

УДК 624.012

DOI : 10.30838/J.BPSACEA.2312.241120.148.710

## ДО ПИТАННЯ РОЗРОБЛЕННЯ ЗАСОБІВ КОНТРОЛЮ, ВИПРОБУВАННЯ ТЕПЛОЗАХИСНИХ МАТЕРІАЛІВ ДЛЯ ЗАХИСТУ ПРАЦІВНИКІВ ДСНС УКРАЇНИ

ШАЛОМОВ В. А.<sup>1</sup>, канд. техн. наук, доц.,  
СТРЕЖЕКУРОВ Е. Є.<sup>2\*</sup>, канд. техн. наук, доц.,  
РАГІМОВ С. Ю.<sup>3</sup>, канд. техн. наук, доц.,  
ПРИХОДЧЕНКО В. І.<sup>4</sup>, асист.

<sup>1</sup> Кафедра безпеки життєдіяльності, Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Чернишевського, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 756-34-57, e-mail: [shalomov1709@gmail.com](mailto:shalomov1709@gmail.com), ORCID ID: 0000-0002-6890-932X

<sup>2\*</sup> Кафедра електротехнології та електромеханіки, Дніпровський державний технічний університет, вул. Дніпробудівська 2, 51918, Кам'янське, Україна, тел. +38 (0569) 55-20-05, e-mail: [strejkyrov@ukr.net](mailto:strejkyrov@ukr.net), ORCID ID: 0000-0003-4304-3556

<sup>3</sup> Кафедра організації та технічного забезпечення аварійно-рятувальних робіт, Національний університет цивільного захисту України, вул. Чернишевська, 94, 61023, Харків, Україна, тел. +38 (057) 370-50-52, e-mail: [sergragimov@ukr.net](mailto:sergragimov@ukr.net), ORCID ID: 0000-0003-0572-4465

<sup>4</sup> Кафедра безпеки життєдіяльності, Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Чернишевського, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 756-34-57, e-mail: [bgd@mail.pgasa.dp.ua](mailto:bgd@mail.pgasa.dp.ua), ORCID ID: 0000-0001-6468-1739

**Анотація.** *Постановка проблеми.* Наразі необхідне розроблення засобів контролю, випробування теплозахисних матеріалів, які використовуються для виготовлення засобів індивідуального захисту, як існуючих, так і на стадії створення нових. Теплозахисні матеріали для спеціального одягу повинні проходити випробування за номенклатурою показників якості. Ми розглянули найважливіші, пов'язані із впливом високоінтенсивного теплового випромінювання і високої температури. **Результати.** Запропоновано розв'язок наближеного значення області існування методу випробування. В основу методу покладено два способи. Попередній: у рамці затискається зразок для випробування і поблизу його поверхні проводиться електрозварювання. Краплі розплавленого металу потрапляють на поверхню зразка і залишають сліди у вигляді пропалів, прилиплих частинок. Досліджуються глибина пропалу, ступінь липкості тощо. Нині застосовується більш прогресивний метод – метод розплавлення зварювального електрода з дуттям на поверхню випробуваного матеріалу. Однак обидва способи дозволяють отримати розпечені краплі різних розмірів, різної ваги, різного спрямування щодо досліджуваного матеріалу і неконтрольованої температури нагріву розпеченої краплі, що не дозволяє отримати високу достовірність результатів дослідження. Ми пропонуємо пристрій, який дозволяє контролювати розмір краплі, кінетичну енергію удару, напрямок польоту і температуру розпеченої частинки. Це визначило напрямки роботи зі створення методики дослідження цих параметрів і, як впливає звідси, потребу створення установки, яка забезпечувала б сталість таких параметрів як маса, швидкість польоту, температура і траєкторія польоту нагрітих частинок металу з можливістю контрольованої зміни цих параметрів. Для визначення області існування критеріїв дослідження запропонованим методом необхідно розв'язати задачу з такими припущеннями: форма краплі металу взята у вигляді ідеальної кулі; розмір краплі взятий як середньо-статистичний; крапля підвішена на нетеплопровідній тонкій нитці у повітрі; рух повітря виключено; теплопередача за рахунок теплопровідності виключена з розрахунку; в розрахунку не врахований процес окиснення поверхні розжареної краплі й утворення окалини; не враховано час кристалізації металу. Процес впливу розпеченої металеві кульки на досліджуваний матеріал умовно поділений на три етапи: нагрів кульки до заданої температури і її контроль; політ кульки в повітряному середовищі з її подальшим охолодженням; удар кульки об поверхню зразка з передачею кінетичної і теплової енергії. Крім того, необхідно контролювати силу і задавати напрямки удару частинки відносно випробуваного матеріалу. Розрахунок процесів теплопередачі – складна математична задача, що включає розв'язання багатьох систем нелінійних рівнянь. Із використанням певних припущень приймаємо два механізми теплопереносу – молекулярний і конвективний. **Наукова новизна.** Пропонується новий метод випробування теплозахисних матеріалів що дозволяє доповнити існуючі та отримати більш достовірні результати. **Практична значимість.** Розроблено установку для дослідження теплозахисних матеріалів на іскростійкість.

**Ключові слова:** теплове випромінювання; робочі місця; термічні процеси; датчик теплового потоку; номограма; моделювання

## К ВОПРОСУ РАЗРАБОТКИ СРЕДСТВ КОНТРОЛЯ, ИСПЫТАНИЯ ТЕПЛОЗАЩИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ЗАЩИТЫ РАБОТНИКОВ ГСЧС УКРАИНЫ

ШАЛОМОВ В. А.<sup>1</sup>, канд. техн. наук, доц.,  
СТРЕЖЕКУРОВ Э. Е.<sup>2\*</sup>, канд. техн. наук, доц.,  
РАГИМОВ С. Ю.<sup>3</sup>, канд. техн. наук, доц.,  
ПРИХОДЧЕНКО В. И.<sup>4</sup>, ассист.

<sup>1</sup> Кафедра безопасности жизнедеятельности, Государственное высшее учебное заведение «Придніпровская государственная академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского, 24-а, 49600, Дніпро, Украина, тел. +38 (056) 756-34-57, e-mail: [shalomov1709@gmail.com](mailto:shalomov1709@gmail.com), ORCID ID: 0000-0002-6890-932X

<sup>2\*</sup> Кафедра электротехнологии и электромеханики, Дніпровский государственный технический университет, ул. Днепростроевская 2, 51918, Каменское, Украина, тел. +38 (0569) 55-20-05, e-mail: [strejekyrov@ukr.net](mailto:strejekyrov@ukr.net), ORCID ID: 0000-0003-4304-3556

<sup>3</sup> Кафедра организации и технического обеспечения аварийно-спасательных работ, Национальный университет гражданской защиты Украины, ул. Чернышевская, 94, 61023, Харьков, Украина, тел. +38 (057) 370-50-52, e-mail: [sergragimov@ukr.net](mailto:sergragimov@ukr.net), ORCID ID: 0000-0003-0572-4465

<sup>4</sup> Кафедра безопасности жизнедеятельности, Государственное высшее учебное заведение «Придніпровская государственная академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского, 24-а, 49600, Дніпро, Украина, тел. +38 (056) 756-34-57, e-mail: [bgd@mail.pgasa.dp.ua](mailto:bgd@mail.pgasa.dp.ua) ORCID ID: 0000-0001-6468-1739

**Аннотация. Постановка проблемы.** Возникла необходимость разработки средств контроля, испытания теплозащитных материалов, используемых для изготовления средств индивидуальной защиты, как существующих, так и на стадии создания новых. Теплозащитные материалы для специальной одежды должны проходить испытания по номенклатуре показателей качества. Нами были рассмотрены наиболее важные, связанные с влиянием высокоинтенсивного теплового излучения и высокой температуры. **Результаты.** Предложено решение приближенного значения области существования метода испытания. В основу метода положены два способа. Предварительный: в рамке зажимается образец для испытания и вблизи его поверхности производится электросварка. Капли расплавленного металла попадают на поверхность образца и оставляют следы в виде прожогов, прилипших частиц. Исследуются глубина прожога, степень прилипаемости и т. п. В настоящее время применяется более прогрессивный метод – метод расплавления сварочного электрода с дутьем на поверхность испытуемого материала. Однако оба способа позволяют получить раскаленные капли разных размеров, разного веса, разного направления по исследуемому материалу и неконтролируемой температуры нагрева раскаленной капли, но не позволяют получить высокую достоверность результатов исследования. Нами предложено устройство, которое позволяет контролировать размер капли, кинетическую энергию удара, направление полета и температуру раскаленной частицы. Все вышесказанное определило направление работы по созданию методики исследования этих параметров и, как следует отсюда, требование создания установки, которая обеспечивала бы устойчивость таких параметров как масса, скорость полета, температура и траектория полета нагретых частиц металла с возможностью контроля изменения этих параметров. Для определения области существования критериев исследования предлагаемым методом необходимо решить задачу со следующими допущениями: форма капли металла взята в виде идеального шара; размер капли взят как среднестатистический; капля подвешена на не теплопроводной тонкой нити в воздухе; движение воздуха исключено; теплопередача за счет теплопроводности исключена из расчета; в расчете не учтен процесс окисления поверхности раскаленной капли и образования окалины; не учтена кристаллизация металла. Процесс влияния раскаленного металлического шарика на исследуемый материал условно разделен на три этапа: нагрев шарика до заданной температуры и ее контроль; полет шарика в воздушной среде с его последующим охлаждением; удар шарика о поверхность образца с передачей кинетической и тепловой энергии. Кроме того, необходимо контролировать силу и задавать направление удара частицы относительно испытуемого материала. Расчет процессов теплопередачи является сложной математической задачей, включающей решение многих систем нелинейных уравнений. С использованием определенных допущений принимаем два механизма теплопереноса – молекулярный и конвективный. **Научная новизна.** Предложен новый метод испытания теплозащитных материалов позволяющий дополнить существующие и получить более достоверные результаты. **Практическая значимость.** Разработана установка исследования теплозащитных материалов на искростойкость.

**Ключевые слова:** *тепловое излучение; рабочие места; термические процессы; датчик теплового потока; номограмма; моделирование*

## IN RELATION TO QUESTION OF DEVELOPMENT OF CONTROLS, TEST OF HEATCOVER MATERIALS, FOR DEFENCE OF WORKERS OF DSNS OF UKRAINE

SHALOMOV V.A.<sup>1</sup>, *Cand. Sc.(Tech.), Assoc. Prof.*,  
STREZHEKUROV Ye.E.<sup>2\*</sup>, *Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*,  
RAGIMOV S.Yu.<sup>3</sup>, *Cand. Sc.(Tech), Assoc. Prof.*,  
PRIKHODCHENKO V.I.<sup>4</sup>, *Ass.*

<sup>1</sup> Department of Life Safety, State Higher Education Institution "Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture", 24-a, Chernyshevskoho Str., 49600, Dnipro, Ukraine, tel. +38 (056) 756-34-57, e-mail: [shalomov1709@gmail.com](mailto:shalomov1709@gmail.com), ORCIDID: 0000-0002-6890-932X

<sup>2\*</sup> Department of electrotechnology and electromechanics, Dnieper State Technical University, 2, Dniprobudivska Str., 51918, Kam'yanske, Ukraine, tel. +38 (0569) 55-20-05, e-mail: [strejekyrov@ukr.net](mailto:strejekyrov@ukr.net), ORCID ID: 0000-0003-4304-3556

<sup>3</sup> Department of Organization and technical support rescue operations, National University of Civil Defence of Ukraine, 94, Chernyshevsky Str., 61023, Kharkiv, Ukraine, tel. +38 (057) 370-50-52, e-mail: [sergragimov@ukr.net](mailto:sergragimov@ukr.net), ORCID ID: 0000-0003-0572-4465

<sup>4</sup> Department of Life Safety, State Higher Education Institution "Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture", 24-a, Chernyshevskoho Str., 49600, Dnipro, Ukraine, tel. +38 (056) 756-34-57, e-mail: [bgd@mail.pgasa.dp.ua](mailto:bgd@mail.pgasa.dp.ua), ORCID ID: 0000-0001-6468-1739

**Abstract. Purpose.** Development of means of control, testing of heat-protective materials used for the manufacture of personal protective equipment, both existing and at the stage of creating new ones. **Method.** Heat-protective materials for special clothing must be tested according to the nomenclature of quality indicators. We have considered the most important, which are associated with the effects of high-intensity heat radiation and high temperature. **Results.** The solution of the approximate value of the area of existence of the test method is offered. The test method is based on two methods. Previous: the test specimen is clamped in the frame and electric welding is performed near its surface. Particles of molten metal fall on the surface of the sample and leave traces in the form of burns, sticky particles. The depth of burn, the degree of adhesion, etc. are investigated. Currently, a more advanced method is used - the method of melting the welding electrode by blowing on the surface of the test material. However, both methods allow to obtain hot drops of different sizes, different weights, different directions relative to the test material and uncontrolled heating temperature of the hot drop, which does not allow to obtain high reliability of the results of the study. We proposed to create a device that allows you to control the size of the drop, the kinetic energy of the impact, the direction of flight and the temperature of the hot particle. All the above determined the direction of work on creating a methodology for studying these parameters and, as follows, the requirement to create an installation that would ensure the stability of parameters such as mass, velocity, temperature and flight trajectory of heated metal particles with the possibility of controlled change of these parameters. All the above determined the direction of work on creating a methodology for studying these parameters and, as follows, the requirement to create an installation that would ensure the stability of parameters such as mass, velocity, temperature and flight trajectory of heated metal particles with the possibility of controlled change of these parameters. To determine the area of existence of the research criteria by the proposed method, it is necessary to solve the problem with the following assumptions: the shape of a drop of metal is taken in the form of an ideal sphere; the droplet size is taken as the average; the drop is suspended on a non-thermally conductive thin thread in the air; air movement is excluded; heat transfer due to thermal conductivity is excluded from the calculation; the calculation does not take into account the process of oxidation of the surface of the hot drop and the formation of scale; the crystallization time of the metal is not taken into account. The process of influence of the hot metal ball on the investigated material is conditionally divided into three stages: heating of the ball to the set temperature and its control; the flight of the ball in the air with its subsequent cooling; the impact of the ball on the surface of the sample with the transfer of kinetic and thermal energy. In addition, it is necessary to control the force and set the direction of impact of the particle relative to the test material. The calculation of heat transfer processes is a complex mathematical problem that involves solving many systems of nonlinear equations. Using certain assumptions, we accept two mechanisms of heat transfer - molecular and convective. **Scientific novelty.** For the first time, a new method is proposed that allows to supplement the existing and get more reliable results. **Practical meaningfulness.** The installation of research of heat-protective materials on spark resistance is developed.

**Keywords:** *thermal radiation; workplaces; thermal processes; heat flow sensor; nomogram; simulation*

**Постановка проблеми.** Найважливішим завданням щодо захисту працівників ДСНС України під час ліквідації стихійних лих у вигляді пожеж постає забезпечення їх засобами захисту. Засоби індивідуального

захисту найчастіше являють собою спеціальний одяг, взуття, здатні протистояти дії високої температури, тепловому опроміненню і впливу розжарених іскор [4].

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** На разі існують методи випробування матеріалів із полімерним покриттям для спеціального одягу, які стандартизовані:

– ГОСТ 12.4.058-84 Система стандартів безпеки праці. Матеріали з полімерним покриттям для спеціального одягу. Номенклатура показників якості ССБТ;

– ГОСТ 12.4.103-83 Система стандартів безпеки праці. Одяг спеціальний захисний, засоби індивідуального захисту ніг і рук;

– ГОСТ Р 12.4.237-2007 (ISO 9150:1988) ССБТ. Одяг спеціальний. Методи випробування матеріалу за впливу бризок розплавленого металу.

Теплозахисні матеріали для спеціального одягу повинні проходити випробування за номенклатурою показників якості [1–2]. Ми розглянули найважливіші, пов'язані із впливом високоінтенсивного теплового випромінювання і високої температури.

**Мета статті** – опис розробки засобів контролю, випробування теплозахисних матеріалів для виготовлення засобів індивідуального захисту, як існуючих, так і на стадії створення нових.

**Виклад матеріалу.** Ми пропонуємо розв'язання наближеного значення області існування методу випробування, згідно із ГОСТ 12.4.058-84, п. 1.13. В основу методу випробування покладено два способи.

Попередній: у рамці затискається зразок для випробування і поблизу його поверхні проводиться електрозварювання. Частинки розплавленого металу потрапляють на поверхню зразка і залишають сліди у вигляді пропалів, прилиплих частинок. Досліджуються глибина пропалу, ступінь липкості тощо. Нині застосовується більш прогресивний метод – метод розплавлення зварювального електрода з дугтям на поверхню випробуваного матеріалу [3].

Однак обидва способи дозволяють отримати розпечені краплі різних розмірів, різної ваги, різного спрямування щодо досліджуваного матеріалу і неконтрольованої температури нагріву розпеченої краплі, що не дозволяє отримати високу достовірність результатів

дослідження. Ми пропонуємо пристрій, який дозволяє контролювати розмір краплі, кінетичну енергію удару, напрямок польоту і температуру розпеченої частинки.

Усе вищесказане визначило напрямок роботи зі створення методики дослідження цих параметрів і, як впливає звідси, потребу створення установки, яка забезпечувала б сталість таких параметрів як маса, швидкість польоту, температура і траєкторія польоту нагрітих частинок металу (сталевих кульок) з можливістю контрольованої зміни цих параметрів.

Для визначення області існування критеріїв дослідження пропонованим методом необхідно розв'язати задачу з такими припущеннями: форма краплі металу взята у вигляді ідеальної кулі; розмір краплі (радіус) узятий як середньостатистичний; крапля підвішена на нетеплопровідній тонкій нитці у повітрі; рух повітря виключено; теплопередача за рахунок теплопровідності виключена з розрахунку; в розрахунку не врахований процес окиснення поверхні розжареної краплі і утворення окалини (окисної плівки); не враховано час кристалізації металу; значення коефіцієнтів  $\epsilon$  і  $\alpha$  взяті наближено.

Процес впливу розпеченої металеві кульки на досліджуваний матеріал умовно поділений на три етапи: нагрів кульки до заданої температури і її контроль; політ кульки в повітряному середовищі з її подальшим охолодженням; удар кульки об поверхню зразка з передачею кінетичної і теплової енергії.

Крім того, необхідно контролювати силу і задавати напрямок удару частинки відносно випробуваного матеріалу. Розрахунок процесів теплопередачі – складна математична задача, що включає розв'язання багатьох систем нелінійних рівнянь.

Із використанням певних припущень, приймаємо два механізми теплопереносу – молекулярний і конвективний. Молекулярний механізм здійснюється за допомогою теплового руху мікрочастинок у середовищі з неоднорідним розподілом температури, тобто, якщо в досліджуваному середовищі (наприклад, у розпеченому тілі) немає градієнта температури за обсягом

середовища, такий механізм теплопередачі в даному випадку не має місця [5].

Конвективний механізм здійснюється в середовищі з неоднорідним розподілом швидкості і температури мікроскопічними елементами середовища при їх переміщенні.

Теплоперенос може бути в загальному випадку розрахований за формулою:

$$Q = \lambda_m \cdot \frac{T_G - T_X}{\delta} \cdot S \cdot \tau, \quad (1)$$

де  $Q$  – кількість тепла, яке передається через поверхню, Вт;  $T_G$ ;  $T_X$  – температура гарячої і холодної поверхонь, К;  $S$  – площа поверхні, м<sup>2</sup>;  $\tau$  – час, ч;  $\delta$  – товщина поверхні, м;  $\lambda_m$  – коефіцієнт теплопровідності, Вт/м·К.

Якщо розглядати краплю металу у вигляді ідеальної кульки невеликого розміру та враховуючи, що коефіцієнт теплопровідності металу високий, можна вважати, що у всьому об'ємі краплі металу температура одна й та сама і дорівнює температурі поверхні. А оскільки перенесення тепла «способом теплопровідності» можливе лише за молекулярного механізму, обов'язкова умова якого – наявність неоднорідного теплового поля в середовищі (тілі), тобто за наявності градієнта температур, можна сказати, що для розв'язання даної окремої задачі цей вид теплопередачі із загального балансу може бути виключений.

Розв'язання задачі в разі спільного теплообміну «способами» конвекції і випромінювання можна подати у наступних двох варіантах розв'язання – приблизному і точному. Приблизний варіант необхідний для визначення меж області існування даного розв'язання. Для розв'язання вводиться поняття коефіцієнта тепловіддачі  $\alpha$ , який дорівнює щільності теплового потоку на поверхні розділу, віднесеного до різниці температур між середовищем і поверхнею. Задаємося умовами для визначення математичної моделі охолодження розплавленої краплі металу в повітрі.

Форма краплі – ідеальна куля, радіус краплі –  $R$ , вага краплі –  $G$ , теплоємність

краплі –  $C$ , матеріал краплі – мідь, алюміній, сталь зі щільністю металу –  $\rho$ .

Розглянемо наближений розв'язок.

За рахунок випромінювання крапля (куля) втрачає енергію  $dQ$  за час  $dt$ :

$$dQ_u = 4\pi R^2 \varepsilon \sigma_0 T_H^4 dt, \quad (2)$$

де  $\varepsilon \approx 1$  – ступінь чорноти (коефіцієнт випромінювання) поверхні краплі;  $\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8}$  (Вт/м<sup>2</sup>·°К<sup>4</sup>) – постійна Стефана – Больцмана.

Втрати конвективного теплообміну складуть:

$$dQ_k = 4\pi R^2 \alpha (T_H - T_B) dt, \quad (3)$$

де  $\alpha$  – [Вт/м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>] коефіцієнт тепловіддачі між поверхнею краплі з температурою нагріву  $T_H$  і повітрям, який має в загальному випадку температуру  $T_B$ , тоді сумарна втрата енергії дорівнюватиме:

$$dQ = dQ_u + dQ_k = [4\pi R^2 \varepsilon \sigma_0 T_H^4 dt + 4\pi R^2 \alpha (T_H - T_B) dt]. \quad (4)$$

Втрата енергії тягне за собою зміну температури краплі за відомим законом:

$$dQ = cG\alpha T_H. \quad (5)$$

Порівнюючи (5) і (4), отримаємо:

$$\alpha T_H = \frac{4\pi R^2 \varepsilon \sigma_0}{cG} \left( T_H^4 + \frac{\alpha}{\varepsilon \sigma_0} T_H - \frac{\alpha}{\varepsilon \sigma_0} T_B \right) dt. \quad (6)$$

Після перетворення рівність матиме вигляд:

$$\frac{cG}{4\pi R^2 \alpha T_\infty} \cdot \left( \frac{1}{\frac{\varepsilon \sigma_0}{\alpha T_\infty} \cdot T_H^4 + \frac{1}{T_B \cdot T - 1}} \right) \cdot dT_H = dt. \quad (7)$$

Проінтегруємо цей вираз від  $t_0$  – початкової температури в момент часу  $t = 0$  і до  $T_K$  – кінцевої температури, що досягається за час  $t_K$ . Введемо припущення і, нехтуючи одиницею в знаменнику, тоді, використовуючи табличний інтеграл, отримаємо:

$$\int \frac{dx}{x(a + bk^m)} = \frac{1}{a \cdot m} \cdot \ln \left| \frac{x^m}{a + bk^m} \right|. \quad (8)$$

Після перетворень отримуємо в кінцевому вигляді рівняння:

$$\frac{\bar{c} R \rho}{9\alpha} \cdot \ln \left| \frac{1 + \frac{\varepsilon \sigma_0}{T_K^3}}{1 + \frac{\varepsilon \cdot \sigma_0}{T_H^3}} \right| = \Delta t. \quad (9)$$

Необхідно враховувати, що у разі охолодження рідкої краплі до досягнення температури кристалізації за час  $\Delta t_{кр}$  температура її залишається незмінною.

Цей час знайдемо з умови:

$$\frac{4}{3} \cdot \pi \cdot R^3 \cdot \rho \cdot \Delta H = [4\pi R^2 \varepsilon \sigma_0 T^4 + 4\pi R^2 \alpha \cdot (T_{кр} - T_e)] \cdot \Delta t_{кр}, \quad (10)$$

$$\Delta t_{кр} = \frac{R \cdot \rho \cdot \Delta H}{3[\sigma_0 \varepsilon T_{кр}^4 + \alpha(T_{кр} - T_\infty)]} \text{сек},$$

де  $T_{кр}$  – температура плавлення (кристалізації), К;  $\Delta H$  – теплота плавлення металу, Дж/кг.

Таким чином, визначаючи час охолодження краплі від  $T_H$  до  $T_K$ , але не нижче, ніж температура кристалізації, слід використовувати вираз (9) і всі дані брати для рідкого металу. Для температури нижче температури кристалізації можна зробити припущення, що час кристалізації малий, і його можна не враховувати в сумарному часі охолодження [4].

Тепер розглянемо уточнене розв'язання. Рівняння (2) набуде вигляду:

$$dQ_k = 4\pi R^2 \varepsilon \sigma_0 (T_H - T_B)^4 dt. \quad (11)$$

Рівняння (3) залишається в колишньому вигляді.

Рівняння (4) набуде вигляду:

$$dQ = [4\pi R^2 \varepsilon \sigma_0 (T_H - T_B) + 4\pi R^2 \alpha (T_H - T_B)] dt. \quad (12)$$

Рівняння (5) не змінюється. Рівняння (6) набуде вигляду:

$$\alpha T_H = \frac{4\pi R^2 \varepsilon \sigma_0}{\bar{c} G} [(T_H - T_B) +$$

$$+ \frac{\alpha}{\varepsilon \sigma_0} T_H - T_B] dt. \quad (13)$$

Після перетворення рівняння (13) отримаємо:

$$\frac{\bar{c} G}{4\pi R^2 \varepsilon \sigma_0} \cdot \left[ \frac{1}{(T - T_\infty)^4 + (T - T_\infty) \cdot \frac{\alpha}{\varepsilon \sigma_0}} \right] \cdot dT = dt. \quad (14)$$

Проінтегруємо рівняння (14) і отримаємо в остаточній формі:

$$\Delta t = \frac{\bar{c} R \rho}{9\alpha} \cdot \ln \frac{\frac{1}{(T_b - T_e)^3 + \frac{\varepsilon \sigma_0}{\alpha}}}{\frac{1}{(T - T_e)^3 + \frac{\varepsilon \sigma_0}{\alpha}}}. \quad (15)$$

У результаті розв'яземо задачу на визначення часу  $\Delta t$  теплообміну за наступних початкових умов: матеріал краплі – мідь,  $T_K = 1\,000$  К, радіус краплі –  $3 \cdot 10^{-3}$  м, щільність міді  $\rho = 8,92 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>, теплоємність міді –  $c = 385,5$  Дж/(кг·К),  $\sigma_0 = 5,67 \cdot 10^{-8}$  Вт/м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>,  $\varepsilon = 0,5$ ,  $\alpha = 17$  Вт/м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>.

Наведений вище розв'язок з відомими допущеннями дозволив визначитися в масштабі часу охолодження частинки розпеченого металу, дати технічне завдання на розроблення установки, що дозволяє обробляти зразки теплозахисних матеріалів частинками розпеченого металу, задаючись їх розмірами, температурою нагріву і швидкістю удару об зразок. Беручи швидкість польоту частинки металу 1 м/с, а відстань від точки нагріву і точки викиду до зразка в межах 150...200 мм, допускаємо зниження температури за рахунок конвективної тепловіддачі в межах  $\pm 8\%$ , що вписується в допустиму похибку  $\pm 10\%$ .

Проведено вимірювання температури декількох партій з 10 кульок, розміром 4 мм, які використовуються в установці при 11 значеннях фіксованого часу. Результати експериментального дослідження зведені в таблицю. З рисунка 1 і таблиці видно, що за високих температур нагріву кульки і за її охолодження до 500 °С розбіжність у розрахунку приблизним і точним методами перебуває в межах реального масштабу часу.

Таблиця

## Результати цифрового розв'язання

$T_{ки}$ К	1000	900	800	700	600	500	400	300
$\Delta t$ при бл. розрах., с	0	8,8	20,6	36,5	57,9	86,8	126	180

З урахуванням недоліків існуючих методів ми пропонуємо більш досконалий метод і установку для випробування теплозахисних матеріалів [4].

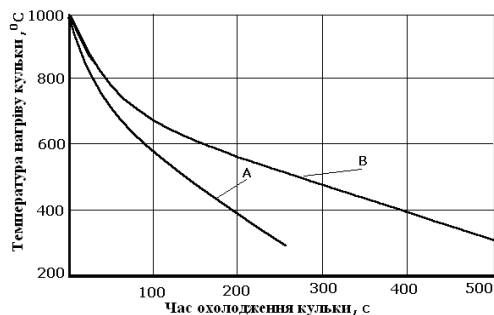


Рис. 1. Залежність часу охолодження кульки від температури її нагріву:

А – результати наближеного розрахунку,  
В – результати точного розрахунку

На рисунку 2 наведено функціональну схему розробленого пристрою де рамка із затиснутим у ній зразком, пов'язана з механізмом її пересування, згідно з програмою зміни координат.

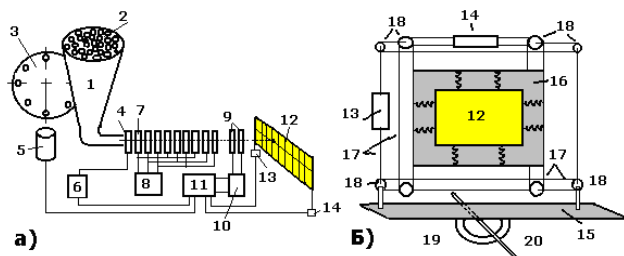


Рис. 2. Установка дослідження теплозахисних матеріалів на іскристійкість

Установка (рис. 3) складається з бункера-накопичувача 1 зі сталевими кульками 2, диска сепаратора 3, який приводиться в рух мотором 5, жолобів для подачі кульки в зону нагріву індуктора-

нагрівача 4, з гальмівним електромагнітом, штовхача з приводом від електромагнітного лінійного двигуна 7. Система керування і контролю процесу нагріву складається з радіаційного пірометра, вихід якого пов'язаний через реєстратор температури із задатчиком температури, вихід якого пов'язаний із входом блока керування 11, один із виходів якого пов'язаний з регулятором сили струму 6 індуктора 4, а інший вихід – із регулятором сили струму 8 в електромагнітному лінійному двигуні 7, з боку входного отвору якого розташовані датчики вимірювання швидкості 9, вихід яких підключений до реєстратора швидкості, а вихід його підключений до блока керування 11, із блоком живлення. Механізм переміщення зразка щодо лінійного двигуна і нагрівача має двигуни 13 і 14, розміщені на платформі 15.

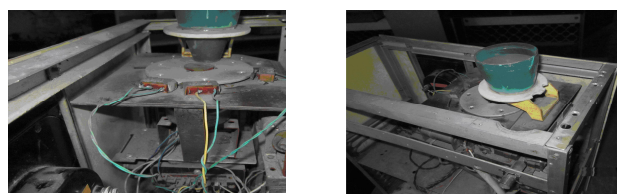


Рис. 3. Механізм сортування (а) та виштовхування (б) металевих кульок

Рухомою рамка 16 зі зразком 12 кріпиться сталевими тросами 17, які рухаються по блоках 18. Платформа 15 має можливість повороту щодо траєкторії руху розпеченої кульки за допомогою планки 20 на осі обертання 19.

**Висновок.** Уперше пропонується новий метод контролю та випробування теплозахисних матеріалів, який дозволяє доповнити існуючі та отримати більш достовірні результати.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Аметистов Е. В. Основы теории теплообмена. Москва : МЭИ, 2011. 242 с.
2. Зигель Р., Хауэлл Дж. Теплообмен излучением. Москва : Мир, 2005. 934 с.
3. Ragimov S., Sobyna V., Vambol S., Vambol V., Feshchenko A., Zakora A., Strejekurov E., Shalomov V. Physical modeling of changes in the energy impact on a worker taking into account high-temperature radiation. *International Scientific Journal. Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*. Vol. 91/1. 2018. Pp. 27–33.
4. Беликов А. С., Рагимов С. Ю., Шаломов В. А. и др. Исследование термодинамической напряженности на рабочих местах при воздействии высоких температур : монография. Днепро : Литограф, 2016. 163 с.

5. Makino T., Kunitomo T., Sakai I. Thermal radiation properties of ceramic materials. Heat Transfer – Japanese Research. 2014. Vol. 13, № 74. Pp. 33–50.

## REFERENCES

1. Ametistov E.V. *Osnovyi teorii teploobmena* [Bases of theory of heat exchange]. Moscow : MEI, 2011, 242 p. (in Russian)
2. Zigel' R. and Khauehll Dzh. *Teploobmen izlucheniem* [Heat exchange by a radiation]. Moscow : Mir Publ., 2005, 934 p. (in Russian)
3. Ragimov S., Sobyna V., Vambol S., Vambol V., Feshchenko A., Zakora A., Strejekurov E. and Shalomov V. Physical modeling of changes in the energy impact on a worker taking into account high-temperature radiation. International Scientific Journal / Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering. Vol. 91/1, 2018, pp. 27–33.
4. Belikov A.S., Ragimov S.Yu. and Shalomov V.A. *Issledovanie termodinamicheskoy napryazhennosti na rabochih mestah pri vozdeystvii vyisokih temperatur* [The study of thermodynamic tension in the workplace under the influence of high temperatures]. Dnipro : Litograf Publ., 2016, 163 p. (in Russian)
5. Makino T., Kunitomo T. and Sakai I. Thermal radiation properties of ceramic materials Heat Transfer – Japanese Research. 2014, vol. 13, no. 74, pp. 33–50.

Надійшла до редакції: 01.11.2020.