

ИЗМЕРИТЕЛЬНОЕ УСТРОЙСТВО ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЖИДКОЙ ФАЗЫ ДЕФЕКТНЫХ РАСТИТЕЛЬНЫХ ТКАНЕЙ КАРТОФЕЛЯ

**М. А. Петрашева, П. В. Балабанов, А. Г. Дивин,
Г. В. Мозгова, С. В. Пономарев**

*Кафедра «Мехатроника и технологические измерения»,
ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия;
kafedra@uks.tstu.ru*

Ключевые слова: выявление поврежденных тканей; измерительное устройство; режимы активного теплового неразрушающего контроля; теплофизические свойства растительных тканей овощей и фруктов.

Аннотация: Предложено измерительное устройство для определения теплофизических свойств жидкой фазы растительных тканей картофеля. Актуальность такого решения заключается в необходимости получения информации об эффективных значениях теплопроводности, теплоемкости, коэффициенте температуропроводности растительных тканей овощей и фруктов, пораженных мокрой бактериальной гнилью. Результаты измерений необходимы для определения таких режимов активного теплового неразрушающего контроля (мощности и времени), при которых разница в изменении температур поверхностей здоровых и поврежденных тканей будет не менее чем в десять раз выше порога чувствительности современных тепловизионных камер, используемых для регистрации дефектов. Это позволит гарантированно (с вероятностью более 90 %) выявлять поврежденные объекты.

Анализ и проектирование технологических процессов переработки растительных материалов, связанных с их охлаждением, замораживанием и тепловой обработкой, а также оценка качества продуктов питания из них опираются на значения характеристик теплопереноса растительных тканей овощей и фруктов. Успешное управление такими процессами зависит от знания значений теплопроводности, теплоемкости, коэффициента температуропроводности [1]. Следует заметить, что растительные ткани картофеля, пораженные фитозаболеваниями, являются, как правило, гетерогенными материалами, состоящими из растительных тканей различной структуры [2]. При поражении клубней картофеля мокрой бактериальной гнилью дефектная растительная ткань, как правило, находится в жидкой фазе. При использовании активного теплового контроля для автоматизированной разбраковки картофеля необходимо знать теплофизические характеристики жидкой фазы дефектных тканей для расчета режимных параметров (мощности теплового воздействия и его длительности), обеспечивающих температурный контраст между здоровой и поврежденной растительными тканями, надежно регистрируемый тепловизионными камерами.

Теплофизические характеристики материалов в жидкой фазе предлагается исследовать с применением измерительного устройства, конструктивная схема которого показана на рис. 1. Физическая модель и метод измерения, положенные

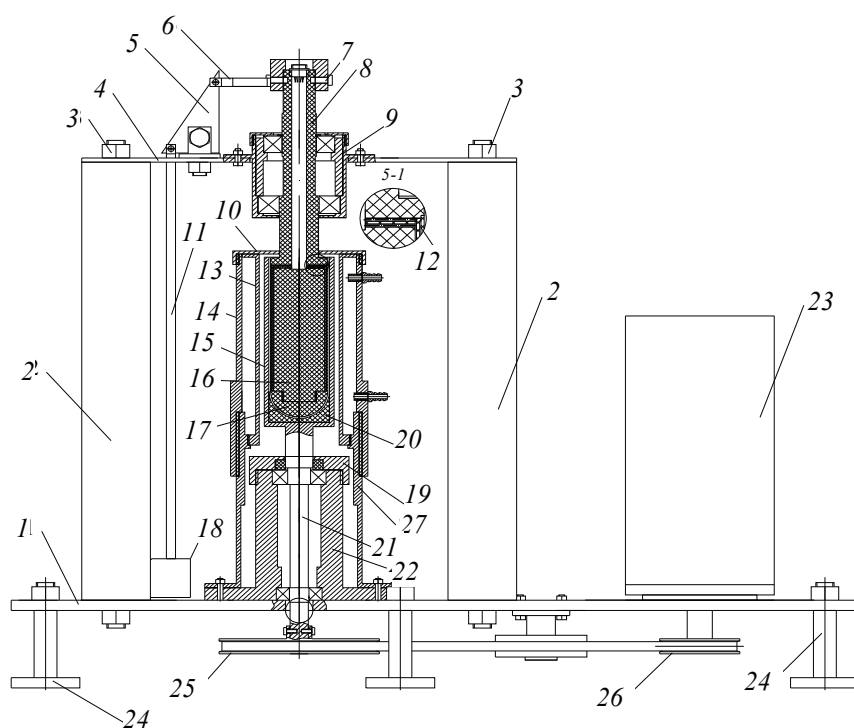


Рис. 1. Схема измерительной установки

в основу принципа действия измерительного устройства представлены в работах [3, 4]. Достоинством предлагаемого измерительного устройства является возможность определения теплофизических характеристик в условиях сдвигового течения, что особенно важно для определения режимных параметров технологических процессов переработки растительных продуктов, сопровождающихся неизотермическими течениями жидких материалов.

Основными функциональными элементами измерительного устройства являются два коаксиальных цилиндра 15 и 16, в зазоре между которыми находится исследуемая жидкость. Внешний цилиндр 15 из латуни в нижней части имеет полусферическое углубление 20. Внутренний цилиндр 16 в свою очередь имеет полусферический наконечник, радиус которого обеспечивает зазор между цилиндрами одинаковой толщины. Цилиндр 15 приводится во вращение при помощи вала 21, установленного в подшипниковом узле 22, корпус которого закрыт крышкой с сальником и закреплен на нижней стальной плите 1, снабженной опорными стойками 24. Для привода внешнего цилиндра 15 на его валу 21 установлен шкив 25, который посредством клиноременной передачи соединен со шкивом 26 шагового двигателя 23, также закрепленного на нижней стальной плите 1 и управляемого компьютером.

Вращение наружного цилиндра приводит к сдвиговому течению исследуемой жидкости 12 в зазоре. Момент, возникающий на внутреннем цилиндре 16 за счет сил вязкого трения в жидкости, через рычажную систему 6, 5, 11 передается на тензорезисторный преобразователь 18.

Корпус 16 внутреннего цилиндра выполнен из полиэфирэфиркетона, прочного и термостойкого полимера. Его вал 8 имеет отверстие, в котором размещены проводники от электрических нагревателей и термопреобразователей сопротивления. При помощи подшипников внутренний цилиндр установлен в корпусе 9,

закрепленном на верхней стальной плите 4. Верхняя 4 и нижняя 1 плиты установки соединены между собой при помощи трубных стоек 2 и шпилек с гайками 3.

Рабочая часть внутреннего цилиндра имеет два электрических нагревателя, один из которых является основным, другой – охранным. Обмотка охранного нагревателя выполнена проводом из константана и установлена во внутреннем цилиндре в сечении с радиусом 25 мм. Данная обмотка закрыта цилиндрическим слоем из полиэфирэфиркетона с внешним радиусом 26 мм. На внешней поверхности цилиндра размещена обмотка основного нагревателя. Совместно с нагревателями, в одном сечении с ними размещены обмотки термопреобразователей сопротивления из медной проволоки толщиной 0,01 мм. Витки нагревателя и термопреобразователя чередуются. Все обмотки (и нагревателей, и термопреобразователей сопротивления) выполнены бифилярно. Снаружи обмотки закрыты гильзой из алюминия.

Рабочие части внутреннего и внешнего цилиндров размещены внутри теплообменника, собранного из стальных цилиндрических оболочек 13, 14, 20 и крышки 10. Теплообменник имеет два штуцера 19 и заполнен теплоносителем – силиконовым маслом ПМС-200, которое масло отличается химической инертностью, высокими диэлектрическими свойствами, низкой летучестью, устойчивостью к окислению и термическому разложению [5].

Управление процессом проведения эксперимента и обработка данных, полученных с помощью измерительного устройства 1 (рис. 2), реализованы на базе персонального компьютера 13 через платы сбора данных 11 и 12 согласно программе, разработанной в среде LabView [3, 4]. Приведение во вращение внешнего цилиндра осуществляется посредством ременной передачи и шагового двигателя 3. Управление двигателем выполняет программа, формирующая на дискретных выходах платы сбора данных 12 импульсные сигналы, которые через блок 4 управляют пуском, остановкой, реверсом и скоростью вращения ротора двигателя. Шаговый двигатель 3 транслирует последовательность цифровых переключений, передаваемых от блока 4 в движение.

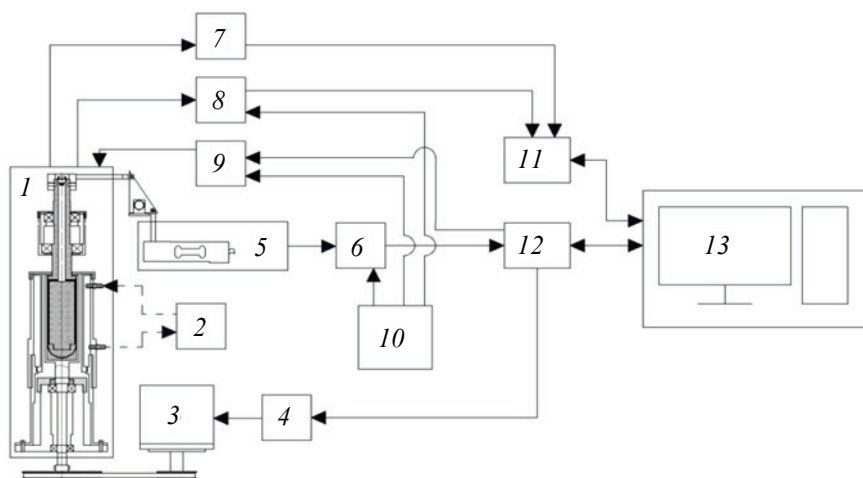


Рис. 2. Функциональная схема измерительной установки:

— — электрический сигнал; - - - - теплоноситель;

1 – измерительное устройство; 2 – термостат с силиконовым маслом; 3 – шаговый двигатель (FL130BYG); 4 – блок управления двигателем (SMD-82); 5 – тензодатчик «Токвес»; 6 – преобразователь «Токвес» TL-30; 7 – термоэлектрический преобразователь; 8 – мостовая измерительная схема; 9 – блок управления мощностью охранного нагревателя; 10 – источник питания; 11, 12 – платы сбора данных соответственно NIUSB 9162 и NIPCI; 13 – компьютер

Теплофизические свойства слоя исследуемой жидкости определяют по изменению температурного поля, вызванного влиянием нагревателя во внутреннем цилиндре на расстоянии R_1 от его оси и/или диссипацией энергии сил вязкого трения исследуемой жидкости. Температуры основного и охранный нагревателей определяются с помощью термопреобразователей сопротивления, которые включены в плечи мостовых измерительных схем 8.

Сигналы разбаланса мостовых схем поступают на аналоговые входы платы сбора данных 11 и далее в цифровом виде передаются в компьютер. В персональном компьютере программно формируется управляющий сигнал, передаваемый через плату сбора данных 12 в блок 9 и направленный на изменение напряжения охранный нагревателя с тем, чтобы его температура соответствовала температуре основного нагревателя.

В одно из плеч моста включен магазин сопротивлений в целях уравнивания мостовой схемы с термопреобразователем сопротивления, измеряющим температуру охранный нагревателя внутреннего цилиндра. Измерение температуры внутренней стенки теплообменника осуществляется с помощью термоэлектрического преобразователя 7, подключенного к аналоговому входу платы сбора данных 11. Температурный режим в измерительном устройстве задается с помощью жидкостного термостата 2 посредством прокачивания теплоносителя (масло ПМС 200) через рубашку внешнего цилиндра.

Измерение касательного напряжения в слое исследуемой жидкости обеспечивает тензорезисторный датчик силы 5 фирмы «Токвес». Вращающий момент от внешнего цилиндра передается внутреннему за счет сил «вязкого» трения. Посредством рычажной системы усилие передается на датчик 5, затем преобразуется с помощью 6 в напряжение 0...5 В и подается на аналоговый вход платы сбора данных 12. Для питания мостовых измерительных схем, блоков 6, 9 используется источник 10, имеющий два независимых выхода регулируемого постоянного напряжения или постоянного тока.

Как показал проведенный анализ, погрешность измерения теплофизических характеристик в основном имеет следующие составляющие:

- 1) инструментальная погрешность за счет ошибок, возникающих при задании геометрических параметров измерительного устройства;
- 2) методическая погрешность за счет принятия различного рода допущений, направленных на упрощение математических моделей и расчетных зависимостей.

Данные погрешности возможно уменьшить на 7 – 10 % за счет введения поправок, определенных по результатам калибровочных экспериментов с жидкостями (дистиллированная вода, глицерин, 95%-й этиловый спирт), имеющими хорошо известные свойства и приведенными в стандартах и справочной литературе [5].

Поправка в результаты измерения вводилась следующим образом:

– для теплопроводности

$$\lambda(t) = b_1(t) \lambda_{\text{изм}}(t) + b_0;$$

– для коэффициента температуропроводности

$$a(t) = k_1(t) a_{\text{изм}}(t) + k_0,$$

где $b_1(t)$, $k_1(t)$ – поправочные функции; t – температура; b_0 , k_0 – значения поправок; $\lambda_{\text{изм}}$, $a_{\text{изм}}$ – измеренные значения теплопроводности и коэффициента температуропроводности соответственно.

Таблица 1

**Результаты косвенного определения теплофизических характеристик
дистиллированной воды**

T, °C	Исследуемая величина	Результаты измерений					Среднее арифме- тическое значение	Действи- тельное значение	Δ	δ, %
		1	2	3	4	5				
25	λ, Вт/(м·К)	0,66	0,67	0,65	0,63	0,69	$\bar{\lambda} = 0,66$	$\lambda_{д} = 0,62$	$\Delta\lambda = 0,04$	$\delta\lambda = 6,71$
	$a \cdot 10^7, \text{ м}^2/\text{с}$	1,49	1,5	1,59	1,67	1,65	$\bar{a} = 1,58$	$a_{д} = 1,47$	$\Delta a = 0,11$	$\delta a = 6,96$
	$c_v \cdot 10^{-6},$ Дж/(м ³ ·К)	4,43	4,37	4,31	4,40	4,26	$\bar{c}_v = 4,35$	$c_{v д} = 4,16$	$\Delta c_v = 0,19$	$\delta c_v = 4,41$
45	λ, Вт/(м·К)	0,65	0,67	0,65	0,69	0,70	$\bar{\lambda} = 0,67$	$\lambda_{д} = 0,64$	$\Delta\lambda = 0,03$	$\delta\lambda = 4,53$
	$a \cdot 10^7, \text{ м}^2/\text{с}$	1,45	1,44	1,57	1,53	1,45	$\bar{a} = 1,49$	$a_{д} = 1,55$	$\Delta a = 0,06$	$\delta a = 4,03$
	$c_v \cdot 10^{-6},$ Дж/(м ³ ·К)	4,33	4,30	4,36	4,33	4,29	$\bar{c}_v = 4,32$	$c_{v д} = 4,13$	$\Delta c_v = 0,19$	$\delta c_v = 4,44$
75	λ, Вт/(м·К)	0,69	0,72	0,70	0,71	0,75	$\bar{\lambda} = 0,71$	$\lambda_{д} = 0,67$	$\Delta\lambda = 0,04$	$\delta\lambda = 5,84$
	$a \cdot 10^7, \text{ м}^2/\text{с}$	1,55	1,54	1,67	1,53	1,55	$\bar{a} = 1,57$	$a_{д} = 1,64$	$\Delta a = 0,07$	$\delta a = 4,46$
	$c_v \cdot 10^{-6},$ Дж/(м ³ ·К)	4,24	4,16	4,36	4,24	4,32	$\bar{c}_v = 4,26$	$c_{v д} = 4,09$	$\Delta c_v = 0,18$	$\delta c_v = 4,11$

Используя значения $\lambda(t)$ и $a(t)$ рассчитаем объемную теплоемкость исследуемого материала, Дж/(м³·К): $c_v(t) = c \rho = \lambda(t)/a(t)$, где c_v – удельная теплоемкость, Дж/(кг·К); ρ – плотность, кг/м³.

В результате, относительные погрешности измерения коэффициента температуропроводности и теплопроводности не превысили 7 % (табл. 1).

Таким образом, предложенное измерительное устройство можно использовать для измерения теплопроводности, коэффициента температуропроводности и объемной теплоемкости жидкостей, в том числе и суспензий растительного происхождения. Как известно, растительные ткани свежих овощей и фруктов, в том числе пораженные фитозаболеваниями состоят на 60 – 80 % из воды, однако в случае поражения мокрой бактериальной гнилью вода уже не находится в связанном состоянии, растительная ткань размягчается и превращается в жидкую слизистую массу. При неблагоприятных условиях хранения болезнь может полностью уничтожить весь урожай. Таким образом, использование теплового контроля, режимные параметры которого определены с учетом теплофизических характеристик растительных тканей как в твердой, так и жидкой фазах, позволяют провести разбраковку клубней картофеля, а также других овощей и фруктов.

Работа выполнена в рамках Соглашения № 14.577.21.0214 с Министерством образования и науки Российской Федерации (уникальный идентификатор RFMEFI57716X0214).

Список литературы

1. Shear Rate Dependent Thermal Conductivity Measurement of Two Fruit Juice Concentrates / S. Xu Qi Lin [et al.] // Journal of Food Engineering. – 2003. – Vol. 57, No. 3. – P. 217 – 224.

2. Пономарев, С. В. Обзор экспериментальных и численно-аналитических методов определения теплофизических характеристик гетерогенных материалов растительного происхождения / С. В. Пономарев, А. Г. Дивин, В. Сычев ; под ред. С. В. Пономарева. – Saarbrücken : Lambert Academic Publishing, 2017. – 80 с.

3. Петрашева, М. А. Нестационарный метод определения теплофизических характеристик жидких полимерных материалов при сдвиговом течении / М. А. Петрашева, А. Г. Дивин // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2013. – № 11. – С. 66 – 69.

4. Метод определения теплофизических характеристик жидких полимерных материалов при сдвиговом течении / А. Г. Дивин [и др.] // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2013. – Т. 19, № 3. – С. 500 – 505.

5. Справочник по теплопроводности жидкостей и газов / Н. Б. Варгафтик [и др.]. – М. : Энергоатомиздат, 1990. – 352 с.

A Device for Measuring Thermophysical Properties of a Liquid Phase of Defective Vegetable Potato Tissues

M. A. Petrasheva, P. V. Balabanov, A. G. Divin,
G. V. Mozgova, S. V. Ponomarev

*Department of Mechatronics and Technological Measurements,
TSTU, Tambov, Russia; kafedra@uks.tstu.ru*

Keywords: measuring device; thermophysical properties of plant tissues of vegetables and fruits; modes of active thermal non-destructive testing; detection of damaged tissues.

Abstract: A measuring device for determining thermophysical properties of the liquid phase of plant potato tissues is proposed. The urgency of this solution lies in the need to obtain information on the effective values of thermal conductivity, heat capacity, thermal diffusivity of plant tissues of vegetables and fruits affected by wet bacterial decay. The values obtained are necessary for determining such modes of active thermal non-destructive testing (power and time) in which the difference in the temperature of the surfaces of healthy and damaged tissues will be no less than ten times higher than the sensitivity threshold of modern thermal imaging cameras used for defect registration. This will allow identifying the damaged plants with a probability of more than 90 %.

References

1. Xu Qi Lin S., Chen X.D., Dong Chen Z., Bandopadhyay P. Shear Rate Dependent Thermal Conductivity Measurement of Two Fruit Juice Concentrates, *Journal of Food Engineering*, 2003, vol. 57, no. 3, pp. 217-224.

2. Ponomarev S.V., Divin A.G., Sychev V. *Obzor eksperimental'nykh i chislenno-analiticheskikh metodov opredeleniya teplofizicheskikh kharakteristik geterogennykh materialov rastitel'nogo proiskhozhdeniya* [A review of experimental and numerical-analytical methods for determining the thermophysical characteristics of heterogeneous materials of plant origin], Saarbrücken: Lambert Academic Publishing, Saarbrücken : Lambert Academic Publishing, 2017. 80 p. (In Russ.)

3. Petrasheva M.A., Divin A.G. [Nonstationary method for determining the thermophysical characteristics of liquid polymer materials under shear flow], *Pribory i sistemy. Upravlenie, kontrol', diagnostika* [Devices and systems. Management, control, diagnostics], 2013, no. 11, pp. 66-69. (In Russ., abstract in Eng.)

4. Divin A.G., Ponomarev S.V., Belyaev P.S., Petrasheva M.A., Divina D.A. [Method for determining the thermophysical characteristics of liquid polymeric

materials in the shear flow], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2013, vol. 19, no. 3, pp. 500-505. (In Russ., abstract in Eng.)

5. Vargaftik N.V., Filippov L.P., Tarzimanov A.A., Totkii E.E. *Spravochnik po teploprovodnosti zhidkosti i gazov* [Handbook on the thermal conductivity of liquids and gases], Moscow: Energoatomizdat, 1990, 352 p. (In Russ.)

Messeinrichtung zur Bestimmung der thermischen physikalischen Eigenschaften der flüssigen Phase der defekten Pflanzengewebe der Kartoffeln

Zusammenfassung: Es ist ein Messgerät für die Bestimmung der thermischen Eigenschaften der flüssigen Phase der pflanzlichen Gewebe der Kartoffeln vorgeschlagen. Die Aktualität dieser Lösung besteht in der Notwendigkeit, Informationen über die effektive Wärmeleitfähigkeit, Wärmekapazität, den Temperaturleitfähigkeitskoeffizienten der pflanzlichen Gewebe der von der nassen Bakterienfäule betroffenen Gemüse und Obst zu erhalten. Die Ergebnisse der Messungen sind notwendig, um solche aktiven thermischen zerstörungsfreien Steuerungen (Arbeitsleistung und Zeit) zu bestimmen, bei denen der Unterschied bei der Temperaturänderung der Flächen der gesunden und geschädigten Stoffe nicht weniger als zehnmal höher ist als Empfindlichkeitsgrenze der modernen Wärmebildkameras, die zur Erfassung der Defekte verwendet werden. Dies lässt zuverlässig (mit einer Wahrscheinlichkeit von mehr als 90 %) beschädigte Objekte identifizieren.

Dispositif de mesure pour la détermination des propriétés thermophysiques de la phase liquide des tissus de plante défectueuses des pommes de terre

Résumé: Est proposé un appareil de mesure pour la détermination des propriétés thermophysiques de la phase liquide les tissus de plante des pommes de terre. L'actualité d'une telle solution réside dans la nécessité d'obtenir des informations sur les valeurs efficaces de la conductivité thermique, de la chaleur spécifique, du coefficient de la conductivité thermique des tissus de plante des légumes et des fruits touchés par une pourriture bactérienne humide. Les résultats des mesures sont nécessaires pour la définition de tels régimes du contrôle actif thermique non destructif (de puissance et de temps) pour lesquels la différence dans le changement des températures des surfaces sains et ceux endommagés ne sera pas moins de dix fois au-dessus du seuil de la sensibilité des caméras thermiques modernes utilisés pour l'enregistrement des défauts. Cela permettra d'identifier avec une garantie (avec une probabilité de plus de 90 %) des objets endommagés.

Авторы: *Петрашева Мария Александровна* – аспирант кафедры «Мехатроника и технологические измерения»; *Балабанов Павел Владимирович* – доктор технических наук, доцент кафедры «Мехатроника и технологические измерения»; *Дивин Александр Георгиевич* – доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Мехатроника и технологические измерения»; *Мозгова Галина Владимировна* – кандидат технических наук, доцент кафедры «Мехатроника и технологические измерения»; *Пономарев Сергей Васильевич* – доктор технических наук, профессор кафедры «Мехатроника и технологические измерения», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.

Рецензент: *Чернышов Владимир Николаевич* – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Уголовное право и прикладная информатика в юриспруденции», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.
