

## 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

*Тамбовский государственный технический университет, 392000, Тамбов, Россия  
E-mail: kafedra@uks.tstu.ru*

Представлена установка для измерения теплофизических свойств теплоизоляционных материалов. С использованием методов линейного и плоского импульсных источников теплоты разработаны математические модели относительных погрешностей измерения объемной теплоемкости и коэффициента температуропроводности твердых материалов, создана методика определения оптимальных условий обработки экспериментальных данных, выбора основного конструкционного размера измерительных устройств и оптимальной длительности тепловых импульсов. Создано программное обеспечение информационно-измерительной системы.

**Ключевые слова:** *объемная теплоемкость, теплопроводность, температуропроводность, измерение, погрешности, минимизация, тепловой импульс, обработка данных, конструкционный размер, оптимизация*

Динамичное развитие технологий и создание новых теплоизоляционных материалов обуславливают актуальность изучения их теплофизических свойств. В настоящее время активно проводятся исследования, посвященные разработке и модернизации методик по реализации так называемых методов „мгновенных“ и импульсных источников теплоты [1—11]. Однако в традиционных методиках не уделяется должного внимания проблемам выбора оптимальных условий измерений и обработки первичной информации, рациональных конструкционных размеров применяемых измерительных устройств и действительной длительности теплового импульса [1—5, 10, 11]. Лишь в последнее время на основе рекомендаций по применению методов метрологии и теории погрешностей [3, 6, 7, 12] в работах [7—11] были рассмотрены вопросы оптимизации режимных параметров процесса измерения и рациональных конструкционных размеров измерительных устройств, что позволяет реализовать методы плоских и линейных импульсных источников теплоты.

Согласно исследованиям [8, 9], для метода плоского импульсного источника теплоты при  $\tau \geq \tau_{и}$  изменение во времени  $\tau$  температурного поля  $[T(x, \tau) - T_0]$  на некотором расстоянии  $x$  от плоского нагревателя определяется зависимостью [9]

$$T(x, \tau) - T_0 = \frac{q_c x}{\lambda} \left[ \frac{\text{ierfc}(U(\tau))}{U(\tau)} - \frac{\text{ierfc}(U(\tau - \tau_{и}))}{U(\tau - \tau_{и})} \right], \quad (1)$$

здесь  $T_0$  — начальная температура образца материала;  $q_c$  — тепловой поток, подводимый к образцу через его поверхность ( $x=0$ ) в течение интервала времени  $0 < \tau \leq \tau_{и}$ , где  $\tau_{и}$  — длитель-

ность теплового импульса;  $ierfc(z) = \int_z^\infty erfc(W) dW = \frac{1}{\sqrt{\pi}} e^{-z^2} - zerfc(z)$  — специальная функция;

$erfc(W) = 1 - erf(W)$ ;  $erf(W) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^W e^{-W^2} dW$  — функция ошибок Гаусса;  $U(\tau) = \frac{x}{2\sqrt{a\tau}}$ ,

$U(\tau - \tau_{и}) = \frac{x}{2\sqrt{a(\tau - \tau_{и})}}$  — безразмерные функции, зависящие от  $x, \tau, \tau_{и}, a$ ;  $a, \lambda$  — температура

теплопроводности и коэффициент теплопроводности материала.

На основе модели (1) с учетом введенного безразмерного параметра

$$\gamma = (T(x, \tau) - T_0) / (T_{\max} - T_0) \quad (2)$$

получены соотношения для вычисления измеряемых (искомых) значений температуропроводности

$$a = x^2 / (4\tau'(U(\tau'))^2) \quad (3)$$

и коэффициента теплопроводности

$$\lambda = \frac{q_c x}{T(x, \tau(\gamma)) - T_0} F(\gamma), \quad (4)$$

где  $x, \tau$  — пространственная координата образца и время;  $T_0$  — первоначальная температура материала (в момент времени  $\tau=0$ ), принимаемая за начало температурной шкалы в каждом эксперименте, т.е.  $T_0=0$ ;

$U(\tau') = x / (2\sqrt{a\tau'})$ ;  $F(\gamma) \equiv \Phi[U(\tau'), \tau_{и}, \tau'] = \frac{ierfc(U(\tau))}{U(\tau)} - \frac{ierfc(U(\tau - \tau_{и}))}{U(\tau - \tau_{и})}$  — значения аналитических функций в моменты времени  $\tau' = \tau'(\gamma)$ , зависящие от безразмерного параметра  $\gamma$  (см. (2)).

В соответствии с положениями теории погрешностей измерений физических величин [3, 6, 12] на основе зависимостей (3) и (4) были получены соотношения [9] для вычисления оценок среднеквадратических относительных погрешностей измерения температуропроводности

$$(\delta a)_{\text{СК}} = \sqrt{4(\delta x)^2 + \left[ \frac{\Delta T}{\tau' \{d[T(x, \tau) - T_0] / d\tau'\}} \right]^2 + \left[ \frac{1}{U'} \frac{dU'}{d\gamma} \sqrt{\gamma^2 + 1} \cdot \delta(T_{\max} - T_0) \right]^2} \quad (5)$$

и коэффициента теплопроводности

$$(\delta \lambda)_{\text{СК}} = \sqrt{(\delta q_c)^2 + (\delta x)^2 + \left[ \frac{1}{F(\gamma)} \frac{\partial F(\gamma)}{\partial \gamma} \sqrt{1 + \gamma^2} \cdot \delta(T_{\max} - T_0) \right]^2 + \left( \frac{\Delta T}{T(x, \tau) - T_0} \right)^2}, \quad (6)$$

где  $\delta x = \Delta x / x$ ,  $\delta \tau' = \frac{\Delta \tau'}{\tau'}$ ,  $\delta U(\tau') = \frac{\Delta U(\tau')}{U(\tau')}$  — относительные погрешности определения соответствующих физических величин  $x, \tau', U(\tau')$ ;  $\Delta T$  — абсолютная погрешность измерения разности температур;  $\delta(T_{\max} - T_0)$  — относительная погрешность измерения максимальной разности температур ( $T_{\max} - T_0$ ).

В процессе расчетов с использованием соотношений (5), (6) установлено следующее [9]:

— для минимизации погрешности  $(\delta a)_{\text{СК}}$  методом плоского импульсного источника теплоты обработку экспериментальных данных следует производить при  $0,45 < \gamma \leq 0,47$ ,

а основной конструктивный размер измерительного устройства (толщину  $d$  средней пластины) выбирать в пределах  $4,0 < x \leq 4,5$  мм;

— минимальные значения погрешности  $(\delta\lambda)_{\text{СК}}$  достигаются при  $0,95 < \gamma \leq 1,0$  и  $2,8 \leq x \leq 3,0$  мм;

— наименьшие суммы среднеквадратических относительных погрешностей  $[(\delta a)_{\text{СК}} + (\delta\lambda)_{\text{СК}}]$  достигаются при длительности теплового импульса  $19 < \tau_{\text{и}} < 23$  с.

Аналогично методу плоского импульсного источника теплоты были проведены исследования и разработаны рекомендации по реализации метода линейного импульсного источника теплоты, подробно рассмотренные в работах [7, 9], где было установлено следующее:

— минимальные значения погрешности  $(\delta a)_{\text{СК}}$  достигаются при  $0,41 < \gamma \leq 0,55$  и основном конструктивном размере измерительного устройства (расстоянии  $r$  между линейным нагревателем и термоэлектрическим преобразователем) в пределах  $5,4 < r \leq 6,0$  мм;

— минимальные значения среднеквадратической относительной погрешности измерения теплоемкости  $(\delta c_p)_{\text{СК}}$  достигаются при  $0,78 < \gamma \leq 0,84$  и  $4,5 \leq r \leq 5,1$  мм;

— наименьшие суммы среднеквадратических относительных погрешностей  $[(\delta a)_{\text{СК}} + (\delta c_p)_{\text{СК}}]$  достигаются при длительности теплового импульса  $18 < \tau_{\text{и}} < 24$  с.

На основе теоретического обоснования методов линейного и плоского импульсных источников теплоты, а также представленных в работах [7—11] рекомендаций была разработана и изготовлена экспериментальная установка, входящая в состав информационно-измерительной системы (ИИС).

В случае плоского источника теплоты физическая модель измерительного устройства представляет собой ячейку (рис. 1), в которую помещен образец теплоизоляционного материала, состоящий из трех пластин: нижней 2, средней 1 и верхней 3. Самые высокие требования предъявляются к точности изготовления средней пластины 1 с заданной толщиной  $d$  (плоскости верхней и нижней граней пластины 1 должны быть параллельны, а ее толщина измерена с относительной погрешностью не более 1 %). Между нижней 2 и средней 1 пластинами размещен малоинерционный плоский нагреватель 4, а между средней и верхней пластинами установлена термопара 5 из хромелевых и копелевых проводов.

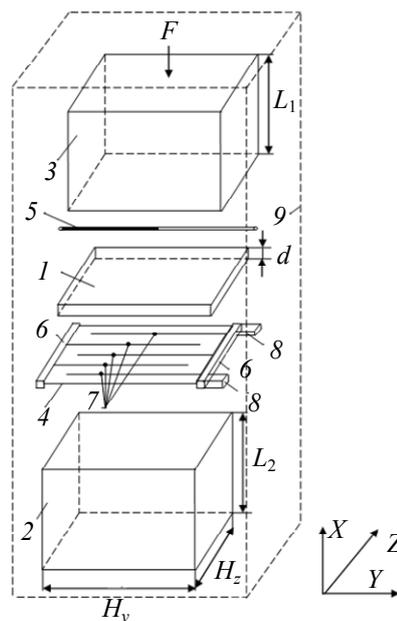


Рис. 1

Толщина  $d$  пластины  $1$  вдоль оси  $X$  выбирается в пределах от 2 до 10 мм в зависимости от теплофизических свойств исследуемого теплоизоляционного материала. Высоты  $L_2$  и  $L_3$  элементов  $2$  и  $3$  вдоль оси  $X$  должны быть порядка 60 мм. Размеры  $H_y=100$  мм и  $H_z=100$  мм всех трех пластин вдоль осей  $Y$  и  $Z$  выбираются исходя из размеров электронагревателя  $4$ , изготовленного из листа пермаллоя, закрепленного в электроизоляционных (диэлектрических) держателях  $6$ . Для получения желаемого значения электрического сопротивления  $R_n=1,5...2,0$  Ом нагревателя  $4$  (с точки зрения обеспечения нормального режима работы источника питания) в листе пермаллоя выполнены прорезы  $7$ , а крайние элементы прорезного нагревателя снабжены электрическими контактами  $8$ , к которым подключают провода. Легкосъемная теплоизоляция, условно показанная на рис. 1 штриховыми линиями  $9$ , выполнена из пенопласта в виде трех составных частей, внутренние размеры которых на 2-3 мм превышают внешние размеры (вдоль осей  $Y, Z$ ) пластин  $1, 2$  и  $3$ . Для снижения теплового сопротивления, возникающего в местах контакта (пластин  $1$  и  $2$  с нагревателем  $4$ , а также пластин  $1$  и  $3$  между собой и с термопарой  $5$ ), в конструкции измерительной ячейки предусмотрено использование груза с постоянной массой, создающего силу  $F$ .

Структурная схема разработанной информационно-измерительной системы, используемой для реализации методов плоского и линейного импульсных источников теплоты, представлена на рис. 2.

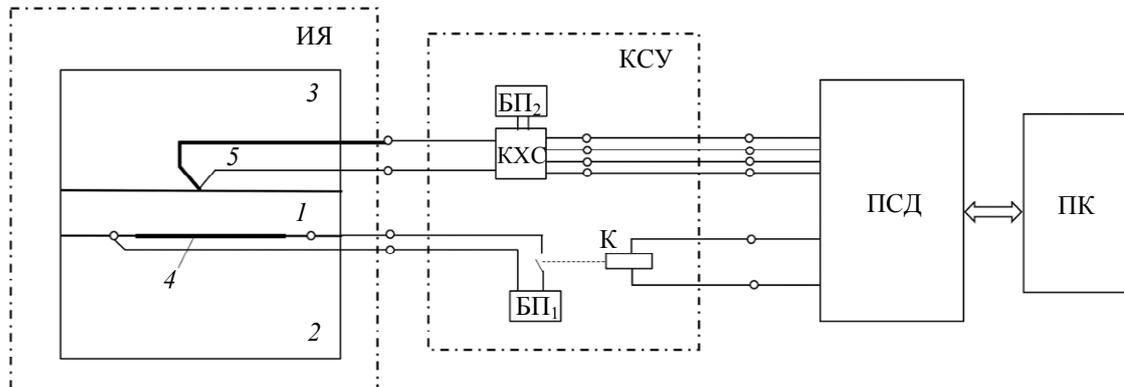


Рис. 2

В состав экспериментальной установки входят следующие блоки:

ИЯ — измерительная ячейка (см. рис. 1), описанная выше. На подготовительной стадии эксперимента нагреватель  $4$  обесточен, в момент же начала активной стадии эксперимента на нагреватель  $4$  с блока питания через контакт-реле (катушка которого подключена к дискретному выходу платы сбора данных) подается импульс постоянной мощности, действующий на интервале времени  $0 \leq \tau \leq \tau_n$ . Термопара  $5$  обеспечивает измерение температуры  $T(x_0, \tau)$  на расстоянии  $x$  от нагревателя  $4$ ; необходимо отметить, что температура  $T(x_0, \tau)$  измеряется (с абсолютной погрешностью порядка  $0,05...0,1$  °С) как на подготовительной стадии эксперимента (для контроля степени достижения установившегося, стационарного, режима работы), так и на протяжении активной стадии.

ПСД — плата сбора данных, управляемая программой, созданной в лицензионной среде LabVIEW, и используемая при проектировании, разработке и тестировании виртуальных приборов. Плата и программная среда применяются для измерения и регистрации (в персональном компьютере) первичной информации, поступающей от термопары  $5$ , а также для включения и выключения источника питания нагревателя  $4$ .

КСУ — комплект согласующих устройств, содержащий коробку холодных спаев (КХС) со встроенным интегральным датчиком температуры, промежуточное реле  $K$  и блоки питания (БП<sub>1</sub>, БП<sub>2</sub>), обеспечивающие взаимное согласование входных и выходных сигналов ИЯ и ПСД.

ПК — персональный компьютер, используемый в составе информационно-измерительной и управляющей систем.

При реализации метода линейного импульсного источника теплоты используется аналогичная информационно-измерительная система (рис. 3), однако в измерительную ячейку помещается образец, состоящий из двух частей, между которыми устанавливается измерительная пластина, в основе конструкции которой лежит использование двух тонких проволок 1 и 2 (линейного нагревателя и термоэлектрического преобразователя), натянутых на прочный, но достаточно тонкий держатель в виде каркаса 3.

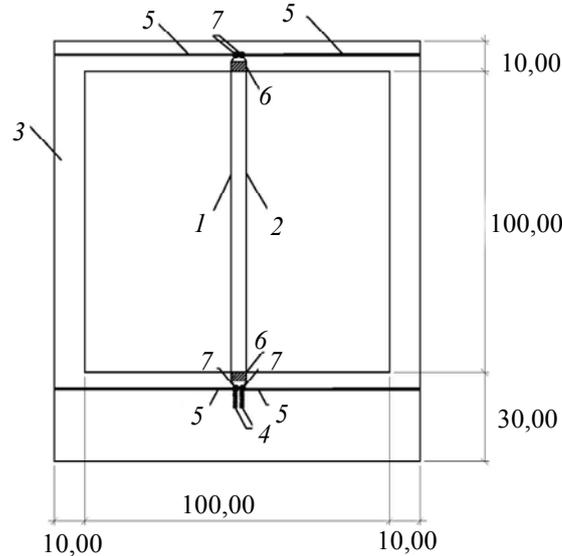


Рис. 3

Каркас держателя выполнен из диэлектрического материала (пластины текстолита) размером  $140 \times 120$  мм и толщиной 2 мм. В пластине вырезано отверстие размером  $100 \times 100$  мм, посередине которого с помощью системы пружин 4 натянуты проволоки 1 и 2. Линейный нагреватель 1, выполненный из константановой проволоки, нагревает поверхность образца при подаче на него импульса длительностью  $\tau_{и}$ , а на расстоянии  $r$  от нагревателя размещена хромель-копелевая термопара 2. Расстояние  $r$  между проволоками 1 и 2, которые припаяны с обеих сторон к изолированным медным проводам 5 большого сечения, регулируется распорами б; места спайки обозначены цифрой 7.

При разработке и изготовлении экспериментальной установки использованы предложенные ранее рекомендации по выбору оптимального значения безразмерного параметра  $\gamma$ , рационального конструкционного размера  $d$  средней пластины образца исследуемого материала (в случае плоского импульсного источника теплоты) или расстояния  $r$  между линейным нагревателем и измерителем температуры (в случае линейного импульсного источника теплоты), а также длительности  $\tau_{и}$  теплового импульса. Эти меры обеспечили снижение погрешностей измерений температуропроводности  $a$ , коэффициента теплопроводности  $\lambda$  (в случае плоского импульсного источника теплоты) и объемной теплоемкости  $c_p$  (в случае линейного импульсного источника теплоты) с 12...14 до 5...7 %.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (государственное задание; проект „Интеллектуальная информационно-измерительная и управляющая система оперативного контроля теплофизических характеристик теплоизоляционных материалов, применяемых в условиях Арктики. Разработка теоретических основ, методологии построения интеллектуальных информационно-измерительных и управляющих систем“).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Шашков А. Г., Волохов Г. М., Абраменко Т. М.* Методы определения теплопроводности и температуропроводности. М.: Энергия, 1973. 336 с.
2. *Платунов Е. С.* и др. Теплофизические измерения и приборы. Л.: Машиностроение, 1986. 256 с.
3. Теоретические и практические основы теплофизических измерений: Монография / *С. В. Пономарев, С. В. Мищенко, А. Г. Дивин* и др.: Под ред. *С. В. Пономарева*. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. 408 с.
4. Теплофизические измерения: Учеб. пособие / *Е. С. Платунов, И. В. Баранов, С. Е. Буравой, В. В. Курепин*; Под ред. *Е. С. Платунова*. СПб: СПбГУНИИТ, 2010. 738 с.
5. *Гуров А. В.* Экспериментальная установка для измерения теплофизических свойств теплоизоляционных материалов методом плоского „мгновенного“ источника теплоты // *Метрология*. 2013. № 4. С. 16—24.
6. Рекомендации по разработке методики введения поправок на систематические погрешности измерения теплофизических свойств веществ / *С. В. Пономарев, А. Г. Дивин, П. В. Балабанов* и др. // *Метрология*. 2013. № 10. С. 38—47.
7. Применение математических основ метрологии при оптимизации режимных параметров методов и основных конструктивных размеров устройств для измерения теплофизических свойств веществ: Монография / *С. В. Пономарев, А. Г. Дивин, Д. А. Любимова*; Под науч. ред. *С. В. Пономарева*. Тамбов: Изд-во ТГТУ, 2015. 160 с.
8. Оптимизация измерения 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.
9. Минимизация погрешностей измерений коэффициентов теплопроводности и температуропроводности теплоизоляционных материалов методом плоского импульсного источника теплоты / *С. В. Пономарев, Е. В. Буланов, В. О. Буланова, А. Г. Дивин* // *Измерительная техника*. 2018. № 12. С. 43—46.
10. Измерение теплофизических свойств теплоизоляционных материалов методом плоского „мгновенного“ источника теплоты: Монография / *А. В. Гуров, С. В. Пономарев*; Под науч. ред. *С. В. Пономарева*. Тамбов: Изд-во ТГТУ, 2013. 100 с.
11. *Гуров А. В.* Разработка алгоритмического и программно-технического обеспечения установки для измерения теплофизических свойств теплоизоляционных материалов методом плоского „мгновенного“ источника теплоты: Автореф. дис. ... канд. тех. наук. Тамбов, 2013.
12. *Зайдель А. Н.* Ошибки измерений физических величин. Л.: Наука, 1974. 108 с.

*Сведения об авторах*

- Валентина Олеговна Буланова** — аспирант; Тамбовский государственный технический университет, кафедра мехатроники и технологических измерений; E-mail: valyabulanova@gmail.com
- Евгений Владимирович Буланов** — аспирант; Тамбовский государственный технический университет, кафедра мехатроники и технологических измерений; E-mail: evgenbull@gmail.com
- Сергей Васильевич Пономарев** — д-р техн. наук, профессор; Тамбовский государственный технический университет, кафедра мехатроники и технологических измерений; E-mail: svronom@yahoo.com
- Александр Георгиевич Дивин** — д-р техн. наук, доцент; Тамбовский государственный технический университет, кафедра мехатроники и технологических измерений; заведующий кафедрой; E-mail: agdv@yandex.ru

Поступила в редакцию  
10.09.19 г.

**Ссылка для цитирования:** Буланова В. О., Буланов Е. В., Пономарев С. В., Дивин А. Г. Установка для измерения теплофизических свойств теплоизоляционных материалов методами линейного и плоского импульсных источников теплоты // *Изв. вузов. Приборостроение*. 2019. Т. 62, № 11. С. 1022—1029.

**INSTALLATION FOR MEASURING THERMOPHYSICAL PROPERTIES  
OF HEAT-INSULATING MATERIALS  
BY METHODS OF LINEAR AND PLANAR PULSED HEAT SOURCES**

**V. O. Bulanova, E. V. Bulanov, S. V. Ponomarev, A. G. Divin**

*Tambov State Technical University, 392000, Tambov, Russia  
E-mail: kafedra@uks.tstu.ru*

An installation for measurement of thermophysical properties of heat-insulating materials is presented. Using the methods of linear and planar pulsed heat sources, mathematical models of relative errors in the measurement of bulk heat capacity and the coefficient of thermal conductivity of solid materials are developed, a method for determining the optimal conditions for processing experimental data, choosing the main structural size of measuring devices and the optimal duration of thermal pulses is created. A software of information-measuring system is described.

**Keywords:** bulk heat capacity, thermal conductivity, temperature conductivity, measurement, errors, minimization, heat pulse, data processing, structural size, optimization

**REFERENCES**

1. Shashkov A.G., Volokhov G.M., Abramenko T.M. *Metody opredeleniya teploprovodnosti i temperaturoprovodnosti* (Methods for Determining Thermal Conductivity and Thermal Diffusivity), Moscow, 1973, 336 p. (in Russ.)
2. Platonov E.S. et al. *Teplofizicheskiye izmereniya i pribory* (Thermophysical Measurements and Devices), Leningrad, 1986, 256 p. (in Russ.)
3. Ponomarev C.B., Mishchenko C.B., Divin A.G. et al. *Teoreticheskiye i prakticheskiye osnovy teplofizicheskikh izmereniy* (Theoretical and Practical Foundations of Thermophysical Measurements), Moscow, 2008, 408 p. (in Russ.)
4. Platonov E.S., Baranov I.V., Buravoi S.E., Kurepin V.V. *Teplofizicheskiye izmereniya* (Thermophysical Measurements), St. Petersburg, 2010, 738 p. (in Russ.)
5. Gurov A.V. *Measurement Techniques*. 2013, no. 4, pp. 16–24. (in Russ.)
6. Ponomarev S.V., Divin A.G., Balabanov P.V. et al. *Measurement Techniques*, 2013, no. 10, pp. 38–47. (in Russ.)
7. Ponomarev S.V., Divin A.G., Lyubimova D.A. *Primeneniye matematicheskikh osnov metrologii pri optimizatsii rezhimnykh parametrov metodov i osnovnykh konstruktsionnykh razmerov ustroystv dlya izmereniya teplofizicheskikh svoystv veshchestv* (The Use of the Mathematical Foundations of Metrology in Optimizing the Operational Parameters of Methods and the Main Structural Dimensions of Products for Measuring the Thermophysical Properties of Substances), Tambov, 2015, 160 p. (in Russ.)
8. Ponomarev S.V., Bulanova V.O., Divin A.G., Bulanov E.V. *Measurement Techniques*, 2017, no. 2, pp. 10–19. (in Russ.)
9. Ponomarev S.V., Bulanov E.V., Bulanova V.O., Divin A.G. *Measurement Techniques*, 2018, no. 12, pp. 43–46. DOI: 10.32446/0368-1025it.2018-12-43-45 (in Russ.)
10. Gurov A.V., Ponomarev S.V. *Izmereniye teplofizicheskikh svoystv teploizolyatsionnykh materialov metodom ploskogo "mgnovennogo" istochnika teploty* (Measurement of Thermophysical Properties of heat-Insulating Materials by the Method of a Planar "Instant" Heat Source), Tambov, 2013, 100 p. (in Russ.)
11. Gurov A.V. *Razrabotka algoritmicheskogo i programmno-tekhnicheskogo obespecheniya ustanovki dlya izmereniya teplofizicheskikh svoystv teploizolyatsionnykh materialov metodom ploskogo "mgnovennogo" istochnika teploty* (Development of Algorithmic, Software and Hardware Support for the Installation for Measuring the Thermophysical Properties of Heat-Insulating Materials by the Method of a Flat "Instant" Heat Source), Extended abstract of Candidate's thesis, Tambov, 2013. (in Russ.)
12. Zaydel' A.N. *Oshibki izmereniy fizicheskikh velichin* (Errors of Measurement of Physical Quantities), Leningrad, 1974, 108 p. (in Russ.)

**Data on authors**

- |                              |   |
|------------------------------|---|
| <b>Valentina O. Bulanova</b> | — Post-Graduate Student; Tambov State Technical University, Department of Mechatronics and Technological Measurements; E-mail: valyabulanova@gmail.com                        |
| <b>Evgeny V. Bulanov</b>     | — Post-Graduate Student; Tambov State Technical University, Department of Mechatronics and Technological Measurements; E-mail: evgenbull@gmail.com                            |
| <b>Sergey V. Ponomarev</b>   | — Dr. Sci., Professor; Tambov State Technical University, Department of Mechatronics and Technological Measurements; E-mail: svponom@yahoo.com                                |
| <b>Alexander G. Divin</b>    | — Dr. Sci., Associate Professor; Tambov State Technical University, Department of Mechatronics and Technological Measurements; Head of the Department; E-mail: agdv@yandex.ru |

**For citation:** Bulanova V. O., Bulanov E. V., Ponomarev S. V., Divin A. G. Installation for measuring thermophysical properties of heat-insulating materials by methods of linear and planar pulsed heat sources. *Journal of Instrument Engineering*. 2019. Vol. 62, N 11. P. 1022—1029 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2019-62-11-1022-1029