

ЕТАЛОНУВАННЯ ВИЗНАЧЕННЯ ТЕПЛОПРОВІДНОСТІ ТЕПЛОІЗОЛЯЦІЙНИХ БУДІВЕЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ

Бурова З.А., Декуша Л.В., Воробйов Л.Й., Грищенко Т.Г., Декуша О.Л.

Інститут технічної теплофізики Національної академії наук України
м. Київ, Україна

АННОТАЦІЯ: Представлено теоретичні засади та результати досліджень щодо створення відсутнього в Україні робочого еталону теплопровідності в діапазоні від 0,02 Вт/(м·К) до 1,5 Вт/(м·К) за температури від 250 К до 400 К.

АННОТАЦИЯ: Представлены теоретические основы и результаты исследований по созданию отсутствующего в Украине рабочего эталона теплопроводности в диапазоне от 0,02 Вт/(м·К) до 1,5 Вт/(м·К) при температуре от 250 К до 400 К.

ABSTRACT: Theoretical bases and results of researches about creation of the heat conductivity working standard in a range from 0,02 V/(m·K) to 1,5 V/(m·K) at a temperature from 250 K to 400 K, which is absent in Ukraine, are presents.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: теплоізоляційні матеріали, теплопровідність, похибка вимірювань, еталон.

Теплопровідність є основною теплофізичною характеристикою теплоізоляційних матеріалів, які використовують в енергетиці, будівництві та промисловості, головним показником їх якості, що є важливим в рамках програм ресурсо- та енергозбереження. Найбільш поширеними на ринку України є волокнисті та спінені теплоізоляційні матеріали – мінеральна або скловата, пінополістирольні та пінополіуретанові плити. Оскільки такі теплоізоляційні матеріали є негомогенними, тобто включають волокна, порожнини тощо, відповідно до діючих стандартів [1 – 3] розміри дослідних зразків таких матеріалів повинні бути не менше 300×300 мм або Ø250 мм, при цьому похибка вимірювання їх коефіцієнтів теплопровідності не повинна перевищувати ±3%.

Створенням апаратури для визначення коефіцієнта теплопровідності теплоізоляційних матеріалів займаються в багатьох розвинутих країнах. І в Європі, і в Америці багато уваги приділяється метрологічному забезпеченню вимірюванням коефіцієнта теплопровідності. Сертифікованими еталонними мірами (SRM або CRM) та робочими еталонами (TS) теплопровідності у світовій практиці метрологічного забезпечення низькотеплопровідної області у середньому температурному діапазоні є пінополістирольні та скловолокнисті плити. Провідні світові лабораторії, зокрема, Національна фізична лабораторія (NPL) Великобританії та Національний інститут стандартизації (NIST), США, сертифікують такі матеріали на зразках великих розмірів згідно вимог діючих міжнародних стандартів [1, 2].

В Росії після кількох років досліджень введено новий еталон теплопровідності та оновлений стандарт [4]. У складі Російського Державного еталону перебувають три еталонні установки, в тому числі середньотемпературна установка А1, яка забезпечує відтворення одиниці теплопровідності та передавання її розміру методом прямих вимірювань від 0,02 Вт/(м·К) до 0,2 Вт/(м·К) за температури віднесення від 250 К до 350 К. До складу державного еталону Росії входить також комплект мір теплопровідності, в тому числі традиційні однозначні та спеціально розроблена регульована багатозначна міра, яка дозволяє застосувати неперервний метод відтворення одиниці теплопровідності [5].

В Україні вимірювання коефіцієнта теплопровідності теплоізоляційних будівельних матеріалів як на імпортному обладнанні, так і на приладах власної розробки проводиться, на жаль, без належного метрологічного забезпечення у зв'язку з відсутністю відповідної еталонної бази. Так в ІТТФ НАН України розроблено та виготовлено робочий засіб для вимірювання коефіцієнта теплопровідності – установку ИТ-7С для дослідження теплоізоляційних матеріалів [6], яка відповідає вимогам діючих стандартів та впроваджена у провідних випробувальних та сертифікаційних центрах, у тому числі, в ДП «Укрметртестстандарт» та ДП «НДІБК». При проведенні метрологічної атестації цієї установки традиційним методом порівняння з еталонними мірами неможливо забезпечити необхідну згідно стандартам [1, 3] похибку $\pm 3\%$, адже такою є похибка самої міри, тому було розроблено методику її атестації методом непрямих вимірювань з використанням спеціального градуювального нагрівника та еталонного термоперетворювача опору. Інакше, якщо слідувати Державній повірній схемі, передавання розміру одиниці вимірювання теплопровідності робочим засобом вимірювання з похибкою $\pm(2 - 5)\%$, згідно міжнародного стандарту [4], проводять безпосередньо від еталону, і на практиці це означає, що кожний засіб вимірювання для підтримання необхідної точності повинен проходити атестацію та періодичні перевірки у ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева», м. Санкт-Петербург, Росія.

Таким чином, провівши вивчення та аналіз існуючих закордонних еталонів та приладів для вимірювання коефіцієнта теплопровідності, створивши власну установку та розробивши методику її атестації, в ІТТФ були зроблені подальші кроки щодо вирішення питання метрологічного забезпечення теплотричних вимірювань. В рамках робіт з узгодження нормативної бази в ІТТФ НАН України гармонізовано з міжнародними низку національних стандартів, що регламентують теплотричний метод вимірювання коефіцієнта теплопровідності [1] і метод гарячої пластини [2], та з метою вибору принципової схеми еталонної установки проведено ґрунтовний аналіз схем обох методів, їх переваг і недоліків.

Зокрема, виконано теоретичне оцінювання можливої тривалості виходу показів приладів на стаціонарний режим вимірювань. Для цього проведено аналітичне дослідження функції відношення поточних значень вимірюного коефіцієнта тепло провідності до його сталого значення $\lambda_{\text{вим}}/\lambda_0 = f(\tau)$. При цьому були використані готові аналітичні рішення рівняння теплопровідності [7] за відповідних граничних умов.

Для приладів із захищеною гарячою пластиною в симетричному виконанні функція виходу на стаціонарний тепловий режим має вигляд:

$$\lambda_{\text{вим}}/\lambda_0 = f(\tau) = f(Fo), \quad (1)$$

де $Fo = a \cdot \tau / h_{\text{зр}}^2$ – число Фур'є;

a – температуропровідність матеріалу зразка;

τ – час;

$h_{\text{зр}}$ – товщина зразка.

Для теплометричних приладів, зібраних по асиметричній схемі, коли тепломір розташовано зверху або знизу зразка, або по симетричній схемі з двома тепломірами, функція виходу на стаціонарний тепловий режим має вигляд:

$$\lambda_{\text{ВИМ}}/\lambda_0 = f(Fo, Bi), \quad (2)$$

де $Bi = h_{\text{ЗР}} \cdot \alpha/\lambda = h_{\text{ЗР}}/(\lambda_0 \cdot R_{\text{ПТП}})$ – число Біо;

$R_{\text{ПТП}}$ – радіус тепломіра – перетворювача теплового потоку (ПТП).

Результати розрахунків представлені графічно на рис. 1.

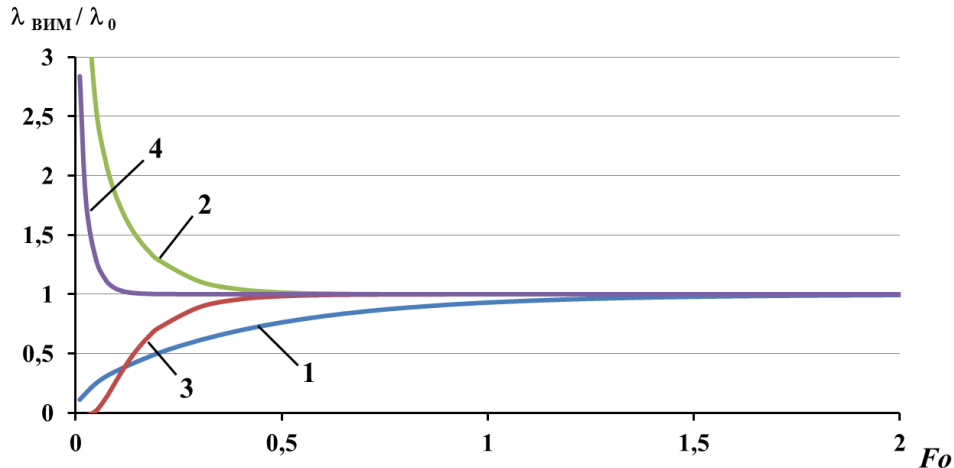


Рис.1. Функції виходу на стаціонарний режим приладів за методом гарячої пластини (1), теплометричним за асиметричною схемою – ПТП зверху (2) і ПТП знизу (3), і за симетричною схемою (4)

Як бачимо, симетрична схема теплометричного методу дає найбільший вигреш у часі, отже саме цю схему обрано для подальших досліджень.

Для оцінення методичних похибок вимірювання коефіцієнта теплопровідності теплометричним методом для обраної симетричної схеми теплового блоку вирішено задачу теплообміну в системі тіл «ПТП – зразок – ПТП», розміщеною між двома ізотермічними поверхнями, якими служать поверхні металевих корпусів нагрівника і холодильника, що контактують із зразком, модель якої приведено на рис. 2.

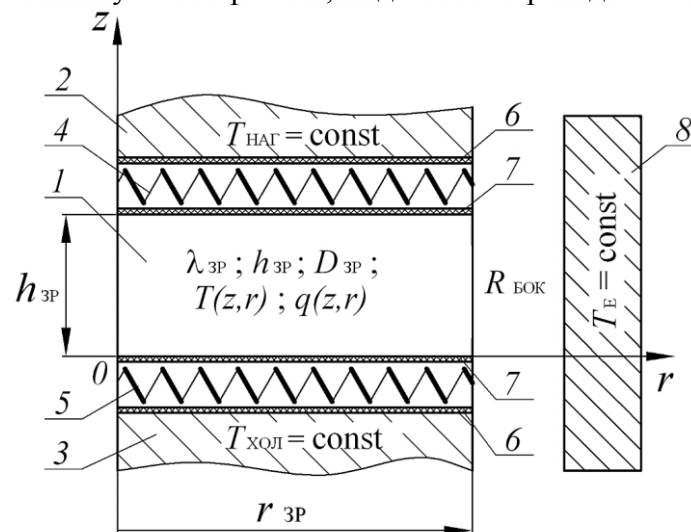


Рис. 2. Модель теплообміну в системі «ПТП – зразок – ПТП»: 1 – зразок, 2 – нагрівник, 3 – холодильник, 4, 5 – ПТП; 6, 7 – прошарки контактного теплового опору, 8 – теплозахисний екран

Визначення стаціонарного температурного поля в циліндричному зразку за описаних умов і допущенні про незалежність теплофізичних властивостей ПТП від температури за наявності осової симетрії зведено до вирішення відомого стаціонарного рівняння теплопровідності (3) за граничних умов III-го роду [8, 9] (4):

$$\frac{\partial^2 T(z, r)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial T(z, r)}{\partial r} + \frac{\partial^2 T(z, r)}{\partial z^2} = 0 \quad (3)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \lambda_{3P} \frac{\partial T(z, r)}{\partial z} = \frac{1}{R_{ПТП_1}} (T_{НАГ} - T(z, r)) \quad \text{при } z = h_{3P}, \\ \lambda_{3P} \frac{\partial T(z, r)}{\partial z} = \frac{1}{R_{ПТП_2}} (T(z, r) - T_{ХОЛ}) \quad \text{при } z = 0, \\ \lambda_{3P} \frac{\partial T(z, r)}{\partial z} = \alpha_{БОК} \cdot (T_E - T(z, r)) \quad \text{при } r = r_{ПТП}, \\ \frac{\partial T(z, r)}{\partial z} = 0 \quad \text{при } r = 0. \end{array} \right. \quad (4)$$

Задачу вирішено у безрозмірних координатах $\zeta = z/h_{3P}$ і $\rho = r/r_{3P}$ для температури, безрозмірну форму якої задано рівнянням $\theta(\zeta, \rho) = (T(z, r) - T_E)/T_E$. При цьому прийнято, що теплосприймальна поверхня зразка (переріз $z = h_{3P}$) має температуру, що дорівнює температурі екрану $T_{НАГ} = T_E$, а поверхня тепловіддачі (переріз $z = 0$) підтримується при нульовій температурі $T_{ХОЛ} = 0$. Відповідні значення температури в безрозмірній формі мають у такому разі наступні значення: $\theta_1(1, \rho) = 0$ та $\theta_2(0, \rho) = -1$. В результаті отримано функцію приведенної густини теплового потоку, яка має вигляд [10]:

$$\frac{q_{СЕР}(\zeta, \rho)}{q_0} = \frac{4}{D_{3P}/h_{3P}} \cdot (1 + 2R_{ПТП}/R_{3P}) \cdot \frac{Bi_{БОК}}{R_{ПТП}/R_{3P}} \cdot \sum_{n=1}^{\infty} B_n \cdot \frac{J_1(v_n \rho)}{v_n \rho} \cdot P_n(\zeta), \quad (5)$$

де $Bi_{БОК} = r_{3P} \cdot \alpha_{БОК} / \lambda_{3P} = r_{3P} / (R_{БОК} \cdot \lambda_{3P})$ – число Біо, що характеризує теплообмін по боковій поверхні зразка.

У даному дослідженні до чинників впливу віднесені:

- співвідношення розмірів дослідного зразка D_{3P}/h_{3P} ,
- відношення теплового опору ПТП і зразка $R_{ПТП}/R_{3P}$,
- умови теплообміну по боковій поверхні зразка.

Розрахунки виконано для двох варіантів режиму термостатування екрану: коли $T_E = T_{НАГ}$ (або $T_E = T_{ХОЛ}$) та при $T_E = 0,5 \cdot (T_{НАГ} + T_{ХОЛ})$. Порівняльний аналіз отриманих результатів, що представлені сімействами графіків на рис. 3, при різних варіаціях чинників впливу дозволив обрати такий режим термостатування екрану, при якому похибка визначення приведенної густини теплового потоку на порядок менша, а зона незбуреного теплового потоку ширша. Це режим, при якому температура екрану дорівнює напівсумі значень температури нагрівника і холодильника, і саме його доцільно обрати для еталонної установки.

Для аналізу критеріїв вибору геометричних розмірів дослідних зразків і використаних ПТП за формулою (5) виконано розрахунок значень відношення $q_{СЕР}/q_0$ при фіксованих значеннях бокового теплового опору $R_{БОК} = 1 \text{ м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$, теплового опору ПТП $R_{ПТП} = 0,01 \text{ м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$ для зразка теплоізоляційного матеріалу з коефіцієнтом теплопровідності $\lambda_{3P} = 0,03 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ при варіації геометричного параметру зразка

$D_{зр}/h_{зр} = 3; 4; 5; 10; 20$ для обраного режиму бокового термостатування $T_E = 0,5 \cdot (T_{наг} + T_{хол})$. Результати розрахунків, представлені сімействами графіків на рисунку 4, підтверджують вимоги до розмірів дослідних зразків і чутливої зони ПТП, регламентовані діючими стандартами [1, 3].

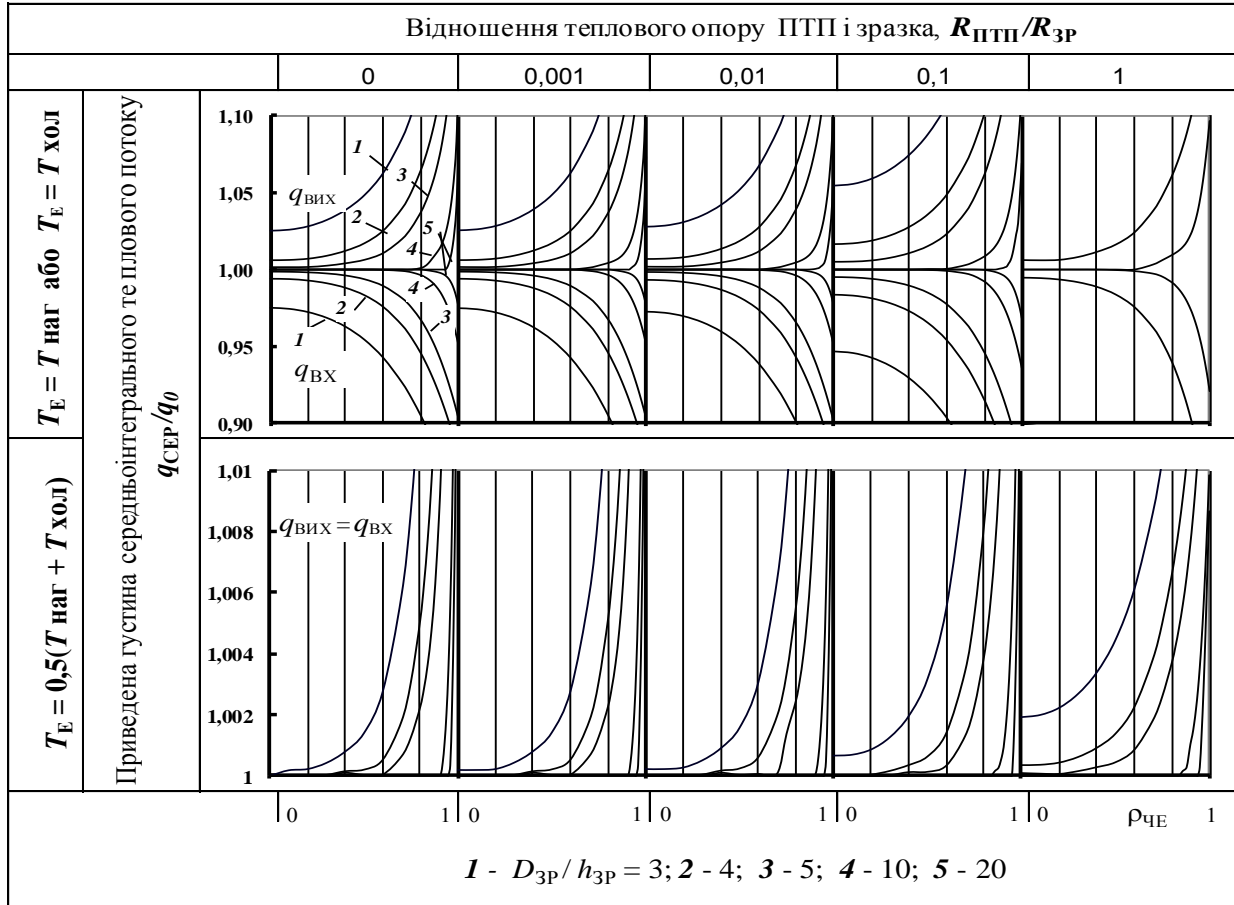


Рис. 3. Приведена густина середньоінтегрального теплового потоку на вході ($q_{вх}$) і виході ($q_{вих}$) зразка для двох режимів термостатування екрану

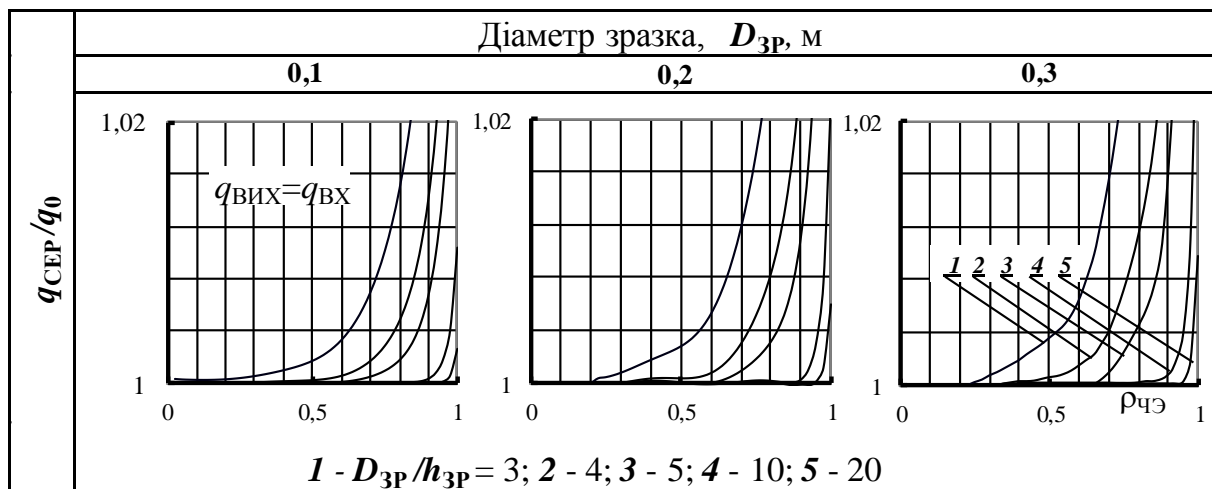


Рис. 4. Розподіл приведеної густини середньоінтегрального теплового потоку в залежності від геометричних параметрів зразка і ПТП

На практиці це означає, що при необхідному за стандартами розмірі зразка 300×300 мм його товщина може досягати 100 мм ($D_{3p}/h_{3p} \geq 3$) без втрати точності вимірювання за умови, що $\rho_{\text{ЧЕ}} = D_{\text{ПТП}}/D_{3p} = 0,2\dots 0,4$, тобто діаметр чутливої зони ПТП має бути в межах від 60 мм до 120 мм [10].

Симетрична схема теплотричного методу, обрана для еталонної установки, передбачає застосування двох ідентичних тепломірів. З метою максимального зменшення похибки вимірювань було виконане дослідження особливостей вибору теплотричних та конструктивних характеристик ПТП для установки вищої точності [11]. В результаті основою вимірювальних теплотричних блоків обрано ПТП на основі пари константан-нікель, оскільки для цієї пари матеріалів характерна висока температурна і часова стабільність внаслідок незначної температурної залежності коефіцієнтів перетворення.

Отже, результати проведених теоретичних досліджень дозволили оцінити складові похибки вимірювання коефіцієнта теплопровідності та шляхи їх зменшення, а також підібрати такі співвідношення геометричних та теплових параметрів установки, щоб джерела методичних похибок були практично відсутні.

Для визначення індивідуальних функцій перетворення первинних перетворювачів теплового потоку та температури, що входять до складу теплового блоку установки, розроблено методику, апробовану на робочому засобі вимірювання, з використанням спеціального електричного нагрівника для ПТП та платинового перетворювача температури ПТ-100 – еталона 3-го розряду [6]. Такий індивідуальний підхід забезпечує більшу точність вимірювання відповідних параметрів.

На основі результатів розрахунків передбачена похибка еталонних мір теплопровідності складатиме 2...2,5%, а атестація робочих засобів вимірювання безпосередньо на еталоні забезпечить їх похибку на рівні 3%.

ВИСНОВКИ

Результати теоретичних досліджень та багаторічний досвід теплотричних вимірювань доводить можливість створення в ІТТФ НАНУ відсутнього в Україні робочого еталону теплопровідності в діапазоні від 0,02 Вт/(м·К) до 1,5 Вт/(м·К) за температури від 250 К до 400 К. Це дозволить забезпечити необхідну точність та єдність вимірювання коефіцієнта теплопровідності теплоізоляційних матеріалів в Україні.

ЛІТЕРАТУРА

- 1 Теплоізоляція. Визначення теплового опору та пов'язаних із ним характеристик в ustalеному режимі приладом із перетворювачем теплового потоку: ДСТУ ISO 8301:2007 (ISO 8301:1991, IDT).
- 2 Теплоізоляція. Визначення теплового опору та пов'язаних з ним характеристик в ustalеному режимі приладом із захищеною гарячою пластиною: ДСТУ ISO 8302:2008 (ISO 8302:1991, IDT).
- 3 Матеріали та вироби будівельні. Метод визначення теплопровідності і термічного опору при стаціонарному тепловому режимі: ДСТУ Б В.2.7-105-2000 (ГОСТ 7076-99).
- 4 Государственная система обеспечения единства измерений. Государственная поверочная схема для средств измерений теплопроводности твердых тел в диапазоне от 0,02 до 20 Вт/(м·К) при температуре от 90 до 1100 К: ГОСТ 8.140-2009
- 5 Соколов Н.А. Новый класс приборов: многозначные меры теплопроводности / Н. А. Соколов // Измерительная техника. – 2006. – №4. – С. 50-53.
- 6 Установка для вимірювання коефіцієнта теплопровідності будівельних матеріалів / [З. Бурова, Л. Воробйов, Л. Декуша, О. Декуша] // Метрологія та прилади. – 2009. – № 6. – С. 15-19.
- 7 Пехович, А.И. Расчеты теплового режима твердых тел / А.И. Пехович, В. М. Жидких. – Л.: Энергия, 1976. – 352 с.
- 8 Лыков А.В. Теория теплопроводности / А.В. Лыков – М.: Высшая школа, 1967. – 599 с.

- 9 Карслоу Г. Теплопроводность твердых тел / Г. Карслоу, Д. Егер. – М.: Наука, 1964. – 489 с.
- 10 Методические погрешности измерения коэффициента теплопроводности материалов на установке ИТ-7С / [З.А. Бурова, Л.И. Воробьев, Л.В. Декуша, Т.Г. Грищенко] // Промышленная теплотехника: Международный научно-прикладной журнал.– Киев, 2013. – Т.35. – №2. – С.96-103.
- 11 Особенности конструирования преобразователей теплового потока для приборов для определения теплопроводности по ДСТУ ISO 8301:2007 / [З. А. Бурова, Л. И. Воробьев, Т. Г. Грищенко та ін.] // Будівельні конструкції: зб. наук. праць. – Вип. 77. – К.: ДП НДІБК, 2013. – С.349-354.

REFERENCES

- 1 Thermal insulation – Determination of steady-state thermal resistance and related properties – Heat flow meter apparatus: ISO 8301:1991.
- 2 Thermal insulation – Determination of steady-state thermal resistance and related properties – Guarded hot plate apparatus: ISO 8302:1991.
- 3 Building materials and products. Method of determination of steady-state thermal conductivity and thermal resistance: SSU Б В.2.7-105-2000 (ГОСТ 7076-99).
- 4 State system for ensuring the uniformity of measurements. State primary standard and all-union verification schedule for means measuring heat conductivity of solid bodies in the range of 0,02 to 20 W/(m·K) at temperatures from 90 to 1100 K: ГОСТ 8.140-2009.
- 5 Sokolov N. A. New class of devices: multiple-valued measures of heat conductivity/ N. A. Sokolov // Measuring Technique. – 2006. – №4.– P. 50-53.
- 6 Complex ИТ-7С for building materials thermal conductivity measurements / [Z. Burova, L. Vorobyov, L. Dekusha, O. Dekusha] // Metrology and Apparatus. – 2009. – № 6. – P.15-19.
- 7 Pehovich A. I. Calculations of the thermal mode of solids / A. I. Pehovich, V. M. Jidkih. – L.: Energy, 1976. – 352 p.
- 8 Lykov A. V. Theory of heat conductivity / A. V. Lykov – V.: The Higher School, 1967. – 599 p.
- 9 Karslow G. Heat conductivity of solid bodies / G. Karslow, D Eger. – М.: Nauka, 1964. – P. 489.
- 10 The truncation errors of thermal conductivity measurements of the materials on device ИТ-7С / [Z. Burova, L. Vorobyov, L. Dekusha, T. Grischenko] // Industrial Heat Engineering .– К., 2013. – V.35. – №2. – P.96-103.
- 11 Features of constructing of heat flow transducers for heat conductivity measuring devices according to ДСТУ ISO 8301:2007 / [Z. Burova, L. Vorobyov, T. Grischenko and other] // Building Constructions: collect. of scien. labours. – V.77. – К.: DP NDIBK, 2013. – P.349-354.

Стаття надійшла до редакції 02.04.2014 р.