

УДК 536.6

Бабак В.П., член-корр. НАН України, д.т.н., проф., заст. директора з наукової роботи
Декуша Л.В., д.т.н., провідний науковий співробітник
Ковтун С.І., к.т.н., старший науковий співробітник
Інститут технічної теплофізики НАН України, м. Київ

Бабак В.П., член-корр. НАН Украины, д.т.н., проф., зам. директора по научной работе,
Декуша Л.В., д.т.н., ведущий научный сотрудник
Ковтун С.И., кандидат технических наук, старший научный сотрудник
Институт технической теплофизики НАН Украины

Babak V.P., Doct. of technical sciences, Prof., Deputy Director for Science
Dekusha L.V., Doct. of technical sciences, Leading Researcher
Kovtun S.I., PhD, Senior Researcher
Institute of Engineering Thermophysics NAS of Ukraine

КОНЦЕПТУАЛЬНА МОДЕЛЬ ЕТАЛОНУ ПОВЕРХНЕВОЇ ГУСТИНИ ТЕПЛОВОГО ПОТОКУ

КОНЦЕПТУАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ ЭТАЛОНА ПОВЕРХНОСТНОЙ ПЛОТНОСТИ ТЕПЛОВОГО ПОТОКА

CONCEPTUAL MODEL OF THE SURFACE HEAT FLUX STANDARD

Запропоновано концепцію модульної побудови еталону поверхневої густини теплового потоку, реалізація якого дозволить забезпечити єдність вимірювання поверхневої густини теплового потоку в актуальному динамічному діапазоні.

Предложена концепция модульного построения эталона поверхностной плотности теплового потока, реализация которого позволит обеспечить единство измерения поверхностной плотности теплового потока в актуальном динамическом диапазоне.

A conceptual model for constructing a standard of heat flow surface density based on a systems approach that encompasses a comprehensive analysis of physical principles reproduction of unit of heat flow surface density are presented in work, establishing valid limits the use of each of them in order to the availability of implementation while ensuring minimum of measurement uncertainty, detection and investigation of influence factors that cause low accuracy of reproduction of heat flux density unit and ways to minimize their influence, and development of methods for transfer of units size, ways of implement traceability of measurement results of surface heat flux density and establishment of requirements to equipment for metrological support this type of measurement.

Ключові слова: *поверхнева густина теплового потоку, еталон одиниці вимірювання теплового потоку, концептуальна модель.*

Ключевые слова: *поверхностная плотность теплового потока, эталон единицы измерения теплового потока, концептуальная модель.*

Keywords: *surface heat flux, reference the measurement unit of heat flux, conceptual model.*

ВСТУП

Предметні сфери, для яких вимірювання теплового потоку мають вагоме значення, достатньо різноманітні. Застосування засобів теплотрії дозволяє вирішити завдання, які неможливо або важко вирішити іншими засобами, наприклад, вимірювання теплових потоків, локальних у просторі і часі, з метою визначення втрат теплоти від теплотрас і споруд,

технологічних пристроїв і апаратів ; вимірювання складових теплового потоку і коефіцієнтів теплообміну і теплопередачі при складному теплообміні з метою оптимізації та автоматизації виробничих процесів за тепловим параметром; вимірювання теплофізичних характеристик з метою дослідження ефективності теплозахисних і теплопровідних властивостей матеріалів, одягу, огорожувальних конструкцій, споруд, холодильного обладнання, сховищ, тощо; вимірювання тепловиділення від технічних і біологічних об'єктів з метою оптимізації чисельних процесів і систем [1-5].

Найбільш інформативним для оцінки теплового стану та співставлення результатів вимірювання є питоме значення теплового потоку, а саме – його поверхнева густина, одиницею вимірювання якої прийнято $\text{Вт}/\text{м}^2$. Актуальний інтервал вимірюваних значень становить від кількох одиниць до $10^6 \text{ Вт}/\text{м}^2$. На сьогоднішній день в Україні для засобів вимірювання теплового потоку державним еталоном є еталон одиниці енергетичної освітленості некогерентним випромінюванням [6]. Еталон призначений для відтворення та передавання одиниці густини потоку оптичного випромінювання в діапазоні від $10 \text{ Вт}/\text{м}^2$ до $10^5 \text{ Вт}/\text{м}^2$, при цьому калібрування робочих засобів вимірювання відбувається на вторинному еталоні, в якому значення одиниці вимірювання відтворюється в діапазоні від $400 \text{ Вт}/\text{м}^2$ до $1360 \text{ Вт}/\text{м}^2$ [7]. Крім того, особливості конструкції вказаних еталонів не дозволяють проводити калібрування засобів вимірювання, які мають розмір вхідної діафрагми або теплосприймальної поверхні чутливого елемента більше 8 мм, що обмежує застосування значної кількості приймачів теплового випромінювання, а також майже всіх сенсорів теплового потоку.

МЕТА РОБОТИ ТА ПОСТАНОВКА ДОСЛІДЖЕНЬ

Метою роботи є розроблення концептуальної моделі реалізації одиниці вимірювання поверхневої густини теплового потоку в широкому динамічному діапазоні для подальшого передавання її розміру засобам вимірювання різних типів, що дає можливість забезпечити єдність вимірювань.

Концептуальна модель еталону поверхневої густини теплового потоку базується на системному підході, що охоплює комплекс аналізу фізичних принципів відтворення одиниці вимірювання поверхневої густини теплового потоку, встановлення адекватних меж застосування кожного з них з огляду на доступність реалізації з одночасним забезпеченням мінімальної невизначеності вимірювання, виявлення і дослідження факторів впливу, які обумовлюють низьку точність відтворення одиниці густини теплового потоку та визначення шляхів мінімізації їх впливу, а також розроблення методів передавання розміру одиниці вимірювання, способи реалізації простежуваності результатів вимірювання поверхневої густини теплового потоку та встановлення вимог до апаратної частини засобів метрологічного забезпечення даного виду вимірювань.

Еталон має бути реалізовано у вигляді інформаційно-вимірювальної системи [8], яка повинна відповідати таким основним вимогам:

теоретична обґрунтованість: урахування фізичних принципів реалізації одиниці вимірювання;

функціональність: можливість проведення калібрування засобів вимірювання різних типів;

надійність: забезпечення простежуваності результатів вимірювань до національних або міжнародних еталонів;

економічність: мінімізація фінансових та ресурсних витрат при відтворенні одиниці вимірювання та проведенні калібрування засобів вимірювання.

ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

Теоретична обґрунтованість передбачає аналізування фізичних принципів індукування теплової енергії певної інтенсивності, способів її передавання та умов формування відповідного однорідного поля на вході приймача теплової енергії.

Тепловий потік є по суті мірою інтенсивності протікання процесів теплообміну та виникає при наявності різниці температури між двома ізотермічними поверхнями. Тому для індукування потоку теплової енергії потрібні нагрівник (джерело теплової енергії) з більш високою температурою та холодильник, що має більш низьку у порівнянні з нагрівником температуру. Передавання теплової енергії між нагрівником та холодильником може відбуватися кондуктивним шляхом (ефект теплопровідності) чи радіаційним (електромагнітне випромінювання переважно у інфрачервоному діапазоні спектра).

Як показано в роботі [9], перспективним є відтворення теплової енергії шляхом підведення електричної потужності заданого значення до джерела теплоти, що має скінченні геометричні розміри. При цьому, знаходження відтвореного у такий спосіб значення поверхневої густини теплового потоку розраховується за законом Джоуля-Ленца при забезпеченні стаціонарного теплового режиму ($q = const$).

При порушенні умов стаціонарності температурного режиму вимірювань відбувається нагрівання або охолодження нагрівника, при цьому частина потужності витрачається на зміну його температури. Змінення температури вимірювальної комірки призводить до неконтрольованого притоку або відтоку теплоти, залежить від теплоємності основного нагрівника, що є одним із основних джерел невизначеності при кондуктивному способі передавання одиниці вимірювання поверхневої густини теплового потоку. Складова невизначеності вимірювань, викликана цим фактором, оцінена за формулою:

$$u(T, t) = \frac{C}{F \cdot q} \cdot \frac{dT(t)}{dt} \cdot 100, \% \quad (1)$$

де $C = c \cdot \rho \cdot h \cdot F$ – теплоємність нагрівника, c , ρ , h – питома теплоємність, густина матеріалу і товщина нагрівника, відповідно.

На рис.1 наведено результати розрахунків у вигляді графіків залежності складової невизначеності через вплив теплоємності джерела теплової енергії при варіації товщини основного нагрівника в діапазоні (1÷20 000) Вт/м² зміни поверхневої густини теплового потоку.

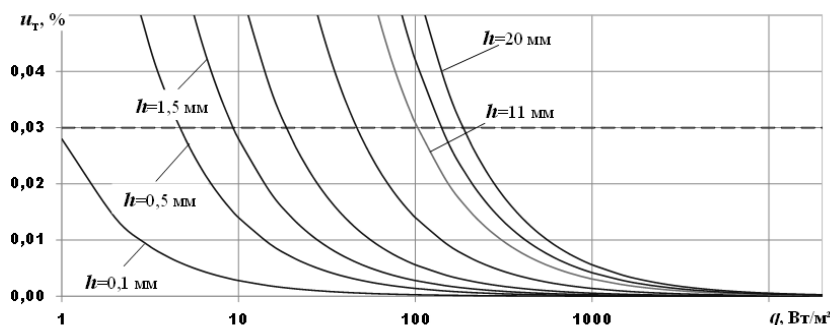


Рис.1 Графіки розподілу складової невизначеності через вплив теплоємності джерела теплової енергії при варіації геометричного параметра нагрівника

Fig.1 Graphs of the distribution of the uncertainty component which due to the influence of the heat capacity of the heat energy source when the geometric parameter of the heater is varied

За результатами досліджень встановлено, що зменшення теплоємності основного нагрівника сприяє зменшенню сумарної стандартної невизначеності при малих значеннях густини теплового потоку. Так, при зменшенні товщини нагрівника до 1,5 мм нижня межа діапазону вимірювання може бути розширена до 10 Вт/м² при забезпеченні відповідного рівня невизначеності вимірювання. Слід зазначити, що подальше зменшення товщини нагрівника є недоцільним, тому для забезпечення нижньої межі динамічного діапазону необхідно уникати впливу теплоємності джерела теплової енергії.

Вирішення цього питання можливе при застосуванні джерела теплового випромінювання та передаванні одиниці вимірювання радіаційним способом. Значення густини потоку теплового

випромінювання, що відтворюється у стаціонарному режимі, знаходиться згідно закону Стефана-Больцмана:

$$q = \varepsilon_{\text{пр}} \cdot \varphi_{1-2} \cdot \sigma \cdot (T_1^4 - T_2^4), \quad (2)$$

де $\varepsilon_{\text{пр}}$ – приведений коефіцієнт емісії; φ_{F1-F2} – кутовий коефіцієнт випромінювання, який враховує форму і розмір поверхонь, що беруть участь у теплообміні, їхнє взаємне розташування і відстань між ними; σ_0 – стала Стефана-Больцмана; T – температура, індексом “1” позначена поверхня джерела випромінювання, а індексом “2” – теплосприймальня поверхня засобу вимірювання.

Сучасний рівень розвитку термометрії забезпечує високу точність завдання і вимірювання значень температури T_1 і T_2 . Стала Стефана-Больцмана є фундаментальною фізичною величиною, значення якої відомо з високою точністю [10].

На рис.2 представлена концептуальна модель еталону поверхневої густини теплового потоку, реалізованого за модульним принципом.

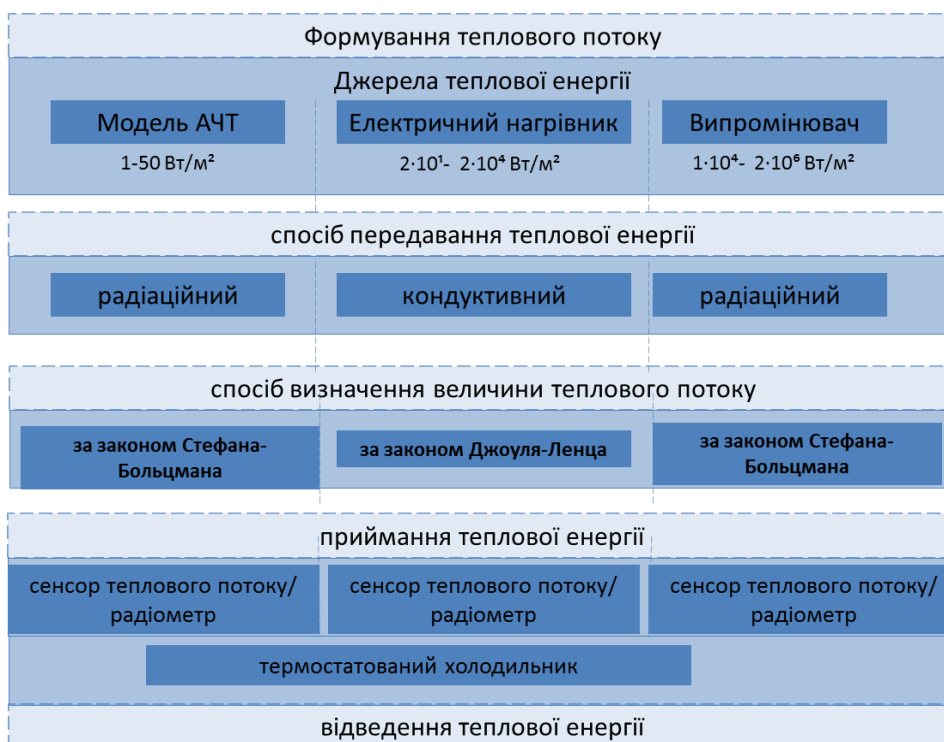


Рис.2 Концептуальна модель еталону поверхневої густини теплового потоку
 Fig.2 Conceptual model of the surface heat flux standard

ВИСНОВКИ

Обґрунтована реалізація концептуальної моделі еталону поверхневої густини теплового потоку за модульним принципом полягає в наступному:

– динамічний діапазон $(1 \div 2 \cdot 10^6)$ Вт/м² розділено на три під діапазони: I - $(1 \div 50)$ Вт/м²; II - $(2 \cdot 10^1 \div 2 \cdot 10^4)$ Вт/м²; III - $(1 \cdot 10^4 \div 2 \cdot 10^6)$ Вт/м²;

– в кожному з них визначені різні способи формування та передавання теплової енергії: у I – формування теплової енергії за допомогою моделі АЧТ та передавання радіаційним способом; у II – формування за допомогою електричного нагрівника та передавання кондуктивний способом; у III – формування за допомогою випромінювача та передавання радіаційним способом;

– апаратний модуль реєстрації, передавання та опрацювання вимірювальної інформації залишається єдиним для всіх піддіапазонів.

При застосуванні запропонованої моделі еталону досягається не тільки розширення діапазону до $(1 \div 2 \cdot 10^6)$ Вт/м², а й забезпечення значень невизначеності, які не перевищують 0,6%.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Апаратно-програмне забезпечення моніторингу об'єктів генерування, транспортування та споживання теплової енергії: Монографія / В.П. Бабак, В.С. Берегун ін.; за ред. чл.-кор. НАН України В.П. Бабака / - К.: Ін-т технічної теплофізики НАН України, 2016. – 298 с.
2. Baygildina, E.; Smirnova, L.; Murashko, K.; Juntunen, R.; Mityakov, A.; Kuisma, M.; Pyrhönen, O.; Peltoniemi, P.; Hynynen, K.; Mityakov, V.; Sapozhnikov, S. Application of a Heat Flux Sensor in Wind Power Electronics. *Energies* 2016, 9, 456.
3. Currano, J.A. (2007). Heat Flux-based Emissivity Measurement. Michigan: ProQuest Information and Learning Company. P 9–15. – Access mode: <http://www.mdpi.com/1996-1073/9/6/456>
4. Uomoto, T. (2000). Non-Destructive Testing in Civil Engineering. Oxford, UK: Elsevier Science Ltd. Pages 181–186.
5. Воробьев Л. Теплометрические средства контроля тепловой нагрузки на головной обтекатель ракеты-носителя / Л. Воробьев, Т. Грищенко, Л. Декуша, О. Декуша, С. Ковтун, Е. Шмаров // *Метрологія та прилади*. – 2013. – №2. – С. 22-29.
6. Бондаренко Л.И., Прокопенко Н.В. Метрологическое обеспечение оптико-физических измерений в системе экологического мониторинга и контроля параметров микроклимата // *Вестник ХНАДУ*. – 2011. – Вып. 52. – С. 162-166.
7. ДСТУ 3193-95. Метрологія. Державна повірочна схема для засобів вимірювань енергетичної освітленості некогерентним випромінюванням. – На заміну ГОСТ 80195-89; чинний від 01.07.1996. – К. : Держстандарт України, 1996. – 18 с.
8. Теоретичні основи інформаційно-вимірювальних систем: Підручник / В.П. Бабак, С.В. Бабак, В.С. Єременко та ін.; за ред. чл.-кор. НАН України В.П. Бабака / 2-е вид., перероб. і доп. – К.: Ун-т новітніх технологій; НАУ, 2017. – 496 с.
9. Ковтун С. И. Воспроизведение единицы измерения поверхностной плотности теплового потока / С. И. Ковтун, Л. В. Декуша // *Український метрологічний журнал*. – 2016. – № 4. – С. 45-47. – Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Umlzh_2016_4_16.
10. The NIST Reference on Constants, Units, and Uncertainty. US National Institute of Standards and Technology. June 2015. Retrieved 2015-09-25. 2014 CODATA recommended values. – Access mode: <https://physics.nist.gov/cgi-bin/cuu/Value?sigma>

REFERENCES

1. Hardware-software for monitoring the objects of generation, transportation and consumption of thermal energy: Monograph / V.P. Babak, V.S. Beregun and other / K: Institute of Engineering Thermophysics of National Academy of Sciences of Ukraine, 2016. – 298 p.
2. Baygildina, E.; Smirnova, L.; Murashko, K.; Juntunen, R.; Mityakov, A.; Kuisma, M.; Pyrhönen, O.; Peltoniemi, P.; Hynynen, K.; Mityakov, V.; Sapozhnikov, S. Application of a Heat Flux Sensor in Wind Power Electronics. *Energies* 2016, 9, 456.
3. Currano, J.A. (2007). Heat Flux-based Emissivity Measurement. Michigan: ProQuest Information and Learning Company. P 9–15. – Access mode: <http://www.mdpi.com/1996-1073/9/6/456>
4. Uomoto, T. (2000). Non-Destructive Testing in Civil Engineering. Oxford, UK: Elsevier Science Ltd. Pages 181–186.
5. Vorobjov L. Control teplotometry diveces of thermal load on the aerodynamic payload fairing of a lounch-vehicle / L.Vorobjov, T. Grischenko, L. Dekusha, O. Dekusha, S. Kovtun // *Metrology and devices*. – 2013. – №2. – P. 22-29.
6. Bondarenko L.I., Prokopenko N.V. Metrological support of optical-physical measurements in the system of environmental monitoring and control of microclimate parameters // *Bulletin KhNAHU*. – 2011. – Vol. 52. – P. 162-166. (Rus.)
7. NSTU 3193-95. Metrology. State verification scheme for means of measuring energy illumination incoherent radiation. – K. : State Standard of Ukraine, 1996. – 18 p. (Ukr.)
8. Theoretical Foundations of Information and Measuring Systems: Textbook / Edited by Member of the NAS of Ukraine V. Babak / K.: University of Emerging Technologies, NAU, 2017. – 496 p.
9. Kovtun S.I. Reproducing of surface heat flux unit / S.I. Kovtun, L. V. Dekusha // *Ukrainian metrological journal*. – 2016. – № 4. – P. 45-47. – Access mode: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Umlzh_2016_4_16.
10. The NIST Reference on Constants, Units, and Uncertainty. US National Institute of Standards and Technology. June 2015. Retrieved 2015-09-25. 2014 CODATA recommended values. – Access mode: <https://physics.nist.gov/cgi-bin/cuu/Value?sigma>