

УДК 665.753(045)

**А.В. ЯКОВЛЄВА, С.В. БОЙЧЕНКО***Національний авіаційний університет, Україна***ЗАСТОСУВАННЯ БІОПАЛИВ ДЛЯ ПОВІТРЯНО-РЕАКТИВНИХ ДВИГУНІВ  
З МЕТОЮ ПОКРАЩЕННЯ ЇХ ЕКОЛОГІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК**

*У даній статті описано основні екологічні проблеми, пов'язані з використанням реактивних палив. Розглянуто доступні на сьогодні енергетичні ресурси, що можуть застосовуватися у процесах виробництва палив для повітряно-реактивних двигунів на ряду з нафтою. Детально проаналізовано якість відпрацьованих газів авіаційних двигунів, їх компонентний склад, вплив на навколишнє середовище та здоров'я людини. Окреслено потенціал використання рослинних олій, як сировини для отримання альтернативних авіаційних палив. В статті надано інформацію про технологію отримання таких біопалив. Розглядається потенційний позитивний ефект застосування авіаційних біопалив, як на якість відпрацьованих газів повітряно-реактивних двигунів, а також на деякі їх експлуатаційні показники. Вбачається необхідність у проведенні експериментальних досліджень стосовно зазначених питань.*

**Ключові слова:** *повітряно-реактивні двигуни, реактивне паливо, екологічні характеристики, відпрацьовані гази, токсичність, біопаливо.*

**Вступ**

Транспортна система виступає найважливішою складовою економічного розвитку будь-якої країни, безперервна робота якої забезпечує її становлення і сталий розвиток. Особливу роль у цьому процесі, безперечно, відіграє авіаційний транспорт.

Сучасна авіація постійно розвивається. На сьогодні у світі нараховується близька 2 тис. авіакомпаній, що оперують більш ніж 50 тис. літаків. Світовий об'єм авіаційних пасажироперевезень щорічно збільшується на 4-5%. Розширення авіапарку та збільшення кількості виконаних польотів зумовлює зростання об'єму споживання авіаційних палив. Разом з тим, розвиток авіаційної галузі викликає збільшення антропогенного навантаження на довкілля.

**Постановка проблеми.** Сучасна авіація виступає одним з основних споживачів палив нафтового походження у вигляді авіабензинів та реактивних палив. Більша частина парку цивільної авіації оснащена повітряно-реактивними двигунами (ПРД), що працюють на реактивному паливі. Протягом десяти років (1992 – 2002 рр.) рівень споживання палив для ПРД зріс на 21%. Авіаційні судна є відповідальними за більш ніж 2% світової емісії CO<sub>2</sub>. Окрім CO<sub>2</sub>, відпрацьовані гази літальних апаратів (ЛА) містять низку інших компонентів, що негативно впливають як на здоров'я людини, так і на глобальні зміни клімату на планеті [1]. І, до 2050 року повітряний транспорт буде джерелом 20% усіх шкідливих речовин, що викидаються в світі. У зв'язку з цим, в останні роки досить гостро постало питання екологізації

авіаційної галузі, а саме зменшення викидів парникових газів, таких як CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> та інших, а також зниження токсичності відпрацьованих газів ЛА. Одним зі шляхів вирішення даної проблеми є пошук та впровадження в авіацію альтернативних біопалив.

**Аналіз досліджень та публікацій.** Починаючи з середини 70-х років велися пошуки альтернативних джерел енергії, що могли б замінити нафту [2]. У Канаді та Венесуелі, наприклад, відкритим способом розроблялися бітумінозні піски (нафтоносні піски, у яких після зникнення легких фракцій залишаються важкі нафти, бітум і асфальт). Запаси нафти у нафтових пісках Канади і Венесуели складають приблизно 3400 млрд. барелів [2]. Цієї нафти за нинішніх темпів споживання вистачить на 110 років. У США зосереджені великі запаси горючих сланців, що теж використовуються для отримання палив. Горючі сланці містять загалом близько 2,8 – 3,2 трлн. тонн нафти [2]. В якості сировини для виробництва палив застосовуються буре та кам'яне вугілля і природний газ [1, 3, 4].

Однак, серйозною проблемою отримання палива із зазначених видів сировини є їх негативний вплив на навколишнє середовище. Вугілля, природний газ, так само як і нафта є невідновлюваними сировинними енергоресурсами.

Крім того, видобуваючи їх з надр та перетворюючи у кінцевому рахунку на вуглекислий газ, підвищується концентрація CO<sub>2</sub> в атмосфері, і тим самим посилюється парниковий ефект, що спричиняє потепління клімату на Землі з наступними катастрофічними наслідками [4].

В останні роки набуває популярності розробка технологій отримання авіаційних палив з відновлюваної сировини: рослинної біомаси, промислових, побутових та сільськогосподарських відходів. Вже розроблено альтернативні моторні палива, що отримують з кукурудзи, сої, цукрової тростини, ріпаку та інших сільськогосподарських рослин. Це спирти та ефіри при згоранні яких також утворюється  $\text{CO}_2$ . Однак, цей вуглекислий газ був раніше поглинений рослинами з повітря, а отже використання біомаси в якості сировини для виробництва палив не спричиняє підвищення вмісту  $\text{CO}_2$  в атмосфері [1].

**Мета роботи.** Беручи до уваги постійний розвиток сучасної авіації, а відтак збільшення навантаження на навколишнє природне середовище, необхідним є дослідження потенціалу авіаційних біопалив не тільки для вирішення проблеми вичерпності сировини, а й шляху екологізації роботи ЛА. Метою даної роботи є аналіз можливостей підвищення деяких екологічних характеристик ПРД шляхом використання біопалив на основі рослинних олій.

### Екологічні вимоги до якості авіаційних палив

Сучасні палива для цивільної авіації мають задовольняти ряд вимог, пов'язаних з економічністю, надійністю та довговічністю роботи авіаційної техніки. А в останні десятиріччя особливої популярності та гостроти набуває така вимога, як екологічна безпечність палива [5].

Говорячи про екологічну безпечність палива, слід розуміти, що воно має спричиняти найменший вплив на навколишнє середовище на всіх етапах його експлуатації (виробництво, транспортування, заправка повітряних суден, зберігання, та безпосередньо використання). Особливо гостро стоїть питання з викидами продуктів згорання палива в атмосферу, їх об'ємами та хімічним складом. Крім того палива мають бути безпечними та не спричиняти негативного впливу на організм людини.

В той же час авіаційні палива мають забезпечувати надійність та довговічність роботи ЛА, тобто мати оптимальний фракційний склад, що забезпечує стабільний процес згорання у всіх режимах роботи двигуна та не викликати утворення парових пробок в паливній системі при висотних польотах. Паливо та продукти його згорання не повинні спричиняти шкідливого впливу на деталі паливної системи та двигуна, крім того мають забезпечувати надійну роботу двигуна у широкому діапазоні зовнішніх умов (температура, тиск, вологість та ін.) [4 - 6].

Однак, на практиці реактивні палива не здатні забезпечувати всього комплексу бажаних властивостей. Більш того, деякі з них є взаємно виключаю-

чими. Так, наприклад, наявність сірки в паливі зводиться до мінімуму у зв'язку з токсичністю відпрацьованих газів та підвищеною корозійною агресивністю палива. В той же час, палива повністю очищені від сірки продемонстрували гірші протизношувальні властивості і вимагали додаткового введення певних присадок. Крім того, вартість процесу повного видалення сірки дуже висока. Таким чином, необхідним є пошук оптимального балансу фізико-хімічних, експлуатаційних та екологічних властивостей з метою забезпечення ефективної, надійної та безпечної роботи літальних апаратів [5].

### Показники токсичності відпрацьованих газів ПРД

Відпрацьовані гази ПРД представляють собою складну, багатокомпонентну суміш газів, пари, крапель рідини, дисперсних твердих частинок. Загалом відпрацьовані гази авіаційних двигунів містять близько 280 компонентів, серед яких можна виділити основні: продукти повного згорання палива ( $\text{CO}_2$  та водяна пара), речовини, що утворюються в процесі термічного синтезу з повітря при високих температурах ( $\text{NO}_x$ ), продукти неповного згорання палива ( $\text{CO}$ , вуглеводні  $\text{C}_n\text{H}_m$ , сажа), а також оксиди сірки  $\text{SO}_x$ , альдегіди  $\text{RCHO}$ , продукти конденсації та полімеризації [7]. Крім того, відпрацьовані гази містять продукти згорання різноманітних паливних присадок. Усі ці речовини, більшість з яких є токсичними, потрапляючи в навколишнє середовище, спричиняють шкоду рослинному та тваринному світу, негативно впливають на здоров'я людей.

Якість палива, його фізико-хімічні властивості, а отже і склад відпрацьованих газів визначаються природою та властивостями сировини, способами отримання базових фракцій, методами їх очистки, властивостями присадок, що додаються. Традиційно реактивні палива отримують з нафти, що утворена вуглеводнями різних класів та містить у своєму складі певну кількість води, механічних домішок та деяких гетероатомних сполук [5 - 7]. Нижче приведено взаємозв'язок між фізико-хімічними показниками палив для ПРД та токсичністю їх викидів.

Масова частка ароматичних вуглеводнів. Даний показник, вказує на наявність у паливі ароматичних сполук. Ароматичні вуглеводні характеризуються підвищеною схильністю до нагароутворення та димлення. Найбільший вплив на нагароутворення та димлення мають біциклічні вуглеводні [4]. Окрім того, ароматичні вуглеводні погіршують сумісність палива з гумовими та пластмасовими ущільненнями.

Вміст загальної сірки. Наявність у паливі сірки і її сполук є причиною корозійних процесів деталей літальних апаратів, трубопроводів резервуарів та ін.

Підвищений вміст сірки призводить до швидшого зношування деталей двигуна, утворення відкладень, нагароутворення та більшої токсичності викидів [4]. Вміст меркаптанової сірки. Цей показник вказує на вміст сірки в меркаптанах – активних сіркоорганічних похідних вуглеводнів, що містять групу – SH. Він є показником сумісності з матеріалами, що характеризує корозійність палива та токсичність викидів відпрацьованих газів ПРД [4].

Одним з найбільш вагомих компонентів відпрацьованих газів ПРД є сажа. Вона представляє собою тверді частинки, що складені розчинними та нерозчинними в органічних розчинниках фракції [6, 7]. В основному це вуглець (95-98%) та хімічно зв'язаний водень (1-3%). Сажові частинки адсорбують високомолекулярні вуглеводні, альдегіди та сірковмісні солі. В основі процесу формування частинок сажі полягає термічний розклад вуглеводнів палива, утворення активних вуглеводневих частинок, ріст ядер сажі, їх агломерація та окиснення. Наявність сажі у відпрацьованих газах знижує їх прозорість, викиди містять дим чорного забарвлення. Окрім того, сажа містить канцерогенні поліциклічні ароматичні вуглеводні, солі оксидів сірки, деякі метали та компоненти присадок до палива [7].

Наявність у відпрацьованих газах ПРД таких токсичних компонентів як оксиди сірки зумовлено вмістом у реактивному паливі сірки та її сполук (елементарна сірка S, сірководень  $H_2S$ , меркаптани RSH та ін.). За високих температур і надлишку кисню ці сполуки згорають до оксидів  $SO_2$  та  $SO_3$ , які в атмосфері реагують з вологою повітря і утворюють сірчану та сірчисту кислоти. Вміст сірки в реактивному паливі дуже жорстко нормується, однак повністю її виключити не можливо. Це пов'язано з тим, що наявність сірки у паливі спричиняє позитивний вплив на його протизношувальні властивості [7].

Серйозну небезпеку для довкілля та здоров'я людини становить монооксид вуглецю, або чадний газ. Він представляє собою газ без кольору та запаху, що є проміжним продуктом хімічної реакції вуглеводневого палива та кисню.

В умовах роботи авіаційних двигунів вуглеводні палива, кисень та водяна пара розкладаються з утворенням вуглеводневих радикалів типу  $CH_3$ , вуглецю C, атомарних кисню та водню, груп OH та SHO, в результаті рекомбінацій яких і утворюється CO. Основною причиною утворення чадного газу є нестача кисню, що призводить до неповного згорання палива [7].

Досить широку групу токсичних компонентів відпрацьованих газів складають неспалені вуглеводні [4, 7]. Серед них у викидах ПРД присутні парафіни, олефіни, нафтени, поліциклічні ароматичні вуглеводні та ін.. Вуглеводні, що знаходяться у рід-

кій або твердій фазах (найчастіше високомолекулярні) адсорбуються на частинках сажі. Низькомолекулярні вуглеводні присутні у викидах у газоподібному стані і надають їм білого кольору. Такі вуглеводні формуються в результаті неповного згорання палива за умов нестачі кисню [7].

## Застосування біокеросину для ПРД

Аналізуючи існуючі на сьогодні технології виробництва авіаційних палив, їх можна умовно поділити на 5 груп відповідно до типу сировини [1, 3, 8]:

- палива на основі традиційної нафти;
  - палива на основі нетрадиційної нафтової сировини (сланці, бітумінозні піски);
  - синтетичні палива виготовлені з вугілля, природного газу та біомаси ФТ-процесом;
  - палива на основі рослинних олій та тваринних жирів (біодизель, біокеросин, гідрогенізовані рослинні олії);
  - палива на основі спиртів (етанол, бутанол).
- Однак останні не задовольняють вимог. Що висуваються до реактивних палив і радше є альтернативною бензинам.

Зважаючи на актуальність розробки альтернативних технологій виробництва біопалив, представниками Національного авіаційного університету розпочато масштабну роботу в цьому напрямку.

Ми дослідили низку факторів, які на нашу думку є ключовими у виборі оптимальної технології. Серед таких факторів слід відмітити стан економіки, наявність сировинної бази, наявність необхідних технологій та обладнання. В результаті, ми дійшли висновку, що оптимальною для умов України є технологія виробництва авіаційного біокеросину.

Біокеросин представляє собою суміш традиційного нафтового керосину, та біокомпоненту в певних концентраціях. Відсоток біокомпоненту в суміші може сягати 50%. Як біокомпонент використовуються метилові/етилові ефіри жирних кислот рослинних олій (МЕЖК/ЕЕЖК). Технологія отримання біокомпоненту досить проста і подібна до виробництва біодизелю. В основі полягає процес етерифікації жирних кислот рослинних олій метиловим чи етиловим спиртом у присутності лужного каталізатору [7]. Після очистки кінцевими продуктами є ефіри та гліцерин. На рис. 1 схематично зображено процес виробництва біо-компоненту [7].

У якості сировини для виробництва біокомпонентів використовуються різноманітні високоолійні рослини, вибір яких залежить від географічних та кліматичних умов вирощування. Для умов України раціональною є переробка ріпакової олії, також в певній кількості соняшникової та соєвої олій.

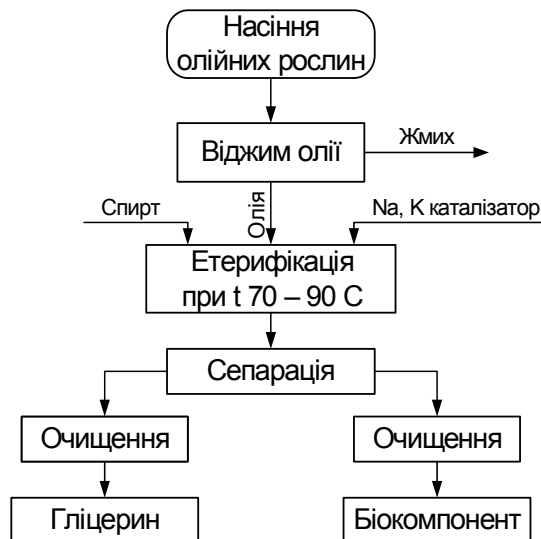


Рис. 1. Технологія виробництва біокомпоненту [7]

Застосування МЕЖК/ЕЕЖК рослинних олій у якості альтернативи нафтовому реактивному паливу має цілу низку переваг. Так як біокомпоненти є похідними жирних кислот, вони значно відрізняються за своїм компонентним складом від нафти. Рослинні олії володіють виключно низьким вмістом сірки та ароматичних вуглеводнів, що означає майже повну відсутність у відпрацьованих газах двигунів оксидів сірки та поліциклічних ароматичних вуглеводнів; викиди містять менше неспалених вуглеводнів [9]. Однак, як відомо певний вміст сірки у паливі позитивно впливає на його протизношувальні властивості. Тож виникає деяка непевність, чи здатне біопаливо забезпечити відповідний рівень захисту деталей ПРД від зношування. Спираючись на досвід застосування МЕЖК/ЕЕЖК рослинних олій у дизельних двигунах автомобілів, можна говорити про їх позитивний вплив на протизношувальні властивості. Дані властивості є дуже важливими, адже підвищене зношування деталей двигуна призводить до зміни його гідродинамічних характеристик, порушень режиму роботи, збільшенню нагароутворення та димлення [7, 9]. Протизношувальні властивості палив залежать від ряду факторів, найважливішими з яких є змашувальна здатність та наявність механічних домішок. Змашувальна здатність палива на пряму залежить від в'язкості. Чим вона вище, тим більша несуча здатність плівки палива, що знаходиться між парами тертя деталей ПРД. У зв'язку з цим встановлюють нижню межу в'язкості, що для традиційних реактивних палив становить  $1,25 \text{ мм}^2/\text{с}$  [7]. Біокомпоненти отримані з рослинних олій відрізняються вищими значеннями в'язкості у порівнянні з керосином нафтового походження. Нами встановлено, що в'язкість ЕЕЖК ріпакової олії становить

$7,2 \text{ мм}^2/\text{с}$ , а ЕЕЖК соняшникової олії  $6,9 \text{ мм}^2/\text{с}$ . Можливо припустити, що суміші біокеросину володіють гарними протизношувальними властивостями, в результаті змішування біокомпонентів з традиційним реактивним паливом вдасться значно знизити вміст сірки.

Говорячи про вплив біопалив на довкілля, необхідно відмітити, що паливо на основі рослинних олій є відносно нешкідливим для навколишнього середовища, так як при розливах на поверхню землі дуже швидко піддається біологічному розкладенню, як і будь-який інший компонент рослинної сировини [8, 9]. Також слід зазначити, що застосування біопалив, на відміну від традиційних нафтових палив, не призводить до порушення загального балансу  $\text{CO}_2$  в атмосфері. Це пояснюється тим, що рослини, які використовують у якості сировини для біопалив, у процесі своєї життєдіяльності споживають необхідний їм вуглекислий газ із атмосфери [3].

## Висновки

У даній статті наведено інформацію про сучасний стан сировинної бази для виробництва реактивних палив. Незважаючи на обмеженість світових запасів нафти, вона й досі залишається основним ресурсом для виробництва палив для ПРД. Однак, на сьогодні існує ціла низка проблем, пов'язаних з використанням авіаційних палив на основі викопної сировини. У зв'язку з цим до сучасних палив для ПРД висувається низка екологічних вимог. Нами проведено аналіз основних показників токсичності відпрацьованих газів ПРД, процесів їх утворення та впливу на навколишнє природне середовище.

Для вирішення проблем, описаних у статті, нами запропоновано використання авіаційних біопалив, а саме біокеросину на основі рослинних олій. Завдяки своєму рослинному походженню біопалива не містять багатьох речовин, що негативно впливають на якість відпрацьованих газів ПРД, зокрема сполук сірки та ароматичних вуглеводнів; забезпечують більш повне згорання палива, а отже менший вміст сажі та інших твердих частинок у викидах.

На нашу думку застосування біопалив у авіації є перспективним з огляду на можливість вирішення зазначених екологічних проблем. Це питання потребує проведення експериментальних досліджень фізико-хімічних, експлуатаційних та екологічних характеристик біопалив. Результати проведених досліджень планується опублікувати у наступній статті.

## Література

1. Hileman, J.I. Near-Term Feasibility of Alternative Jet Fuels [Text]/ J.I. Hileman, H.M. Wong, I. Waitz.

– Santa Monica, California: RAND Corporation, 2009. – 120 p.

2. Ергин, Д. Добыча: Всемирная история борьбы за нефть, деньги и власть [Текст]/ Д. Ергин. – М.: «Альпина Паблишер», 2011. – 960 с.

3. Крылов, И.Ф. Альтернативные моторные топлива. Производство, применение, перспективы [Текст]/ И.Ф. Крылов, В.Е. Емельянов // Мир нефтепродуктов. – 2008. – №1. – С. 38-42.

4. Газ природный, палива та оливи [Текст]: моногр. / М.П. Андрійшин, Я.С. Марчук, С.В. Бойченко, Л.А. Рябоконт. – Одеса: Астропринт, 2010. – 232 с.

5. Яновский, Л.С. Основы авиационной химотологии [Текст]/ Л.С. Яновский, В.П. Дмитренко, Н.Ф. Дубровкин. – М.: МАТИ, 2005. – 680 с.

6. Большаков, Г.Ф. Гетероорганические соединения реактивных топлив [Текст]/ Г.Ф. Больша-

ков, Е.А. Глебовская. – Л.: Гостоптехиздат, 1962. – 220 с.

7. Девянин, С.Н. Растительные масла и топлива на их основе для дизельных двигателей [Текст]: моногр. / С.Н. Девянин, В.А. Марков, В.Г. Семенов. – Х.: Новое слово, 2007. – 452 с.

8. Альтернативные реактивные топлива: проблемы и перспективы [Текст]/ Л.С. Яновский, Е.П. Федоров, Н.И. Варламова, П.В. Бородако, И.М. Попов // Вестник НАУ. – 2009. – № 1. – С. 108 – 112.

9. Техника и технологии производства и переработки растительных масел [Текст]: учеб. пособие / С.А. Нагорнов, Д.С. Дворецкий, С.В. Романцова, В.П. Таров; Мин-во образования и науки Рос. Федерации, Тамбов. гос. техн. ун-т. – Тамбов: Изд-во ГОУ ВПО ТГТУ, 2010. – 96 с.

Надійшла до редакції 17.05.2012

**Рецензент:** д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри реконструкції аеропортів та автошляхів, заступник директора з наукової роботи Інституту аеропортів А.О. Белятинський, Національний авіаційний університет, Київ.

## ПРИМЕНЕНИЕ БИОТОПЛИВ ДЛЯ ВОЗДУШНО-РЕАКТИВНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ С ЦЕЛЬЮ УЛУЧШЕНИЯ ИХ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК

*А.В. Яковлева, С.В. Бойченко*

В данной статье описаны основные экологические проблемы, связанные с использованием реактивных топлив. Рассмотрены доступные на сегодня энергетические ресурсы, которые могут применяться в процессах производства топлив для воздушно-реактивных двигателей наравне с нефтью. Проанализировано в деталях качество отработанных газов авиационных двигателей, их компонентный состав, влияние на окружающую среду и здоровье человека. Обозначено потенциал использования растительных масел в качестве сырья для получения альтернативных авиационных топлив. В статье приводится информация о технологии получения таких биотоплив. Рассматривается потенциальный позитивный эффект применения авиационных биотоплив на качество отработанных газов воздушно-реактивных двигателей, а также на некоторые их эксплуатационные показатели. Видится необходимость проведения экспериментальных исследований касательно обозначенных вопросов.

**Ключевые слова:** воздушно-реактивные двигатели, реактивное топливо, экологические характеристики, отработанные газы, токсичность, биотопливо.

## APPLICATION OF BIOFUELS FOR AIR-JET ENGINES WITH A VIEW TO IMPROVE THEIR ECOLOGICAL CHARACTERISTICS

*A.V. Yakovleva, S.V. Boichenko*

The main ecological problems connected with application of jet fuels are described in the given article. Energy resources that are available nowadays and may be used for production of fuels for air-jet engines similarly to crude oil are described. The authors analyzed in details the quality of aviation engines exhaust gases, their component composition, impact on the environment and human health. It is determined the potential of plant oils application as a raw material for production of alternative aviation fuels. There is information in the article about the technology of such biofuels production. It is discussed the potential positive effect of aviation biofuels application on both quality of air-jet engines exhaust gases and some of their exploitation characteristics. The necessity in experimental investigations execution according to the mentioned questions is seemed to be obvious.

**Key words:** air-jet engines, jet fuel, ecological characteristics, exhaust gases, toxicity, biofuel.

**Яковлева Анна Валеріївна** – аспірантка кафедри екології Інституту екологічної безпеки Національного авіаційного університету, Київ, Україна. e-mail: pinchuk\_anay@ukr.net.

**Бойченко Сергій Валерійович** – д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри екології Інституту екологічної безпеки Національного авіаційного університету, Київ, Україна. e-mail: chemmotology@ukr.net.