detonation of the warhead is provided by the cumulative jet. Calculations of engineering defense systems to increase the survivability of military equipment and structures were carried out. It has been proven that shelters should have both pre-detonation screens and an internal protective shell to neutralize all damage factors. Calculated distances at which the cumulative jet does not pose a significant danger and the combat part of unmanned aerial vehicles can be considered as high-explosive fragmentation. The proposed classification of the engineering protection system to increase the survivability of military equipment and structures, by categories, material and degree of protection. The main requirements that protective pre-detonation screens must meet are formulated. Examples of effective options for the arrangement of protective pre-detonation screens are considered, in particular, based on circular weaving nets. The strength of such products has been confirmed by numerical simulations in software complexes based on the finite element method, as well as by full-scale experiments conducted abroad. It was noted that mesh and lattice pre-detonation screens by themselves do not provide full protection, they are only able to create a safe distance from the anti-aircraft missile to the possible point of explosion of the combat part of the unmanned aerial vehicle, and also increase the chance of its trajectory being distorted and the detonator not detonating when it collides with the screen.

***Keywords**: engineering protection, UAV, Lancet, "Fortress country", pre-detonation screens, metal structures, nets, fortification, protective structures.*

УДК: 623.454.52 DOI: https://doi.org/10.33577/2312-4458.31.2024.82-91

О.П. Клімов[1], О.В. Ісаков[1], А.С. Пашуба[1], О.М. Купріненко[2]

[1]*Військовий інститут танкових військ Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», Харків*
[2]*Національна академія сухопутних військ імені гетьмана Петра Сагайдачного, Львів*

Article history: Received 13 September 2024; Revised 31 October 2024; Accepted 04 November 2024

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТЕПЛОФІЗИЧНИХ ПРОЦЕСІВ У БУЛЬБАШЦІ ЯК ЕЛЕМЕНТА МАСКУВАЛЬНОЇ ЗАВІСИ

Чисельно досліджено рух бульбашки у потоці повітря з протіканням процесу теплообміну між повітрям, оболонкою бульбашки та підігрітим повітрям всередині бульбашки. Математичне моделювання проведено в програмному продукті Ansys Fluent. *Приймалось, що нагнітання бульбашки відбувається у потік повітря, який має середню швидкість 3 м/с, а середня температура повітря складає 293 К. Розрахунок здійснювався для діаметрів бульбашок, що мають значення 3 мм та 5 мм. Товщина оболонки бульбашки, в середньому значенні дорівнювала 1 мкм. Приймалось, що в момент нагнітання бульбашки у потік повітря початкова температура підігрітого повітря, яким наповнена бульбашка, перевищує температуру навколишнього повітря у першому варіанті на 10 К та у другому варіанті на 30 К. Розраховано поле швидкості потоку повітря, що виникає всередині бульбашки під час її зовнішнього обтікання потоком зі швидкістю 3 м/с та коли зовнішнє повітря є нерухомим. Розраховано температуру поверхні бульбашки та поле векторів швидкості повітря. На підставі аналізу результатів моделювання визначено, що досягнення летючості бульбашки за рахунок підігрівання газу не є доцільним через короткий час охолодження повітря, який у розрахункових варіантах не перевищував 250 мс. Тому в статті визначено найбільш ефективний метод досягнення летючості бульбашки. Робимо загальний висновок, що наповнення газом з густиною є меншою густини повітря за однакових термодинамічних умов. Відмічені процеси мають увійти в основу механізму, який забезпечить високике значення тактичних маскувальних показників бронетанкового озброєння. Вказана функція має максимальну реалізацію в умовах застосування противником приладів нічного бачення. Зазначений напрям має здійснювати постійні кроки розвитку, що є протидією розвідувальним завданням противника. Матеріальна частина дослідження (газ та рідина) є вивчатись у взаємодії та підлягати експериментальному дослідженню. Цей напрям дослідження передбачає досягнення максимального ефекту в рамках протидії розвідувальним діям противника.*

***Ключові слова:** аерозольне маскування, бульбашкова завіса, теплофізичні процеси, математичне моделювання, значення температурних показників (за градусом Кельвіна), потік повітря, тактичні маскувальні показники, розвідувальні ознаки.*

Постановка проблеми

Розвиток збройних сил провідних країн світу та практика їх застосування в останніх воєнних

© О.П. Клімов, О.В. Ісаков, А.С. Пашуба, О.М. Купріненко

конфліктах свідчать про стрімке впровадження в сучасну збройну боротьбу високоточної зброї, носіями яких є безпілотні літальні апарати, за рахунок яких успішно виконуються оперативно-тактичні завдання та забезпечується в цілому успіх операції (бою). Тому проблема зниження помітності військ, їх захисту від вогневого впливу будь-якого виду зброї противника, і насамперед, від високоточних засобів ураження, є актуальною.

Аерозольне маскування є одним із ефективних засобів зниження оптичної помітності військ, об'єктів і створення перешкод для засобів розвідки та наведення зброї противника [1-3]. Але аерозолі, що застосовують у Збройних Силах України, мають задовільні маскуючи властивості лише в ультрафіолетовому, видимому і ближньому інфрачервоному спектрах (від 0,2 – 1,5 мкм) електромагнітного випромінювання та є оптично прозорими для спостереження з тепловізорів. Закордонні аерозолеутворюючі речовини не повною мірою відповідають комплексу вимог щодо безпечності та вартості [4-6]. Тому науково-технічна задача розроблення складу завіси, що забезпечує маскування від ультрафіолетового до інфрачервоного діапазонів випромінювання, має властивості низької швидкості осадження, є не токсичною та екологічно чистою та має низьку вартість, відноситься до актуальних задач.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

У роботах [7, 8] запропоновано застосування бульбашкової завіси, яка забезпечує розширення спектру маскування на інфрачервону область випромінювання. При цьому вирішуються завдання збільшення протяжності завіси зі спрощенням умов формування завіси та зниженням її вартості, можливістю формування завіси з окремих проєкцій по відношенню до об'єкта маскування та мінімізацією екологічного впливу на довкілля.

Бульбашкова завіса створюється шляхом нагнітання у повітря безлічі бульбашок кулеподібної форми, які зависають у повітрі, а розмір цих бульбашок перевищує довжину електромагнітних хвиль, в діапазоні яких здійснюється маскування [9]. Бульбашки кулеподібної форми складаються з суцільної оболонки, що сформована з рідини, та внутрішньої порожнини, що наповнена газом з густиною, що є меншою, ніж густина повітря. Для збільшення часу існування бульбашок кулеподібної форми оболонки бульбашок формуються з рідини, що полімеризується. Наповнення порожнини бульбашок газом з густиною, що є меншою, ніж густина повітря, дозволяє створити умови для летючості бульбашок кулеподібної форми у повітрі.

Для забезпечення летючості бульбашки необхідно зменшувати густину газу-наповнювача відносно густини навколишнього повітря. Зниження густини газу-наповнювача можливо досягнути за рахунок підігрівання газу. Підігрівання повітря з 0 ºС до 100 ºС за атмосферного тиску газу призводить до зниження густини повітря з 1,29 кг/м^3 до 0,94 кг/м^3. За такої густини має місце доволі широкий діапазон розмірів бульбашок, що набувають властивості летючості. Вирішення задачі досягнення летючості бульбашки шляхом підігрівання повітря є низько-вартісним. Тому таке технічне рішення доцільно розглянути. Але підігріте повітря у бульбашці буде перебувати в умовах теплообміну з навколишнім повітрям. В результаті, охолодження повітря у бульбашці призведе до втрати летючості. Тому питання охолодження повітря у бульбашці потребує дослідження.

Формування мети статті

Метою роботи є чисельне дослідження теплофізичних процесів під час руху бульбашки у повітряному середовищі. Зазначене супроводжується протіканням процесу теплообміну між зовнішнім повітрям, оболонкою бульбашки та повітрям всередині неї. Крім того, визначається фізична суть можливостей досягнення летючості бульбашки за рахунок підігрівання газу-наповнювача. Зазначене має увійти в основу створення захисного екрана, що дозволить збільшити ступінь тактичних маскувальних показників бронетанкового озброєння.

Виклад основного матеріалу

У результаті постійно зростаючого розвитку технічних засобів розвідки противника збільшується вірогідність виявлення бронетанкового озброєння своїх військ. В ході виконання бойових завдань, в рамках застосування бронетанкового озброєння, збільшується вірогідність її виявлення та знищення. Враховуючи відмічене, технічні заходи щодо тактичних маскувальних показників броньованих об'єктів мають пропорційною мірою нарощуватись. Крім того, основою зниження результатів виявлення розвідувальних ознак озброєння своїх військ має бути розвиток технологій відповідного захисту. Всі новітні розробки основані на законах фізики. Враховуючи зазначене, можливо створити прилад, конструкційними особливостями якого є забезпечення фізичної взаємодії бульбашки рідини та теплового випромінювання об'єкта. Така теплова взаємодія можлива тільки в результаті відповідного технічного рішення, що забезпечить потрібний результат. Вказаний прилад зможе здійснити інфрачервону прихованість роботи бронетанкового озброєння. Таким чином

© О.П. Клімов, О.В. Ісаков, А.С. Пашуба, О.М. Купріненко

виникає потреба збільшення ресурсу фізичного існування бульбашки в повітряному просторі.

Досліджено рух бульбашки у потоці повітря з протіканням процесу теплообміну між повітрям, оболонкою бульбашки та підігрітим повітрям всередині бульбашки. Вирішення цієї задачі проведено в програмному продукті Ansys Fluent. Враховуючи те, що повітря в цій задачі перебуває у газоподібному стані, а оболонка бульбашки у стані рідини, то застосовано теорію за Лагранжевими дискретними фазами на основі підходу Ейлера-Лагранжа. Згідно з таким підходом процеси у газі розглядаються за рівняннями Нав'є-Стокса, а дисперсна фаза розв'язується шляхом відстеження бульбашки через розрахункове поле потоку газу. При цьому між дисперсною фазою та газом відбувається обмін імпульсом, масою та енергією. Область застосування такого підходу обмежується умовою, що можливо знехтувати впливом зіткнень між бульбашками. Такій підхід є допустимим, якщо дисперсна фаза займає малий локальний об'єм і працює навіть у разі перевищення маси бульбашок над масою повітря.

Рух окремої бульбашки визначається з рівняння балансу сил, що викликані інерцією бульбашки та зовнішніми силами, що діють на бульбашку. Це рівняння набуває вигляд [10]

$$m_Б \frac{d\overrightarrow{u_Б}}{dt} = m_Б \frac{\vec{u} - \overrightarrow{u_Б}}{\tau_r} + m_Б \frac{\vec{g}(\rho_Б - \rho)}{\rho_Б} + \vec{F}, \quad (1)$$

де $m_Б$ – маса бульбашки;

$\vec{u}$ – швидкість газу;

$\vec{u}_Б$ – швидкість бульбашки;

ρ – густина газу;

$\rho_Б$ – середня густина речовини у бульбашці;

$\vec{g}$ – прискорення вільного падіння;

$\vec{F}$ – додаткові сили;

$m_Б \frac{\vec{u} - \overrightarrow{u_Б}}{\tau_r}$ – сила опору;

τ_r – час релаксації бульбашки, який визначається за рівнянням [10]

$$\tau_r = \frac{\rho_Б d_Б^2}{18\mu} \frac{24}{C_d \,\mathrm{Re}}, \quad (2)$$

де μ – молекулярна в'язкість газу;

$d_Б$ – діаметр бульбашки;

C_d – коефіцієнт лобового опору;

Re – число Рейнольдса, яке визначається як [10]

$$\mathrm{Re} = \frac{\rho d_Б \left| \overrightarrow{u_Б} - \vec{u} \right|}{\mu}. \quad (3)$$

Момент імпульсу бульбашки розраховувався шляхом рішення звичайного диференціального рівняння [10]

$$I_Б \frac{d\overrightarrow{\omega_Б}}{dt} = \frac{\rho}{2} \left(\frac{d_Б}{2} \right)^5 C_\omega \left| \vec{\Omega} \right| \cdot \vec{\Omega} = \vec{T}, \quad (4)$$

де $I_Б$ – момент інерції бульбашки;

$\overrightarrow{\omega_Б}$ – кутова швидкість бульбашки;

C_ω – коефіцієнт аеродинамічного опору обертання;

$\vec{T}$ – крутний момент, що прикладений до бульбашки;

$\vec{\Omega}$ – відносна кутова швидкість бульбашка-газ, яка визначається з рівняння [10]

$$\vec{\Omega} = \frac{1}{2} \nabla \times \vec{u} - \vec{\omega}_Б. \quad (5)$$

Серед додаткових сил слід враховувати силу, пов'язану з прискоренням газу, що знаходиться навколо бульбашки. Розрахунок цієї сили здійснюється за рівнянням у вигляді [10]

$$\vec{F} = C_{BM} m_Б \frac{\rho}{\rho_Б} \left(\overrightarrow{u_Б} \nabla \vec{u} - \frac{d\overrightarrow{u_Б}}{dt} \right), \quad (6)$$

де C_{BM} – коефіцієнт віртуальної маси.

Також додаткова сила викликана наявним градієнтом тиску у газі. Ця сила визначається за виразом [10]

$$\vec{F} = m_Б \frac{\rho}{\rho_Б} \vec{u} \nabla \vec{u}. \quad (7)$$

У задачі, що розглядається, співвідношення $\rho/\rho_Б$ наближається до одиниці, що викликано умовою летючості. Тому сили віртуальної маси та градієнта тиску стають значними.

У рухомій системі відліку наявна складова додаткових сил. Ця складова додаткової сили, що діє на бульбашку, в декартовій системі координат, наприклад, по осях *x* та *y* визначається за рівнянням [10]

$$m_Б \left(1 - \frac{\rho}{\rho_Б} \right) \Omega^2 x + 2 m_Б \Omega \left(u_{Б,y} - \frac{\rho}{\rho_Б} u_y \right), \quad (8)$$

де $u_{Б,y}$ та u_y – проєкції швидкості бульбашки та газу, відповідно, на вісь *y* в декартовій системі координат, та [10]

$$m_Б \left(1 - \frac{\rho}{\rho_Б} \right) \Omega^2 y + 2 m_Б \Omega \left(u_{Б,x} - \frac{\rho}{\rho_Б} u_x \right), \quad (9)$$

де $u_{Б,x}$ та u_x – проєкції швидкості бульбашки та газу, відповідно, на вісь *x* в декартовій системі координат.

© О.П. Клімов, О.В. Ісаков, А.С. Пашуба, О.М. Купріненко

Вплив температурного градієнта газового середовища на складову додаткової сили визначається за виразом [10]

$$\vec{F} = -D_{T,Б}\frac{1}{T}\nabla T\ , \qquad (10)$$

де $D_{T,Б}$ – термофоретичний коефіцієнт.

Обертання бульбашок призводить до появи підйомної сили Магнуса як обертальної підйомної сили, що виникає, коли частинка обертається в газі. Підйом викликаний появою перепаду тиску вздовж поверхні бульбашки під час обертання. Сила Магнуса як складова додаткової сили визначається за виразом [10]

$$F_{RL} = \frac{1}{2}S_Б C_{ОП}\,\rho\,\frac{\left|\vec{V}\right|}{\left|\vec{\Omega}\right|}\left(\vec{V}\times\vec{\Omega}\right), \qquad (11)$$

де $S_Б$ – площа поверхні бульбашки;

$\vec{V}$ – відносна швидкість газ-бульбашка;

$\vec{\Omega}$ – відносна кутова швидкість газ-бульбашка;

$C_{ОП}$ – обертовий підйомний коефіцієнт.

Дисперсія (розсіювання відповідно розміру) бульбашок у турбулентному повітряному потоці розраховується за стохастичною моделлю відстеження. Модель стохастичного відстеження (випадкове блукання) дозволяє врахувати ефект миттєвості турбулентні коливання швидкості на траєкторіях руху бульбашок за допомогою стохастичних методів. В моделі миттєве значення флуктуаційної швидкості потоку газу представляється у вигляді [10]

$$u=\bar{u}+u', \qquad (12)$$

де $\bar{u}$ – середня швидкість газу у потоці;

u' – випадкова флуктуація швидкості.

При цьому флуктуація швидкості відбувається по всіх трьох проєкціях швидкості у декартовій системі координат.

Прогнозування дисперсії частинок використовує концепцію інтегрального масштабу часу, де масштаб часу визначається за рівнянням [10]

$$T_L = C_L\frac{k}{\varepsilon}, \qquad (13)$$

де C_L – емпіричний коефіцієнт;

k та ε – модельні коефіцієнти.

У чисельних розрахунках швидкість бульбашки у новому місці за розрахунковий час Δt обчислюється за допомогою рівняння [10]

$$u_Б^{n+1} = u_Б^n + e^{-\frac{\Delta t}{\tau_Б}}\left(u_Б^n - u^n\right) - a\,\tau_Б\left(e^{-\frac{\Delta t}{\tau_Б}} - 1\right) \qquad (14)$$

При цьому нове положення бульбашки визначають за рівнянням [10]

$$x_Б^{n+1} = x_Б^n + \Delta t\left(u^n + a\tau_Б\right) + \\ + \tau_Б\left(1 - e^{-\frac{\Delta t}{\tau_Б}}\right)\left(u_Б^n - u^n - a\tau_Б\right). \qquad (15)$$

Бульбашки мають сферичну форму. У цьому випадку коефіцієнт лобового опору визначається за виразом [10]

$$C_D = a_1 + \frac{a_2}{\mathrm{Re}} + \frac{a_3}{\mathrm{Re}}, \qquad (16)$$

де a_1, a_2 та a_3 – постійні, що беруться з довідникових даних.

Коефіцієнт аеродинамічного опору обертання розраховується за виразом [10]

$$C_\omega = \frac{6{,}45}{\sqrt{\mathrm{Re}_\omega}} + \frac{32{,}1}{\mathrm{Re}_\omega}, \qquad (17)$$

де обертове число Рейнольдса розраховувалось за рівнянням [10]

$$\mathrm{Re}_\omega = \frac{\rho\left|\vec{\Omega}\right|d_Б^2}{4\mu}. \qquad (18)$$

Теплообмін між бульбашкою та повітрям розглядався подібно до теплообміну у хімічно-інертному середовищі. Тому розглядалось просте рівняння теплового балансу для співвідношення температури бульбашок до конвективного теплообміну та поглинання/випромінювання на зовнішній та внутрішній поверхнях бульбашки у наступному вигляді [10]

$$m_{об}C_{об}\frac{dT_{об}}{dt} = hA_{об}(T_\infty - T_{об})\varepsilon_{об}A_{об}\sigma\left(\theta_R^4 - T_{об}^4\right), \qquad (19)$$

де $m_{об}$ – маса оболонки бульбашки;

$C_{об}$ – теплоємність матеріалу оболонки;

$A_{об}$ – площа поверхні оболонки бульбашки;

T_∞ – локальна температура безперервної фази;

$T_{об}$ – температура матеріалу оболонки;

h – коефіцієнт тепловіддачі в умовах конвективного теплообміну;

$\varepsilon_{об}$ – випромінювальна здатність оболонки бульбашки;

© О.П. Клімов, О.В. Ісаков, А.С. Пашуба, О.М. Купріненко

σ – стала Стефана-Больцмана;

θ_R – температура випромінювання.

Коефіцієнт теплопередачі визначається за рівнянням [10]

$$Nu = \frac{hd_Б}{k_\infty} = 2{,}0 + 0{,}6\,\mathrm{Re}_d^{1/2}\,\mathrm{Pr}^{1/3}, \qquad (20)$$

де Re_d – число Рейнольдса на основі діаметра частинок і відносної швидкості;

Pr – число Прандтля безперервної фази;

k_∞ – теплопровідність безперервної фази;

Nu – число Нуссельта, яке розраховувалось із залежності [10]

$$h = Nu\frac{k_\infty}{d_Б}. \qquad (21)$$

Розгляд нестаціонарних газодинамічних процесів у повітряному потоці здійснювався із застосуванням наступних основних рівнянь. Рівняння збереження маси представляється у вигляді

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = S_M, \qquad (22)$$

де S_M – джерело маси;

$\vec{v}$ – швидкість газового потоку.

Рівняння збереження імпульсу має вигляд

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v}\vec{v}) = -\nabla p + \rho\vec{g} + \vec{F} \qquad (23)$$

де $\vec{F}$ – зовнішні сили.

Рівняння збереження енергії представляється у вигляді

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \nabla \cdot (\vec{v}(\rho E + p)) = S_h, \qquad (24)$$

де

E – внутрішня енергія газу;

S_n – джерельна енергетична складова.

Під час моделювання руху бульбашок застосовувався механізм перебудови розрахункової сітки (рис. 1). Це викликано тим, що за великого розміру сітки по відношенню до розміру бульбашки стає неможливим розрахувати теплофізичні процеси, що відбуваються між бульбашкою та повітряним потоком. Подрібнення сітки навколо бульбашки дозволяє більш коректно дослідити процеси теплообміну. Але слід зазначити, що коли сітка автоматично перебудовувалася, то якість сітки коду погіршувалась внаслідок її деформації. В той час застосування дрібної сітки у всій розрахунковій області не є доцільним, бо це підвищує розрахунковий час.

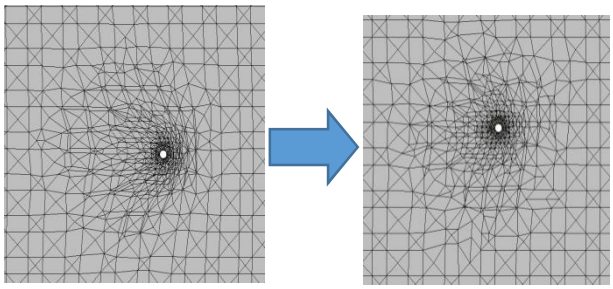

Рис. 1. **Зразок перебудови розрахункової сітки**

Таким чином, вищеописана математична модель дозволяє здійснити дослідження теплофізичних процесів у бульбашці, що нагнітається у повітряний потік.

Результати розрахунку поля швидкості потоку повітря, що виникає всередині бульбашки під час її зовнішнього обтікання потоком зі швидкістю 3 м/с, відображено на рисунку 2. Такі умови обтікання виникають на початковий момент, коли бульбашка подається в повітряний потік та має низьку початкову швидкість. Спрямованість векторів швидкості показує, що всередині бульбашки виникає циркуляція повітря. Така циркуляція прискорює теплообмін між зовнішнім повітрям, оболонкою бульбашки та повітрям, що знаходиться всередині бульбашки. Такі конвекційні потоки спричинені різницею температур, що виникають у повітрі, яке знаходиться всередині бульбашки. Спостерігаємо, що максимальна швидкість газового потоку виникає в центрі бульбашки та за величиною досягає близько 3-4 мм/с. Швидкість руху вздовж поверхні оболонки не перевищує 1 мм/с, що зумовлено граничними ефектами. Також має місце несиметричність конвекційних потоків. Це може бути викликано нерівномірністю охолодження поверхні бульбашки у зовнішньому потоці повітря.

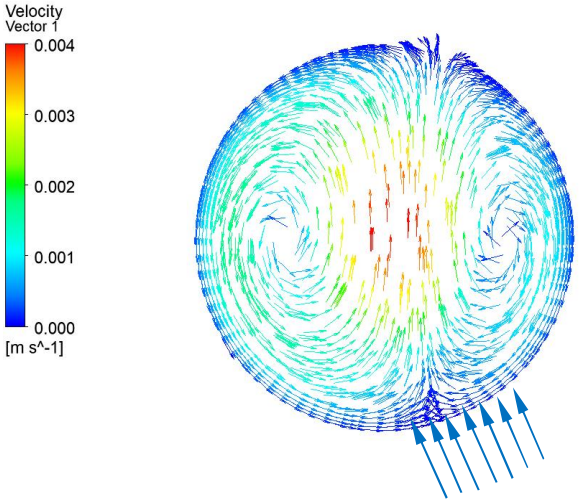

Рис. 2. **Поле швидкості потоку повітря, що виникає всередині бульбашки під час її зовнішнього обтікання потоком зі швидкістю 3 м/с**

© О.П. Клімов, О.В. Ісаков, А.С. Пашуба, О.М. Купріненко

З часом бульбашка набирає швидкості, яка практично дорівнює швидкості потоку повітря. В цьому випадку бульбашка є нерухомою відносно зовнішнього навколишнього повітря. Результати розрахунку поля швидкості потоку повітря, що має всередині бульбашки, коли зовнішнє повітря є нерухомим, відображено на рисунку 3.

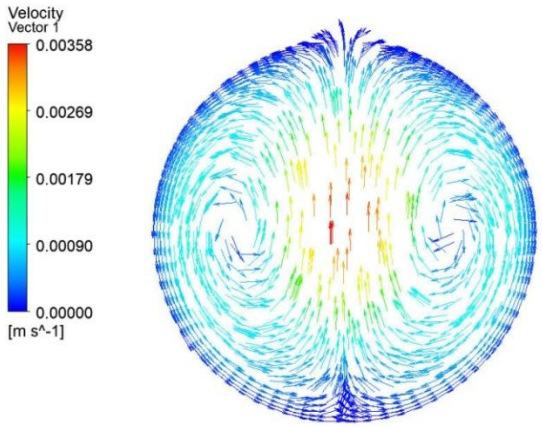

Рис. 3. **Поле швидкості потоку повітря, що виникає всередині бульбашки, коли зовнішнє повітря є нерухомим**

Спостерігаємо, що коли зовнішнє повітря є нерухомим відносно бульбашки, то циркуляція повітря всередині бульбашки стає симетричною. Товщина шару з більш повільним рухом вздовж поверхні оболонки незначно розширюється. При цьому максимальна швидкість потоку повітря в центрі бульбашки незначно зменшується до 3,6 мм/с. Це є ознакою зниження швидкості теплообміну в умовах, коли зовнішнє повітря є нерухомим відносно бульбашки.

Наявність умов для виникнення конвекційних потоків підтверджується розподілом температури на поверхні оболонки бульбашки, яка знаходиться у нерухомому зовнішньому повітрі (рис. 4).

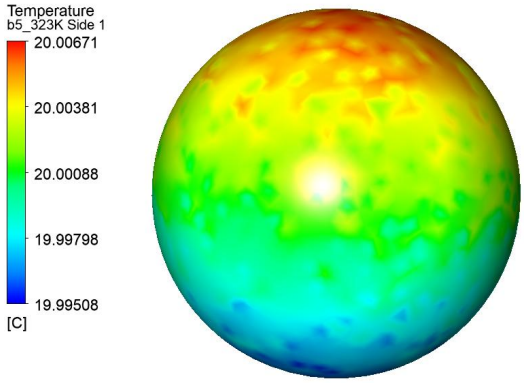

Рис. 4. **Температури на поверхні оболонки бульбашки, яка знаходиться у нерухомому зовнішньому повітрі**

Повітря всередині бульбашки з більшою температурою піднімається вгору, а з більш нижчою температурою опускається до низу. Виникає невелика різниця у температурі між верхньою та нижньою поверхнями оболонки бульбашки, яка в даному випадку не перевищує 0,1 К. Але наявність навіть таких потоків прискорює теплообмін між бульбашкою та зовнішнім повітряним середовищем.

Дослідження температури поверхонь оболонки бульбашки з діаметрами 3 мм та 5 мм, які перебувають в потоці повітря на час 10 мс від початку обтікання, відображено на рисунках 5 та 6. Початкова температура повітря дорівнювала 323 К. *Рисунки мають різні кути зображення з метою більш якісного наочного показу процесу.*

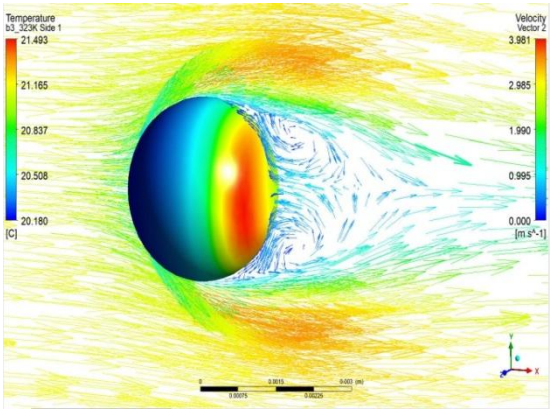

Рис. 5. **Температура поверхні бульбашки діаметром 3 мм у потоці повітря та поле векторів швидкості повітря**

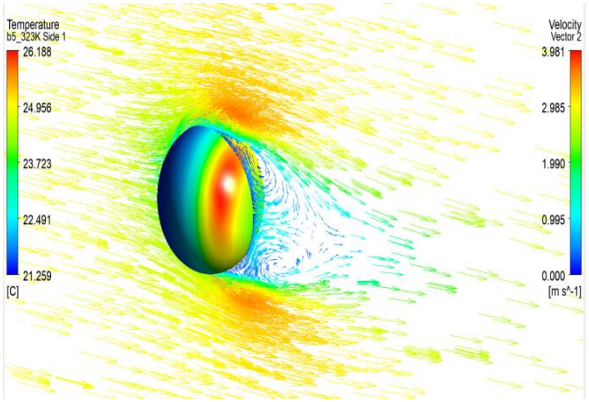

Рис. 6. **Температура поверхні бульбашки діаметром 5 мм у потоці повітря та поле векторів швидкості повітря**

Спостерігаємо класичний розподіл векторів швидкості, що виникає під час обтікання тіла шароподібної форми. З лобового боку бульбашки відбувається загальмування газового потоку, а з тильного боку по відношенню напрямку повітряного потоку виникають вихрові потоки. При цьому у локальній тильній області напрямок цих потоків є протилежним до напрямку основного потоку повітря. Густина та швидкість повітряного потоку є більшими з лобового боку, що зумовлює інтенсивне охолодження

© О.П. Клімов, О.В. Ісаков, А.С. Пашуба, О.М. Купріненко

поверхні бульбашки з лобового боку. Спостерігаємо різницю температур на поверхні оболонки бульбашки до 2 К за діаметра бульбашки 3 мм та у 5 К за діаметра бульбашки 5 мм. Маємо, що зростання діаметра бульбашки уповільнює процес її охолодження.

Розподіл поля швидкості повітря поблизу бульбашок у разі їх обтікання повітряним потоком зі швидкістю 3 м/с відображено на рисунку 7.

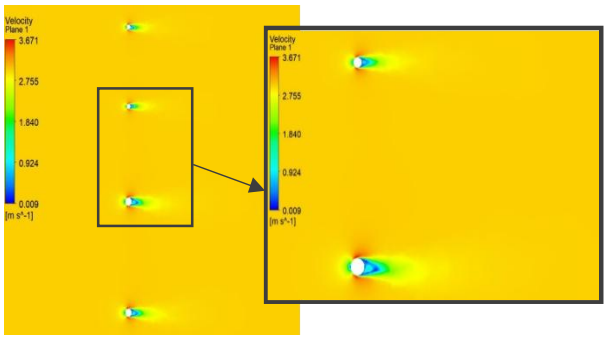

Рис. 7. **Поле швидкості повітря поблизу бульбашок у разі їх обтікання повітряним потоком зі швидкістю 3 м/с**

Спостерігаємо, що на бокових сторонах бульбашки швидкість потоку повітря навіть перевищую середню швидкість газового потоку. Саме нерівномірність розподілу швидкості руху повітряного потоку вздовж поверхні бульбашки призводить до нерівномірності охолодження бульбашки потоком повітря з різних її боків. Цим пояснюється несиметричність конвекційних потоків всередині бульбашки, яка виникає в умовах її руху у потоці повітря (див. рис. 2 та 7).

Результати дослідження зміни середньої температури повітря всередині бульбашки, яка прискорюється у холодному повітряному потоці, відображено на рисунку 8.

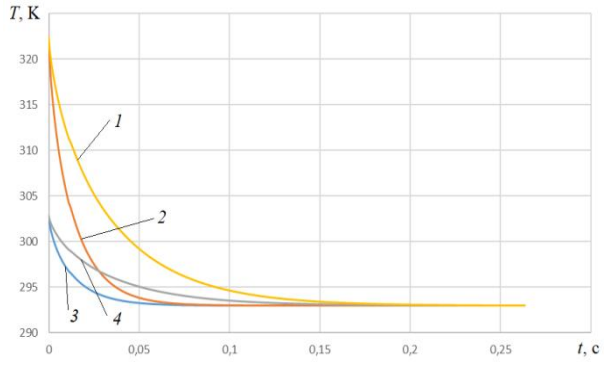

Рис. 8. **Середня температура повітря всередині бульбашки, яка прискорюється у холодному повітряному потоці зі швидкістю 3 м/с:**

1 – діаметр бульбашки 5 мм, початкова температура повітря 323 К; *2* – діаметр бульбашки 3 мм, початкова температура повітря 323 К; *3* – діаметр бульбашки 3 мм, початкова температура повітря 303 К; *4* – діаметр бульбашки 5 мм, початкова температура повітря 303 К

З отриманих результатів спостерігаємо, що зниження температури повітря всередині бульбашки у першому наближенні відбувається по експоненті. У разі зростання діаметра бульбашки час охолодження повітря всередині бульбашки зростає. Зростання початкової температури повітря всередині бульбашки дозволяє подовжити час наявності підвищеної температури. Але у розглянутих випадках час охолодження повітря всередині бульбашки до температури повітря навколишнього середовища не перевищує 250 мс. При швидкості вітру 3 м/с за цей час переміщення бульбашки відбудеться на 0,75 м. Тобто можна вважати, що втрата летючості бульбашки з підігрітим повітрям відбувається майже «миттєво» у повітряному потоці. Тому такий метод підвищення летючості не є доцільним до застосування у бульбашковій завісі.

Можливо прискорити бульбашки у генераторі до швидкості потоку повітря. Це може вплинути на швидкість охолодження повітря в бульбашці. В цьому випадку в ідеальному варіанті можна припустити, що швидкість повітря навколо бульбашки буде дорівнювати нулю. Результати дослідження зміни середньої температури повітря всередині бульбашки, коли швидкість потоку повітря, що оточує бульбашку, дорівнює нулю, відображено на рисунку 9.

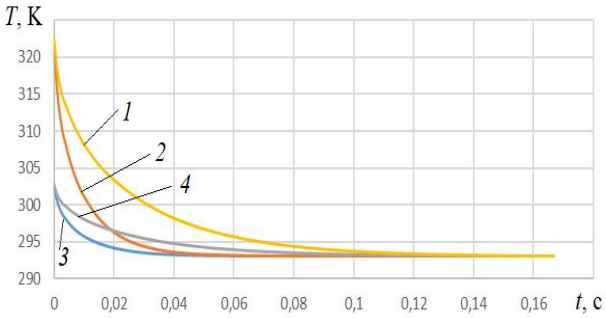

Рис. 9. **Середня температура повітря всередині бульбашки, коли швидкість потоку повітря, що оточує бульбашку, дорівнює нулю:**

1 – діаметр бульбашки 5 мм, початкова температура повітря 323 К; *2* – діаметр бульбашки 3 мм, початкова температура повітря 323 К; *3* – діаметр бульбашки 3 мм, початкова температура повітря 303 К; *4* – діаметр бульбашки 5 мм, початкова температура повітря 303 К

Порівняння результатів розрахунку зміни середньої температура повітря всередині бульбашки у часі за різних вищерозглянутих умов показує, що прискорення бульбашки у генераторі до швидкості потоку повітря не дозволить вирішити питання підвищення летючості бульбашки. Навіть спостерігаємо, що коли швидкість потоку повітря, що оточує бульбашку, дорівнює нулю, час охолодження повітря

© О.П. Клімов, О.В. Ісаков, А.С. Пашуба, О.М. Купріненко

всередині бульбашки до температури повітря навколишнього середовища не перевищує 150 мс. Це майже в два рази менше, ніж коли бульбашка прискорюється у холодному повітряному потоці швидкістю 3 м/с.

Таким чином, можна зробити висновок, що найкращим методом досягнення летючості бульбашки є її наповнення газом з густиною, що є меншою густини повітря за однакових термодинамічних умов.

Для практичного застосування бульбашкової завіси є важливими її часові показники у створенні такої завіси. На час створення завіси впливає не тільки швидкість вітру, але й зростання та зниження швидкості бульбашки за певний проміжок часу у повітряному потоці. Результати чисельного дослідження зміни швидкості бульбашки у часі надано на рисунку 10.

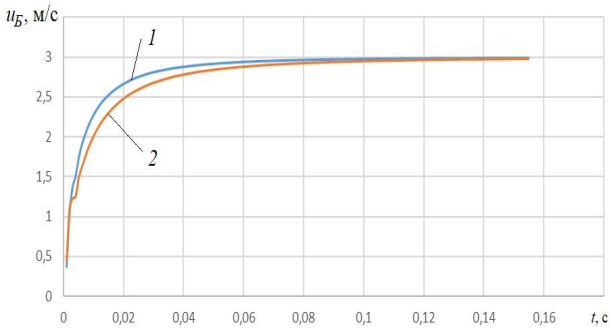

Рис. 10. **Зміна швидкості бульбашки у часі у повітряному потоці зі швидкістю 3 м/с за різних діаметрів бульбашки:**

1 – 3 мм; *2* – 5 мм

З отриманих результатів маємо, що час досягнення швидкості повітряного потоку складає сотні мілісекунд, хоча швидкість бульбашок зі зростанням їх розміру знижується (сповільнення) за певний проміжок часу. Виявлено, що на сталому режимі розповсюдження бульбашкової завіси бульбашки діаметром 3 мм рухаються зі швидкістю 2,99 м/с, а бульбашки діаметром 5 мм – зі швидкістю 2,97 м/с. Тому у потоці можливо відокремлення бульбашок великого розміру від бульбашок малого розміру. Але в умовах безперервної подачі бульбашок такий ефект буде нівелюватися. Відносно невеликий час прискорення бульбашок дозволяє застосовувати у розрахунках загальну довжину (по фронту, бульбашкової завіси, швидкість потоку повітря та час генерування бульбашок. Вказані параметри є основою для проведення розрахунків що визначають значення тактичних маскувальних показників бронетанкового озброєння.

Висновки

У статті надано математичне моделювання теплофізичних процесів у бульбашці, що в сукупності складають маскувальну завісу ддя зниження інфрачервоної помітності бронетанкового озброєння. Приймалось, що нагнітання бульбашки відбувається у потік повітря, який має швидкість 3 м/с, при температурі повітря 293 К. Розрахунок здійснювався для бульбашок діаметрів, що дорівнювали 3 мм та 5 мм. Товщина оболонки бульбашки дорівнювала 1 мкм. Приймалось, що в момент нагнітання бульбашки у потік повітря початкова температура підігрітого повітря, яким наповнена бульбашка, перевищує температуру навколишнього у першому варіанті на 10 К та у другому варіанті – на 30 К.

Обгрунтовано математичну модель для дослідження теплофізичних процесів у бульбашці, що нагнітається у повітряний потік. Застосовано теорію за Лагранжевими дискретними фазами на основі підходу Ейлера-Лагранжа. Згідно з таким підходом процеси у газі розглядаються за рівняннями Нав'є-Стокса, а дисперсна фаза розв'язується шляхом відстеження бульбашки через розрахункове поле потоку газу. При цьому між дисперсною фазою та газом відбувається обмін імпульсом, масою та енергією. Вирішення цієї задачі проведено в програмному продукті Ansys Fluent.

Проведено чисельне дослідження теплофізикних процесів у бульбашці, що нагнітається у повітряний потік. Розраховано поле швидкості потоку повітря, що виникає всередині бульбашки під час її зовнішнього обтікання потоком зі швидкістю 3 м/с та коли зовнішнє повітря є нерухомим. Розраховано температуру поверхні бульбашки та поле векторів швидкості повітря. Виявлено зміну середньої температури повітря всередині бульбашки, яка прискорюється у холодному повітряному потоці, за діаметрів бульбашки 3 мм та 5 мм та початкової температури повітря 303 К та 323 К.

На підставі аналізу результатів моделювання визначено, що досягнення летючості бульбашки за рахунок підігрівання газу не є доцільним через короткий час охолодження повітря, який у розрахункових варіантах не перевищував 250 мс. Тому найкращим методом досягнення летючості бульбашки є її наповнення газом з густиною, що є меншою густини повітря за однакових термодинамічних умов. Результати роботи плануються увійти в основу захисної завіси одиниці бронетанкового озброєння, з метою підвищення тактичних маскувальних показників. У подальшому планується експериментальне дослідження летючості бульбашки, що наповнюється сумішшю легкого газу з повітрям.

© О.П. Клімов, О.В. Ісаков, А.С. Пашуба, О.М. Купріненко

Список літератури

1. Марущенко В.В., Сакун О.В. та ін. Радіаційний, хімічний, біологічний захист підрозділів. Харків.: ВІТВ НТУ ХПІ, 2020. 380 с.

2. Коритченко К.В., Танцюра І.І., Клімов О.П., Стаховський О.В. Аналіз засобів аерозольної протидії Сухопутних військ Збройних Сил України. *Механіка та машинобудування*. Х. : НТУ “ХПІ”, 2021. Вип. 2. С. 26– 30, інв. 662.

3. Ковальчук І.М., Дубовицький В.А., Єременко В.Г., Ситнік О.В., Рудим О.В. *Озброєння і засоби військ радіаційного, хімічного, біологічного захисту* : навч. посіб. Вип. 2-й. Харків: ХІТВ, 2003. 95 с.

4. Kenneth Smit, Augustine Lee, Mark Burridge. Multispectral Smoke Obscurants for M1A1 Abrams Tank and M88A2 Hercules Recovery Vehicle. *8th Australian Explosives Ord-nance Symposium (PARARI 2007) At: Melbourne*, VIC, Australia, November 2007.

5. Katherine von Stackleberg, Craig Amos, Thomas Smith, Don Cropek and Bruce MacAl-lister. Military smokes and obscurants fate and effects. A literature review relative to threatened and endangered species. *Engineer Research and Development Center Con-struction Engineering Research Laboratory. Report ERDC/CERL TR-04-29.* 2004.

6. Everett George, Patrick A. Dezeeuw, Robert M. Headley. Test results for dual-band infra-red transmission measurements of obscurant clouds. *Dahlgren Division, Naval Surface Warfare Center, Electro-Optical Systems Branch (F44)*, Dahlgren, VA 22448, Technical Revision: 1993-09-12.

7. Кузьменко Л. Ф., Джежулей О. В., Ковальов О. С. та ін. *Аерозольна протидія технічним засобам розвідки високоточної зброї противника в бою та операціях*. Київ: НАОУ, 2003. 133с.

8. Коритченко К.В., Танцюра І.І., Клімов О.П. Розвиток засобів аерозольного маскування у видимому та інфрачервоному діапазонах випромінювання. *Актуальні питання забезпечення службово-бойової діяльності військових формувань та правоохоронних органів: збірник тез доповідей VIII Всеукраїнської науково-практичної конференції Національної академії Національної гвардії України (м. Харків, 31 лютого 2022 р.)*. Харків, 2022. 141 с.

9. Коритченко К.В., Танцюра І.І., Клімов О.П. Розвиток систем аерозольного маскування з урахуванням викликів сучасності. *Збірник тез доповідей Міжнародної науково-технічної конференції «Перспективи розвитку озброєння та військової техніки сухопутних військ»*, Львів, 15-16 травня 2024 р., 11-12 с.

10. ANSYS FLUENT 12.0 User's Guide, режим доступу: https://www.afs.enea.it/project/neptunius/docs/fluent/html/ug/main_pre.htm, дата звернення: 28.05.2024.

Reference

1. V.V. Marushchenko, O.V. Sakun and others. (2020), "*Radiacia, himichny, biologichnyi zahyst pidrozpiliv*" [Radiation, chemical, biological protection of units]. Kharkiv.: VITV NTU KhPI. 380 p. [in Ukranian]

2. K.V. Korytchenko, I.I. Tansyura, O.P. Klimov and Stakhovskyi O.V. (2021), "Analis zasobiv aerozolnoi pritydii SV ZSU" [Analysis of aerosol countermeasures of the Ground Forces of the Armed Forces of Ukraine]. *Mechanics and mechanical engineering*. H.: NTU“KhPI”,. Issue 2. pp. 26–30, Inv. 662. [in Ukranian]

3. Kovalchuk I.M., Dubovytskyi V.A., Yeremenko V.G., Sytnik O.V. and Rudym O.V. (2021), "*Ozbroennia I zasoby viisk radiaciinogo, himichnogo, biologichnogo zahystu*" [Weapons and means of radiation, chemical, biological protection of troops] : education manual Vol. 2nd. Kharkiv: KHITV. 95 p. [in Ukranian]

4. Kenneth Smit, Augustine Lee and Mark Burridge (2007), Multispectral Smoke Obscurants for M1A1 Abrams Tank and M88A2 Hercules Recovery Vehicle. *8th Australian Explosives Ordnance Symposium (PARARI 2007)* At: Melbourne, VIC, Australia, November 2007.

5. Katherine von Stackleberg, Craig Amos, Thomas Smith, Don Cropek and Bruce MacAl-lister (2004), Military smokes and obscurants fate and effects. A literature review relative to threatened and endangered species. *Engineer Research and Development Center Con-struction Engineering Research Laboratory. Report ERDC/CERL TR-04-29.*2004.

6. Everett George, Patrick A. Dezeeuw and Robert M. Headley. (1993), Test results for dual-band infra-red transmission measurements of obscurant clouds. *Dahlgren Division, Naval Surface Warfare Center, Electro-Optical Systems Branch (F44)*, Dahlgren, VA 22448, Technical Revision: 1993-09-12.

7. L. F. Kuzmenko, O. V. Jezhulei, O.S. Kovalev et al. (2003), "*Aeroso protydia tehnichnym zasobam rozvidky vysokotochnoi zbroi protyvnyka v boyu ta operaciyah*" [Aerosol countermeasures against technical means of reconnaissance of the enemy's high-precision weapons in combat and operations]. Kyiv: NAOU. 133p. [in Ukranian]

8. Korytchenko K.V., Tansyura I.I. and Klimov O.P. (2022), "Rozvytok zasobiv aerozolnogo maskuvannia u vydymomu ta infrachervonomu diapazonah vyprominyuvannia" [Development of means of aerosol masking in the visible and infrared ranges of radiation]. *Current issues of ensuring the service and combat activity of military formations and law enforcement agencies: a collection of theses of reports of the VIII All-Ukrainian Scientific and Practical Conference of the National Academy of the National Guard of Ukraine* (Kharkov, February 31, 2022). p.-141. [in Ukranian]

9. Korytchenko K.V., Tansyura I.I. and Klimov O.P. (2024), "Rozvytok system aerozolnogo maskuvannia z urahuvanniam vuklukiv suchasnosti" [Development of aerosol masking systems taking into account the challenges of modern times]. *Collection of abstracts of reports of the International scientific and technical conference "Prospects of the development of weapons and military equipment of the ground forces"*, Lviv, May 15-16, 2024, p. 11-12. [in Ukranian]

10. ANSYS FLUENT 12.0 User's Guide, access mode: https://www.afs.enea.it/project/neptunius/docs/fluent/html/ug/main_pre.htm, access date: 05/28/2024.

© О.П. Клімов, О.В. Ісаков, А.С. Пашуба, О.М. Купріненко

NUMERICAL SIMULATION OF THERMOPHYSICAL PROCESSES IN THE BUBBLE AS AN ELEMENT OF A MASKING CURTAIN

O. Klimov, O. Isakov, A. Pashuba, O. Kyprinenko

The movement of a bubble in an air stream with the consideration of the heat exchange process between the air, the bubble shell and the heated air inside the bubble was numerically investigated. Numerical modeling was carried out in the Ansys Fluent software product. It was assumed that the injection of the bubble takes place in the air flow, which has a speed of 3 m/s, and the air temperature is 293 K. The calculation was carried out for the diameters of the bubbles, which were equal to 3 mm and 5 mm. The thickness of the bubble shell was equal to 1 μm. It was assumed that at the time of injection of the bubble into the air flow, the initial temperature of the heated air, which is filled with the bubble, exceeds the temperature of the surrounding air in the first variant by 10 K and in the second variant by 30 K. The velocity field of the air flow that occurs inside the bubble during its external flow with a speed of 3 m/s and when the external air is stationary. The bubble surface temperature and air velocity vector field are calculated. Based on the analysis of the simulation results, it was determined that achieving the volatility of the bubble by heating the gas is not expedient due to the short air cooling time, which in the calculated versions did not exceed 250 ms. Therefore, the most effective method for achieving bubble volatility is determined in this paper. Based on the above, we come to the general conclusion that the filling should be with a gas of the density that is less than the density of air under the same thermodynamic conditions. These processes should form the basis of a mechanism that will ensure thermal reconnaissance protection of armoured weapons. This function is most effective when the enemy uses night vision devices. This area should take constant development steps to counteract the enemy's reconnaissance tasks. The material part of the study (gas and liquid) should be studied in interaction and subject to experimental investigation. These actions are aimed at achieving maximum effect.

Keywords: *aerosol masking, bubble curtain, thermophysical processes, numerical simulation, Kelvin degree, air flow, detection, conspicuity, visibility, reconnaissance signs, armoured weapons.*

© О.П. Клімов, О.В. Ісаков, А.С. Пашуба, О.М. Купріненко