

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 664.8.039.51

DOI: 10.26897/2687-1149-2023-2-69-73



Проницаемость слоя влажного сельскохозяйственного сырья при инфракрасном излучении, определяемая динамическим методом

*Алексей Алексеевич Завалий, д-р техн. наук, доцент*zavalym@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-0806-1110>; Scopus Autor ID: 57214120527*Людмила Анатольевна Лаго, канд. техн. наук, доцент*Luda_Lago@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-2019-4327>

Крымский федеральный университет имени В.И. Вернадского; 295007, Российская Федерация, Республика Крым, г. Симферополь, пр. Академика Вернадского, 4

Аннотация. Разработанный динамический метод определения интегрального теплового потока, основанный на одноёмкостной динамической модели теплового состояния измерительного преобразователя температуры (ИПТ), испытывающего тепловое воздействие постоянного по величине потока инфракрасного излучения и естественно-конвективного теплообмена поверхности ИПТ с окружающим его воздухом, позволяет определять проницаемость влажного сельскохозяйственного сырья. Проверка эффективности метода определения интегрального теплового потока выполнена при исследовании проницаемости инфракрасным излучением слоя очищенной питьевой воды с минерализацией не более 1 г/л и слоя мякоти яблока сорта Гольден-Делишес. Экспериментально последовательно определялись реакции измерительного преобразователя температуры на воздействие инфракрасного излучения при воздействии излучения непосредственно на ИПТ и через лист монолитного поликарбоната толщиной 3 мм. На листе поликарбоната размещался слой воды толщиной от 1 до 6 мм и мякоти яблока толщиной от 1 до 10 мм с шагом 1 мм. В результате аппроксимации полученных экспериментальных данных получили максимальное постоянное значение температуры ИПТ и величину постоянной времени переходного процесса нагрева ИПТ. Установлено, увеличение толщины слоя воды с 1 до 6 мм сопровождается снижением проницаемости слоя с 0,804 до 0,629 по экспоненциальной зависимости с коэффициентом показателя экспоненты $-0,736$. С ростом толщины слоя яблок с 1 до 6 мм проницаемость слоя влажного сырья падает от 0,780 до 0,097 по экспоненциальной зависимости с коэффициентом показателя экспоненты $-0,399$. Достаточная продолжительность нагрева для сферического ИПТ составила около 70 с, а для зачернённого расплющенного ИПТ – не более 30 с. Коэффициенты показателя степени зависимостей могут рассматриваться как коэффициенты ослаблений в законе Бугера для теплового излучения с максимумом энергии при длине волны $\lambda_{max} = 0,9 \dots 1,1$ мкм.

Ключевые слова: инфракрасное излучение, проницаемость слоя, проницаемость слоя влажного сельскохозяйственного сырья, интегральный тепловой поток

Формат цитирования: Завалий А.А., Лаго Л.А. Проницаемость слоя влажного сельскохозяйственного сырья при инфракрасном излучении, определяемая динамическим методом // *Агроинженерия*. 2023. Т. 25, № 2. С. 69-73. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2023-2-69-73>

Завалий А.А., Лаго Л.А., 2023

ORIGINAL ARTICLE

Dynamic method for determining the permeability of a layer of high-moisture agricultural raw materials for infrared radiation

*Aleksei A. Zavalii, DSc (Eng), Associate Professor*zavalym@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-0806-1110>; Scopus Autor ID: 57214120527*Lyudmila A. Lago, CSc (Eng)*Luda_Lago@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-2019-4327>

V.I. Vernadsky Crimean Federal University; 4, Prospekt Vernadskogo, Simferopol, Republic of Crimea, 295007, Russian Federation

Abstract. The developed dynamic method of integral heat flux determination is based on the single-capacity dynamic model of the thermal state of the temperature measuring transducer (TMT), experiencing thermal influence of the constant infrared radiation flux and natural convective heat exchange of the TMT surface with the surrounding air. The model can help determine the permeability of moist agricultural raw materials. The effectiveness of the integral heat flux method was tested by studying the infrared radiation permeability of a layer of purified drinking water with salinity not exceeding 1 g/l and a layer of apple pulp of the Golden-Deliches variety. The response of the temperature measuring transducer to infrared radiation was experimentally

determined in series when the radiation was applied directly to the TMT and through a 3 mm thick sheet of monolithic polycarbonate. A 1 to 6 mm thick layer of water and a 1 to 10 mm thick layer of apple pulp were placed on the polycarbonate sheet in 1 mm increments. As a result of approximation of the experimental data obtained, the authors determined the maximum constant temperature value of the TMT and the time constant value of the TMT transient heating process. It was found that increasing the thickness of the water layer from 1 to 6 mm was accompanied by a decrease in the layer permeability from 0.804 to 0.629 in an exponential relationship with an exponent coefficient of -0.736 . As the thickness of the apple layer increased from 1 to 6 mm, the permeability of the wet layer decreased from 0.780 to 0.097 according to an exponential relationship with an exponent coefficient of -0.399 . The sufficient heating duration for the spherical TMT was about 70 s and for the blackened flattened TMT it did not exceed 30 s. The coefficients of the power-law ratio can be treated as attenuation coefficients in the Bouguer law for thermal radiation with energy maximum at wavelength λ_{\max} equaling 0.9 to 1.1 μm .

Keywords: infrared radiation, layer permeability, permeability of wet agricultural raw material layer, integral heat flux

For citation: Zavaliy A.A., Lago L.A. Dynamic method for determining the permeability of a layer of high-moisture agricultural raw materials for infrared radiation. *Agricultural Engineering (Moscow)*, 2023;25(2):69-73. (In Rus.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2023-2-69-73>

Введение. Инфракрасное излучение интенсифицирует влагоудаление в процессе сушки влажного сельскохозяйственного сырья^{1,2} [1].

Проницаемость слоя влажного сельскохозяйственного сырья изучалась рядом ученых¹⁻³. Определить величину потока теплового излучения сквозь слой влажного сырья можно с помощью измерительных преобразователей интегрального теплового излучения – приёмников теплового потока типа вспомогательной стенки. Для таких измерений используются и другие электротермические приемники: болометрические, пироэлектрические, термоэлектрические, емкостные и др.⁴ [2]. Основными требованиями к приёмникам являются достаточная для регистрации чувствительность к тепловому потоку в диапазоне спектра инфракрасного излучения (0,2...800 мкм), малая инерционность и помехоустойчивость.

Существуют два основных класса приёмников излучения: фотоэлектрические (селективные) и тепловые (неселективные)⁵. Селективность фотоэлектрических

приёмников не позволяет решать задачи определения интегрального потока теплового излучения от источника со свойствами серого тела. Так, тепловизор Testo 882⁶ позволяет получать измерительную информацию с частотой 8...15 Гц с разрешающей способностью 0,1 К в диапазоне температур от -20°C до 500°C , но его спектральный диапазон ограничен длинами волн 8...14 мкм.

На рисунке 1 представлены полученные с использованием Testo 882 оптические изображения и термограммы нагретого до температуры, близкой к 90°C , наполненного водой стеклянного электрического чайника и линейной галогеновой лампы, температура нити накала которой составляет около 2400°C ⁷. Лампа и левая половина чайника в поле снимка находятся за оконным стеклом толщиной 2 мм на расстоянии 100 мм. Тепловизор регистрирует температуру стекла, в том числе и отражённое от стекла тепловое излучение от оператора с тепловизором (на рисунке 1 справа), так как его спектральный диапазон перекрывается спектральным диапазоном поглощения инфракрасного излучения оконным стеклом [3].

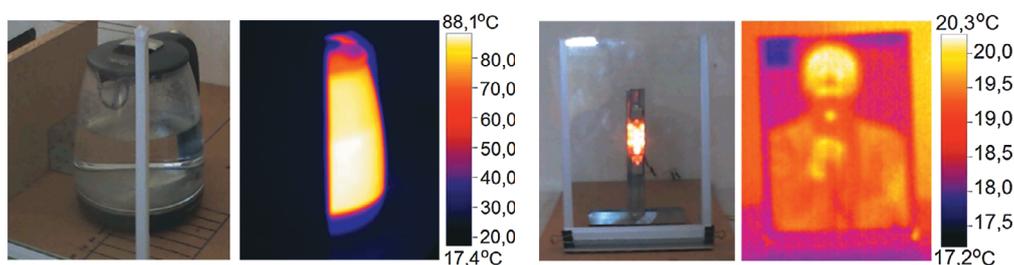


Рис. 1. Термограммы нагретого чайника и лампы накаливания, расположенных за оконным стеклом

Fig. 1. Thermograms of a heated boiler and an incandescent lamp located behind a window glass

¹ Лыков А.В. Тепло- и массообмен в процессах сушки. М. – Л.: Государственное энергетическое издательство, 1956. 464 с.

² Рогов И.А. Применение инфракрасного излучения в пищевой промышленности. М.: ЦНИИТЭИлегпищемаш, 1971. 78 с.

³ Гинзбург А.С. Инфракрасная техника в пищевой промышленности. М.: Пищевая промышленность, 1966. 407 с.

⁴ Герашенко О.А., Федоров В.Г. Тепловые и температурные измерения: Справочное руководство. К.: Наукова думка, 1965. 304 с.

⁵ Торшина И.П., Якушенок Ю.Г. Выбор приемника излучения при проектировании оптико-электронного прибора: Учебное пособие. М.: Изд-во МИИГАиК, 2017. 58 с.

⁶ Testo 882 – Тепловизор с NETD. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.testo.ru/ru-RU/testo-882-sniat-s-proizvodstva/p/0560-088> (дата обращения: 05.04.2022).

⁷ Справочная книга по светотехнике / Под ред. Ю.Б. Айзенберга. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Знак, 2006. 972 с.

Несмотря на более высокую инерционность тепловых приёмников возможность регистрации ими потока теплового излучения, имеющего непрерывный спектр, является решающим фактором для исследования проницаемости слоя влажного сельскохозяйственного сырья.

Цель исследований: разработка метода определения проницаемости влажного сельскохозяйственного сырья в процессе инфракрасного излучения, заключающегося в выборе измерительного преобразователя, разработке экспериментальной установки, методике выполнения эксперимента и обработки экспериментальных данных.

Материалы и методы. Разработан динамический метод определения интегрального теплового потока инфракрасного излучения, основанный на наблюдении во времени реакции малоинерционного измерительного преобразователя температуры (ИПТ), размещённого за слоем влажного сырья, на которое воздействует инфракрасное излучение. Метод относится к инерционным методам измерения стационарного потока теплового излучения⁴. При постоянных характеристиках ИПТ его температура пропорциональна поступающему в ИПТ потоку тепловой энергии.

ИПТ представляет собой спай термопары, полученный сваркой термоэлектродов диаметром 0,2 мм, в виде шарика диаметром около 0,3 мм или расплющенного до толщины 0,1 мм и размещённого плоскостью плочения в направлении источника излучения. Источником излучения служит линейная галогеновая лампа накаливания 1 потребляемой мощностью 150 Вт, оснащённая конусовидным зеркальным отражателем 2 (рис. 2). Подключение источника излучения к электрическому питанию осуществлено через автотрансформатор 5. В горизонтальной плоскости, отстоящей на 60 мм ниже

излучающей лампы, расположен лист бесцветного монолитного поликарбоната 3 толщиной 3 мм, под которым на расстоянии 20 мм расположены чувствительные элементы 4 (спаи термопар) блока из шести ИПТ. Для восстановления исходного теплового состояния всех элементов экспериментальной установки используются вентиляторы 6, охлаждающие установку после записи цикла нагрева ИПТ.

Для сопоставления значений проницаемости использовался метод измерения теплового потока с помощью преобразователя теплового потока (ПТП) размером 80×40×2 мм типа вспомогательной стенки [2]. Верхняя тепловоспринимающая поверхность ПТП размещена под листом поликарбоната на расстоянии 200 мм, а нижняя его часть расположена на алюминиевом холодильнике 8, охлаждаемом проточной водой.

В основу метода определения интегрального теплового потока положена одноёмкостная динамическая модель теплового состояния измерительного преобразователя температуры, испытывающего тепловое воздействие постоянного по величине потока инфракрасного излучения и естественно-конвективного теплообмена поверхности ИПТ с окружающим его воздухом⁸:

$$C \cdot \rho \cdot V \cdot \frac{dt(\tau)}{d\tau} = \alpha \cdot S \cdot (t_s - t(\tau)) + q_{\text{и}} \quad (1)$$

где C – теплоёмкость материала ИПТ, Дж/(кг · К); ρ – плотность материала ИПТ, кг/м³; V – объём чувствительного элемента ИПТ, м³; t – температура ИПТ, °С; τ – время, с; α – коэффициент конвективной теплоотдачи, Вт/(м² · К); S – площадь поверхности чувствительного элемента ИПТ, м²; t_s – температура окружающего ИПТ воздуха, °С; $q_{\text{и}}$ – тепловой поток инфракрасного излучения, Вт/м².

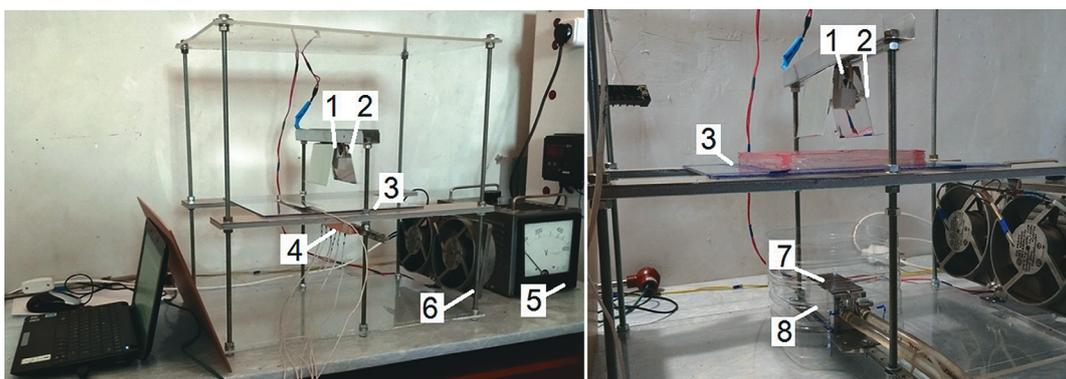


Рис. 2. Установка для определения пропускания инфракрасного излучения слоем влажного сырья:

1 – галогеновая лампа накаливания; 2 – зеркальный отражатель; 3 – лист поликарбоната; 4 – спаи термопар; 5 – автотрансформатор; 6 – вентиляторы; 7 – преобразователь теплового потока; 8 – холодильник

Fig. 2. Installation for determining the transmission of infrared radiation by a layer of wet raw materials:

1 – incandescent halogen lamp; 2 – reflector; 3 – polycarbonate sheet; 4 – thermocouple junction; 5 – autotransformer; 6 – fans; 7 – heat flux converter; 8 – cooler

⁸ Ярышев Н.А. Теоретические основы измерения нестационарной температуры. 2-е изд., перераб. Л.: Энергоатомиздат, Ленинградское отделение, 1992. 256 с.

Модель (1) не учитывает тепловой поток излучения ИПТ в окружающую среду, сток теплоты по отводящим проводам, градиент температуры в теле ИПТ, зависимость теплофизических свойств ИПТ и интенсивности теплоотдачи от температуры ИПТ. Решение уравнения (1) при $t(0) = ts$ имеет вид:

$$t(\tau) = \frac{b \cdot (1 - e^{-\tau/a}) + a \cdot c}{a};$$

$$a = \frac{\alpha \cdot S}{C \cdot \rho \cdot V}; b = \frac{q_{и}}{C \cdot \rho \cdot V}; c = ts. \quad (2)$$

Уравнение (2) показывает, что реакция ИПТ на постоянное по величине тепловое воздействие инфракрасным излучением является экспоненциальной зависимостью нагрева ИПТ от начального значения температуры ts до некоторого конечного постоянного по величине значения.

Результаты и их обсуждение. Проверка эффективности метода определения интегрального теплового потока выполнена при исследовании проницаемости инфракрасным излучением слоя воды и слоя мякоти яблока. В эксперименте изучалась очищенная питьевая вода с минерализацией не более 1 г/л и яблоки сорта Гольден-Делишес. Эксперимент включал в себя последовательное определение реакции измерительного преобразователя температуры на воздействие инфракрасного излучения для случаев, когда излучение воздействовало непосредственно на ИПТ и через лист монолитного поликарбоната толщиной 3 мм. Затем на лист поликарбоната размещали слой воды толщиной от 1 до 6 мм и мякоти яблока толщиной от 1 до 10 мм с шагом 1 мм. Количество повторений каждого опыта составляло 10. В эксперименте сигналы термпар регистрировались в персональном компьютере с частотой 4 Гц. Толщина слоя воды контролировалась инструментальной линейкой с ценой деления 0,5 мм, толщина слоя яблока измерялась штангенциркулем с ценой деления шкалы 0,1 мм. Для построения аппроксимирующих экспоненциальных зависимостей применялся метод наименьших квадратов. В результате аппроксимации получили максимальное постоянное значение температуры ИПТ и величину постоянной времени переходного процесса нагрева ИПТ ϵ , равную величине $1/a$ в формуле (2).

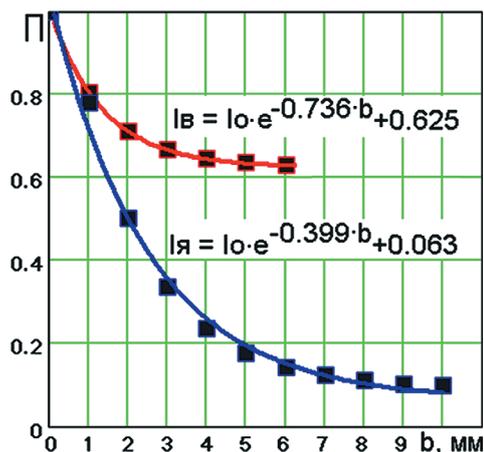
Значения проницаемости слоя воды (I_v) и слоя мякоти яблока ($I_я$), определённые с использованием формул И.А. Рогова и А.С. Гинзбурга^{2,3}, а также аппроксимирующие экспоненциальные зависимости изменения проницаемости представлены на рисунке 3. Коэффициенты показателя степени зависимостей могут рассматриваться как коэффициенты ослаблений в законе Бугера для теплового излучения с максимумом энергии при длине волны $\lambda_{max} = 0,9 \dots 1,1$ мкм (температура источника излучения – 2800...3000 К).

Для сравнения: определенная с использованием преобразователя теплового потока проницаемость

листа поликарбоната толщиной 3 мм составила $0,703 \pm 0,041$. Вторичным прибором регистрации сигнала ПТП служил цифровой милливольтметр ДТ-912 с диапазоном измерения 0...200 мВ и ценой деления шкалы измерения 0,1 мВ. В эксперименте фиксировали показания милливольтметра до включения источника излучения (галогеновой лампы) и после ее включения. Время установления выходного сигнала ПТП после включения лампы составило от 120 до 160 с. Выполнено 10 опытов, по результатам которых значение проницаемости составило $0,698 \pm 0,054$. Отличие этого значения от величины, полученной динамическим методом, не превышает 1,5%.

Для достоверного определения величины теплового воздействия измерительным преобразователем температуры продолжительность регистрации сигнала ИПТ должна быть близкой к величине $3 \cdot \epsilon^{9,10}$. Для ИПТ в виде шарика $\epsilon = 23,92$ с, а для расплюснутого зачернённого – 10,25 с.

Таким образом, для сферического ИПТ достаточная продолжительность наблюдения процесса нагрева ИПТ в эксперименте составляет около 70 с, а для зачернённого расплющенного ИПТ – не более 30 с.



Толщина слоя, мм	Проницаемость слоя воды, I_v	Проницаемость мякоти яблока, $I_я$
0,00	1	1
1,00	0,804	0,780
2,00	0,711	0,502
3,00	0,666	0,336
4,00	0,645	0,237
5,00	0,635	0,177
6,00	0,629	0,142
7,00		0,122
8,00		0,110
9,00		0,102
10,00		0,097

Рис. 3. Аппроксимация зависимости пропускания инфракрасного излучения:

P – проницаемость; b – толщина слоя, мм

Fig. 3. Approximation of the relationship of infrared radiation transmission:

P – permeability, b – thickness of the layer, mm

Выводы

Метод определения проницаемости влажного сельскохозяйственного сырья для интегрального потока инфракрасного излучения показал снижение проницаемости слоя воды с 0,804 до 0,629 при увеличении толщины ее слоя с 1 до 6 мм по экспоненциальной зависимости с коэффициентом показателя экспоненты $-0,736$. С увеличением толщины слоя мякоти яблока

с 1 до 10 мм проницаемость влажного сырья падает с 0,780 до 0,097 по экспоненциальной зависимости с коэффициентом показателя экспоненты $-0,399$. Коэффициенты показателя степени зависимостей могут рассматриваться как коэффициенты ослаблений в законе Бугера для теплового излучения с максимумом энергии при длине волны $\lambda_{\max} = 0,9 \dots 1,1$ мкм (температура источника излучения $- 2800 \dots 3000$ К).

Список использованных источников

1. Рудобашта С.П., Зуева Г.А., Зуев Н.А. Влияние термодиффузии на кинетику осциллирующей инфракрасной сушки // Известия высших учебных заведений. Серия «Химия и химическая технология». 2016. Т. 59, № 4. С. 83-87. EDN: VZVPMP.
2. Грищенко Т.Г., Декуша Л.В., Воробьев Л.И. и др. Теплометрия: теория, метрология, практика: Монография: В 3 кн. / Под ред. д-ра техн. наук Т.Г. Грищенко. Кн. 1. Методы и средства измерения теплового потока. Киев: Институт технической теплофизики НАН Украины, 2017. 438 с. <https://doi.org/10.5281/zenodo.3522597>
3. Майоров В.А. Оконные стекла – состояние и перспективы // Оптика и спектроскопия. 2018. Т. 124. Вып. 4. С. 559-573. <https://doi.org/10.21883/OS.2018.04.45759.240-17>

А.А. Завалий, Л.А. Лаго имеют на статью авторские права и несут ответственность за плагиат.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 20.10.2022; поступила после рецензирования и доработки 27.02.2023; принята к публикации 28.02.2023

References

1. Rudobashta S.P., Zueva G.A., Zuev N.A. Influence of thermal diffusion on the kinetics of oscillating infrared drying. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Series "Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya"*. 2016;59(4):83-87. (In Rus.)
2. Grishchenko T.G., Dekusha L.V., Vorobyov L.I. et al. *Thermometry: theory, metrology, practice. Monograph in three books. Ed. by DSc (Eng) T.G. Grishchenko. Book 1: Methods and Means for Measuring Heat Flow. K.: Institute of Technical Thermal Physics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2017. 438 p. (In Rus.)*
3. Mayorov V.A. Window glass – current state and prospects. *Optics and Spectroscopy*. 2018;124(4):559-573. (In Rus.) <https://doi.org/10.21883/OS.2018.04.45759.240-17>

A.A. Zavaliy, L.A. Lago have copyright on the article and are responsible for plagiarism.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests regarding the publication of this article.

Received 20.10.2023; revised 27.02.2023; accepted 28.02.2023