

*О.В. Кириченко, к.т.н., доцент, АПБ ім. Героїв Чорнобиля,
В.А. Ващенко, д.т.н., професор, зав. кафедри, ЧДТУ,
В.В. Цибулін, викладач, ЧДТУ*

ПОЖЕЖОВИБУХОНЕБЕЗПЕЧНІ ТЕРМОВПЛИВИ НА ПОВЕРХНЮ МЕТАЛЕВИХ КОРПУСІВ ПІРОТЕХНІЧНИХ ВИРОБІВ В УМОВАХ ПОСТРІЛУ ТА ПОЛЬОТУ

(представлено д-ром техн. наук Прохачем Е.Ю.)

Представлено результати шлірен-фотографічних досліджень структури надзвукового повітряного потоку, що обтікає металеві корпуси піротехнічних виробів, які дозволили удосконалити випробувальну установку у частині уточнення моделювання умов пострілу та польоту виробів. Вперше встановлено вплив швидкості повітряного потоку (в межах до $2 \cdot 10^3$ м/с) та режиму обтікання (ламінарний, турбулентний) на місця розташування на поверхні корпусів виробів зон максимальних зовнішніх термовпливів, де відбуваються їх пожежовибухонебезпечні руйнування.

Ключові слова: піротехнічні вироби, нітратно-металеві суміші, аеродинамічний нагрів.

Постановка проблеми. Піротехнічні вироби на основі сумішей металевих паливних з нітратовмісними окислювачами і добавками органічних речовин широко використовуються в різних областях народного господарства і військової техніки [1 – 7]. При запуску вказаних виробів як з наземних пускових установок, так і з літальних аерокосмічних об'єктів, вони піддаються інтенсивним ударним тепловим впливам в умовах надзвукового обдуву потоком повітря (рис. 1).

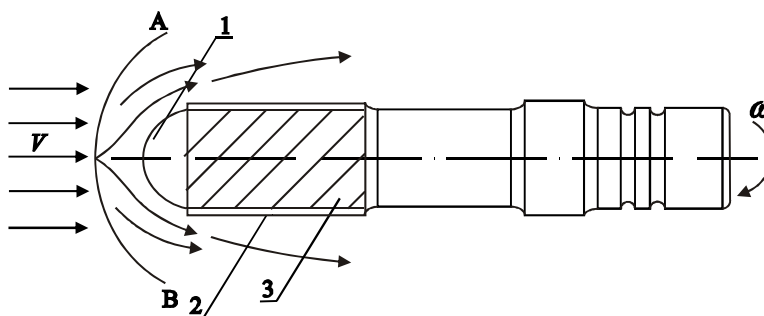


Рис. 1 – Схематичне зображення умов пострілу та польоту виробів:
 V – швидкість надзвукового обдуву потоком повітря; ω – кутува швидкість вісесиметричного обертання; АВ – фронт ударної хвилі; 1 – обтічник зі спалахним пристроєм; 2 – металева оболонка; 3 – заряд піротехнічної суміші

У вказаних умовах пострілу та польоту виробів окремі частини корпусів (півсферичний обтічник (рис. 2), металева оболонка (рис. 3)),

під якими розташовані заряди сумішей піддається істотно нерівномірному нагріву, що призводить до їх передчасного спалахування і, зрештою, до руйнування виробів, яке супроводжується проявом різних чинників пожежі (рис. 4), які призводять до руйнування оточуючих об'єктів, людським жертвам і наносять значні матеріальні збитки [8 – 20]. Тому підвищення пожежної безпеки і надійності піротехнічних виробів в умовах ударних теплових впливів зовнішнього надзвукового потоку повітря на поверхню металевих корпусів виробів є актуальною проблемою.

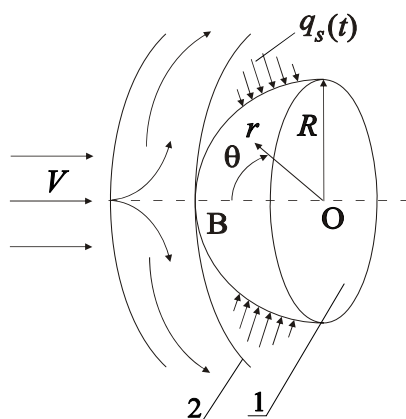


Рис. 2 – Схема нагріву півсферичного обтічника: 1 – металевий обтічник; В – передня критична точка (швидкість потоку рівна нулю); 2 – зовнішня межа прикордонного шару; r , θ – сферичні координати; R – радіус обтічника

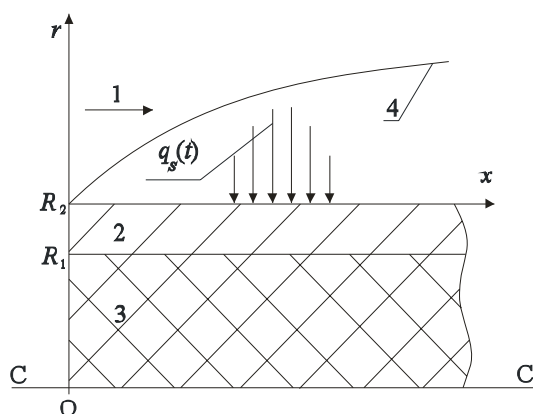


Рис. 3 – Схема нагріву металеві оболонки виробу: 1 – зовнішній газовий потік; 2 – металева оболонка виробу; 3 – заряд піротехнічної суміші; 4 – зовнішня межа прикордонного шару; x , r – циліндричні координати; R_1 , R_2 – внутрішній і зовнішній радіуси виробу; CC – вісь обертання виробу.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. В теперішній час є велика кількість досліджень [21 – 23] по аеродинамічному нагріву надзвуковим потоком повітря різних поверхонь (плоских стінок, сферичних та циліндричних елементів тощо). Однак відсутні дослідження аеродинамічного нагріву складових тіл (наприклад, півсферичний обтічник або плоска стінка + заряд реакційно здатної до підвищених температур нагріву суміші тощо).

Постановка завдання та його вирішення. Виникає необхідність вирішення завдання визначення ділянок на поверхні металевих корпусів виробів, що піддаються максимальним нагрівам і пожежонебезпечним руйнуванням в умовах пострілу та польоту.

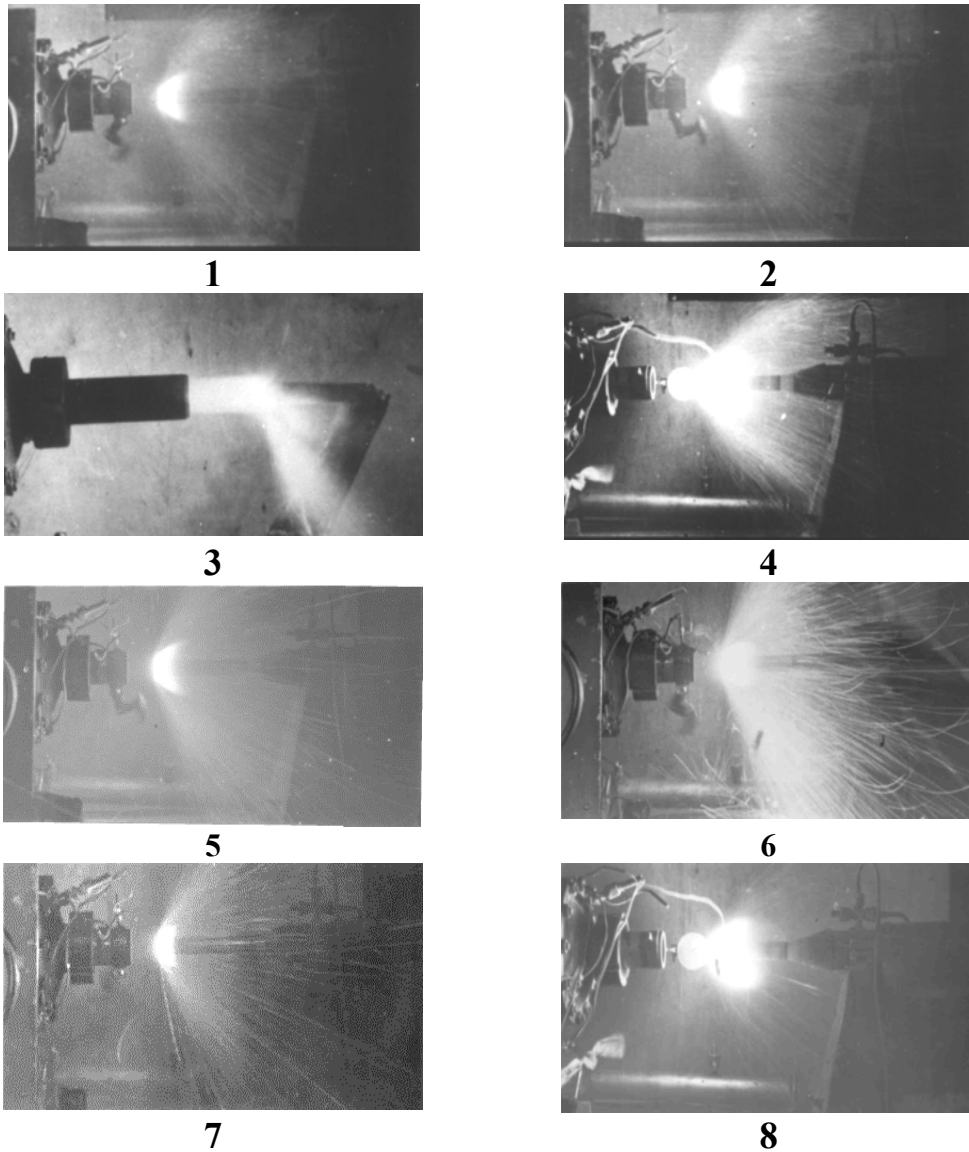


Рис. 4 – Кінокадри зйомки загальної картини спрацьовування зарядів сумішей при руйнуванні піротехнічних виробів, отримані на установці, що приводиться нижче, яка моделює їх поведінку в умовах пострілу і польоту ($\omega = 5 \cdot 10^2 \dots 10^3$ рад/с; зйомка проводилася за допомогою кінокамери “Конавас-автомат” зі швидкістю 30 кадр/с [6, 7, 24]): суміш $Zr + NaNO_3 - V = 8 \cdot 10^2$ м/с (1), $9 \cdot 10^2$ м/с (5); суміш $Al + NaNO_3 - V = 1,5 \cdot 10^3$ м/с (3), $2 \cdot 10^3$ м/с (4), $1,8 \cdot 10^3$ м/с (8); суміш $Mg + NaNO_3 - V = 1,2 \cdot 10^3$ м/с (2), $1,1$ м/с (6), $1,4 \cdot 10^3$ м/с (7)

Нижче спочатку наводиться опис розробленої установки [18], що моделює умови пострілу та польоту виробів, методів та результатів досліджень структури газового потоку, який обтікає виріб, а потім наводяться результати випробувань виробів.

1. Установа, що моделює умови пострілу та польоту піротехнічних виробів (надзвуковий обдув потоком повітря зі швидкістю $2 \cdot 10^3$ м/с та вісесиметричне обертання з кутовою швидкістю до 10^3 рад/с). Конструкція установки передбачає надзвуковий обдув потоком повітря як нерухомого зразка суміші (рис. 5а), так й зразка, що обертається (рис. 5б). Це обумовлено тим, що в реальних умовах запуску піротехнічних виробів, наприклад, з літальних апаратів, вони в момент пострілу мають осьове обертання (кутова швидкість обертання $5 \cdot 10^2 \dots 10^3$ рад/с) з метою надання стійкості в процесі польоту [1 – 3, 6 – 10, 12, 15, 17 – 19, 23].

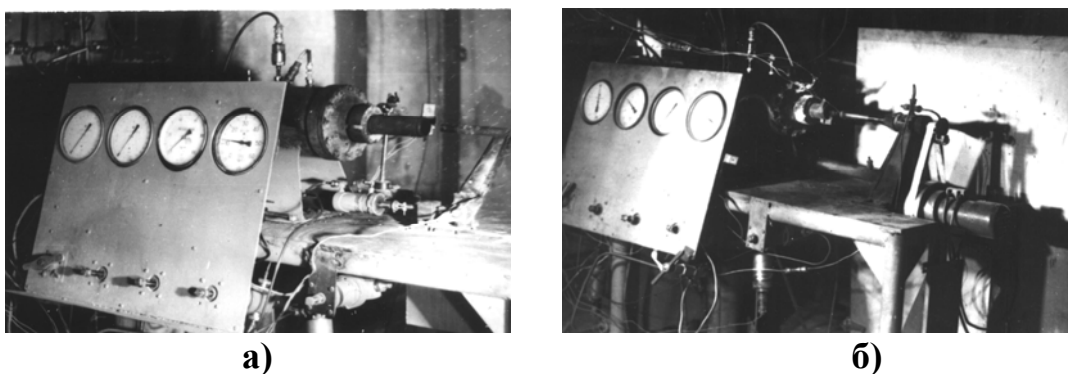


Рис. 5 – Зовнішній вигляд установки: а) установка без вузла обертання; б) установка з вузлом обертання.

Повітряний потік, що обдуває зразок при горінні, створюється витіканням з сопла до- або надзвукового струменя, заздалегідь підігрітого з метою компенсації охолодження потоку при течії по соплу. Діаметр повітряного струменя (діаметр зрізу сопла) складає $4 \cdot 10^{-2} \dots 6 \cdot 10^{-2}$ м. Сопла змінні, що дозволяють варіювати швидкість потоку до $V = 2 \cdot 10^3$ м/с. Установка (рис. 6) містить камеру 1 з соплами 2, змонтовану на станині 7. Нагрів повітря в камері 1 відбувається при змішуванні холодного повітря з гарячими газами, що генеруються підігрівачем 11. З бачка 8 пального (бензин) подається через форсунку в камеру згорання підігрівача. Туди ж подається окислювач (повітря). Обидва компоненти подаються через відсічні крани 10, керовані електропневмоклапанами 9. На станині кріпиться співвісний з соплом вузол обертання 4 з датчиком частоти обертання 5 і електродвигун постійного струму потужністю 2,7 кВт, напругою 27 В і номінальною кутовою швидкістю обертання 995 рад/с. Передача крутильного моменту з електродвигуна на вал державки заряду суміші здійснюється за допомогою спеціального гнучкого плоского ремня. Датчик частоти обертання складається з металевого диска з прорізом (закріпленого на валу державки), фотодіода і джерела світла (змонтованих на нерухомій станині). Світлові імпульси сприймаються фотодіодом, перетворюються в електричні, посилюються і подаються на електронний частотомір.

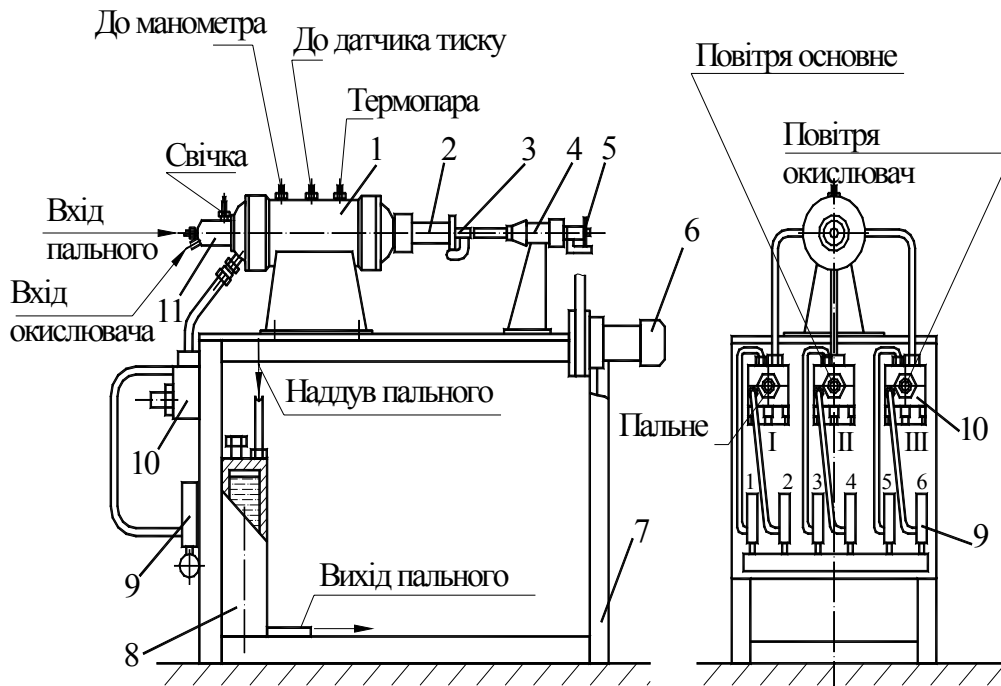


Рис. 6 – Загальна схема установки: 1 – камера; 2 – змінне сопло; 3 – вузол відкриття сопла; 4 – вузол обертання; 5 – датчик частоти обертання; 6 – електродвигун; 7 – станина; 8 – бак з паливом; 9 – електропневмоклапан; 10 – відсічний кран; 11 – підігрівач повітря.

Установка забезпечена також нерухомою державкою, в якій знаходиться зразок суміші. Відстань від зразка до зрізу сопла вибирається на підставі шлірен-фотографічних досліджень картини обтікання на тіньовому приладі ІАБ – 451 [6, 7, 24], а також вимірювання тиску на передньому торці дренированих моделей зразка. Для якісної оцінки формування потоку, візуалізації картини обтікання, визначення оптимальної відстані перешкоди, імітуючої заряд суміші, від зрізу сопла, визначення місця розташування прямого стрибка залежно від відстані і виду перешкоди була проведена зйомка течії при обтіканні моделі зразка повітряним потоком. Зйомка проводилася з розташуванням моделі зразка на відстанях $2 \cdot 10^{-2} \dots 0,1$ м від зрізу сопла (рис. 7). Встановлено, що істотної різниці при зміні відстані від моделі до зрізу сопла не виявляється (рис. 8 – 10). Проведені обміри показали, що відстань S_0 прямого стрибка від зрізу моделі зразка при $S_1 = 1,5 \cdot 10^{-2} \dots 0,1$ м змінюється незначно і лежить в межах $S_0 = 1,3 \cdot 10^{-2} \dots 1,5 \cdot 10^{-2}$ м. На підставі проведених досліджень на тіньовому приладі ІАБ – 451 було вибрано відстань від зрізу державки зразка до зрізу сопла $S_{1opt} = 5,5 \cdot 10^{-2}$ м. Аналіз всіх отриманих фотографій показав, що надзвуковий газовий струмінь має розрахункові режими течії в межах досліджених довжин. При цьому зберігається структура початкової ділянки струменя, що дозволяє у декілька разів підвищити точність розрахунків, використавши в цих цілях відомі газодинамічні функції [21, 22].

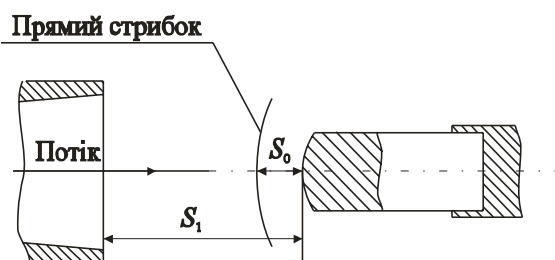


Рис. 7 – Схема установки моделі зразка при проведенні експериментів на приладі ИАБ – 451

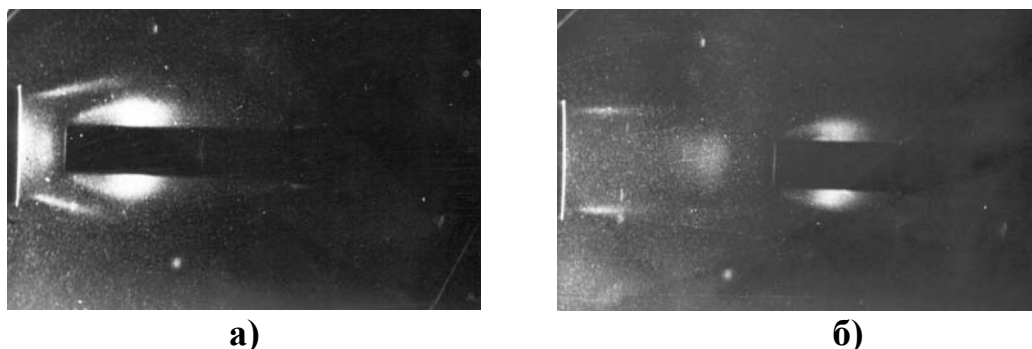


Рис. 8 – Шлірен-фотографії обтікання моделі повітряним потоком ($V = 500$ м/с): а) – відстань від моделі до зрізу сопла $1,5 \cdot 10^{-2}$ м; б) – відстань від моделі до зрізу сопла $6 \cdot 10^{-2}$ м

2. Результати випробовувань піротехнічних виробів. В результаті проведених випробувань було встановлено, що при швидкості обдуву до $8 \cdot 10^2 \dots 1,2 \cdot 10^3$ м/с у 30...40 % випробуваних виробів металеві оболонки піддаються руйнуванню, а при швидкостях обдуву $1,5 \cdot 10^3 \dots 2 \cdot 10^3$ м/с руйнуванню піддаються вже більше 90 % випробуваних виробів (рис. 11 – 13).

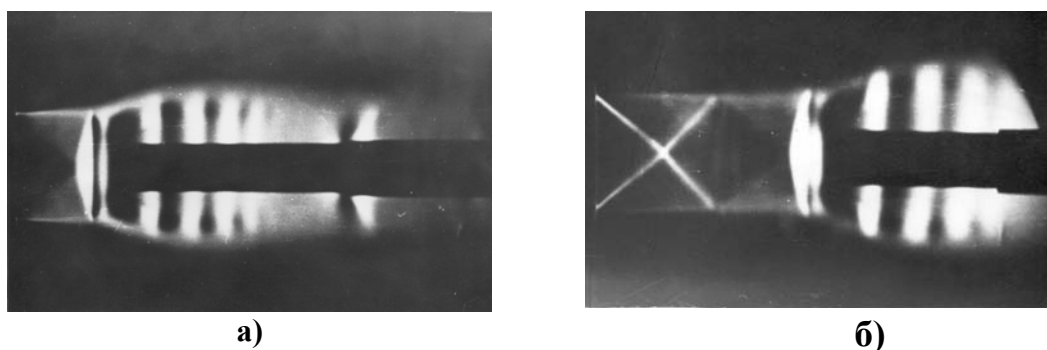
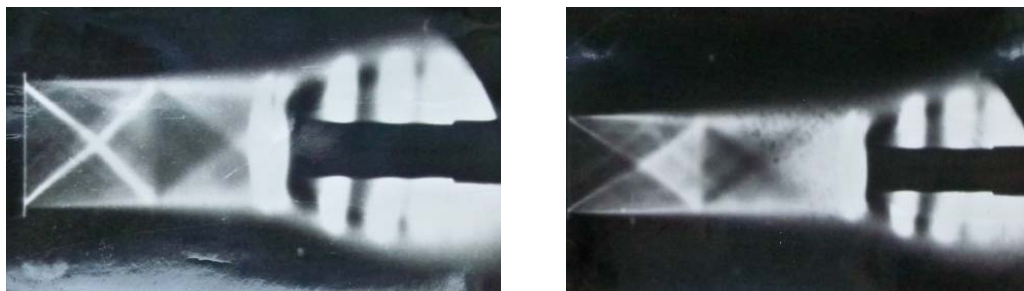


Рис. 9 – Шлірен-фотографії обтікання моделі повітряним потоком ($V = 1,2 \cdot 10^3$ м/с): а) відстань від моделі до зрізу сопла $3 \cdot 10^{-2}$ м; б) відстань від моделі до зрізу сопла $7 \cdot 10^{-2}$ м

Збільшення кутової швидкості вісесиметричного обертання виробів (аж до 10^3 рад/с) практично не впливає на формування термоударних впливів газового потоку на поверхню їх металічних корпусів та руйнування випробувальних виробів. Крім цього, за результатами шлірен-

фотографічних досліджень структури газового потоку і безпосередньо по кінцевих результатах випробувань встановлено, що основний внесок в руйнування виробів надає турбулентний надзвуковий обдув потоком повітря, що призводить до істотно нерівномірному нагріву поверхні металевих корпусів виробів і формування зон підвищених термовпливів, в яких відбуваються локальні перегріву зарядів сумішей, їх запалювання і розвинуте горіння, що призводить до руйнування виробів.



а)

б)

Рис. 10 – Шлірен-фотографії обтікання моделі повітряним потоком ($V = 1,5 \cdot 10^3$ м/с): а) відстань від моделі до зрізу сопла $7,5 \cdot 10^{-2}$ м; б) відстань від моделі до зрізу сопла $8,5 \cdot 10^{-2}$ м



а)



б)

Рис. 11 – Різні ракурси піротехнічних виробів на основі сумішей цирконій + нітрат натрію після їх передчасного спрацьовування та руйнування в умовах запуску: а) – $V = 9 \cdot 10^2$ м/с, $\omega = 7 \cdot 10^2$ рад/с; б) – $V = 1,2 \cdot 10^3$ м/с, $\omega = 10^3$ рад/с



а)



б)



в)



г)

Рис. 12 – Різні ракурси піротехнічних виробів на основі сумішей магній + нітрат натрію після їх передчасного спрацьовування та руйнування в умовах запуску: а) – $V = 8 \cdot 10^2$ м/с, $\omega = 5 \cdot 10^2$ рад/с; б) – $V = 9,5 \cdot 10^2$ м/с, $\omega = 0$; в) – $V = 10^3$ м/с, $\omega = 9 \cdot 10^2$ рад/с; г) – $V = 1,7 \cdot 10^3$ м/с, $\omega = 3 \cdot 10^2$ рад/с

При цьому місця розташування цих зон для ламінарного режиму обтікання знаходяться в околиці передніх критичних точок для всіх дос-

ліджених діапазонів V , а у разі турбулентного режиму – значно зміщені уздовж поверхні виробів. В результаті проведених досліджень для турбулентного режиму обтікання були отримані для різних частин металічного корпусу виробу наступні залежності: для суцільного півсферичного обтічника – залежність $\theta_{max}^*(V)$ (θ – кутова координата вздовж поверхні обтічника від передньої критичної точки ($\theta = 0$) до місця, де відбувається максимальний нагрів обтічника та його руйнування ($\theta = \theta_{max}^*$) (рис. 14); для металічної оболонки – залежність $L_{max}^*(V)$ ($L^* = \frac{x}{L}$, де x – координата уздовж поверхні оболонки від її передньої критичної точки ($x = 0$) до місця, де відбувається її максимальний нагрів та руйнування ($L_{max}^* = \frac{x_{max}}{L}$); L – довжина виробу) (рис. 15).

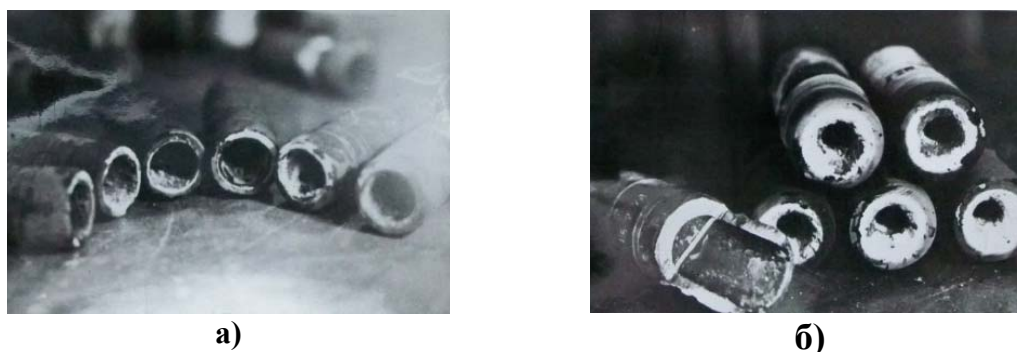


Рис. 13 – Різні ракурси піротехнічних виробів на основі сумішей алюміній + нітрат натрію після їх передчасного спрацьовування та руйнування в умовах запуску: а) – $V = 8 \cdot 10^2$ м/с, кутова швидкість обертання виробу $\omega = 0$; б) – $V = 1,2 \cdot 10^3$ м/с, $\omega = 5 \cdot 10^2$ рад/с

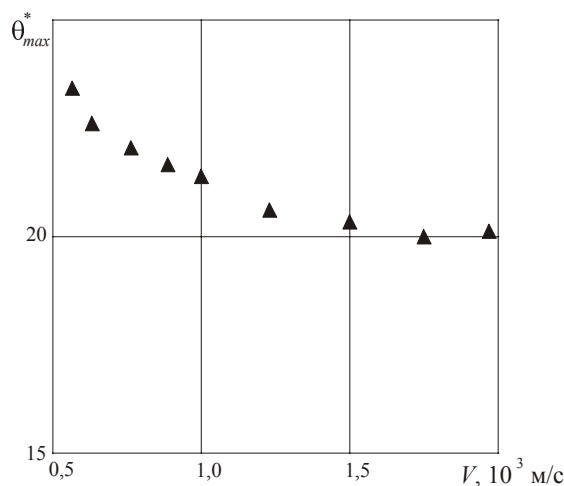


Рис. 14 – Залежність $\theta_{max}^*(V)$ для турбулентного обдуву металевго обтічника виробу надзвуковим потоком повітря: ▲ – результати випробувань, отримані на вказаній вище установці

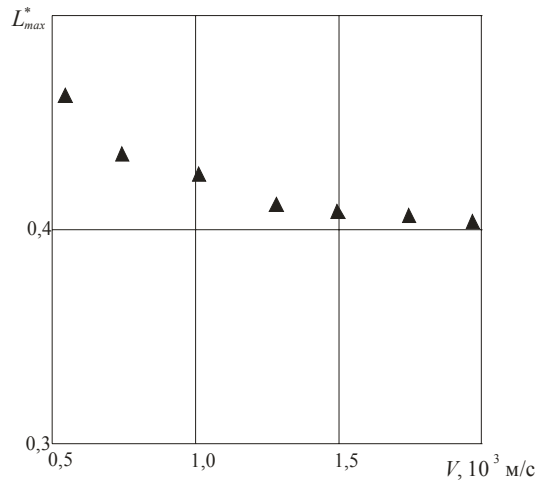


Рис. 15 – Залежність $L^*(V)$ для турбулентного обдуву металеві оболонки виробу надзвуковим потоком повітря: \blacktriangle – результати випробувань, отримані на вказаній вище установці

З результатів, представлених на рис. 14, 15 випливає, що із збільшенням швидкості обдуву потоком повітря місця розташування зон поверхневого руйнування виробу практично не змінюються: при збільшенні V від $5 \cdot 10^2$ м/с до $2 \cdot 10^3$ м/с значення θ_{max}^* та L_{max}^* лежать в межах $20 \dots 25^0$ та $0,40 \dots 0,45$.

Висновки. Для підвищення ефективності роботи випробувальної установки, що моделює надзвуковий обдув потоком повітря зразків сумішей, проведено шлірен-фотографічні дослідження формування газового потоку, візуалізації картини обтікання, які дозволили: встановити, що відстань до прямого стрибка від зрізу зразка при відстанях між зрізом та зразком $s_1 = 4 \cdot 10^{-2} \dots 0,1$ м складає $s_0 = 1,3 \cdot 10^{-2} \dots 1,5 \cdot 10^{-2}$ м; вибрати оптимальну відстань від зрізу сопла до зразка $s_{opt} = 5 \cdot 10^{-2}$ м, при якій надзвуковий газовий струмінь зберігає структуру своєї початкової ділянки, що дозволяє у декілька разів підвищити точність розрахунків його параметрів, використовуючи для цього відомі газодинамічні функції. Вперше проведені випробування в умовах надзвукового обдуву потоком повітря та вісесиметричного обертання показали, що при швидкостях обдуву до $5 \cdot 10^2 \dots 10^3$ м/с у $30 \dots 40$ % випробуваних виробів металеві обтічники та оболонки піддаються пожежонебезпечним руйнуванням, а при швидкостях обдуву $1,5 \cdot 10^3 \dots 2 \cdot 10^3$ м/с руйнуванню піддаються вже більше 90 % випробуваних виробів. При цьому у випадку ламінарного режиму обтікання руйнування виробів спостерігається біля їх передніх критичних точок, а у випадку турбулентного режиму обтікання область руйнування зміщується від передніх критичних точок ($\theta^* = 0$ – для обтічника; $x^* = 0$ – для оболонки) вздовж поверхні виробів до $\theta_{max}^* = 20 \dots 25^0$ та $L_{max}^* = 0,40 \dots 0,45$.

ЛІТЕРАТУРА

1. Брауэр К.О. Пиротехнические устройства для космических аппаратов / К. О. Брауэр // Вопросы ракетной техники. – 1969. – № 10. – С. 47 – 61.
2. Шидловский А.А. Основы пиротехники / Шидловский А. А. – М.: Машиностроение, 1973. – 320 с.
3. Шидловский А. А. Пиротехника в народном хозяйстве / Шидловский А. А., Сидоров А. И., Силин Н. А. – М.: Машиностроение, 1978. – 231 с.
4. Силин Н. А. Металлические горючие гетерогенных конденсированных систем / Силин Н. А., Ващенко В. А., Кашпоров Л. Я. – М.: Машиностроение, 1976. – 320 с.
5. Силин Н. А. Окислители гетерогенных конденсированных систем / Силин Н. А., Ващенко В. А., Зарипов Н. И. – М.: Машиностроение, 1978. – 456 с.
6. Силин Н.А. Горение металлизированных гетерогенных конденсированных систем / Силин Н. А., Ващенко В. А., Кашпоров Л. Я. – М.: Машиностроение, 1982. – 232 с.
7. Ващенко В.А. Высокотемпературные технологические процессы взаимодействия концентрированных источников энергии с материалами / Ващенко В. А. [Монография] – М.: Деп. в ВИНТИ 07.08.96, № 62 – хп 96. – 408 с.
8. Влияние больших скоростей вращения изделия на процессы в волне горения / [Ващенко В. А., Краснов Д. М., Заика П. И. // Вісник Сумського державного університету, 1998. – № 1 (9). – С. 67 – 74.
9. Кириченко О.В. Определение участков на поверхности металлических корпусов пиротехнических изделий, подвергающихся разрушениям в условиях эксплуатации / О.В.Кириченко // Вісник ЧДТУ, 2008. – № 1. – С. 149 – 154.
10. Кириченко О.В. Влияние повышенных угловых скоростей вращения на скорость и концентрационные пределы горения пиротехнических нитратных систем / О.В.Кириченко // Вісник Приазовського державного технічного університету, 2008. – вип. 19. – С. 131 – 135.
11. Кириченко О.В. Повышение эффективности пиротехнических нитратосодержащих изделий в условиях их применения / О.В.Кириченко // Вісник ЧДТУ, 2009. – № 2. – С. 89 – 94.
12. Кириченко О.В. Дослідження впливу надзвукового обдуву потоком повітря та вісесиметричного обертання на залежності швидкості горіння ПНС від співвідношення компонентів та концентраційні межі горіння / О.В.Кириченко // Вісник ЧДТУ, 2009. – № 3. – С. 95 – 100.

13. Экспериментально-статистические модели для расчета зависимостей скорости и концентрационных пределов горения пиротехнических нитратных систем от скорости обдува потоком воздуха / Кириченко О. В., Акиншин В. Д., Яхно Б. О. та ін. // Вестник НТУУ «КПИ». Машиностроение. – 2008. – № 52. – С. 58 – 66.

14. Зависимости скорости горения пиротехнических нитратных систем от соотношения компонентов, нахождение концентрационных пределов горения в условиях повышенных скоростей обдува потоком воздуха / Ващенко В. А., Кириченко О. В., Акиншин В. Д. та ін. // Вісник Приазовського державного технічного університету, 2008. – вип. 18. – С. 257– 261.

15. Экспериментальные исследования различных режимов горения пиротехнических нитратных систем в условиях сверхзвукового обдува потоком воздуха и осесимметричного вращения / Ващенко В. А., Кириченко О. В., Акиншин В. Д. та ін. // Науковий вісник УкрНДПБ. – 2008. – № 2(18). – С. 102 – 109.

16. Моделирование пожаровзрывоопасных режимов горения нитратных систем при применении пиротехнических изделий / Кириченко О. В., Цыбулин В. В., Яценко И. В. та ін. // Вісник ЧДТУ, 2008. – № 4. – С. 35 – 41.

17. Обоснование условий повышения эффективности применения пиротехнических нитратосодержащих изделий в условиях сверхзвукового обдува потоком воздуха и осесимметричного вращения / Ващенко В. А., Кириченко О. В., Акиншин В. Д. та ін. // Науковий вісник УкрНДПБ. – 2008. – № 2(18). – С. 91 – 101.

18. Комплекс испытательных установок, моделирующих реальные условия применения пиротехнических нитратосодержащих изделий / Ващенко В. А., Кириченко О. В., Акиншин В. Д. та ін. // Науковий вісник УкрНДПБ, 2009. – № 1(19). – С. 127 – 137.

19. Вибухонебезпечні режими горіння потрійних піротехнічних нітратовмісних систем в умовах зустрічного обдуву потоком повітря та обертання / Кириченко О. В., Ващенко В. А., Заїка П. І. та ін. // Вісник ЧДТУ, 2010. – № 2. – С. 152 – 158.

20. Вплив органічних домішок на вибухонебезпечні режими горіння ПНМС в умовах підвищених температур нагріву і зовнішніх тисків / Кириченко О. В., Ващенко В. А., Заїка П. І. та ін. // Вісник ЧДТУ, 2010. – № 3. – С. 118 – 125.

21. Абрамович Г. Н. Прикладная газовая динамика / Абрамович Г. Н. – М.: Наука, 1969. – 824 с.

22. Лойцянский Л. С. Механика жидкости и газа / Лойцянский Л. С. – М.: Наука, 1987. – 840 с.

23. Паничкин И. А. Аэродинамика ракет / Паничкин И. А., Кираванов М. В., Жур М. С. – М.: Машиностроение, 1960. – 421 с.

24. Похил П.Ф. Методы исследования процессов горения и детонации / Похил П.Ф., Мальцев М. И., Зайцев В. М.. – М.: Наука, 1969. – 303 с.

О.В. Кириченко, В.А. Ващенко, В.В. Цыбулин

Пожаровзрывоопасные термовоздействия на поверхность металлических корпусов изделий в условиях выстрела и полета

Представлены результаты шлирен-фотографических исследований структуры сверхзвукового воздушного потока, обтекающего металлические корпуса пиротехнических изделий, которые позволили усовершенствовать испытательную установку в части уточнения моделирования условий выстрела и полета изделий. Впервые установлено влияние скорости воздушного потока (в границах до $2 \cdot 10^3$ м/с) и режима обтекания (ламинарный, турбулентный) на местоположения на поверхности корпусов изделий зон максимальных внешних термовоздействий, где происходят их пожаровзрывоопасные разрушения.

Ключевые слова: пиротехнические изделия, нитратно-металлические смеси, аэродинамический нагрев.

O.V. Kirichenko, V.A. Vaschenko, V.V. Tsybulin

Fire-explosion-dangerous thermo-influences on the surface of metallic corps of wares in the conditions of shot and flight

The results of shliren-photographic researches of structure of the supersonic current of air, flowing around metallic corps of pyrotechnic wares which allowed to perfect the tester installation in part of clarification of design of terms of shot and flight of wares, are presented. The influence of speed of current of air (in scopes about $2 \cdot 10^3$ m/s) and mode of flow line (laminar, turbulent) on the locations on the surface of corps of wares of areas of maximal external thermo-influences, where their fire-dangerous destructions is first set.

Keywords: pyrotechnic wares, nitrate-metallic mixtures, aerodynamic heating.