

УДК 629.764

В. В. Ємець¹, Ф. П. Санін¹, Є. О. Джур¹, М. В. Масляний¹,
О. Ю. Костріцин¹, Г. В. Мінтєєв¹, В. М. Ушканов²

¹ Дніпропетровський національний університет

² Південний машинобудівний завод, Дніпропетровськ

Експериментальне дослідження моделі ракетного двигуна, що живиться твердим поліетиленовим стержнем як паливом

Надійшла до редакції 19.03.07

Описані вогняні випробування моделі ракетного двигуна, в якому згорає твердий поліетиленовий стержень. Наводяться експериментально визначені величини теплових потоків, коефіцієнти тепловіддачі, швидкості газифікації. Результати експериментів можуть бути застосовані при проектуванні ракет-носіїв, в яких оболонка бака з поліетилену використовується як паливо.

ВСТУП

Однією з основних проблем створення двигунної установки для спалюваної ракети [1] є розробка газифікаційної камери, в якій тверда бакова оболонка з поліетилену перетворюватиметься на газ. Цей газ подаватиметься в камеру згорання як паливо. Така газифікаційна камера для ракетного двигуна є новим технічним пристроєм, тому метою цієї роботи, що проводилась в 2003—2006 роках згідно з проектною угодою № 2524 «Використання поліетиленових баків ракет-носіїв як пального» між Дніпропетровським національним університетом та Українським науково-технологічним центром, було отримання висновків щодо принципів побудови газифікаційної камери за результатами експериментального дослідження основних характеристик і особливостей піролізу поліетиленового стержня за допомогою моделей газифікаційної камери і ракетного двигуна, який спочатку живиться газоподібними метаном і киснем, а потім киснем і цим самим поліетиленовим стержнем.

На підготовчому етапі випробувань відпрацьовувались елементи стенда і двигуна, пневмогідросистеми, система вимірювань. На основному етапі випробувань продемонстровано піроліз поліетиленового стержня власними продуктами згорання і отримано дані, що дозволяють оцінити теплові потоки в газифікаційній камері, швидкість і ефективність піролізу. Особлива увага приділялась вимірюванню температури в кількох точках газифікаційної камери з метою оцінки теплових потоків. Вимірювалась швидкість газифікації стержня, інші параметри.

Згідно з експериментальними даними порядок швидкості газифікації поліетилену становить 1 мм/с при умові надходження в газифікаційну камеру теплових потоків із щільністю порядку 1 МВт/м². Отже, площа газифікаційної камери мусить перевищувати площу торця спалюваної бакової оболонки ракети в 10...100 разів. Для цього її треба робити конічною або зубчастою, тоді швидкість скорочення бакової оболонки зросте до необхідної величини 1—10 см/с. Газифікаційну камеру треба розміщувати в камері

згоряння в області форсуночної головки. Розміщувати газифікаційну камеру в районі сопла з ціллю отримання високих теплових потоків не є необхідним.

Отримані дані дозволяють оцінити достовірність розрахунків двигунної установки для спалюваної ракети, а зроблені висновки дозволяють розпочати розробку вдосконаленого варіанту експериментального двигуна.

СТЕНД ДЛЯ ВОГНЬОВИХ ВИПРОБУВАНЬ І ВИМІРЮВАННЯ ОСНОВНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОЛІЗУ І ГОРІННЯ

Основою стенда є масивний металевий стіл. На ньому знаходиться рама з напрямними стержнями і пересувною кареткою для установки двигуна. Спереду від рами розміщений гідроциліндр, що штовхає двигун на поліетиленовий стержень. Позаду від рами розміщується вогняний ящик, що використовується для забору продуктів згоряння і установки консольного упора для поліетиленового стержня. Від вогняного ящика відходить вентиляційна труба. Загальний вигляд стенда наводиться на рис. 1.

Шість пневматичних і гідравлічних систем входять до складу стенда:

- система подачі газоподібного метану, що використовується як пускове пальне;
- система подачі газоподібного кисню, що використовується як окислювач;
- система подачі газоподібного аргону для зниження температури в камері згоряння; другою функцією цієї системи є керування клапаном газоподібних продуктів піролізу поліетилену (піролізованого поліетилену);
- система подачі води для охолодження камери згоряння;
- система подачі газоподібного гелію для захисту від окислення зовнішньої поверхні ніобієвого сопла, що не охолоджується;
- система подачі оливи в гідроциліндр.

Модель двигуна, що складається з камери згоряння з соплом і газифікаційної камери, закріплюється за допомогою пересувної каретки на трьох напрямних стержнях (рис. 2).

Поліетиленовий стержень одним кінцем спирається на упор у вогняному ящику, другим кінцем входить в газифікаційну камеру. У міру

скорочення стержня внаслідок газифікації двигун пересувається вздовж напрямних стержнів під дією гідроциліндра (рис. 3).

Під час випробувань вимірюються такі характеристики:

- температура всередині стінки газифікаційної камери в чотирьох точках;
- температура піролізованого поліетилену;
- тиск в газифікаційній камері;
- температура продуктів згоряння на виході з сопла;
- тиск в камері згоряння;
- сила, що виникає в перетині між гідроциліндром і двигуном;
- витрата і температура води на виході з охолоджувального тракту.

Експериментальні дані записувались самописцями рулонного типу і web-камерою. Керування експериментами і візуальне спостереження здійснювались із приміщення, що відокремлене від випробувального боксу стінкою з вікнами із броньового скла.

МОДЕЛЬ ДВИГУНА

Модель двигуна живиться двома пальними — метаном і піролізованим поліетиленом. Окислювачем є газоподібний кисень. Аргон застосовується для зниження температури в камері згоряння до величини приблизно 2800 К, щоб зменшити ризик прогарів. Запалення здійснюється переробленою автомобільною свічкою. Спочатку двигун живиться метаном. Продукти згоряння метану і кисню розігрівають газифікаційну камеру, що призводить до піролізу поліетилену. Відомо, що піроліз поліетилену розпочинається при температурі близько 360 °С і закінчується при температурі 475 °С. Внаслідок піролізу не менше ніж 99,9 % поліетилену перетворюється на газ. Коли тиск в газифікаційній камері перевищує тиск в камері згоряння, піролізований поліетилен через клапан подається в камеру згоряння. Деякий час двигун живиться метаном і піролізованим поліетиленом. Далі подача метану припиняється, і двигун живиться лише піролізованим поліетиленом, що піролізує сам себе. Варіант влаштування двигуна подано на рис. 4, а загальний вигляд — на рис. 5.

Основними частинами двигуна є камера згоряння, сопло, газифікаційна камера, кільцевий газовод, клапан піролізованого поліетилену, поліетиленовий стержень. Камера згоряння виготовлена з жаротривкої сталі 12X18H10T. Вона має шатрову головку з форсунками струменевого типу і водяне охолодження. Камера згоряння використовується для утворення гарячих продуктів згоряння, які газифікують поліетилен. Сопло з ніобію (температура плавлення 2487 °С), що не охолоджується, використовується для розміщення газифікаційної камери. Кільцевий газовід з жаротривкої сталі 12X18H10T потрібен лише для закріплення газифікаційної камери в соплі. На рис. 6 представлені камера згоряння і сопло.

Газифікаційна камера виготовляється з молібденового сплаву і розміщується в соплі. Висота щілини між газифікаційною камерою і соплом в наших експериментах становила 4.3...4.8 мм на виході з сопла і плавно зростала до 5.7...7.5 мм біля носка газифікаційної камери. Молібденовий сплав для виготовлення газифікаційної камери вибраний тому, що молібдену властиві висока температура плавлення (2625 °С) та висока теплопровідність (145 Вт/(м·К) при 20 °С). Розташування камери в соплі обране з двох причин. По-перше, це дозволяє регулювати величину теплового потоку, що надходить у зовнішню стінку газифікаційної камери від продуктів згоряння, завдяки зміні висоти проміжку між газифікаційною камерою і соплом. По-друге, таке розташування є зручним для установки термопар, що вимірюють температури всередині стінки газифікаційної камери. W-WRe термопари прокладені по зовнішній поверхні газифікаційної камери і закриті гаргротами із танталової фольги (температура плавлення 2996 °С). Гаргроти приєднані до газифікаційної камери точковим зварюванням. Вони потрібні для захисту термопар від гарячого газового потоку. Чотири термопари розташовані попарно для визначення різниці температур між зовнішньою і внутрішньою стінками у двох місцях. Кінці термопар занурені на різні глибини (від 1.5 до 10.8 мм) в глухі отвори в стінці газифікаційної камери діаметром 0.8...1 мм. Внутрішня конічна поверхня газифікаційної камери має поздовжні канав-

ки для витікання піролізованого поліетилену. Цей внутрішній конус має малий кут з метою збільшення газифікаційної поверхні. Хвостова частина газифікаційної камери виготовлена з титану (теплопровідність 20 Вт/(м·К) з метою зниження теплового потоку від газифікаційної камери до інших елементів конструкції. На рис. 7 наводиться загальний вигляд газифікаційної камери.

Клапан піролізованого поліетилену (рис. 8) нагрівається до температури близько 400 °С за допомогою спірального електронагрівача для запобігання конденсації піролізованого поліетилену. Клапан переключається за допомогою газоподібного аргону. Клапан утримує піролізований поліетилен в ресивері, доки його тиск не перевищить тиск в камері згоряння (близько 1 МПа). Після цього за командою з пульту керування піролізований поліетилен подається в камеру згоряння по трубопроводу з електронагрівом.

Поліетиленовий стержень складається із поліетиленової труби діаметром 20 мм, що має 1.5...2.5 % сажі, і кількох циліндрів діаметром 15 мм із чистого поліетилену високого тиску. Циліндри вміщуються всередину труби. Стержень вставляється в сталеву фоль'єру.* З метою мінімізації нагріву фоль'єри вона спирається на газифікаційну камеру через тонку сталеву пластинку (рис. 9). Фоль'єра використовується як ущільнення для перешкодження витіку піролізованого поліетилену через проміжок між стержнем і газифікаційною камерою.

ПІДГОТОВЧІ ВИПРОБУВАННЯ

На цьому етапі здійснювалась експериментальна перевірка працездатності пневмогідравлічних систем, системи вимірювань і запису даних, камери згоряння, пересувної каретки, сопла, газифікаційної камери, фоль'єри. Всього було проведено 24 вогньові пуски. Із них шість — успішно. Після кожного пуску проводились доробки конструкцій, змінювались режими роботи.

Головними проблемами при відпрацюванні камери згоряння були прогар камери згоряння і витік води всередину камери згоряння після

* Ми намагались виготовити фоль'єру з пірофіліту в титановій оправці, але не змогли дотримати довготривалий режим термічної обробки. Втім, реалізований альтернативний варіант виявився ефективним.

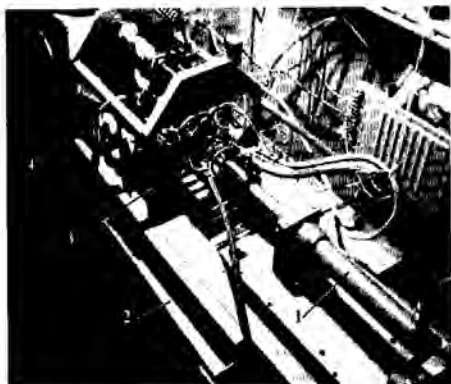


Рис. 1. Загальний вигляд стенда: 1 — гідроциліндр, 2 — стіл, 3 — рама, 4 — вогняний ящик



Рис. 2. Загальний вигляд каретки з двигуном на стенді: 1 — рама, 2 — теплоізоляційна труба, всередині якої знаходиться поліетиленовий стержень, 3 — напрямний стержень, 4 — каретка

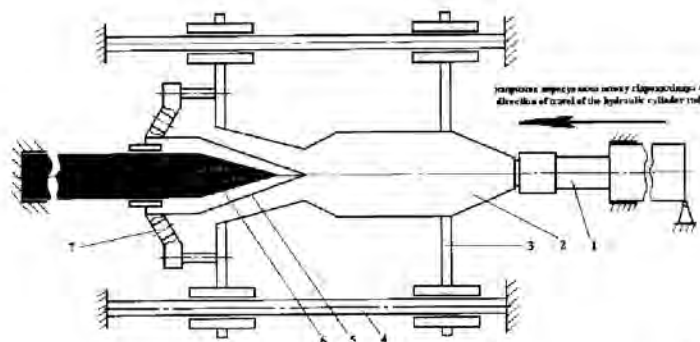


Рис. 3. Кінематична схема стенда: 1 — гідроциліндр, 2 — камера згорання, 3 — каретка, 4 — напрямний стержень, 5 — газифікаційна камера, 6 — поліетиленовий стержень, 7 — кільцевий газовод

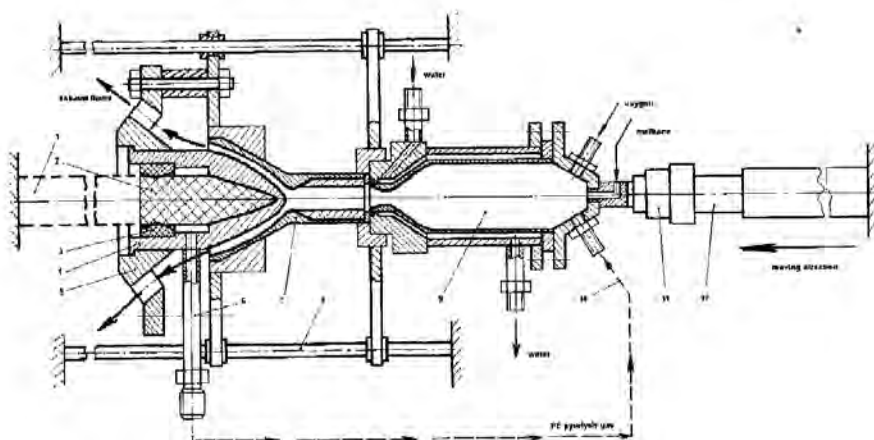


Рис. 4. Варіант влаштування експериментального двигуна: 1 — довгий поліетиленовий стержень, що газифікувався на кінцевому етапі експерименту, 2 — короткий поліетиленовий стержень, що газифікувався на початковому етапі експерименту, 3 — фільтр, 4 — газифікаційна камера з молібденового сплаву, 5 — кільцеве сопло, 6 — трубка для виходу газоподібних продуктів піролізу поліетилену, 7 — сопло з ніобієвого сплаву, 8 — напрямні стержні, 9 — камера згорання, 10 — трубопровід для подачі газоподібних продуктів піролізу поліетилену в камеру згорання, 11 — давач тяги, 12 — гідроциліндр

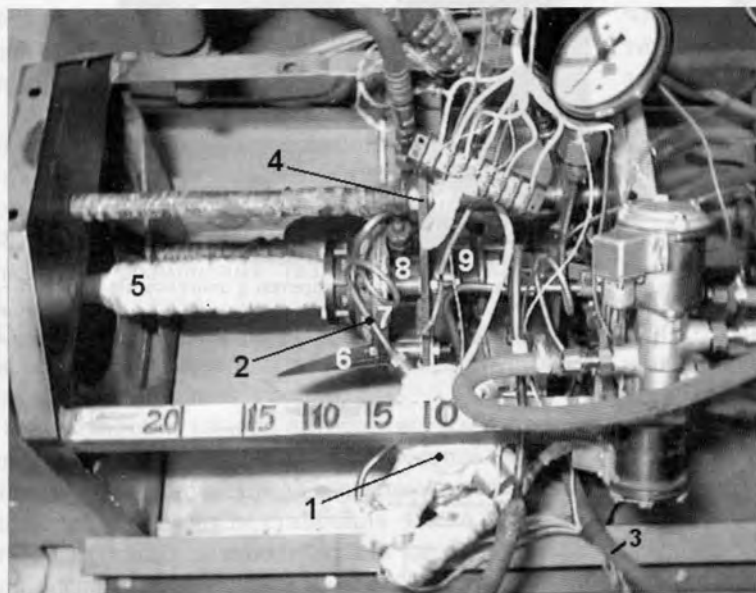


Рис. 5. Загальний вигляд двигуна на стенді (ціна поділки на рамі — 5 см): 1 — клапан піролізованого поліетилену, 2 — трубопровід, що з'єднує газифікаційну камеру і клапан, 3 — трубопровід подачі аргону для керування клапаном, 4 — каретка, 5 — теплоізолювана напрямна труба з поліетиленовим стержнем всередині, 6 — щиток для захисту напрямних стержнів від продуктів згоряння, 7 — кільцевий газовід, 8 — газифікаційна камера, 9 — колектор обдування сопла гелієм

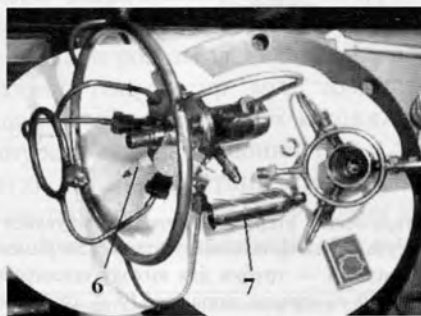
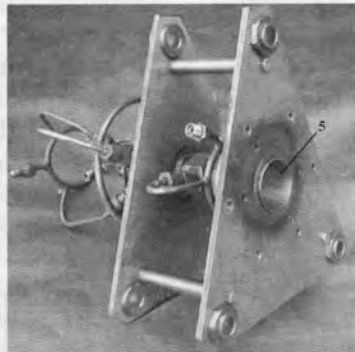
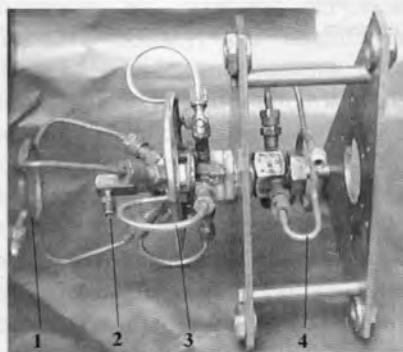


Рис. 6. Камера згоряння і сопло: а — камера згоряння складена на каретці, б — камера згоряння разом із соплом, в — складові частини камери згоряння (1 — колектор кисню, 2 — штуцер метану, 3 — вихідний колектор води, 4 — вхідний колектор води, 5 — сопло, 6 — запальна свічка, 7 — внутрішня оболонка камери згоряння)

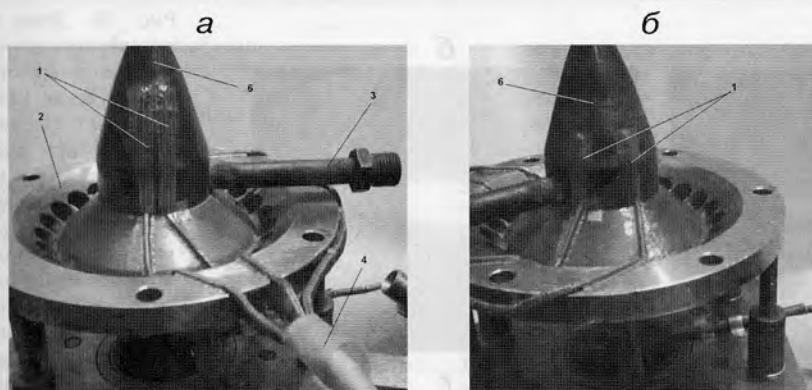


Рис. 7. Загальний вигляд газифікаційної камери: *а* — з боку термодпар, що наближені до кінцевого носка, *б* — з боку термодпар, що віддалені від кінцевого носка (*1* — W-WRe термодпар, що приєднані до зовнішньої поверхні газифікаційної камери за допомогою танталової фольги, *2* — кільцевий газовід, *3* — штуцер з ніобієвого сплаву для виходу піролізованого поліетилену із газифікаційної камери, *4* — W-WRe термодпар, що вміщені в гнучкі металізовані трубки, *б* — газифікаційна камера з молібденового сплаву)

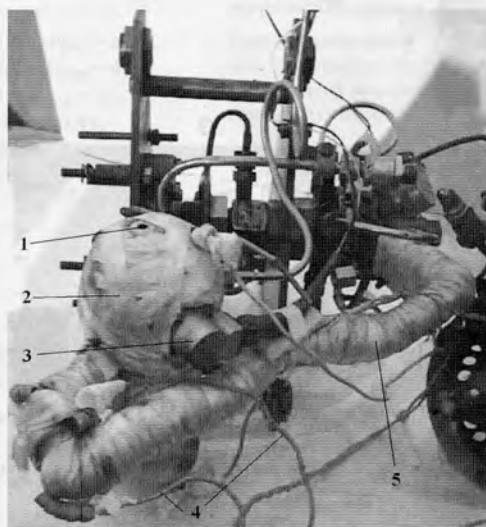


Рис. 8. Загальний вигляд елементів системи подачі піролізованого поліетилену: *1* — отвір для установки термодпар, *2* — клапан з ресивером, спіральним електронагрівачем і теплоізоляцією, *3* — давач тиску, *4* — провідники живлення електронагрівачів, *5* — трубопровід із спіральним електронагрівачем і теплоізоляцією, що з'єднує клапан і камеру згоряння

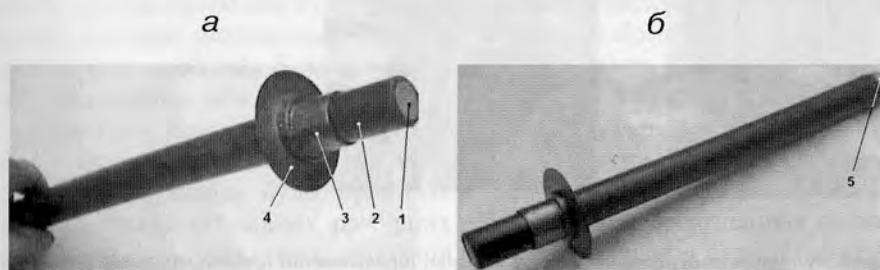


Рис. 9. Поліетиленовий стержень разом з філь'єрою, підготовлені до установки в газифікаційну камеру (загальна довжина стержня 282 мм, діаметр — 20 мм): *а* — вигляд з боку газифікаційної камери, *б* — загальний вигляд (*1* — циліндр з чистого поліетилену, *2* — труба з поліетилену, що має домішку сажі, *3* — філь'єра, *4* — тонка пластинка, що сполучає філь'єру і газифікаційну камеру, *5* — сталевий наконечник)

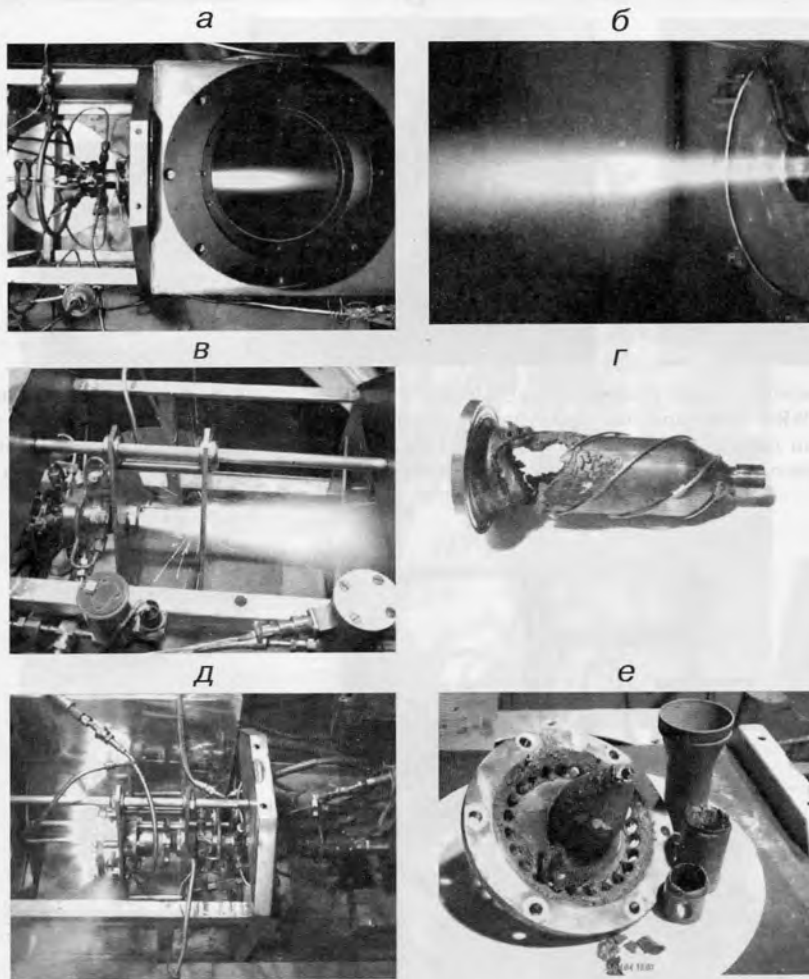


Рис. 10. Деякі етапи підготовчих випробувань: *a* — випробування камери згоряння протягом 20 с, *б* — випробування камери згоряння протягом 40 с (видно «бочки» Маха, що свідчить про досконалість процесу згоряння), *в* — прогар камери згоряння під дією власної тяги (вода з охолоджувального тракту виходить разом з продуктами згоряння), *г* — камера згоряння, що прогоріла, *д* — піроліз короткого поліетиленового стержня, вміщеного у газифікаційну камеру, продуктами згоряння метану і кисню (струмінь білого газу відходить вбік від газифікаційної камери), *е* — газифікаційна камера і сопло, що частково розплавившись і згоріли внаслідок надлишку кисню у паливі (праворуч для порівняння — запасне сопло)

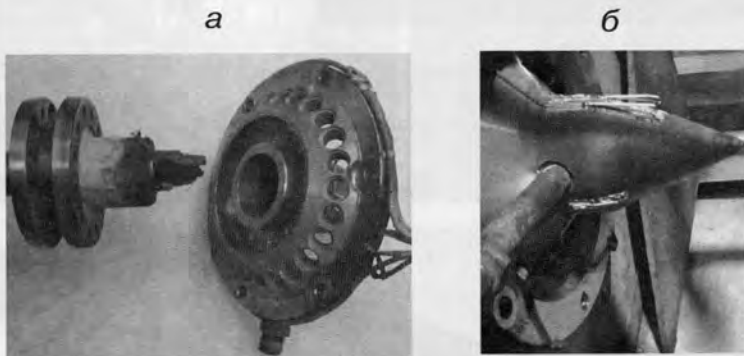


Рис. 11. Піроліз поліетилену продуктами згоряння метану і кисню; піролізований поліетилен згоряє в атмосфері (експеримент 18.06.2004): *a* — залишок поліетиленового стержня в філь'єрі з азбестовою теплоізоляцією після експерименту, *б* — танталові гарготи двох ближніх до носка газифікаційної камери термопар згоріли (видно термопари в керамічній електроізоляції, що відхилилися від поверхні газифікаційної камери); температура на поверхні кінця носку газифікаційної камери перевищувала температуру плавлення молібдену внаслідок гальмування газового потоку

Таблиця 1. Перебіг підготовчих випробувань

Дата	Мета	Робочі режими* (P , МПа; G , г/с; T , °С; $F_{дв}$, Н)	Досягнення	Проблеми	Імена файлів на сайті http://perocket.dnu.dp.ua
25.09.03, 22.10.03, 05.11.03, 06.11.03, 24.11.03, 25.12.03	Випробування камери згоряння. Збільшення тривалості горіння в камері згоряння від 20 до 60 с	$P_{мет} = 1.03$, $P_{кис} = 1.47$, $P_{вод} = 2.06$, $G_{мет} = 4$, $G_{кис} = 15$, $G_{вод} = 21$, $P_{кам} = 0.49...0.54$, $T_{вод} = 50$, $T_{соп} = 2000...2300$, $t = 20, 40, 60$ с	Запалення добре, горіння стійке, повне. Прогару камери згоряння немає	Прогар камери згоряння. Після припинення горіння вода потрапляє всередину камери згоряння	06nov03.WMV unsuccess.WMV 24nov03.WMV
04.03.04, 11.03.04, 12.03.04, 19.03.04	Доведення тривалості горіння до 100 с. Пересування двигуна на каретці під дією власної тяги	$P_{мет} = 1.03$, $P_{кис} = 1.72$, $P_{вод} = 2.06$, $G_{мет} = 4$, $G_{кис} = 16$, $G_{вод} = 21$, $P_{кам} = 0.44$, $F_{дв} = 19.6...34.3$ $t = 20, 30, 100$ с	Тривалість горіння доведена до 100 с. Двигун пересувається на каретці під дією власної тяги. Заміряна тяга двигуна. Вода не потрапляє всередину камери згоряння після припинення горіння	Заклиновання каретки	100sec.WMV travel.WMV burn-out.WMV
22.03.04, 23.03.04, 30.04.04	Випробування сопла, газифікаційної камери, гідроциліндра. Піроліз короткого (50 мм) поліетиленового стержня. Піроліз довгого поліетиленового стержня, що подається гідроциліндром	$P_{мет} = 1.03$, $P_{кис} = 1.72$, $P_{вод} = 2.06$, $G_{мет} = 4$, $G_{кис} = 16$, $G_{вод} = 21$, $P_{кам} = 0.44...0.49$, $F_{дв} = 147^{**}$ $t = 22$ с	Продемонстровано можливість піролізу поліетилену за допомогою продуктів згоряння	Згоряння сопла, відрив носка газифікаційної камери	short_rod.WMV fire30apr.WMV

*Тут і далі: $P_{мет}$, $P_{кис}$, $P_{ар}$, $P_{вод}$ — тиск подачі метану, кисню, аргону на виході з редуктора та води на виході з тракту охолодження; $P_{кам}$, $P_{ц}$ та $P_{ппе}$ — тиск в камері згоряння, гідроциліндрі та тиск піролізованого поліетилену; $G_{мет}$, $G_{кис}$, $G_{ар}$, $G_{вод}$ — витрата метану, кисню, аргону та води; $T_{вод}$ — температура води на виході з тракту охолодження, $T_{соп}$ — температура продуктів згоряння на виході з сопла, $T_{ппе}$ — температура клапана піролізованого поліетилену, t — тривалість горіння, $F_{дв}$ — тяга двигуна.

**Варто звернути увагу на цей побічний результат. Імовірно, що тяга збільшилась в 5...7 разів за рахунок інжекції повітря в кільцевому газоводі.

припинення горіння внаслідок циклу термічного розширення-стиснення внутрішньої оболонки камери згоряння. Перша проблема була розв'язана в основному шляхом підвищення тиску у водяному тракці. Друга проблема була розв'язана за рахунок ущільнення між внутрішньою і зовнішньою оболонками камери згоряння, яке дозволяє ковзати внутрішній оболонці при розширенні-стисненні. Це рішення було прийняте після аналізу конструкцій німецьких розбірних багаторазових авіаційних ракетних двигунів 1940-х років.

При випробуваннях газифікаційної камери і сопла з'явилась проблема розплавлення і зго-

ряння цих деталей. Вона була розв'язана шляхом зниження коефіцієнта надлишку окислювача (відношення витрати окислювача до потрібної за стехіометричним співвідношенням) із значення 1.0 до 0.8 і подаванням аргону в камеру згоряння у масовому співвідношенні 5:4 до кисню. За розрахунками це спричиняє зниження температури в камері згоряння приблизно з 3200 до 2800 К.

Головним досягненням цього етапу є розробка і відпрацювання стенда і двигуна, потрібних для основних досліджень. Головна інформація про вогнєві випробування зведена в табл. 1 і проілюстрована на рис. 10.

ОСНОВНІ ДОСЛІДЖЕННЯ

Перебіг експериментів і експериментальні дані. На цьому етапі здійснювались подача поліетиленового стержня в газифікаційну камеру за допомогою гідроциліндра, спалення піролізованого поліетилену в атмосфері і в камері згоряння, вимірювання температури в чотирьох точках газифікаційної камери, вимірювання температури піролізованого поліетилену та інших характеристик. Всього було проведено два експерименти. Перший експеримент (18.06.2004) із спаленням піролізованого поліетилену в атмосфері був цілком вдалий. Стержень довжиною 20 см був плавно газифікований за 20 с. Другий експеримент (20.07.2004) із спаленням піролізованого поліетилену в камері згоряння вдався лише частково. Його перебіг був перерваний через кілька секунд після початку горіння піролізованого поліетилену в камері згоряння внаслідок прогару камери згоряння і відриву носка газифікаційної камери. Прогар камери згоряння розпочався ще на початку експерименту (на відеозапису видно іскри і дим) від головки, що не охолоджується, і був наслідком закінчення її ресурсу. Однією з причин відриву носка було навмисне припинення подачі аргону в момент подачі в камеру згоряння піролізованого поліетилену з метою забезпечити найкраще його запалення, що призвело до зростання температури продуктів згоряння. Втім, протягом кількох секунд (з 17-ї по 20-ту) функціонував двигун, що живиться поліетиленовим стержнем,

який газифікується власними продуктами згоряння. За цей час двигун пересунувся приблизно на 2 см, а швидкість піролізу зросла майже удвічі. Зазначимо, що навіть в аварійних умовах надходження в камеру згоряння води і відриву носка газифікаційної камери в цій камері продовжувався піроліз поліетилену (стержень заткнув собою пробійну), продовжувалось надходження піролізованого поліетилену через клапан в головку камери згоряння (згідно з показами манометра на клапані) і горіння, що добре видно в кінцевій частині відеозапису. Отже, припинення подачі аргону було непотрібним і призвело до аварії.

Перебіг експериментів описано в табл. 2 і 3 та проілюстровано на рис. 11, а файли відеозаписів цих випробувань (18-06-2004.avi і 20-07-2004.avi) можна переглянути на інтернет-сторінці <http://perocket.dnu.dp.ua>. Експериментальні дані представлені у вигляді графіків на рис. 12—15.

Оцінка теплових потоків в газифікаційній камері і коефіцієнта тепловіддачі від стінки камери в піролізованій поліетилен. Внаслідок процесу тепловіддачі від продуктів згоряння в газифікаційну камеру надходить деякий тепловий потік, який завдяки теплопровідності продовжує рухатись деяким шляхом в стінці цієї камери. За законом Фур'є питомий тепловий потік в стінці газифікаційної камери залежить від градієнта температурного поля. Цей градієнт визначається тим, що носок газифікаційної камери гріється більше, ніж хвос-

Таблиця 2. Перебіг спалення піролізованого поліетилену в атмосфері 18.06.2004. Робочі режими: $P_{\text{мет}} = 1.3$, $P_{\text{кис}} = 1.72$, $P_{\text{ар}} = 2.94$, $P_{\text{вод}} = 2.06$, $P_{\text{гц}} = 1.4$ МПа, $G_{\text{мет}} = 2.5$, $G_{\text{кис}} = 8$, $G_{\text{ар}} = 10$, $G_{\text{вод}} = 21$ г/с, $P_{\text{кам}} = 0.64$ МПа, $F_{\text{дв}} > 147$ Н, $t = 34$ с

Подія	Час від початку горіння, с	Примітки
Запалення метану і кисню	0	Видно спалах
Подача аргону	3..4	Різкий стрибок тиску в камері згоряння (рис. 13, а). Видно зміну кольору полум'я на білий
Поява піролізованого поліетилену із штуцера	6	—
Початок горіння піролізованого поліетилену, що виходить із штуцера	10	—
Початок пересування двигуна гідроциліндром	12	—
Поява великого факелу піролізованого поліетилену із штуцера	14	—
Припинення подачі палива	34	Зникло гудіння
Припинення пересування двигуна гідроциліндром	35	Чути свист дренажу

Таблиця 3. Перебіг спалення піролізованого поліетилену в камері згоряння 20.07.2004. Робочі режими: $P_{мет} = 1.32$, $P_{пне} = 0.5...1$, $P_{кис} = 1.72$, $P_{ар} = 2.94$, $P_{вод} = 2.06$, $P_{гц} = 1.62$ МПа, $G_{мет} = 2.5$, $G_{кис} = 8$, $G_{ар} = 10$, $G_{вод} = 21$ г/с, $P_{кам} > 0.54$ МПа, $T_{соп} = 1300...2300$, $T_{пне} = 370...390$ °С, $t = 32$ с

Подія	Час від початку горіння, с	Примітки
Запалення метану і кисню	0	Видно спалах
Подача аргону	0.8...0.9	Незначне зниження температури продуктів згоряння (рис. 14, а)
	1.25...1.5	Різкий стрибок тиску в камері згоряння (рис. 13, б)
	2	Видно, як піднявся шланг подачі аргону на клапан піролізованого поліетилену. Видно зміну кольору полум'я на білий
Початок пересування двигуна гідроциліндром	6	—
Припинення подачі аргону, подача піролізованого поліетилену в камеру згоряння	14...15	Різке і глибоке падіння температури продуктів згоряння від 1300 до 800 °С потім різке підвищення до 1800 °С (рис. 14, а) Видно, як упав шланг подачі аргону на клапан піролізованого поліетилену. Видно зміну кольору полум'я на білий Початок плавного падіння температури клапана піролізованого поліетилену (рис. 14, б)
Стабільне горіння на три-компонентному паливі піролізований поліетилен — метан — кисень	З початку 15 до кінця 16	Видно, що колір факелу змінився від прозорого на прозоро-білий.
	З початку 16 до початку 17	Усталення температури продуктів згоряння в межах 1700...1800 °С (рис. 14, а)
Припинення подачі метану	Початок 17	Різке і значне зростання температури продуктів згоряння, імовірно, внаслідок наближення співвідношення компонентів палива до стехіометричного (рис. 14, а)
	17	Різке і значне зростання температури носка газифікаційної камери (рис. 12, б)
	Кінець 16	Видно миттєве зникнення і появу факела
Близьке до запланованого функціонування двигуна на паливі піролізований поліетилен — кисень	З початку 17 до початку 20	Видно, що факел змінився від стабільного вузького прозоро-білого на нестабільний широкий яскраво-білий. Двигун просунувся приблизно на 2.5 см. Тиск в газифікаційній камері виріс вдвічі — свідчення газифікації поліетилену власними продуктами згоряння
Прогар камери згоряння	16.5	Максимум температури продуктів згоряння (рис. 14, а).
	18	Максимум температури носка газифікаційної камери (рис. 12, б)
	19...20	Видно, як з'явилась водяна пара навколо факела
Відрив носка газифікаційної камери	20	Чути хлопок
	20	Видно, як упала стрілка манометра піролізованого поліетилену приблизно з 1 МПа до нуля
	20.5	Максимум температури середньої частини газифікаційної камери
	20.5	Максимум сили опору пересуванню (рис. 15, б)
Факел гаситься водою	20...28	Видно малі язички полум'я
Припинення пересування двигуна гідроциліндром	28.5	Падіння до нуля сили опору пересуванню (рис. 15, б)
	28	Чути свист дренажу
Повторний спалах піролізованого поліетилену	28...29	—
Припинення горіння	32	Видно, як зник останній спалах
Припинення подачі кисню	32	Зникло гудіння

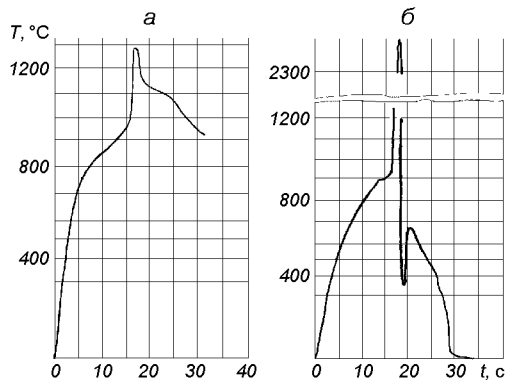


Рис. 12. Температура стінки газифікаційної камери (термопара № 1): *a* — експеримент 18.06.04, *б* — експеримент 20.07.04

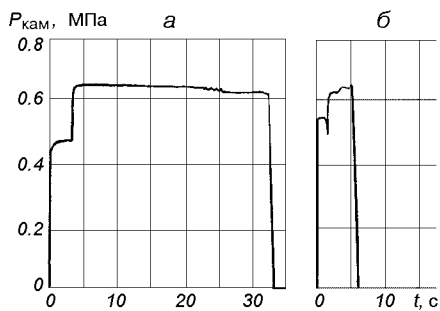


Рис. 13. Тиск в камері згоряння: *a* — експеримент 18.06.04, *б* — експеримент 20.07.04 (давач тиску вийшов з ладу на 5-й с після запалення, імовірно, внаслідок засмічення вхідного отвору розплавленим металом з головки камери згоряння)

товик внаслідок гальмування газового потоку (рис. 11, *б*), а також контактом з відносно холодним поліетиленовим стержнем. Тому частина теплового потоку буде спрямована вздовж стінки від носка до хвостовика і далі на інші деталі двигуна, а частина — уперек стінки у поліетиленовий стержень.

Скористаємось даними, отриманими від термопари № 1 (рис. 12) для приблизної оцінки максимальних питомих теплових потоків $\max q$, за формулою Фур'є (табл. 4). Видно, що порядок максимальних питомих теплових потоків в стінці газифікаційної камери не перевищує

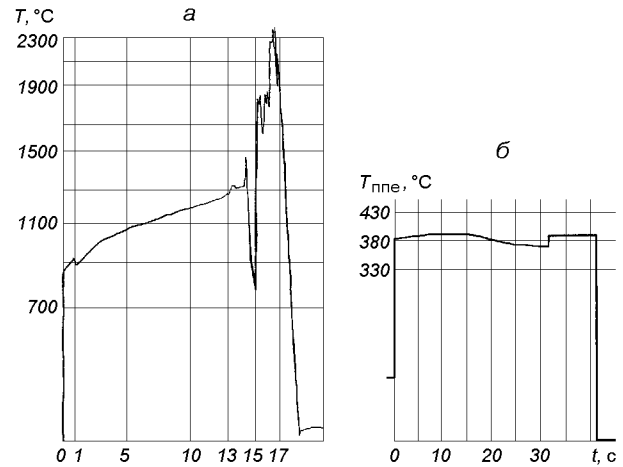


Рис. 14. Експеримент 20.07.2004: *a* — температура продуктів згоряння на виході з сопла, *б* — температура клапана піролізованого поліетилену

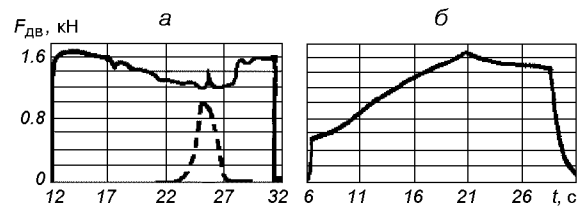


Рис. 15. Сила опору пересуванню, заміряна давачем, розташованим на штоку гідроциліндра: *a* — експеримент 18.06.04 (пунктиром показаний попередньо заміряний максимальний опір пересуванню двигуна при відсутності горіння), *б* — експеримент 20.07.04 (похилий підйом пояснюється, імовірно, амортизаційними властивостями газового об'єму в газифікаційній камері)

1 МВт/м². Отже, порядок питомих теплових потоків від стінки газифікаційної камери в поліетиленовий стержень, які є частиною теплових потоків у стінці газифікаційної камери також не може перевищувати цю величину.

Вийшовши із стінки газифікаційної камери, тепловий потік через деякий шар газоподібних продуктів піролізу, або через розплав, або через розплав, насичений газовими бульбашками, надходить у поліетиленовий стержень завдяки процесу тепловіддачі як конвективний тепловий потік із щільністю $q_{\text{вп}}$. (Зрозуміло, що на короткій ділянці входу в газифікаційну камеру

Таблиця 4. Оцінка $\text{max} q$ між носком газифікаційної камери і термопарою № 1

Дата експерименту	t , с	Температура плавлення молібдену, що приймається для носка газифікаційної камери, °С	Температура термопар № 1, °С	Середня температура між термопарами № 3 і 4, °С	λ , Вт·м ⁻¹ ·К ⁻¹	Відстань між носком термопарою № 1	Відстань між термопарою № 1 і термопарами № 3 і 4	$\text{max} q$, МВт·м ⁻²
Між носком газифікаційної камери і термопарою № 1								
18.06.04	17	2623	1280		80	36		3
Між термопарою №1 і термопарами № 3 і 4								
18.06.04	17		1280	700	90		17	3
20.07.04	15		900	600	100		17	2

буде мати місце теплопередача в твердий поліетилен за рахунок теплопровідності). Для оцінки коефіцієнта тепловіддачі α від стінки газифікаційної камери в піролізованій поліетилен скористаємось законом Ньютона:

$$q_{wf} = \alpha(T_w - T_f),$$

де T_w — температура внутрішньої поверхні стінки газифікаційної камери, T_f — температура газоподібних продуктів піролізу поліетилену. Прийmemo, що $T_f \approx 500$ °С і $700 \leq T_w \leq 900$ °С (згідно з даними рис. 12), тоді α матиме значення 1...10 кВт/(м²·К). Відомо, що такі порядки коефіцієнти тепловіддачі мають при бульбашковому кипінні води або азоту. Отже, логічно припустити, що тепловіддача від газифікаційної камери в розплавлений шар поліетилену, насичений газовими бульбашками продуктів піролізу, є схожою на тепловіддачу при бульбашковому кипінні.

Розрахунок швидкості піролізу. В експерименті 18.06.2004 швидкість ω_{rod} скорочення поліетиленового стержня склала приблизно 10 мм/с. В експерименті 20.07.2004 в інтервалі часу 17...20 с, коли мало місце горіння піролізованого поліетилену, близьке до запланованого, ω_{rod} склала приблизно 7 мм/с (див. відеозаписи). Але потрібно мати на увазі, що газифікаційна камера має внутрішню конічну поверхню, яка приблизно в 10 разів перебільшує площу торця стержня, отже швидкість ω_T газифікації поліетилену, яка була спрямована нормально до внутрішньої поверхні газифікаційної камери, становила 1 мм/с. Це значення узгоджується з нашим теоретичним прогнозом.

Оцінка тяги. Шток гідроциліндра має діаметр 40 мм. 18.06.2004 тиск всередині гідроциліндра становив близько 1.4 МПа, що відповідає теоретичному максимальному зусиллю 1.76 кН. Згідно з рис. 15, а під час роботи двигуна мінімальне зусилля, заміряне давачем сили, становило приблизно 1.2 кН (увігнута форма графіка пояснюється тим, що внаслідок зносу напрямні стержні на кінцях мають трохи більший діаметр, ніж всередині). Попередньо заміряний максимальний опір пересуванню двигуна, який не працює, становив приблизно 1 кН (основна частина його — опір у філь'ері). Таким чином, тяга двигуна становила близько 200 Н (згідно з вимірюванням 23.03.2004 — близько 150 Н, але тоді не було подачі аргону в камеру згоряння). Разом з цим тяга самої лише камери згоряння становила 20...35 Н (в експериментах 04.03.2004, 11.03.2004). Ми припускаємо, що таке зростання тяги спричинено інжекцією повітря в кільцевому газоводі.

ВИСНОВКИ

Згідно з даними експерименту порядок швидкості газифікації (піролізу) поліетилену становить 1 мм/с за умови надходження в газифікаційну камеру теплових потоків із щільністю порядку 1 МВт/м². Але за нашою оцінкою для спалюваної ракети потрібна швидкість скорочення поліетиленової оболонки порядку 10 см/с. Враховуючи, що означений порядок щільності теплових потоків є типовим для сучасних ракетних двигунів, і збільшувати його недоцільно, можна зробити такі основні висновки щодо про-

ектування двигунної установки спалюваної ракети.

1. Площа внутрішньої поверхні газифікаційної камери мусить перевищувати площу плаского торця спалюваної бакової оболонки ракети, або ракетного блоку в 10...100 разів. Для цього її треба робити конічною або зубчастою. В наших експериментах продемонстровано ефективність використання газифікаційної камери з конічною поверхнею.

2. Газифікаційну камеру потрібно розміщувати в камері згоряння в області форсуночної головки. Газифікаційна камера може бути частиною форсуночної головки. Розміщувати газифікаційну камеру в районі сопла з метою отримання високих теплових потоків не є необхідним.

3. Внаслідок високої теплоємності і низької теплопровідності поліетилену будь-які пристрої,

що запобігають його розплавленню поза газифікаційною камерою, не потрібні.

1. Ємець В. В. Експеримент з моделлю ракетного двигуна на газоподібному поліетиленовому пальному // Космічна наука і технологія.—2006.—12, № 2/3.—С. 103—107.

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF LABORATORY-SCALE ROCKET ENGINE FED ON SOLID POLYETHYLENE ROD AS FUEL

V. V. Yemets, F. P. Sanin, Ye. O. Dzhur, M. V. Mastiany, O. Yu. Kostritsyn, G. V. Minteev, V. M. Ushkanov

Fire testing of the laboratory-scale rocket engine with the consumable solid polyethylene rod as fuel is described. The experimental data on heat flows, gasification rate and heat transfer coefficient are presented. Results of the testing may be useful for designing launch vehicles with combustible polyethylene tank shells.