

УДК 629.764

**В. В. Ємець**

Дніпропетровський національний університет

## Експеримент з моделлю ракетного двигуна на газоподібному поліетиленовому пальному

Надійшла до редакції 11.07.05

Описано експеримент з моделлю рідинного ракетного двигуна, в якому за пальне править газоподібний поліетилен, що перед подачею у двигунний агрегат перебуває у твердому стані. Результати свідчать на користь можливості практичної реалізації ідеї спалення твердого конструктивного елемента в камері згоряння рідинного ракетного двигуна.

### ВСТУП

Ідея спалення відпрацьованих елементів конструкції ракет-носіїв, наприклад паливних баків, відома ще з часів піонерів ракетної техніки — Фрідріха Цандера, Юрія Кондратюка, Арі Штернфельда.

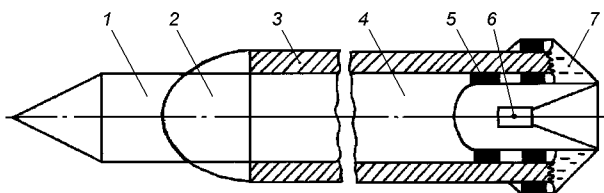


Рис. 1. Варіант компоувальної схеми ракети з витрачанням бакової оболонки: 1 — відсік корисного навантаження, 2 — спускний апарат, 3 — оболонка паливного баку, що використовується як пальне, 4 — рідкий окислювач, 5 — адаптивний магнітний герметизатор і опорні елементи, 6 — двигунна установка з агрегатами подачі, 7 — плавильна камера

Варіант будови ракети із спаленням оболонки паливного баку як компонента палива наведено на рис. 1 [2]. Рухомий двигунний блок, до складу якого входять двигунна установка, плавильна камера, герметизатор та нижнє бакове днище, у міру витрачання палива пересувається вздовж баку в напрямку відсіку корисного вантажу. Тверде пальне, з якого складається бакова

оболонка, плавиться та газифікується у плавильній камері, після чого подається у двигун компресором. Рідкий окислювач подається в двигун звичайним способом за допомогою лопаткового насоса.

Проблем реалізації спалимої ракети є багато, але очевидно, що ключовою є проблема вибору матеріалу, який поєднував би функції пального і конструкційного матеріалу. Природно, що при виборі такої речовини у першу чергу увага була звернута на відомі палива гібридних ракетних двигунів, оскільки вони також мають один компонент твердий, а другий — рідкий. Одним з відомих паливних гібридних двигунів є поліетилен (ПЕ). Саме він і привернув увагу своїми вельми привабливими властивостями:

- високим теоретичним питомим імпульсом поліетиленових палив з кисневими окислювачами (за нашими розрахунками — не нижчим за аналогічну характеристику палив на основі традиційного газу);
- міцністю, достатньою для виготовлення баків радіусом кілька метрів, розрахованих на типовий для сучасних ракетних баків внутрішній тиск (товщина оболонки за умови забезпечення потрібного співвідношення компонентів палива становитиме кілька десятків сантиметрів);
- порівняно високою густиною, яка на 7...18 % більша за густину газу;

- низькою температурою початку плавлення (103...137 °С в залежності від марки);
- можливістю використання в широкому температурному діапазоні — наприклад, для високомолекулярного ПЕ низького тиску робочий температурний діапазон становить — 269...90 °С;
- великим об'ємом промислового виробництва, простотою у використанні;
- нетоксичністю.

#### I ЕТАП ЕКСПЕРИМЕНТУ

Розплавлений ПЕ при температурі 120—280 °С має занадто високу в'язкість — для його транспортування при формуванні виробів застосовують тиски порядку 100 МПа, що не є прийнятним для ракетної техніки. Разом з тим відомо, що підвищення температури рідини призводить до зниження її в'язкості. Зрозуміло, що розплавлений ПЕ можна нагріти лише до температури початку його термічної деструкції (близько 300 °С), якщо нам потрібна гомогенна речовина. Отже, метою першого етапу експерименту була перевірка припущення про достатність зниження в'язкості ПЕ при температурі початку термічної деструкції для організації розпилення розплаву за допомогою типової для рідинних ракетних двигунів (РРД) форсунки [1].

На рис. 3, а наведено факел розпилення, що складається з рідкого ПЕ та газоподібних продуктів термічної деструкції. Нагрівання здійснювалось при температурі 300...350 °С у плавильній камері (ПК) ніхромовим електронагрівачем. Вміст ПК витискався назовні через струминну форсунку з діаметром отвору 0.8 мм завдяки надлишковому тиску 0.15...0.25 МПа, що створювався у баку за допомогою наддування газоподібним азотом.

На рис. 3, б наведена мікрофотографія застиглих частинок ПЕ, що утворилися внаслідок розпилення в одному з експериментів. Бачимо, що вони мають форму кульок завбільшки 8...60 мкм і ниток завтовшки 1...18 мкм. Розміри кульок відповідають типовим розмірам крапель рідини, що мають місце в факелах розпилення сучасних РРД.

Отже, результати першого етапу експерименту підтвердили припущення про достатність зни-

ження в'язкості розплавленого ПЕ при температурах початку термічної деструкції для організації задовільного розпилення типовою форсункою. Але після першого обнадійливого результату експерименти з рідким ПЕ були припинені, оскільки було помічено цікаве явище (як згодом з'ясувалось — відоме), що змінило напрямок подальших досліджень.

В одному з експериментів форсунка забилась. Розплавлений ПЕ, що не мав виходу з баку, став переходити в газоподібний стан, про що свідчили показання манометра — надлишковий тиск у баку підвищився до 0.5 МПа. Згодом форсунку пробило. Вміст баку повністю вийшов у вигляді газового струменя. Огляд баку пока-

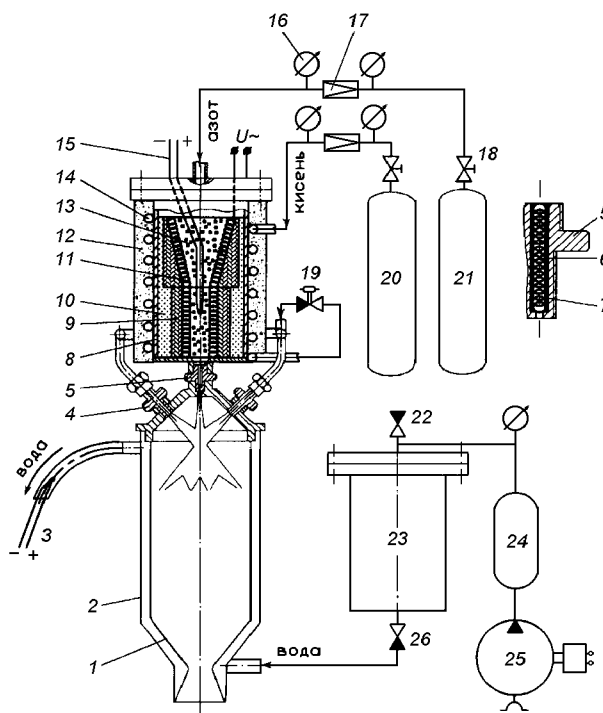


Рис. 2. Схема експериментальної установки: 1 — камера згоряння, 2 — кожух водяного охолодження, 3, 15 — термопара, 4 — форсунка окислювача, 5 — форсунка пального, 6 — додаткова нагрівальна спіраль, 7 — слюда, 8 — корпус плавильної камери, 9 — тигель, 10 — засипка, 11 — основна нагрівальна спіраль, 12 — теплоізоляція, 13 — поліетилен, 14 — теплообмінник, 16 — манометр, 17 — вентиль, 18 — редуктор, 19 — електропневмоклапан, 20 — балон з газоподібним киснем, 21 — балон з газоподібним азотом, 22 — дренажно-запобіжний клапан, 23 — бак з водою, 24 — ресивер, 25 — компресор, 26 — зворотний клапан

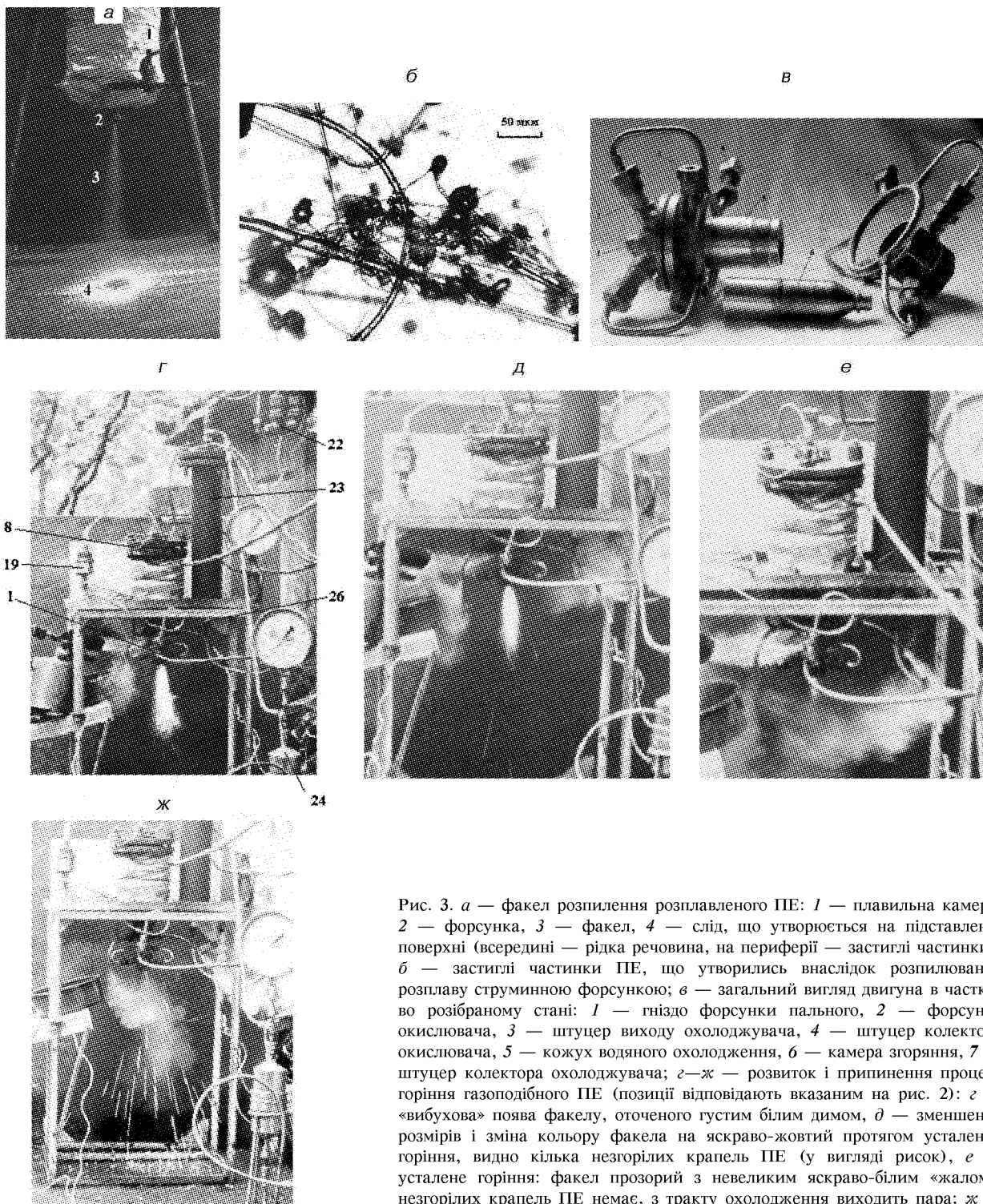


Рис. 3. *a* — факел розпилення розплавленого ПЕ: 1 — плавильна камера, 2 — форсунка, 3 — факел, 4 — слід, що утворюється на підставленій поверхні (всередині — рідка речовина, на периферії — застигли частинки); *б* — застигли частинки ПЕ, що утворились внаслідок розпилювання розплаву струминною форсункою; *в* — загальний вигляд двигуна в частково розібраному стані: 1 — гніздо форсунки пального, 2 — форсунка окислювача, 3 — штуцер виходу охолоджувача, 4 — штуцер колектора окислювача, 5 — кожух водяного охолодження, 6 — камера згоряння, 7 — штуцер колектора охолоджувача; *г-ж* — розвиток і припинення процесу горіння газоподібного ПЕ (позиції відповідають вказаним на рис. 2): *г* — «вибухова» поява факелу, оточеного густим білим димом, *д* — зменшення розмірів і зміна кольору факела на яскраво-жовтий протягом усталення горіння, видно кілька незгорілих крапель ПЕ (у вигляді рисок), *е* — усталене горіння: факел прозорий з невеликим яскраво-білим «жалом», незгорілих крапель ПЕ немає, з тракту охолодження виходить пара; *ж* — припинення горіння після вимикання подачі окислювача, видно «віяло» з крапель розплавленого ПЕ

зав, що він практично чистий усередині з незначним осадком вуглецю лише на нагрівальній спіралі. Тобто, термічна деструкція майже не призвела до небажаних і теоретично можливих реакцій розкладу ПЕ на С, Н<sub>2</sub>, СН<sub>4</sub>.

Результати роботи [3] підтверджують, що за умови відсутності кисню при температурі понад 450 °С ПЕ практично повністю (більш ніж на 98 %) перетворюється на газоподібні продукти термічної деструкції, а в'язкість розплавленого ПЕ різко знижується при температурі початку його термічної деструкції. Наприклад, при 5...10-%-му перетворенні полімеру на продукти деструкції в'язкість знижується приблизно на порядок. Власне, цей відомий ефект уможливив отримання задовільного факелу розпилення.

## II ЕТАП ЕКСПЕРИМЕНТУ

Подальша експериментальна робота була спрямована на демонстрацію можливості спалення газоподібного ПЕ в камері згоряння РРД, оскільки газоподібне пальне, імовірно, більш придатне для використання, ніж в'язкий розплав.

Будова експериментальної установки приведена на рис. 2. Основними агрегатами є ПК та камера згоряння (КЗ) 1.

ПК складається з циліндричного металевого корпусу 8 з внутрішнім діаметром 8 см і вміщеного в нього тигля 9, виготовленого з маршаліту (пилоподібного кварцу) та рідкого скла. Проміжок між ними заповнений засипкою 10 з піску та глини. В пазах тигля, спрямованих уздовж центральної осі, розміщена основна нагрівальна ніхромова спіраль 11 діаметром 0.5 мм і електричним опором 20...30 Ом. Зовні на ПК знаходиться трубчастий теплообмінник 14, призначений для нагрівання окислювача, і шар теплоізоляції 12, утворений із азбестового шнура і склотканини. Для контролю температури нагріву речовини, вміщеної в тигель, у центрі його нижньої частини розташована хромель-алюмелева термопара 15.

Двигун має кожух водяного охолодження 2 і змішувальну головку з однією форсункою пального 5 з діаметром отвору 0.8...0.9 мм і трьома форсунками окислювача 4, кожна з діаметром отвору 3 мм. Всі форсунки струминні. В каналі штуцера виходу води з тракту охолодження

розташована термопара 3, призначена для контролю температури охолоджувача.

ПК і КЗ конструктивно поєднані між собою форсункою пального. Всередині форсунки знаходиться додаткова нагрівальна ніхромова спіраль 6 діаметром 0.5...0.8 мм і електричним опором 1.5...3 Ом, призначена для підвищення температури речовини, яка прямує з ПК в КЗ, та запобігання утворенню пробок із застиглою ПЕ. Ця спіраль електрично ізольована від форсунки трубою із слюди 7. Загальний вигляд двигуна наведено на рис. 3, в.

Експеримент проводився у такій послідовності. ПК розігрівалась основною нагрівальною спіраллю 11 потужністю 350...400 Вт протягом 15...20 хв, доки показання термопари 15 не відповідали температурі приблизно 400 °С. При цьому також нагрівався газоподібний кисень, що заповнював теплообмінник 14. (Газоподібний кисень використовувався задля спрощення технічної реалізації експерименту. Зрозуміло, що внутрішньокамерні процеси в реальному РРД на рідкому кисні не матимуть принципових відмінностей від змодельованих).

Після цього гранульований ПЕ 13 високого тиску марки 15803-020 насипним об'ємом 50...100 см<sup>3</sup>, масою 30...60 г та температурою 10...20 °С швидко вміщувався у ПК. Відкривався вентиль 18 і починався наддув бака газоподібним технічним азотом з надлишковим тиском 0.005...0.01 МПа (з метою запобігання загорянню ПЕ або розкладанню його на С, Н<sub>2</sub>, СН<sub>4</sub>). Потужність спіралі 11 піднімалась до 550...700 Вт, вмикалась додаткова нагрівальна спіраль 6 потужністю близько 100 Вт.

Через 60...120 с температура ПЕ підвищувалась до 350...400 °С (в нижній частині тигля, згідно з показами термопари 15), і з сопла КЗ починали виходити газоподібні продукти термічної деструкції у вигляді білого диму. На отвір сопла КЗ спрямовувався вогонь бензинової паяльної лампи. Надлишковий тиск наддування азотом підвищувався до 0.05...0.1 МПа. Відкривався електропневмоклапан окислювача 19, і починалась подача газоподібного кисню з надлишковим тиском 0.2...0.3 МПа. Вмикався компресор 25, що забезпечував подачу охолоджувача з надлишковим тиском 0.3...0.5 МПа.

Після цих дій протягом кількох секунд спостерігались 5...10 спалахів на виході із сопла, що

супроводжувались різкими сухими хлопками, і з'являвся постійний вогняний факел. Тривалість горіння визначалась кількістю пального, вміщеного в ПК, і становила 100...200 с.

На рис. 3, з—ж послідовно проілюстровано виникнення, усталення і припинення горіння.

Всього було проведено понад 30 успішних експериментів, з них близько 10 — на другому етапі.

#### ОЦІНКА ПАРАМЕТРІВ РОБОЧОГО ПРОЦЕСУ

Тяга моделі РРД, температура продуктів згорання, тиск в КЗ визначались розрахунком з використанням відомих геометричних розмірів КЗ і сопла та заміряних параметрів подачі пального і охолоджувача.

Основні заміряні характеристики такі. Об'єм камери згорання — близько  $50 \text{ см}^3$ , внутрішній діаметр — 3 см, довжина циліндричної частини — 8 см. Коротке сопло, що не охолоджується, завдовжки 1 см мало ступінь розширення близько 2.5. Загальна витрата палива становила приблизно 5 г/с, з відношенням масових витрат окислювача і пального близько 4.0. Витрата охолоджувача — близько 10 г/с. Температура води на виході з тракту охолодження становила 130...150 °С.

Тиск в КЗ оцінювався як близький до 0.15 МПа, виходячи з мінімального потрібного тиску наддування азотом ПК (у припущенні настільки малого перепаду тисків на форсунці пального, що ним можна знехтувати).

За цими даними та за відомою методикою проведено тепловий розрахунок моделі двигуна.

Розраховані характеристики такі: тяга — приблизно 10 Н, питомий імпульс — 2000 м/с, температура продуктів згорання в КЗ — 3100 К.

За перевірочним розрахунком очікувана температура охолоджувача становить приблизно 130 °С, що узгоджується з експериментом і свідчить на користь достовірності розрахунків.

#### ВИСНОВКИ

Вперше продемонстровано можливість використання в РРД компонента палива, який перед подачею в камеру згорання був у твердом стані. Експериментально підтверджено можливість спалення в КЗ РРД традиційної будови газоподібних продуктів термічної деструкції поліетилену як пального.

1. Ємець В. Поліетилен як пальне для рідинного ракетного двигуна // *Машинознавство*.—1999.—№ 12.—С. 44—48.
2. Ємець В. Перекіс рухомого двигунного блока в ракеті з витрачанням бакової оболонки // *Машинознавство*.—2000.—№ 11.—С. 25—28.
3. Мадорский С. Термическое разложение органических полимеров. — М.: Мир, 1967.—328 с.

#### EXPERIMENTAL STUDY OF ROCKET ENGINE MODEL WITH GASEOUS POLYETHYLENE FUEL

V. V. Yemets

Experimental results for liquid rocket engine models with gaseous polyethylene fuel that is hard before its consumption are considered. The possibility of hard design element combustion in a liquid rocket engine is demonstrated.