

УДК 666.9-1

Г. К. ВОРОНОВ, В. І. БЛЯКОВ, Д. О. ФЕДОТОВ, О. Г. БОБРОВ

**ПЕРСПЕКТИВИ ЗАСТОСУВАННЯ КОМПОЗИЦІЙНИХ ТЕПЛОЗАХИСНИХ ПОКРИТТІВ ДЛЯ ЗНИЖЕННЯ ІЧ-СІГНАТУРИ БРОНЕТЕХНІКИ**

Розглянуто та проаналізовано існуючі методи протидії тепловізійній розвідці та встановлено перспективність застосування пасивних засобів зниження ІЧ-сигнатури бронетехніки, зокрема захисних покриттів. Проведено моделювання ефективності дії композиційного теплозахисного покриття на спеціально розробленому випробувальному стенді. Визначено характер тепловипромінювання для поверхні з двох та трьохшаровими захисними покриттями різних типів. Розраховано коефіцієнт інтенсивності ІЧ-сигнатури по температурі поверхні. Підтверджено ефективність застосування тришарових композиційних теплозахисних покриттів як засобу зниження ІК-сигнатури бронетехніки.

**Ключові слова:** композиційне покриття, ІЧ-сигнатура, бронетехніка, теплове випромінювання, коефіцієнт інтенсивності

Рассмотрены и проанализированы существующие методы противодействия тепловизионной разведке и установлена перспективность применения пассивных средств снижения ИК-сигнатуры бронетехники, в частности защитных покрытий. Проведено моделирование эффективности действия композиционного теплозащитного покрытия на специально разработанном испытательном стенде. Определен характер тепловыделения для поверхности с двух и трехслойными защитными покрытиями различных типов. Рассчитан коэффициент интенсивности ИК-сигнатуры по температуре поверхности. Подтверждена эффективность применения трехслойных композиционных теплозащитных покрытий как средства снижения ИК-сигнатуры бронетехники.

**Ключевые слова:** композиционное покрытие, ИК-сигнатура, бронетехника, тепловое излучение, коэффициент интенсивности

The existing methods of counteraction to thermal imaging are considered and analyzed, and the prospect of using passive means of reducing the infrared signature of armored vehicles, in particular protective coatings, has been established. The main requirements for heat-insulating coatings have been determined and the need to use multilayered compositions. The simulation of the effectiveness of the composite heat-protective coating on a specially designed test bench has been carried out. Determination of the external heat-emitting ability of the camera surface was carried out by the thermal imaging method. The character of heat emission for a surface with two and three-layer protective coverings of various types is determined. The intensity of infrared radiation for multi-layer compositions is determined. The coefficient of intensity of the IR signature on the surface temperature is calculated. The effectiveness of three-layer composite heat-shielding coatings as a means of reducing the IR signature of armored vehicles has been confirmed.

**Key words:** composite coating, IR signature, armored vehicles, thermal radiation, intensity factor

**Вступ.** На сьогодні більшість армій світу широко застосовують тепловізори в якості приладів розвідки та наведення для систем озброєння військової техніки. Системи ІЧ-термографії мають цілий ряд факторів які обумовлюють їх широке розповсюдження – мала залежність від атмосферного впливу; незначна чутливість до димових завіс; велика дальність дії та пасивний принцип роботи, що запобігає їх виявленню противником. Все це дає можливість ефективно знаходити та вражати цілі, що недосяжні для візуального спостереження. Поряд з цим традиційні заходи захисту броньованої техніки стають малоефективними при застосуванні приладів тепловізійної розвідки. Основним демаскуючим фактором для бронетехніки є її двигуни, які є достатньо потужними і, як наслідок, стають сильними джерелами теплового випромінювання. Також металеві поверхні машин можуть випромінювати в ІЧ-діапазоні при роботі в запеклих умовах. В сучасних умовах ведення бойових дій, розробка методів протидії тепловізійним засобам розвідки повинна бути одним з пріоритетних напрямків досліджень у галузі військової техніки.

**Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими та практичними завданнями.**

Огляд та аналіз даних з існуючих та перспективних методів та засобів протидії тепловізорам показує, що основні ідеї протидії тепловізійній розвідці включають скочування або визначення ІЧ-сигнатури

об'єкта. Це досягається наступним чином [1 – 4]:

- шляхом укриття поверхні об'єкту масками зі щільних природних матеріалів товщиною не менш 15 см (мати з жердин, гілок, очерету та інше);
- розташуванням на поверхні машини різних предметів, що мають невисоку теплопровідність і неправильну геометричну форму (на основі поролону, пінопласту, вати, повсті та т.п.). Елементи поверхні машини – рисунок 1, розташовані під деяким «критичним» кутом, можуть відображати більш «холодне» небо, що також призводить до зміни ІК сигнатури,;
- використанням спеціальних накидок, що екранують теплове випромінювання (щільні брезентові та інші покриття), що показано на рисунок 2;
- застосуванням пасивних засобів захисту, які орієнтовані на приховування інфрачервоного випромінювання: спеціальних мастик, покриттів (фольги, за умови, що вона досить віддалена від поверхні, яку маскує), екранують теплове випромінювання, які наносяться на техніку.

Дані аналізу показують перспективність застосування у якості пасивних засобів захисту сучасних композиційних теплозахисних матеріалів, що поєднують фізико-хімічні та експлуатаційні властивості як

неорганічних, так і органічних речовин. Основні вимоги до термоізоляційним покриттям, відповідним цілям даної роботи, включають перш за все: безвипальний спосіб формування, відносно низькі значення питомої теплопровідності, щільності, товщини, а також істотну пористість і механічну міцність покриттів. Цим вимогам у великій мірі відповідають плазмові і газополум'яні неорганічні і композиційні покриття, з яких перевагу надають останнім, завдяки досить високій продуктивності, низькій вартості процесу нанесення, можливості обробки великих площ і мобіль-

ності обладнання, що дозволяє виробляти напилення на місці, без демонтажу деталей техніки [5, 6].

Як найбільш ефективний і раціональний спосіб зниження ІК-сигнатури можна вважати використання двошарових покриттів, що складаються з базового підшару з неорганічних матеріалів, нанесених газополум'яним методом і верхнього шару з композиційного матеріалу на основі полімерного сполучного і скляних або керамічних мікросфер. Такі покриття забезпечать не тільки помітне (до 50 %) зниження ІК-сигнатури техніки, а й механічну міцність покриттів, що підвищує їх термін служби в цілому.



Рис. 1. Адаптивний камуфляж системи ADAPTIV (BAE SYSTEMS): а – загальний вид камуфльованого об'єкту; б – фрагмент адаптивного камуфляжу.



Рис. 2. Радіопоглинаючий матеріал «Терновник» (НПП «Радиострим», РФ).

**Експериментальна частина.** У даній роботі для оцінки ефективності використання композиційних теплозахисних покриттів як пасивного захисту від тепловізійної розвідки були проведені дослідні випробування з моделюванням рухового відсіку легкоброньованого транспортного засобу (БТР або БМП).

При моделюванні джерела інфрачервоного випромінювання виходили з умовного уявлення відсіку як замкнутої металевій ємності (камери), в якій розташований джерело випромінювання – еквівалент двигуна транспортного засобу. Відповідно, основними поверхнями теплопоглинання (для внутрішнього се-

редовища) і тепловипромінювання (для зовнішнього середовища) буде корпус рухового відсіку. Виходячи з робочих характеристик двигунів БМП і БТР, а також максимальних допустимих робочих температур мастильних і охолоджуючих рідин передбачувана температура поверхні корпусу не перевищує 100 °С.

Для практичної оцінки теплової ізоляції пропонуваного покриття застосовано випробувальний стенд, який імітує внутрішній простір рухового відсіку легко броньованого транспортного засобу. Основним елементом стенду є металеві камера зі сталі СтЗсп розміром 200 × 200 × 200 мм з товщиною стінок

4 мм. Для розміщення джерела теплового випромінювання одна зі стінок камери відсутня, що показано на рисунку 3. Джерело теплового випромінювання уводиться всередину камери через відсутню задню стінку та для забезпечення режиму рівномірної теплопередачі розміщується рівновіддалено від її стінок. Потужність джерела випромінювання (електричний нагрівач потужністю 200 Вт) обрана такого значення, щоб очі-



кувана температура поверхонь при досягненні режиму стаціонарного теплообміну не перевищувала гранично допустиму температуру нагрівання стінок.

При досягненні стаціонарного режиму теплообміну температура зовнішньої поверхні вимірювальної камери фіксується за допомогою штатного вимірювального пристрою (цифрового термометра), що входить до складу стенду.



Рис. 3. Зовнішній вигляд випробувального стенду з закріпленою камерою та розташованим джерелом ІЧ випромінювання.

Для виконання вимірювань на розробленому стенді було виготовлено кілька однотипних вимірювальних камер для порівняльних вимірів тепловипро-

мінюючої здатності неізолюваною поверхні і поверхонь з різними варіантами теплозахисного покриття.



Рис. 4. Зовнішній вигляд випробувальної камери без покриття та з нанесеним теплозахисним покриттям

Визначення зовнішньої тепловипромінюючої здатності поверхні камери проводилося тепловізійним методом, який обрано, як найбільш ефективний спосіб оцінки енерго- і теплозберігаючих заходів в теплотехніці і енергетиці [6]. Для проведення вимірювань використано портативний тепловізор типу FLIR E6, що має в діапазоні вимірюваних температур наступні параметри:

- спектральний діапазон: 8 – 14 мкм;
- температурна чутливість: 0,1 °С;
- точність вимірювання температури:  $\pm 1$  °С.

**Результати та обговорення.** Дистанційні вимірювання температури поверхонь проводилися в стаціонарному режимі (час витримки до вимірювання – 30 хв.) у приміщенні з температурою навколишнього середовища з відстані 3 м за відсутності додаткових джерел тепла (крім оператора). Температура всередині

приміщення на момент проведення замірів складала – 8 °С та 14 °С.

Тепловізійні вимірювання проводилися серіями – не менше 3-х вимірів для кожного зразка. Для проведення вимірювання використовувалися зразки (у вигляді вимірювальних камер): без покриття, з різними типами нанесених покриттів – композиційним полімерним покриттям (КМП), газополум'яним оксидним покриттям (ГОП) та з поєднанням кількох прийомів:

- контрольний зразок – без покриття;
- зразок 1: 2 шари КМП, нанесених на зовнішню поверхню камери;
- зразок 2: 1 шар КМП нанесений на зовнішню поверхню камери + 1 шар КМП нанесений на внутрішню поверхню;
- зразок 3: 1 шар ГОП + 2 шари КМП нанесених на зовнішню поверхню камери;

– зразок 4: 1 шар ГОП + 2 шари КМП нанесених на зовнішню поверхню камери + 1 шар КМП нанесений на внутрішню поверхню.

Середня товщина нанесених шарів покриття становила: для 1 шару ГОП – 120 мкм (0,12 мм); для 1 шару КМП – 150 мкм (0,15 мм).

Коефіцієнт інтенсивності інфрачервоного випромінювання ( $K_{ІЧ}$ ) виражений в процентах приймався за 100 % для контрольного зразка (без покриття).

Коефіцієнти випромінювання всіх зразків з теплоізоляційними покриттями у спектральному діапазоні 8 – 14 мкм (який відповідає інтервалу температур,

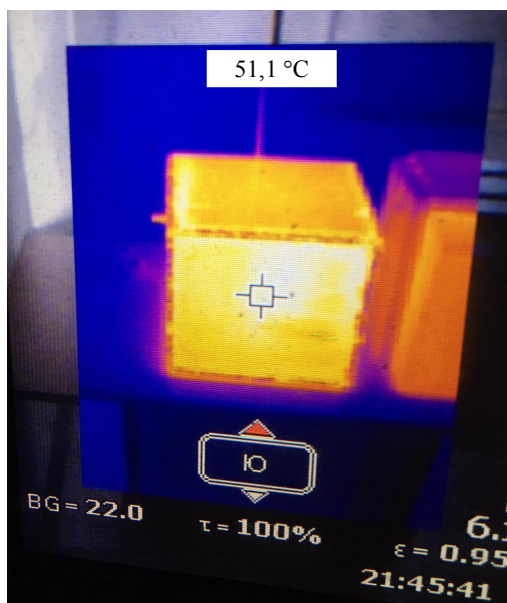
який нас цікавить), якісно і кількісно оцінені термограмою, виявилися порядку  $\varepsilon \approx (0,85 - 0,95)$ .

З урахуванням похибок дистанційних і контактних вимірів температур ( $T = \pm 1^\circ \text{C}$ ), відхилень середньої товщини покриттів ( $\Delta h = \pm 0,05 \text{ мм}$ ), неоднорідностей поверхні, а також припущень, що використовуються при спрощених інженерних розрахунках, можна оцінити точність вимірювання питомої теплового потоку  $\Delta q \approx \pm 10 \text{ Вт / м}^2$ , коефіцієнтів теплопровідності  $\Delta k \approx \pm 0,1 \text{ Вт / (м} \cdot \text{К)}$ .

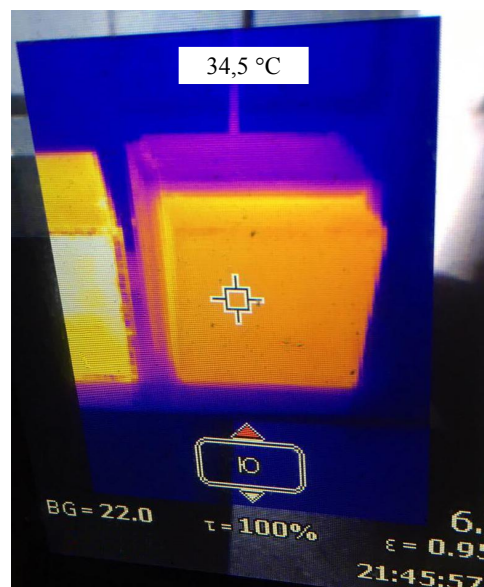
Результати проведених замірів для всіх зразків наведені в таблиці 1.

Таблиця 1. Заміри температурних показників на поверхні вимірювальних камер (Час витримки 30 хв.)

Маркування зразків	Температура навколишнього середовища – 8 °С				Температура навколишнього середовища – 14 °С			
	Температура за замірами			$K_{ІЧ}$ , %	Температура за замірами			$K_{ІЧ}$ , %
	1	2	3		1	2	3	
Контрольний без покриття	45	46	45	100	61	62	62	100
Зразок 1	36	36,5	36	76	47	48	49	71
Зразок 2	36	35	35,5	74	45	46	48	67
Зразок 3	31	32	31,5	64	38	40	41	54
Зразок 4	30	31	30	60	37	38	39	51



а



б

Рис. 5. Теплове зображення випробувальної камери:

а – без покриття; б – з нанесеним шаром теплозахисного покриття.

Розподіл температури на зовнішній тепловипромінюючої поверхні є функцією великого числа як внутрішніх факторів (параметрів і теплофізичних властивостей середовища, матеріалу поверхні, теплоізоляції та їх неоднорідностей), так і зовнішніх (умов теплообміну з навколишнім середовищем). У стаціонарних умовах температурне поле на зовнішній поверхні ка-

мери визначається існуванням в кожній точці поверхні балансу між тепловим потоком, що приходять від теплоносія, і тепловіддачею в навколишнє середовище [7].

Для даних умов моделювання була прийнята спрощена схема обчислення коефіцієнту інтенсивності ІЧ-сигнатури в % ( $K_{ІЧ}$ ) по температурі поверхні.

Умовні позначення прийняті при обчисленні:

$t_0$  – температура навколишнього середовища, °C;

$t_1$  – температура зразка без покриття, °C;

$t_2$  – температура образця з покриттям, °C;

$\alpha$  – діапазон спектру ІЧ випромінювання від чорного до білого

$$\alpha = t_1 - t_0$$

$K_{ІЧ}$  сигнатури температури поверхні можна визначити наступним чином (приклад):

$$t_1 - 50 \text{ °C};$$

$$t_2 - 30 \text{ °C};$$

$$t_0 - 10 \text{ °C}.$$

$$1) \quad t_1 - t_0 = 50 - 10 = 40 \text{ °C};$$

$$2) \quad t_2 - t_0 = 30 - 10 = 20 \text{ °C};$$

$$3) \quad \text{з пропорції:} \quad \begin{array}{l} 40 - 100 \\ 20 - X(K_{ІЧ}), \end{array}$$

4) знаходимо

$$X(K_{ІЧ}) = 2000/40 = 50 \text{ \%}.$$

### Висновки.

Максимально низьку температуру 30 °C поверхні показав зразок 4. Коефіцієнт інтенсивності ІЧ-сигнатури,  $K_{ІЧ}$  склав 60 %. Характер зміни температури зовнішньої поверхні показує, що подальше збільшення покриття на товщину 1 шару веде до зниження величини  $K_{ІЧ}$  на 8 – 10 %. Зниження сигнатури більш яскраво виражено при підвищенні температури навколишнього середовища.

Результати отримані в ході моделювання вказують на достатню ефективність застосування, навіть, двошарових композиційних теплозахисних покриттів як пасивного засобу зниження ІЧ-сигнатури бронетехніки.

Практичне застосування результатів в практиці бойової діяльності з'єднань, частин і підрозділів Збройних Сил України дозволить допомогти вирішенню проблеми протидії тепловізійній розвідці і суттєво підвищити живучість і захищеність техніки.

### Список литературы

1. Byrnes J. *Unexploded Ordnance Detection and Mitigation*. Netherlands: Springer Science & Business Media, 2009, (NATO Science for Peace and Security Series B: Physics and Biophysics), 286 p.

### Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

**Перспективи застосування композиційних теплозахисних покриттів для зниження ІЧ-сигнатури бронетехніки / Г. К. Воронов, В. І. Біляков, Д. О. Федотов, О. Г. Бобров** // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні дослідження у наукових роботах студентів. – Х. : НТУ «ХПІ», 2017. – № 41(1263). – С. 65–70. – Бібліогр.: 7 назв. – ISSN 2220-4784.

2. Поляков С. Ю. Пути усовершенствования противодействия тепловизионной разведке / [С. Ю. Поляков, В. М. Ленкин, С. С. Королев, Г. А. Змиевской] // Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних Сил, 2015. – 1 (42). – С. 7 – 15.
3. Куликовский Э.И. Разработка облегченных РПМ и применение их в маскировочных покрытиях / Э. И. Куликовский, А. Н. Буланова // Журнал депонированных рукописей. 2000. – № 5. – С. 28 – 34.
4. Стаховський О.В. Вирішення танковими (механізованими) підрозділами задачі маскуванню / О. В. Стаховський // Системи озброєння і військова техніка. – 2010. – № 1 (21). – С. 87 – 90.
5. Семченко Г. Д. Теплоизоляционные материалы: учеб. пособие. – Х.: НТУ «ХПІ», 2006. – 285 с.
6. Ющенко К. А. Инженерия поверхности: підручник / [К. А. Ющенко, Ю. С. Борисов, В. Д. Кузнецов, В. М. Корж]. – К.: Наук. думка, 2007. – 559 с.
7. Домбровский Л. А. Моделирование теплового излучения полимерного покрытия содержащего полые микросферы / Л. А. Домбровский // Теплофизика высоких температур, 2005 – Том 43. – № 1. – С. 111.

### References (transliterated)

1. Byrnes J. *Unexploded Ordnance Detection and Mitigation*. Netherlands: Springer Science & Business Media, 2009, (NATO Science for Peace and Security Series B: Physics and Biophysics), 286 p.
2. Polyakov S. Yu., Lenkin V. M., Korolev S. S., Zmievskoy G. A. Puti usovershenstvovaniya protivodeystviya teplovizionnoy razvedke [Ways to improve countermeasures for thermal imaging]. *Zbirnik naukovih prats Harkivskogo universitetu Povitryanih Sil*, 2015, no 1 (42), pp. 7 – 15.
3. Kulikovskiy E. I., Bulanova A. N. Razrabotka oblegchenykh RPM i primeneniye ih v maskirovochnykh pokrytiyakh [Development of lightweight RPMs and their application in camouflage coatings]. *Zhurnal deponirovannykh rukopisey*. 2000, no 5, pp. 28 – 34.
4. Stahovskiy O.V. Virshennya tankovimi (mehanizovanimi) pidrozdilami zadachi maskuvannya [Solving the tank (mechanized) divisions of the task of masking], *Sistemy ozbroennya i viyskova tehnika*. 2010, no 1 (21), pp. 87 – 90.
5. Semchenko G.D. *Teploizolyatsionnyye materialy: Ucheb. posobie* [Thermal insulation materials: Textbook. allowance], Kharkov, NTU "KhPI", 2006, 285 p.
6. Yuschenko K. A., Borisov Yu. S.; Kuznetsov V. D.; Korzh V. M. *Inzheneriya poverhni: pidruchnik* [Surface engineering: tutorial], Kiev, Nauk. dumka, 2007, 559 p.
7. Dombrovsky L. A. Modeling of thermal radiation of polymer coating containing hollow microspheres. *High Temperature*. 2005, vol. 43, no. 2, pp. 247 – 258.

Надійшла (received) 20.09.17

**Перспективы применения композиционных теплозащитных покрытий для снижения ИК-сигнатуры бронетехники / Г. К. Воронов, В. И. Биляков, Д. А. Федотов, А. Г. Бобров** // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні дослідження у наукових роботах студентів. – Х. : НТУ «ХПІ», 2017. – № 41(1263). – С. 65–70. – Бібліогр.: 7 назв. – ISSN 2220-4784.

**Prospects for using composite heat-protective coatings to reduce the IR signature of armored vehicles / H. Voronov, V. Bilyakov, D. Fedotov, A. Bobrov** // Bulletin of National Technical University «KhPI». Series: Innovation researches in students' scientific work. – Kharkiv: NTU «KhPI», 2017. – № 41(1263). – С. 65–70. – Bibliog.: 7 titles. – ISSN 2220-4784.

*Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors*

**Воронов Геннадій Костянтинівич** – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», старший науковий співробітник кафедри технології кераміки, вогнетривів, скла та емалей; тел.: +38 (066) 144-99-73;

e-mail: voronov1976@ukr.net.

**Воронов Геннадий Константинович** – кандидат технических наук, доцент, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», старший научный сотрудник кафедры технологии керамики, огнеупоров, стекла и эмалей; тел.: +38 (066) 144-99-73;

e-mail: voronov1976@ukr.net

**Voronov Hennadiy Kostyantynovich** – Candidate of Engineering Sciences (Ph. D), Docent, National Technical University “Kharkov Polytechnic Institute”, Docent at the Department of Technical Electrochemistry; tel.: ++38 (066) 144-99-73; e-mail: voronov1976@ukr.net.

**Биляков Владимир Иванович** – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», начальник науково-дослідної лабораторії бронетанкового озброєння та військової техніки факультету військової підготовки; тел.: +38(093) 633-56-20; e-mail: ndl\_bto@ukr.net.

**Биляков Владимир Иванович** – Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», начальник научно-исследовательской лаборатории бронетанкового вооружения и военной техники факультета военной подготовки; тел.: +38 (093) 633-56-20; e-mail: ndl\_bto@ukr.net.

**Bilyakov Vladimir** – National Technical University “Kharkov Polytechnic Institute”, Head of the Armored Weaponry and Military Vehicles Research Laboratory of Military Training Faculty; tel.: +38 (093) 633-56-20; e-mail: ndl\_bto@ukr.net.

**Федотов Дмитро Олексійович** – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», провідний науковий співробітник науково-дослідної лабораторії бронетанкового озброєння та військової техніки факультету військової підготовки; тел.: +38 (097) 737-61-50; e-mail: ndl\_bto@ukr.net.

**Федотов Дмитрий Алексеевич** – кандидат технических наук, доцент, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», ведущий научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории бронетанкового вооружения и военной техники факультета военной подготовки; тел.: +38 (097) 737-61-50; e-mail: ndl\_bto@ukr.net.

**Fedotov Dmytro** – Candidate of Engineering Sciences (Ph. D), Docent, National Technical University «Kharkov Polytechnic Institute», Lead Research Associate of the Armored Weaponry and Military Vehicles Research Laboratory of Military Training Faculty; tel.: +38 (097) 737-61-50; e-mail: ndl\_bto@ukr.net.

**Бобров Александр Геннадійович** – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», старший науковий співробітник науково-дослідної лабораторії бронетанкового озброєння та військової техніки факультету військової підготовки; тел.: +38 (067) 957-00-36, e-mail: ndl\_bto@ukr.net.

**Бобров Александр Геннадьевич** – Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», старший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории бронетанкового вооружения и военной техники факультета военной подготовки; тел.: +38(067)-957-00-36, e-mail: ndl\_bto@ukr.net.

**Bobrov Alexander** – National Technical University “Kharkov Polytechnic Institute”, Senior Research Associate of the Armored Weaponry and Military Vehicles Research Laboratory of Military Training Faculty; tel.: +38 (067) 957-00-36; e-mail: ndl\_bto@ukr.net.