только стабилизировать теплотехнические параметры теплоносителя в ее сушильной камере. Параметры теплоносителя при сушке фруктов при влажности W от 75,3% до 6% должны колебаться в пределах температура $t_{ns} = 25$ °C, а $t_m = 31$ °C, относительная влажность воздуха $\phi_{ns} = 72,1\%$, а $\phi_m = 75,9\%$. То есть, выходное температура, влажность теплоносителя должна быть в 1,5 раза выше по сравнению с входной $t_{ns} < t_m$, $\phi_{ns} < \phi_m$.

Если данное условие не обеспечивается, то необходимо в сушильной камере увеличить вынужденную конвекцию перемешивания воздушных масс теплоносителя (активно вентилировать), поскольку на стенках гелиосушилки и на поверхности высушиваемого материале возникнет явление точки росы.

Это вызвано тем, что теплоноситель достигает состояния насыщенности водяным паром при неизменном давлении, температуре и данном состоянии влагоудержания.

Таким образом, представленные результаты начального этапа комплексного исследования по повышению эффективности процесса сушки фруктов на основании разработки конструкции и обоснования режимов работы гелиосушилки, что обеспечит уменьшение затрат энергоресурсов за счет использования солнечной энергии. Разработанная конструкция гелиосушилки относится к комплексу гелиотермических сушильных агрегатов.

выводы

1. Применение солнечной энергии сушки фруктов является эффективным для зоны восточной Европы с умеренным континентальным климатом, где среднегодовая мощность солнечного излучения составляет порядка 3,41 кВт·ч/м² за световой день. Это позволяет с 1 м² площади воздушного кол-

лектора получить от 1,5 до 2,3 кВт·ч тепловой энергии в сутки.

- 2. На основании теоретических и экспериментальных исследований установлено, что перенос влаги внутри высушиваемого материала общей загрузочной массой в сушильную камеру m = 4.9 кг определяется не только величиной градиентов температуры $\Delta t_{\rm TH}$ от 20 до 60° и влагосодержания U(t) = 4,202/3,528 = 1,191 кг сух. вещ./кг вл. вещ., но и коэффициентом диффузии D, который зависит от температуры и скорости теплоносителя в гелиосушилке и, который изменяется в пределах 0,17...4,2·10⁻¹⁰ м²/с. В случае увеличения температуры теплоносителя в сушильной камере t_m от 20 до 60 °C коэффициент диффузии D возрастает, а с увеличением скорости теплоносителя v_{tn} от 1 до 2,8 м/с - уменьшается нелинейно во время сушки продолжительностью 58 часов.
- 3. В результате решения внутренней (включает в себя перенос тепла и массы внутри фруктов) и внешней (перенос тепла и влаги на границе среда твердое тело) задач с учетом закономерностей внешнего теплои влагообмена, обоснованы методы исследования и определения коэффициентов диффузии и влагообмена, влагосодержания и потенциала влагопроводности в процессе сушки фруктов гелиосушилке. Получены математические модели определения этих коэффициентов. Данные модели расширяют теоретические положения тепломассопереноса в процессе сушки фруктов в гелиосушилке.

APPENDIX1 (ПРИЛОЖЕНИЕ 1)

¹Fig. 1. Technological scheme of solar drying. 1 is the input channel; 2 is the ventilating fan; 3 is the air feed pipe; 4 is the air type collector; 5 is the heat-retaining material (pebbles); 6 is the drying chamber; 7 is the exhaust channel; 8 are the sieves; 9 is the mirror concentrator; 10 is the damper.

Fig. 2. General view of the experimental solar dryer with measuring instruments and sensors. 1 is the PELENG SF-06 pyranometer; 2 and 3 are the hot-wire anemometers UT 362 and Testo 425; 4 is the RT-0102-8 temperature meter with Pt100 thermal resistance; 5 is the WCM-1 digital hygrometer with the EE HC 200 humidity sensor; 6 is the RT-0102 digital thermohygrometer with Pt1000 thermal resistance; 7 is the Assman aspiration psychrometer; 8 is the UT-70B digital multimeter; 9 is the BFS-1A moisture meter of the material being dried.

- ³Fig. 3. Input characteristics of fruit drying.
- **4.5Table 1.** Summary conditions and research results of drying apples and pears in solar dryer in the period of 15.07–3.09, 2020
- ⁶**Fig. 4.** Ratio of measured and calculated current moisture content of the material: the vertical line separates the drying modes.
- ⁷**Fig. 5.** Hourly weight loss of fruit mass during drying.
- ⁸Fig. 6. Input parameters of the fruit drying process in solar dryers.
- ⁹Fig. 7. Output parameters of the fruit drying process in solar dryers.
- ¹⁰**Fig. 8.** Logarithmic time dependences of relative (lnU) and excess humidity ln (MR).

Библиография (References)

- [1] Janjai S., Intawcc P., Kacwkicw J. A Solar Timber Drying System: Experimental Performance and System Modeling. International Energy Journal. 2010. Vol. 11. P. 131–144.
- [2] Pirasteh G., Saidur R., Rahman S., Rahim N. A review on development of solar drying applications. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2014. Vol. 31. P. 133–148.
- [3] Mustayen A., Mekhilef S., Saidur R. Performance study of different solar dryers: A Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2014. Vol. 34. P. 463–470. DOI:10.1016/j.rser.2014.03.020
- [4] Kumar C., Karim A., Saha S., Joardder M., Brown R., Biswas D. Multiphysics modeling of convective drying of food materials. Proceedings of the Global Engineering, Science and Technology Conference, 2012. P. 1–13.
- [5] Jose Antonio, Zanuncio Vinha, Carvalho Amelia Guimaraes, Silva da Marcela Gomes, Lima José Tarcisio. Importance of wood drying to the forest transport and pulp mill supply Importance of wood drying to the forest transport and pulp mill supply.2017. Vol. 23(2). P. 147–152. doi: 10.1590/01047760201723022223.
- [6] Seetapong N., Chulok S., Khoonphunnarai P. Thermal efficiency of natural convection solar dryer. Journal of Physics: Conf. Series 901, (2017). 012044. doi:10.1088/1742-6596/901/1/012044.
- [7] E. A. Y. Amankwaha, K. A. Dzisi, G. van Stratena, L. G. van Willigenburge, A. J. B. van Boxtel . Distributed mathematical model supporting design and construction

- of solar collectors for drying. Drying technology, 2017. Vol. 35, Issue 14. P. 1675–1687.
- doi.org/10.1080/07373937.2016.1269806
- [8] Khazimov Z. M., Bora G. C., Khazimov K. M., Khazimov M. Z. Modeling of the motion of free convective drying agent in plastic helio dryer. Journal of Engineering Thermophysics, 2014. 23.4, 306 315.
- [9] Kituu G. M., Shitanda D. R., Kanali C. L., Mailutha J. T. Thin layer drying model for simulating the drying of tilapia fish in a solar tunnel dryer. Journal of Food Engineering, 2010. 98, 306 315.
- [10] Sajin V.S. Osnovi tehniki sushki. M.: Chemistry, 1984. 320. (In Russian).
- [11] Rasev A.I. Sushka drevesiny. (Drying of wood) M.: High school 1980. 181. (In Russian).
- [12] Janjai S., Phusampao C., Nilnont W., Pankaew P., Janjai S. Experimental performance and modeling of a greenhouse solar dryer for drying macadamia nuts. International Journal of Scientific & Engineering Research, 2014. 5, 1155 1161.
- [13] Englmair G., Dannemand M., Johansen J. B., Kong W., Dragsted J., Furbo S., Fan J. Testing of PCM Heat Storage Modules with Solar Collectors as Heat Source Energy Procedia. 2016. Vol. 91. P. 138–144. doi: 10.1016/j.egypro.2016.06.189
- [14] Horta P., Osório T. Optical Characterization Parameters for Line-focusing Solar Concentrators: Measurement Procedures and Extended Simulation Results. Energy Procedia. 2014. Vol. 49. P. 98–108. doi: 10.1016/j.egypro.2014.03.011
- [15] Chamoli S. Exergy analysis of a flat plate solar collector. Journal of Energy in Southern Africa. 2013. Vol. 24, Issue 3. P. 8–13.
- [16] NASA Surface meteorology and Solar Energy. URL: http://eosweb.larc.nasa.gov
- [17] Vishwakarma D., Kale J. Experimental study and analysis of solar air heater using various inlet temperatures. International Journal of Research. 2017. Vol. 5, Issue 10. P. 76–80. doi: 10.5281/zenodo.1039619
- [18] Sabiha M. A., Saidur R., Mekhilef S., Mahian O. Progress and latest developments of evacuated tube solar collectors. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2015. Vol. 51. P.1038–1054.doi: 10.1016/j.rser.2015.07.016

- [19] Solar energy Solar thermal collectors Test methods. International Standard. ISO/FDIS 9806:2013(E).
- [20] Duffie J. A., Beckman W. A. Solar engineering of thermal processes. John Wiley&Sons, 2013. 910 p. doi: 10.1002/9781118671603
- [21] Hematian A., Ajabshirchi Y., Bakhtiari A. Experimental analysis of flat plate solar air collector efficiency. Indian Journal of Science and Technology. 2012. Vol. 5, Issue 8. P. 3183–3187.
- [22] Shemelin V., Matuska T. Detailed Modeling of Flat Plate Solar Collector with Vacuum Glazing. International Journal of Photoenergy.

- 2017. Vol. 2017. P. 1–9. doi: 10.1155/2017/1587592
- [23] Ondieki H. O., Koech R. K., Tonui J. K., Rotich S. K. Mathematical Modeling Of Solar Air Collector With a Trapezoidal Corrugated Absorber Plate. International Journal of Scientific & Technology Research. 2014. Vol. 3, Issue 8. P. 51–56.
- [24] Labai V. I. Teplomasoobmin. (Heat mass exchange) Lviv: Triada Plus, 2004. 260.
- [25] Manoj M., Manivaimair A. Simulation of solar dryer utilizing greenhouse effect for cocoa bean drying. International Journal of Advanced Engineering Technology, 2013. 3, 24 27.

Сведения об авторах.



Коробка Сергей Васильевич Кандидат технических наук, доцент кафедры «Энергетики», ЛНАУ, Сфера научных интересов: Возобновляемые источники и энергосберегающие технологии в АПК. г. Дубляны, Львовская область, Украина

E-mail: korobkasv@ukr.net



Сиротюк Сергей Валерьевич Кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Энергетики», ЛНАУ, Сфера научных интересов: Возобновляемые источники и энергосберегающие технологии в АПК. г. Дубляны, Львовская

область, Украина E-mail: ssyr@ukr.net



Журавель Дмитрий Павлович Доктор технических наук, профессор кафедры «Технический сервис и системы в АПК», ТГАТУ, Сфера научных интересов: ресурсо- и энергосберегающие технологии в АПК. г. Мелитополь, Украина E-mail:

dmytro.zhuravel@tsatu.edu.ua



Болтянский Борис Владимирович

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Технический сервис и системы в АПК», ТГАТУ, Сфера научных интересов: ресурсо- и энергосберегающие технологии в АПК. г. Мелитополь, Украина E-mail:

borys.boltianskyi@tsatu.edu.ua



Болтянская Лариса Алексеевна Кандидат экономических заведующая доцент, кафедрой «Предпринимательство, торговля и биржевая деятельность», ТГАТУ, Сфера научных интересов: экономическая эффективность производства и реализации продукции (работ услуг). Γ. Мелитополь, Украина E-mail:

larysa.boltianska@tsatu.edu.ua