

## ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ИМПУЛЬСНОГО ИСТОЧНИКА ТЕПЛА ДЛЯ КОНТРОЛЯ ВЛАЖНОСТИ РАСТИТЕЛЬНЫХ ТКАНЕЙ ЯБЛОК

**В. О. Буланова**

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

**Ключевые слова:** влажность; измерение; измерительная установка; конструкционный размер; коэффициент температуропроводности; обработка данных; растительные ткани; тепловой импульс.

**Аннотация:** Предложен способ измерения влажности растительных тканей яблок, основанный на зависимости теплопроводности и коэффициента температуропроводности материалов от их влажности. Разработана измерительная установка для определения указанных теплофизических величин методом линейного импульсного источника теплоты, применявшаяся в ходе измерений теплофизических характеристик растительных тканей яблок известной влажности. Полученные экспериментальные зависимости аппроксимированы полиномами, которые могут быть использованы для контроля содержания влаги в яблоках и экспрессной калибровки влагомеров, используемых при неразрушающих измерениях влажности и оценке степени увядания яблок.

---

Для агропромышленного комплекса страны в условиях рыночной экономики актуально решение проблемы повышения качества сельскохозяйственной продукции, эффективности ее производства и хранения. Для фруктов и овощей необходимыми условиями обеспечения качества собранного урожая на долгое время являются эффективная сортировка и поддержание заданных условий при хранении. Необходимым условием сохранности овощей и фруктов, и в частности яблок, является поддержание влажности растительных тканей на заданном уровне (за счет поддержания влажности воздуха в хранилищах на уровне 90 – 95 %), что предотвращает преждевременное увядание плодов. Не всегда пониженная влажность растительных тканей может быть обнаружена визуально или органолептическим методом (особенно на начальных стадиях), поэтому необходимы средства измерения, обеспечивающие возможность инструментального контроля данного показателя качества.

Определения влажности растительных тканей яблок возможно прямыми (как правило, весовыми) и косвенными (оптическими, теплофизическими, ультразвуковыми) методами измерения [1, 2]. Весовые методы требуют больше времени и ресурсов на контроль влажности растительных тканей яблок.

Теплофизические влагомеры отличаются простотой конструкции, а процесс измерения можно автоматизировать. При условии миниатюризации датчиков с их помощью можно определять не только интегральную влажность, но и локальные значения распределения влажности в объеме материала.

К недостаткам теплофизических влагомеров следует отнести сильное влияние плотности материала и необходимость термического контакта с чувствительным элементом. Наличие поверхностной влаги в зоне контакта может вызвать

большие погрешности. Для выполнения измерения необходим отбор пробы или введение датчика в яблоко, что делает контроль разрушающим.

Неразрушающий контроль позволяют обеспечить ультразвуковые влагомеры, основанные на зависимости характеристик ультразвуковых колебаний от свойств и состава среды (в том числе содержания влаги), в которой распространяется ультразвук. Приборы, принцип действия которых основан на поглощении ультразвука, имеют значительные дополнительные погрешности, связанные с изменением параметров генераторов, усилителей, излучателей и приемников ультразвука, а также различных параметров контролируемого объекта.

Решением данной проблемы может быть разработка измерительных комплексов с применением бесконтактных измерений на основе гиперспектральных камер, работающих в ближнем инфракрасном диапазоне, включающем длины волн, на которых наблюдаются максимумы поглощения энергии молекулами воды. Однако, как показали экспериментальные исследования, на спектрограмму растительных тканей яблок влияет не только содержание в них воды, но и сорт плода, место его произрастания, степень зрелости и ряд других характеристик. Поэтому для контроля точности измерений и экспрессной калибровки гиперспектральных камер необходим альтернативный и недорогой способ измерения влажности растительных тканей, как например, теплофизический метод измерения влажности, рассмотренный в работах [3 – 7, 9 – 13].

Теплофизические характеристики растительных тканей яблок исследованы с применением метода линейного импульсного источника теплоты. Проведенные эксперименты помогли выявить зависимость значений теплопроводности и коэффициента температуропроводности от влажности растительных тканей яблок.

Физическая модель измерительного устройства представляет собой два полуограниченных (в тепловом смысле) тела из исследуемого материала [4, 8 – 11]. Между верхним и нижним телами помещают линейный электронагреватель длиной  $L$  (выполненный в виде тонкой металлической проволоки из константана), а на расстоянии  $r$  от нагревателя в этой же плоскости размещают измеритель температуры (термоэлектрический преобразователь). Схемы и конструкции аналогичных измерительных устройств рассмотрены в работах [3 – 5, 7, 11, 12].

На основе теоретического обоснования метода линейного импульсного источника теплоты, а также рекомендаций, представленных в [9 – 12], следует, что в исследуемом материале (на расстоянии  $r$  от линейного нагревателя, в единице длины которого в течение промежутка времени  $0 < \tau < \tau_{и}$  выделилось количество теплоты  $Q_{л} = q_{л}\tau_{и}$ ) изменение температуры  $T(r, \tau)$  может быть вычислено по формуле:

$$[T(r, \tau) - T_0] = \begin{cases} -\frac{q_{л}}{4\pi\lambda} Ei(-U(\tau)) & \text{при } 0 < \tau < \tau_{и}; \\ -\frac{q_{л}}{4\pi\lambda} [Ei(-U(\tau)) - Ei(-U(\tau - \tau_{и}))] & \text{при } \tau \geq \tau_{и}, \end{cases} \quad (1)$$

где  $q_{л}$  – тепловой поток;  $T_0$  – начальная температура исследуемого материала;

$Ei(u) = \int_{-\infty}^u \frac{e^t}{t} dt = -\int_{-u}^{\infty} \frac{e^{-t}}{t} dt$  – интегральная показательная функция;  $U(\tau) = \frac{r^2}{4a\tau}$ ,

$U(\tau - \tau_{и}) = \frac{r^2}{4a(\tau - \tau_{и})}$  – безразмерные функции величин  $r$ ,  $\tau$ ,  $\tau_{и}$ ;  $\lambda$ ,  $a$  – теплопроводность и коэффициент температуропроводности соответственно.

Предлагаемая методика обработки экспериментальных данных базируется на использовании безразмерного параметра  $\gamma = \frac{T(r, \tau) - T_0}{T_{\max} - T_0}$ , который представляет

собой отношение разности температур  $[T(r, \tau) - T_0]$  (в момент времени  $\tau$ ) к максимальному значению разности температур  $[T(r, \tau) - T_0] = [T_{\max} - T_0]$  имеющему место в момент времени  $\tau = \tau_{\max}$ .

Расчетные соотношения для вычисления коэффициента температуропроводности и объемной теплоемкости имеют вид:

$$a = \frac{r^2}{4\tau'U(\tau')}; \quad c\rho = \frac{q_{\text{л}}\tau}{\pi r^2 [T(r, \tau) - T_0]} U(\tau) \left\{ Ei \left[ -U(\tau) \frac{\tau}{\tau - \tau_{\text{и}}} \right] - Ei[-U(\tau)] \right\}. \quad (3)$$

На основе представленных в [8 – 11] рекомендаций разработана и изготовлена экспериментальная установка, включенная в состав информационно-измерительной системы (ИИС) (рис. 1).

В измерительную ячейку 1 помещаются две части образца плода яблока 8, между которыми размещают термоэлектрический преобразователь 6 (термопара) типа ТХА с номинальной статической характеристикой ХА(К) и линейный нагреватель 7, выполненный в виде тонкой металлической проволоки из константана, покрытой слоем лака. Сигнал термопреобразователя 6 поступает на аналоговый вход платы сбора данных 2 типа NI USB 9211 производства National Instruments (США), имеющей АЦП разрядностью 24 бит, предназначенной для коммутации сигнала термоэлектрического преобразователя и формирования его цифрового эквивалента. Сигнал термопары регистрируется и обрабатывается с применением программного обеспечения персонального компьютера 3. Программа для обработки результатов эксперимента разрабатывалась в среде LabVIEW 2009. Управление коммутатором 5, подключающим нагреватель 7 к блоку питания 4 на заданное время осуществляется также программно.

Полученный температурный отклик обрабатывается в программе и вычисляются коэффициент температуропроводности и объемная теплоемкость исследуемого материала [9].

В качестве объектов контроля использовались образцы яблок сорта «Айдаред» (Россия) разной влажности (рис. 2). Для каждого образца получена выборка из пяти измеренных значений теплофизических характеристик. Обработка измеренных значений позволила установить границы доверительного интервала с учетом коэффициента Стьюдента [8], которые отстоят от среднего значения на величину  $\Delta a = \pm 0,16 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$  и  $\Delta \lambda = \pm 0,015 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$  соответственно для коэффициента температуропроводности и теплопроводности растительной ткани. Измеренные значения в выборке получены для одного и того же плода яблока, но при разных положениях зонда.

Время активной стадии измерения теплопроводности и коэффициента температуропроводности, а также удельной объемной теплоемкости для одного исследуемого образца не превышает одной минуты. Напряжение, подаваемое на нагревательный элемент, выбирают таким, чтобы при исследовании температура объекта повышалась не более чем на 15 К, что вполне удовлетворяет требованиям сохранности первоначальных свойств исследуемого образца.

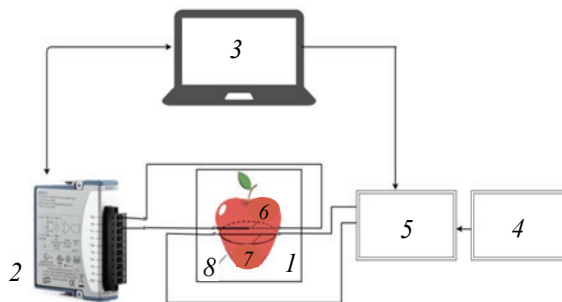
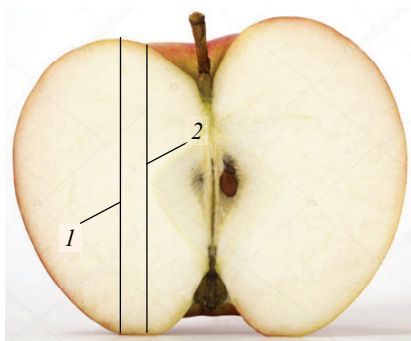


Рис. 1. Составные части экспериментальной установки, включенной в состав ИИС



**Рис. 2. Размещение термоэлектрического преобразователя и нагревателя на растительной ткани яблока:**

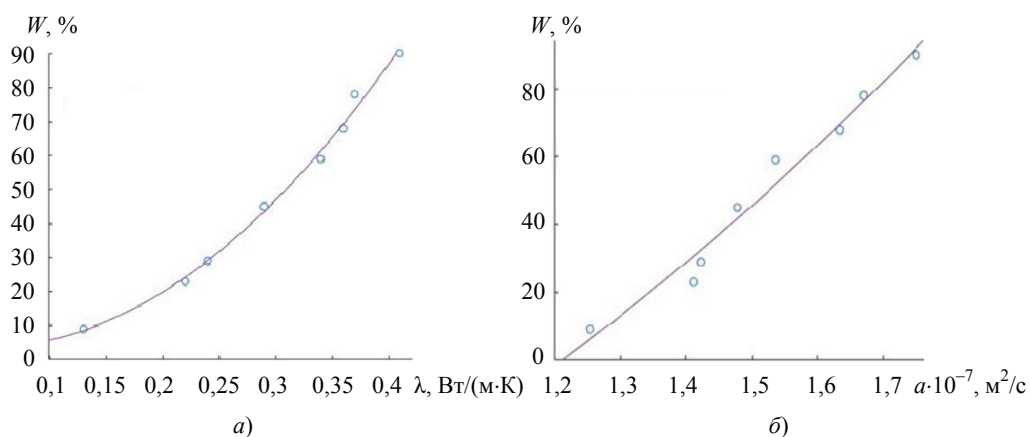
1 – линейный нагреватель; 2 – термоэлектрический преобразователь

Эксперименты с внутренней растительной тканью яблока показали, что эффективные значения теплопроводности и коэффициента температуропроводности растительной ткани яблок сорта «Айдаред» отличаются у образцов с разной влажностью. Различие теплофизических свойств тканей может быть объяснено разным содержанием в них воды.

Учитывая, что случайная погрешность измерения значения эффективной теплопроводности растительных тканей значительно меньше погрешности измерения коэффициента температуропроводности, то предпочтительно пользоваться характеристикой, представленной на рис. 3, а. В этом случае, погрешность измерения влажности не превысит 7 %. Однако подход, приведенный в работе [14], позволяет надеяться, что указанный предел относительной погрешности можно значительно уменьшить за счет учета и стабилизации влияющих величин.

Функциональная зависимость влажности  $W$ , %, от теплопроводности  $\lambda$  (рис. 3, а) может быть выражена формулой  $W = 6,4e^{2\lambda^2} - 52\lambda + 4,5$ , где  $e$  – основное натуральное логарифма; от коэффициента температуропроводности  $a$  –  $W = 52a^2 + 17a - 97$  (рис. 3, б).

Таким образом, представленная экспериментальная установка и основанная на ее использовании методика измерения влажности может быть использована как референтная методика [15] для оценки правильности измерений или для экспрессной калибровки других средств измерения, в частности гиперспектральной



**Рис. 3. Градуировочные характеристики для измерения влажности  $W$  растительной ткани яблока в зависимости от эффективных значений теплопроводности (а) и коэффициента температуропроводности (б)**

камеры SPECIMFX10, используемой для измерения влажности твердых растительных материалов. Результаты определения теплофизических характеристик растительных тканей яблок могут быть также использованы для расчета режимных параметров процесса сушки яблок, а также других процессов, связанных с переносом тепла и влаги.

*Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках проекта по Соглашению № 05.604.21.0240 от 02.12.2019. Уникальный идентификатор соглашения RFMEFI60419X0240.*

#### *Список литературы*

1. Секанов, Ю. П. Влагометрия сельскохозяйственных материалов / Ю. П. Секанов. – М. : Агропромиздат, 1985. – 160 с.
2. Раулов, Д. А. Исследование перспективных методов автоматического контроля влажности сыпучих и кусковых материалов на основе анализа современных промышленных влагомеров / Д. А. Раулов, Н. В. Аринова // Евразийское Научное Обединение. – 2017. – Т. 1, № 12 (34). – С. 59 – 62.
3. Методы определения теплопроводности и температуропроводности / А. Г. Шашков, Г. М. Волохов, Т. М. Абраменко, В. П. Козлов ; под ред. А. В. Лыкова. – М. : Энергия, 1973. – 336 с.
4. Теплофизические измерения и приборы / Е. С. Платунов, С. Е. Буравой, В. В. Курепин, Г. С. Петров ; под ред. Е. С. Платунова. – Л. : Машиностроение, 1986. – 256 с.
5. Теоретические и практические основы теплофизических измерений: монография / С. В. Пономарев, С. В. Мищенко, А. Г. Дивин, В. А. Вертоградский ; под ред. С. В. Пономарева. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2008. – 408 с.
6. Теплофизические измерения : учеб. пособие / Е. С. Платунов, И. В. Баранов, С. Е. Буравой, В. В. Курепин. – СПб. : Санкт-Петербургский государственный университет низкотемпературных и пищевых технологий, 2010. – 738 с.
7. Гуров, А. В. Экспериментальная установка для измерения теплофизических свойств теплоизоляционных материалов методом плоского «мгновенного» источника теплоты / А. В. Гуров // Метрология. – 2013. – № 4. – С. 16 – 24.
8. Зайдель, А. Н. Ошибки измерений физических величин / А. Н. Зайдель. – Л. : Наука, 1974. – 108 с.
9. Оптимизация измерений теплофизических параметров теплоизоляционных материалов методом линейного импульсного источника теплоты / С. В. Пономарев, В. О. Буланова, А. Г. Дивин, Е. В. Буланов // Метрология. – 2017. – № 2. – С. 10 – 19.
10. Установка для измерения теплофизических свойств теплоизоляционных материалов методами линейного и плоского импульсных источников теплоты / В. О. Буланова, Е. В. Буланов, С. В. Пономарев, А. Г. Дивин // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2019. – Т. 62, № 11. – С. 1022 – 1029.
11. Оптимизация измерений теплофизических свойств теплоизоляционных материалов / С. В. Пономарев, В. О. Буланова, А. Г. Дивин, Е. В. Буланов // Метрология. – 2015. – № 4. – С. 40 – 51.
12. Лыков, А. В. Теория теплопроводности / А. В. Лыков. – М. : Высшая школа, 1967. – 599 с.
13. Акулинин, И. Н. Автоматизированная система для определения зависимости теплофизических свойств твердых полимерных материалов от температуры и давления / И. Н. Акулинин, П. С. Беляев // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2010. – Т. 16, № 3. – С. 545 – 549.
14. Погрешности измерений влажности кокса методом ИК-спектроскопии / С. В. Медведевских, М. Ю. Медведевских, Л. К. Неудахина, Е. П. Собина // Аналитика и контроль. – 2006. – Т. 10, № 1. – С. 85 – 88.
15. РМГ 29-2013 ГСИ. Метрология. Основные термины и определения. – Взамен РМГ 29-99 ; введ. 2015-01-01. – М. : Стандартинформ, 2014. – 59 с.

## Using the Method of Pulsed Heat Source to Control the Moisture of Plant Tissues of Apples

V. O. Bulanova

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

**Keywords:** humidity; measurement; measuring installation; structural size; thermal diffusivity coefficient; data processing; plant tissue; heat pulse.

**Abstract:** A method for measuring the moisture of vegetable tissues of apples based on the dependence of thermal conductivity and thermal diffusivity of materials on their moisture is proposed. A measuring device was developed to determine the indicated thermophysical quantities by the linear pulsed heat source method, which was used in the course of measurements of the thermophysical characteristics of plant tissues of apples of known moisture. The obtained experimental dependences are approximated by polynomials that can be used to control the moisture content in apples and the express calibration of moisture meters used in non-destructive measurements of moisture and assess the degree of wilting of apples.

### References

1. Sekanov Yu.P. *Vlagometriya sel'skokhozyaystvennykh materialov* [Moisture measurement of agricultural materials], Moscow: Agropromizdat, 1985, 160 p. (In Russ.)
2. Raulov D.A., Arinova N.V. [Research of advanced methods for automatic control of moisture content of bulk and lump materials based on the analysis of modern industrial moisture meters], *Yevraziyskoye Nauchnoye Ob'yedineniye* [Eurasian Scientific Association], 2017, vol. 1, no. 12 (34), pp. 59-62. (In Russ.)
3. Shashkov A.G., Volokhov G.M., Abramenko T.M., Kozlov V.P., Lykov A.V. [Ed.] *Metody opredeleniya teploprovodnosti i temperaturoprovodnosti* [Methods for determining thermal conductivity and thermal diffusivity], Moscow: Energiya, 1973, 336 p. (In Russ.)
4. Platonov Ye.S. [Ed.], Buravoy S.Ye., Kurepin V.V., Petrov G.S. *Teplofizicheskiye izmereniya i pribory* [Thermophysical measurements and instruments], Leningrad: Mashinostroyeniye, 1986, 256 p. (In Russ.)
5. Ponomarev S.V. [Ed.], Mishchenko S.V., Divin A.G., Vertogradskiy V.A., Churikov A.A. *Teoreticheskiye i prakticheskiye osnovy teplofizicheskikh izmereniy: monografiya* [Theoretical and practical fundamentals of thermophysical measurements: monograph], Moscow: FIZMATLIT, 2008, 408 p. (In Russ.)
6. Platonov Ye.S., Baranov I.V., Buravoy S.Ye., Kurepin V.V. *Teplofizicheskiye izmereniya: uchebnoye posobiye* [Thermophysical measurements: a training manual], St. Petersburg: Sankt-Peterburgskiy gosudarstvennyy universitet nizkotemperaturnykh i pishchevykh tekhnologiy, 2010, 738 p. (In Russ.)
7. Gurov A.V. [Experimental setup for measuring the thermophysical properties of heat-insulating materials by the method of a planar "instant" heat source], *Metrologiya* [Metrology], 2013, no. 4, pp. 16-24. (In Russ., abstract in Eng.)
8. Zaydel A.N. *Oshibki izmereniy fizicheskikh velichin* [Errors of measurements of physical quantities], Leningrad: Nauka, 1974, 108 p. (In Russ.)
9. Ponomarev S.V., Bulanova V.O., Divin A.G., Bulanov Ye.V. [Optimization of measurements of thermophysical parameters of heat-insulating materials by the linear pulse heat source method], *Metrologiya* [Metrology], 2017, no. 2, pp. 10-19. (In Russ., abstract in Eng.)
10. Bulanova V.O., Bulanov Ye.V., Ponomarev S.V., Divin A.G. [Installation for measuring the thermophysical properties of insulating materials by linear and planar pulsed heat sources], *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Priborostroyeniye*



[Proceedings of higher educational institutions. Instrument making], 2019, vol. 62, no. 11, pp. 1022-1029. (In Russ., abstract in Eng.)

11. Ponomarev S.V., Bulanova V.O., Divin A.G., Bulanov Ye.V. [Optimization of measurements of thermophysical properties of heat-insulating materials], *Metrologiya* [Metrology], 2015, no. 4, pp. 40-51. (In Russ., abstract in Eng.)

12. Lykov A.V. *Teoriya teploprovodnosti* [Theory of thermal conductivity], Moscow: Vysshaya shkola, 1967, 599 p. (In Russ.)

13. Akulinin I.N., Belyayev P.S. [Automated system for determining the dependence of the thermophysical properties of solid polymer materials on temperature and pressure], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2010, vol. 16, no. 3, pp. 545-549. (In Russ., abstract in Eng.)

14. Medvedevskikh S.V., Medvedevskikh M.Yu., Neudachina L.K., Sobina Ye.P. [Errors of measurements of coke moisture by IR spectroscopy], *Analitika i kontrol'* [Analytics and control], 2006, vol. 10, no. 1, pp. 85-88. (In Russ., abstract in Eng.)

15. *RMG 29-2013 GSI. Metrologiya. Osnovnyye terminy i opredeleniya* [RMG 29-2013 GSI. Metrology. Key terms and definitions], Moscow: Standartinform, 2014, 59 p. (In Russ.)

---

### **Anwendung der Pulswärmequellenmethode zur Kontrolle des Feuchtigkeitsgehalts von pflanzlichen Geweben der Äpfel**

**Zusammenfassung:** Es ist eine Methode zur Messung der Feuchtigkeit von pflanzlichen Geweben der Äpfel vorgeschlagen, die auf der Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit und des Koeffizienten der Temperaturleitfähigkeit der Materialien von ihrer Feuchtigkeit basiert. Um die angegebenen thermophysikalischen Größen durch das lineare gepulste Wärmequellenverfahren zu bestimmen, ist ein Messgerät entwickelt, das im Verlauf von Messungen der thermophysikalischen Eigenschaften von pflanzlichen Geweben der Äpfel bekannter Feuchtigkeit verwendet wurde. Die erhaltenen experimentellen Abhängigkeiten sind durch Polynome angenähert, die zur Kontrolle des Feuchtigkeitsgehalts in Äpfeln und zur Expresskalibrierung der Feuchtigkeitsmessgeräte verwendet werden können, die bei zerstörungsfreien Feuchtigkeitsmessungen, und zur Beurteilung des Welkungsgrades von Äpfeln benutzt werden.

---

### **Application de la méthode de la source de chaleur pulsée pour le contrôle de l'humidité des tissus végétaux des pommes**

**Résumé:** Est proposée une méthode de la mesure de l'humidité des tissus végétaux des pommes basée sur la dépendance de la conductivité thermique et du coefficient de conductivité thermique des matériaux de leur humidité. Est mis au point un appareil de mesure pour déterminer les valeurs thermiques spécifiées par la méthode de la source de chaleur pulsée linéaire utilisée lors de la mesure des caractéristiques thermiques des tissus végétaux des pommes d'une humidité connue. Les dépendances expérimentales reçues sont approximées en fonction des polynômes qui peuvent être utilisés pour le contrôle de la teneur en humidité dans les pommes et de l'étalonnage des hygromètres utilisés lors des mesures non destructives de l'humidité et de l'évaluation du degré de l'étiollement des pommes.

---

**Автор:** *Буланова Валентина Олеговна* – аспирант кафедры «Мехатроника и технологические измерения», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.

**Рецензент:** *Беляев Павел Серафимович* – доктор технических наук, профессор кафедры «Материалы и технология», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.