



**ТОРБА**

**Юрій Іванович** — кандидат технічних наук, начальник експериментально-випробувального комплексу Державного підприємства «Запорізьке машинобудівне конструкторське бюро «Прогрес» імені академіка О.Г. Івченка»

## НАУКОВО-ТЕХНІЧНІ ПРОБЛЕМИ ПІДВИЩЕННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ТА ТЕХНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ДВИГУНІВ ДЛЯ АВІАЦІЙНОЇ ТЕХНІКИ

Стенограма доповіді на засіданні Президії НАН України 20 квітня 2022 року

*У доповіді розглянуто окремі результати науково-дослідних та дослідно-конструкторських робіт у галузі проектування та створення перспективних газотурбінних двигунів нового покоління, а також вдосконалення сучасних технологій, спрямованих на підвищення експлуатаційних і технічних характеристик двигунів для авіаційної техніки. Роботи виконувалися в рамках Угоди про науково-технічне співробітництво ДП «Івченко-Прогрес» з науковими установами і організаціями НАН України. Наголошено на перспективності такої науково-технічної співпраці, необхідності її подальшого розвитку й розширення зв'язків між фахівцями ДП «Івченко-Прогрес» та науковцями НАН України в галузі авіаційного двигунобудування.*

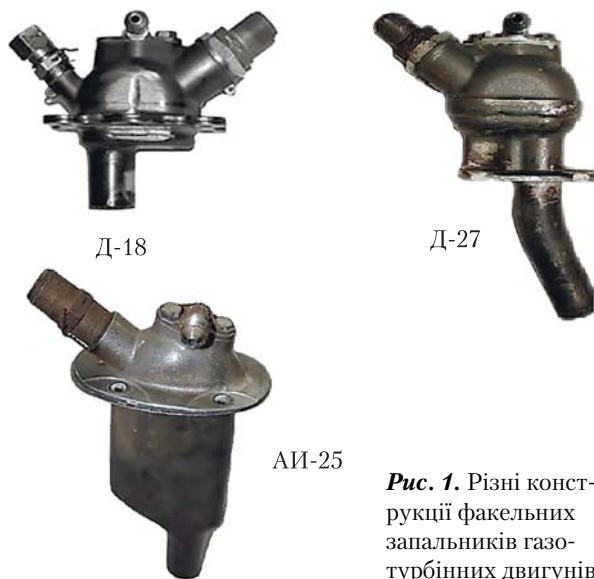
Високошановний пане президенте!

Вельмишановні члени Президії!

Як відомо, Державне підприємство «Івченко-Прогрес» є національним розробником та виробником широкої лінійки газотурбінних двигунів для літаків, вертольотів та безпілотних літальних апаратів.

Сучасний авіаційний двигун — це надскладний високотехнологічний продукт, у якому втілено велику кількість науково-технічних розробок, пов'язаних безпосередньо з науковими дослідженнями в галузі матеріалознавства, міцності, металургії, хімії, інформаційних технологій, математичного моделювання, а також результати цілого комплексу робіт з проектування, налагодження виробництва, експлуатаційної підтримки технічної придатності та подовження ресурсу.

З метою використання сучасних наукових розробок в авіабудівній галузі в рамках Угоди про науково-технічне співробітництво Запорізького машинобудівного конструкторського бюро «Прогрес» імені академіка О.Г. Івченка з науковими установами і організаціями НАН України ми вже тривалий час



**Рис. 1.** Різні конструкції факельних запальників газотурбінних двигунів

співпрацюємо з інститутами Академії за такими напрямками:

- розроблення технології виготовлення зварних біметалевих дисків турбін (Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України);
- створення ливарного алюмінієвого сплаву з підвищеними механічними властивостями (Інститут металофізики ім. Г.В. Курдюмова НАН України);
- впровадження керамічних матеріалів (Інститут проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича НАН України);
- створення керамічних підшипників (Інститут надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України);
- вибір раціональних параметрів бандажування робочих лопаток турбін (Інститут проблем міцності ім. Г.С. Писаренка НАН України);
- розвиток і вдосконалення методу розрахунку просторової течії (Інститут проблем машинобудування ім. А.М. Підгорного НАН України);
- розроблення методики розрахунку ефективності плівкового охолодження соплових і робочих лопаток турбін (Інститут технічної теплофізики НАН України);
- створення жаростійких покриттів, розрахованих на температури 1700–1800 °С (ННЦ «Харківський фізико-технічний інститут»).

Завдяки співпраці з науковими установами і організаціями НАН України в галузі розроблення нових сучасних газотурбінних двигунів авіаційного і промислового призначення отримано важливі практичні результати, що забезпечують підвищення експлуатаційних та технічних характеристик двигунів, які розробляються на нашому підприємстві.

Головним пріоритетом діяльності ДП «Івченко-Прогрес» є забезпечення надійності польотів на всіх стадіях проектування, розроблення, виготовлення та модифікації авіаційних двигунів, що закріплено в документі «Політика ДП «Івченко-Прогрес» у сфері безпеки польотів та якості». Тому одним з основних напрямів діяльності підприємства є постійне підвищення експлуатаційних та технічних характеристик двигунів, що модернізуються і розробляються, оскільки це зумовлює належний рівень конкурентоспроможності сучасної авіаційної техніки вітчизняного виробництва.

Багаторічний практичний досвід розроблення та експлуатації широкої лінійки авіаційних двигунів дозволяє зробити висновок, що на сьогодні одним з найважливіших напрямів підвищення експлуатаційних та технічних характеристик двигунів є розширення діапазону розпалення камер згоряння шляхом вдосконалення характеристик пускових факельних запальників.

Одним з етапів запуску авіаційного двигуна є розпалення камери згоряння, що здійснюється за допомогою факельного запальника (рис. 1). Залежно від режиму запуску іноді трапляються випадки незадовільного розпалювання камер згоряння. Це пов'язано з великою кількістю факторів, які впливають на процеси утворення паливно-повітряної суміші та її згоряння у факельному запальнику. Крім того, практичний досвід свідчить про обмеженість можливості використання найбільш доведеної конструкції запальника як прототипу для інших двигунів без проведення комплексу відповідних заходів і випробувань.

Аналіз різних широко використовуваних у світі систем розпалення камер згоряння (див. табл.) свідчить, що кожна з них має свої пере-

ваги та недоліки, проте системи на основі факельного запальника все ж найбільш перспективні для застосування.

Дослідженням систем розпалення камер згоряння займаються багато провідних підприємств галузі як в Україні (ДП «Івченко-Прогрес», «Зоря»–«Машпроект»), так і за кордоном – General Electric (США), Rolls-Royce (Велика Британія), Pratt & Whitney (США) та ін. Серед українських вчених, які зробили значний внесок у розвиток цього напрямку, слід відзначити І.Ф. Кравченка, С.І. Сербіна, Д.А. Долматова, В.Є. Костюка та ін.

Першим кроком до підвищення рівня проектування та випробування факельних запальників став розвиток теорії та застосування методів чисельного моделювання процесів горіння. Для оптимізації конструкції корпусу запальника на підприємстві використовують методи чисельного моделювання параметрів факела в середовищі ANSYS Fluent.

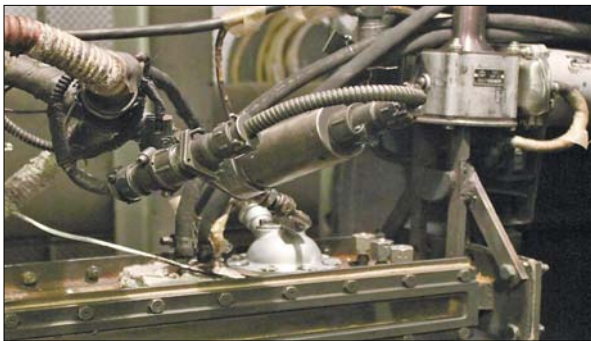
Для отримання експериментальних вхідних даних для чисельного моделювання процесу горіння було розроблено спеціальні установки.

На основі результатів проведених досліджень створено та апробовано скінченноелементну модель стаціонарного горіння. Потім було вибрано параметри оптимізації, функцію відгуку і за результатами чисельного моделювання отримано поля розподілу температур факела та інших параметрів горіння. Виконано оцінки впливу параметрів на оптимізацію режимів роботи і геометрії запальника. За результатами чисельного експерименту отримано базові геометричні параметри оптимальної конструкції, що дало змогу значно зменшити часові та матеріальні витрати на доводку системи розпалення. Оптиміальні конструкції корпусу факельного запальника на підприємстві виготовляють у натуральному вигляді і проводять з ними широкий спектр експериментів.

Експериментальне обладнання, яке донедавна використовувалося на ДП «Івченко-Прогрес», було вже морально застарілим і не дозволяло проводити експерименти на світовому рівні. Тому з метою досягнення сучасних стандартів проведення натурних експериментів наші фахівці модернізували широку ліній-

### Порівняння різних систем розпалення камер згоряння

Тип системи	Переваги	Недоліки
Іскрова свіча	Дозволяє підвищити ефективність розпалення завдяки створенню локального невеликого обсягу пароповітряної суміші навколо свічі зі зниженим тепло- і масообміном з навколишнім середовищем	Потужність розряду пропорційна квадрату тиску газу, що оточує електроди свічі. Придатна лише тоді, коли немає потреби запускати двигун за дуже низьких температур або в польоті на великих висотах
Напівпровідникова свіча	Потужність розряду не залежить від тиску в камері згоряння. Для живлення використовують низьковольтні електричні системи з накопичувальним конденсатором. Підвищений термін служби. Можливість повторного запалювання в польоті	Використання обмежене низькими температурами горіння пароповітряної суміші. За високих температур горіння пароповітряної суміші після запалення свічі в камері згоряння при роботі двигуна у крейсерському або максимальному режимах відбувається перегрів робочого торця свічі і, як наслідок, її відмова
Плазмовий запальник	Висока надійність розпалення камери згоряння у широкому діапазоні зміни параметрів. Простота монтажу й обслуговування. Більша питома потужність	Висока вартість та складність конструкції
Факельний запальник	Високі питомі й вартісні показники. Великий ресурс роботи свіч запалювання та запальника в цілому. Висока теплова потужність. Низька споживана потужність	Складність організації процесу перемішування палива з повітрям і спалювання сильно перебагаченої пароповітряної суміші. Нестабільність роботи



**Рис. 2.** Модернізований пристрій для випробування запальників на стенді КС-1В ДП «Івченко-Прогрес»



**Рис. 3.** Автоматизована мала термобарокамера для дослідження систем розпалення камер згоряння



**Рис. 4.** Установка з одно- і чотиріпальниковим відсіком камери згоряння

ку установок та експериментальних стендів (рис. 2). Крім того, створено та введено в експлуатацію нові установки та стенди, для кожного з яких проведено повну автоматизацію, розроблено українське програмне забезпечення для автоматичної реєстрації, синхронізації та математичної обробки параметрів у динаміці проведення експерименту, забезпечено ви-

соку якість вимірювання параметрів динамічних процесів.

Так, створено автоматизовану малу термобарокамеру для дослідження систем розпалення камер згоряння, що імітує висотність запуску від 0 до 10 км та зміну температури палива і повітря від  $-40$  до  $+60$  °С (рис. 3). Саме в цій термобарокамері спочатку випробовують нові системи розпалення, оскільки натурні випробування в ній є найдешевшими.

Випробування починають із земних умов, за температури навколишнього середовища, поступово збільшуючи висотність та змінюючи температуру палива і повітря згідно з матрицею плану проведення експерименту.

На наступному етапі випробування проводять на установці з одно- та чотиріпальниковим відсіком камери згоряння в об'ємі в порядку вартості їх проведення (рис. 4). Після отримання позитивних результатів роботи продовжують на стенді для випробувань повнорозмірних камер згоряння (рис. 5) і визначають основні характеристики камери згоряння.

Наступний крок — дослідження системи розпалення на повнорозмірному двигуні на відкритих та закритих стендах спочатку в умовах навколишнього середовища, а потім у кліматичній камері за температур від  $-40$  до  $+60$  °С (рис. 6).

У 2021 р. було введено в експлуатацію розроблену і виготовлену на підприємстві термобарокамеру (рис. 7) для випробувань двигунів малої розмірності для швидкостей з числом Маха до 0,9, температурою повітря і палива від  $-40$  до  $+60$  °С та висотністю від 6 км (1-й етап модернізації) до 8 км (2-й етап модернізації). Саме в цій термобарокамері виконують дослідження систем розпалення на повнорозмірному двигуні.

Модернізовані й розроблені установки і стенди для дослідження систем розпалення становлять потужний фундамент для проведення великої кількості інших науково-дослідних робіт.

Важливим етапом роботи є розвиток методів математичного моделювання процесів горіння та методів оптимізації конструкції корпусу фа-



кельного запальника. На цьому етапі реалізують дрібнофакторний та повнофакторний експерименти з варіюванням на кількох рівнях, встановлюють регресійні залежності найбільш вагомих факторів з функцією відгуку.

Отримані результати дозволяють:

- прогнозувати здатність виконати розпалювання камери згоряння;
- провести мінімальні конструктивні доопрацювання корпусу запальника для поліпшення його характеристик;
- скоротити час на доводку запальника аналогічної конструкції, визначивши найбільш статистично значущі фактори, які дають найменший вплив;
- встановити математичні залежності, що дозволяють визначити режим подачі пускового палива.

Реалізований під час досліджень спосіб керування горінням запропоновано вперше і на нього отримано патент України.

У результаті оптимізації, виконаної методом крутого сходження, отримують раціональні значення геометрії корпусу запальника та параметрів режиму подачі пускового палива. Потім на основі встановленої для заданих умов нижньої межі розпалення камери згоряння і температури на виході із запальника проводять оцінку діапазону розпалення камери згоряння за перепадом тиску повітря на жаровій трубі.

За результатами виконаних досліджень для формування рекомендацій щодо розширення діапазону розпалювання камер згоряння шляхом удосконалення корпусу запальника і режиму подачі пускового палива на широке коло проєктованих двигунів було розроблено блок-схему загального підходу до проєктування і дослідження систем розпалення камер згоряння.

В рамках співпраці з науковими установами і організаціями НАН України з використанням методів чисельного моделювання і завдяки модернізації експериментальної бази, реалізації натурних експериментів, застосуванню математичної статистики та теорії оптимізації отримано такі результати, що забезпечують:

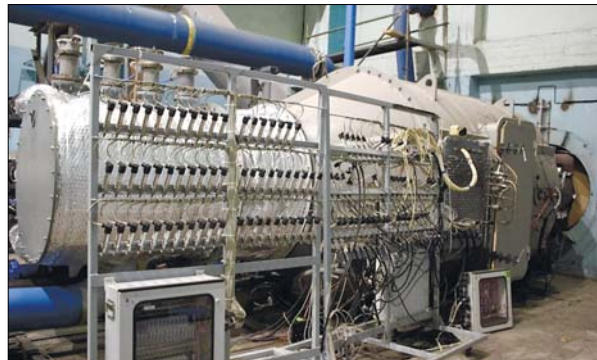
1) Розширення діапазону розпалення камер згоряння газотурбінних двигунів конструкції



**Рис. 5.** Стенд для випробувань повнорозмірних камер згоряння



**Рис. 6.** Відкритий стенд для випробувань повнорозмірних двигунів в умовах навколишнього середовища



**Рис. 7.** Термобарокамера для випробувань двигунів малої розмірності

ДП «Івченко-Прогрес» за перепадом тиску повітря на 15–20 %.

2) Розширення умов запуску газотурбінних двигунів за кліматичними показниками на 10 °С.

3) Підвищення висотності запуску двигунів на 2000 м. Якщо для певної моделі запуск у польоті обмежений висотою 6 км, то уявіть собі ситуацію, в якій безпілотний літальний апарат виконує бойове завдання на висоті 8 км і при цьому виникає потреба перезапустити двигун. Це означає, що потрібно спочатку знизити висоту польоту, а вже потім виконати запуск. На зменшення висоти знадобиться певний час, при цьому знизиться маневреність та швидкість, що призведе до значного зростання ризиків для успішного виконання завдання безпілотним літальним апаратом. Однак якщо запуск двигуна безпілотника в цьому польоті буде обмежений висотою 8 км, то на перезапуск двигуна буде витрачено мінімальний час, що значно мінімізує ризики невиконання бойового завдання.

4) Скорочення на 30 % часу і пропорційно — матеріальних ресурсів на проектування та доводку нових систем розпалення газотурбінних двигунів. Для модернізації техніки, що вже використовується, цей показник значно вищий, оскільки на першому етапі модернізації встановлені залежності дають змогу підвищити характеристики без проведення високовартісних механічних доопрацювань матчастини й отримати розширення характеристик за допомогою

зміни алгоритму керування подачею палива. На другому етапі модернізації проводиться механічне доопрацювання, але не всієї системи, а її малої змінної частини, наприклад пускової форсунки, яка потребує мінімальних ресурсів для заміни в експлуатації. І лише на останній стадії здійснюють механічне доопрацювання системи. Це дуже важливо для підтримання конкурентоспроможності вітчизняної авіаційної техніки.

5) Створення унікальної матеріально-технічної бази експериментально-випробувального комплексу ДП «Івченко-Прогрес», яка стає потужним фундаментом для проведення великої кількості інших науково-дослідних робіт.

6) Створення фундаментальної науково-технічної основи для вдосконалення наявних двигунів та підвищення ефективності роботи принципово нової техніки, зокрема двигунів нового покоління та безпілотних літальних апаратів.

Отримані результати можна також застосувати для вдосконалення допоміжних двигунів розробки ДП «Івченко-Прогрес», створення на нашому підприємстві нових турбореактивних двигунів для регіональних, військово-транспортних і багатоцільових літаків, а також турбореактивних двигунів для вертольотів та безпілотних літальних апаратів.

Дякую за увагу!

*За матеріалами засідання підготувала О.О. Мележик*

*Yuriy I. Torba*

Zaporizhzhia Machine-Building Design Bureau “Progress”  
State Enterprise named after Academician O.H. Ivchenko, Zaporizhzhia, Ukraine

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8470-9049>

#### SCIENTIFIC AND TECHNICAL PROBLEMS OF IMPROVING THE OPERATIONAL AND TECHNICAL CHARACTERISTICS OF AIRCRAFT ENGINES

Transcript of the report at the meeting of the Presidium of NAS of Ukraine, April 20, 2022

The report considers some results of research and development works in the field of design and building of promising new generation gas turbine engines, as well as improving modern technologies aimed at enhancing the operational and technical characteristics of aircraft engines. The works were performed within the framework of the Agreement on Scientific and Technical Cooperation between Ivchenko-Progress and scientific institutions and organizations of the NAS of Ukraine. Emphasis was placed on the prospects of such scientific and technical cooperation, the need for its further development and expanding the partnership between specialists of Ivchenko-Progress and scientists of the NAS of Ukraine in the field of aircraft engine building.