

## АЕРОПОРТИ ТА ЇХ ІНФРАСТРУКТУРА

УДК 662.75:621.593.3

**С.В. Іванов**, д-р хім. наук  
**В.В. Єфіменко**  
**В.Ф. Новікова**, канд. хім. наук  
**О.В. Полякова**

### ВПЛИВ КИСНЮ НА НАДІЙНІСТЬ РОБОТИ ПАЛИВНИХ СИСТЕМ

Інститут екології та дизайну НАУ, e-mail: ied@ nau.edu.ua

*Розглянуто вплив розчиненого кисню на експлуатаційні властивості реактивних палив: термоокиснювальну стабільність, пожежовибухонебезпечність, кавітаційні та протиспрацьовувальні властивості.*

#### Вступ

Реактивні палива і будь-які рідини здатні розчинити в собі гази, у т. ч. кисень, що міститься в повітрі. Повітря і гази, що його складають, проникають в паливо двома шляхами: розчиняючись у процесі дифузії та при перемішуванні. Тому максимальна концентрація кисню в паливі спостерігається після його фільтрації [1].

Розчинність газів в рідинах залежить від парціального тиску і описується законом У. Генрі. За даним законом концентрація розчиненого в рідині газу пропорційна його парціальному тиску, а відношення цих величин відповідає постійному для даних умов коефіцієнту розчинності [2].

У міру зниження тиску розчинність газу у вуглеводнях зменшується, що спричиняє його виділення в надпаливний простір. Цей закон справедливий, якщо немає хімічної взаємодії між компонентами розчину, тому для вуглеводневих палив застосовувати його можна лише для наближених розрахунків.

#### Вплив вуглеводневого складу палива, температури і парціального тиску на розчинність повітря

Розчинність у паливі кисню, азоту та інших газів, що є компонентами повітря, пропорційна парціальному тиску кожного з них у даних умовах. При температурі 15,5 °С коефіцієнт розчинності в реактивному паливі кисню дорівнює 0,0285, азоту – 0,0157. Унаслідок цього кисень розчиняється в паливі в більшій пропорції ніж азот у порівнянні з їх співвідношенням у повітрі. Тому газова суміш, що виділяється з палива, більш збагачена киснем, ніж звичайне повітря. Об'ємне співвідношення азоту до кисню в ній становить 2,07:1, тоді як у повітрі воно дорівнює 3,76:1.

На висоті 8000 м при зниженні тиску з палива виділяється повітря, що містить до 30 % об'єму кисню, тому вибухонебезпечність паливної системи значно зростає. Це збільшує також і межі пожежовибухонебезпечності паливо-повітряних сумішей.

Крім того, газ з підвищеним вмістом кисню є більш агресивним середовищем, ніж звичайне повітря щодо корозії матеріалів і термоокиснювальної стабільності реактивних палив [1].

Розчинність повітря в паливі зростає при зменшенні густини, поверхневого натягу та в'язкості вуглеводнів, що характеризує цей процес як суттєво дифузійний (див. таблицю).

#### Залежність розчинності повітря в паливі від параметрів палива

Густина, г/см <sup>3</sup>	В'язкість вуглеводнів, Сст	Поверхневий натяг, дм/см	Розчинність повітря, %
0,882	898	29,3	7,75
0,880	368	29,5	9,05
0,870	17,50	26,8	9,70
0,780	1,67	23,4	17,2
0,723	0,63	18,4	22,8

У бензинах за нормальних умов розчиняється приблизно 20 – 25 % об'єму повітря, у реактивних паливах – 13 – 16 % об'єму. Його розчинність у парафінових вуглеводнях більш висока, ніж в ароматичних.

З підвищенням температури, особливо при надзвукових польотах, розчинність повітря в паливах зменшується. Вплив температури на розчинність газів можна пояснити за принципом Ле Шательє: з підвищенням температури посилюється процес, який послаблює її зростання, тобто ендотермічний. Таким процесом є виділення газу з розчину. Унаслідок посилення цього процесу розчинність зменшується.

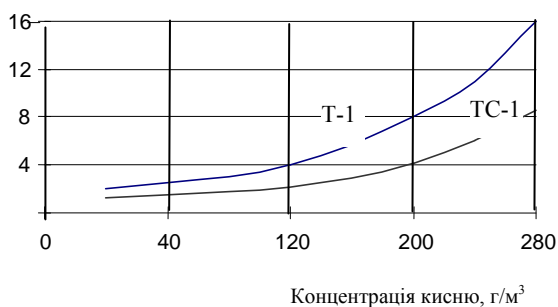
Отже, розчинність повітря залежить від вуглеводного складу палива, температури і парціального тиску газу.

### Вплив кисню на експлуатаційні властивості палива

Концентрація розчиненого повітря, і в першу чергу кисню, суттєво впливає на експлуатаційні властивості реактивних палив: термоокиснювальну стабільність, пожежовибухонебезпечність, кавітаційні та протиспрацьовувальні властивості.

Серед факторів, які найбільше впливають на термоокиснювальну стабільність палив, концентрація кисню відіграє вирішальну роль.

З підвищенням її в паливі або надпаливному просторі різко зростає маса нерозчинного осаду, що свідчить про інтенсифікацію процесу та зниження термоокиснювальної стабільності вуглеводнів палива (див. рисунок).



Вплив концентрації кисню в газовому середовищі на утворення нерозчинного осаду при температурі 150 °C

Вміст кисню в реактивних паливах при температурі 20 °C і тиску 101,3 кПа становить 4 – 6 % об'єму.

У процесі окиснення, в першу чергу, витрачається розчинений в паливі кисень, а після його повного використання кисень, що знаходиться в надпаливному просторі.

Якщо із палива вилучити весь розчинений кисень, а паливо помістити в інертне середовище, то утворення осаду практично припиняється. Воно стає термічно стабільним з можливим використанням до температур термічної деструкції вуглеводнів, що починається при температурі 350 – 400 °C.

Для сучасної авіаційної техніки з газотурбінними та реактивними двигунами характерна підвищена теплонавантаженість паливної системи. Це призводить до утворення продуктів окиснення в реактивних паливах, що, у свою чергу, збільшує

кількість відкладень у паливній системі та можливість порушення її роботи.

Паливо нагрівається при використанні його як охолоджуючого агента, тобто за рахунок тепла, що виділяється від працюючих механізмів, а в надзвукових літаках – за рахунок аеродинамічного розігріву.

Температура аеродинамічного нагріву збільшується пропорційно квадрату числа Маха  $M$ . Так, при польотах зі швидкістю 3М температура палива в баках може досягати 120 – 150 °C, а при збільшенні швидкості може підніматися до 200 °C і більше, що заперечує можливість використання нафтових палив. Але це не так. Слід розрізняти розпад компонентів палива в середовищі окисника (термоокиснювальну стабільність) і в інертному середовищі (термічну деструкцію).

У гідроочищених (РТ) і тим більше в гідрованих (Т-6) паливах вилучені неуглеводневі домішки (сірчані, азотні, кисневмісні з'єднання). Чим більше цих домішок у паливі, тим більше утворюється осаду – продукту їх окиснювального ущільнення. Тому продукти окиснення очищених палив добре розчиняються у вуглеводневому середовищі. У зв'язку з цим фазовий склад таких палив практично не змінюється, і, як наслідок, термічна стабільність їх залишається задовільною.

Палива прямої перегонки мають високий вміст неуглеводневих з'єднань і тому характеризуються низькою термоокиснювальною стабільністю. До них додають присадки, які ефективно працюють до температури 150 °C.

Дія цих присадок обумовлена тим, що вони окиснюються з більшою швидкістю, ніж неуглеводневі домішки, відбираючи з зони реакції кисень і утворюючи розчинні в паливі речовини. Але в міру використання цих присадок термоокиснювальна стабільність палив спадає.

Гідроочищені палива позбавлені природних антиокисників і при тривалому зберіганні окиснюються киснем повітря, що зменшує їх термоокиснювальну стабільність. Тому в гідроочищені палива також додають антиокиснювальні присадки. Але при високих температурах вони мало ефективні, оскільки швидко окиснюються, утворюючи додаткову кількість продуктів окиснення.

При використанні палив з невеликою термоокиснювальною стабільністю можливі порушення в роботі паливних систем унаслідок випадання осаду, що забиває пори фільтрів, та утворення смолистих відкладень на деталях паливно-регулювальної апаратури.

Найменша кількість осаду утворюється при окисненні алкано-цикланових вуглеводнів. Навіть під час окиснення протягом 6 год при температурі 150 °С не утворюється осад і лише тривале (більше ніж 6 год) окиснення призводить до утворення осаду. Ароматичні вуглеводні при окисненні утворюють значну кількість нерозчинних осадів і смол. До того ж кількість їх збільшується зі збільшенням кількості кілець у молекулах ароматичних вуглеводнів.

Глибина окиснення та кількість утворених твердих нерозчинних продуктів окиснювального розпаду зростають зі збільшенням температури палива. При температурі 150 °С для палива ТС-1 і 170 °С для палива РТ утворення осаду досягає максимального значення, і тоді прокачування палива через фільтр може припинитися.

Зростання утворення осаду при підвищенні температури пояснюється тим, що з нагрівом зменшується в'язкість палива і збільшується кількість зіткнень частинок, що призводить до їх укрупнення. При більш високих температурах паливо починає інтенсивно випаровуватися, що призводить до підвищення тиску насиченої пари і, як наслідок, витіснення з надпального простору кисню, що забезпечує затухання самого процесу окиснення і зменшення утворення осаду.

Авіаційні палива являють собою легкозаймисту вуглеводневу рідину, пари якої в суміші з повітрям вибухонебезпечні. Для характеристики пожежовибухонебезпечності застосовують такі показники, як температура спалаху та температура самозаймання. Температура спалаху – це найнижча температура пальної речовини, при якій над її поверхнею утворюється пароповітряна суміш, здатна спалахувати від джерела запалювання, але швидкість її утворення недостатня для підтримання процесу горіння, оскільки відведення тепла в навколишнє середовище перевищує тепловиділення при обмеженій унаслідок нестачі кисню або палива реакції окиснення. Температура спалаху залежить від фракційного складу палива. Із зовнішніх факторів на неї впливає концентрація кисню в зоні реакції. З її підвищенням температура спалаху зміщується в бік більш низьких значень.

Хімічний склад палива суттєво впливає на пожежовибухонебезпечність паливної системи, оскільки від нього залежить температура спалаху. Палива, що забезпечують швидке утворення нестійких продуктів окиснення, тобто які мають низьку стабільність, будуть за рівних умов займатися при більш низьких температурах. Найбільш низькі температури займання мають алканові вуглеводні (пропан, бутан, гептан), най-

більш високі – ароматичні (бензол, толуол). Циклани займають проміжне значення. При збільшенні кількості атомів вуглецю в молекулі (молекулярної маси) температура займання зменшується. Так, гідроочищене паливо РТ має температуру спалаху не нижче ніж 28 °С, гідроване паливо Т-6 – не нижче ніж 62 °С, що підвищує його пожежовибухонебезпечність.

У нинішніх умовах розвитку авіації неможливо повністю виключити ймовірність виникнення джерела запалення пари палива в надпальному просторі. Але застосовуючи антистатичні присадки, заземлення агрегатів і трубопроводів, обмежуючи швидкості перекачування та заправки палива, частково зменшують вплив даного фактора на вибухонебезпечність паливних систем.

Зменшення вмісту окисника в надпальному просторі паливних баків виключає утворення вибухонебезпечної суміші і тим самим можливість виникнення пожежі та вибуху. На цьому принципі ґрунтується використання систем нейтрального газу. Загальним недоліком їх є велика маса, яка може досягати до 1,2 % від загальної маси палива, що заправляється в повітряні судна.

Недоліком є також складність систем, необхідність їх дозаправки та обслуговування, ймовірність відмов. Тому на даному етапі підвищення пожежовибухонебезпечності паливних систем визначальним технологічним процесом підготовки палив до заправки є наземна обробка їх нейтральним газом.

Для палив надзвукових літаків завдяки додатковому розігріву мінімальна температура самозаймання відіграє вирішальну роль. Вона знаходиться в межах 200–240 °С, що практично на 50 °С нижче температури палива в баках, при польотах зі швидкістю більше за 3М. Температура самозаймання залежить від фракційного складу палива і концентрації кисню в надпальному просторі. При зростанні вмісту кисню температура самозаймання зміщується в бік більш низьких значень, що підвищує пожежовибухонебезпечність паливо-повітряних сумішей.

Зі збільшенням висоти польоту атмосферний тиск і, як наслідок, концентрація кисню зменшуються. Під впливом цього з більшою інтенсивністю буде проходити деаерація палива в баках літака.

Унаслідок різної розчинності парогазова суміш збагачується киснем, вміст якого на висоті 12 000 м досягає 35 % об'єму, що збільшує пожежовибухонебезпечність паливної системи.

Незважаючи на те, що зі збільшенням висоти польоту концентрація кисню зменшується, необхідна продувка палива азотом, який створює над

паливом захисну газову подушку з мінімальним вмістом кисню, що значно скорочує межі запалення. Але в літературі недостатньо даних, що характеризують вплив обробки палив нейтральним газом на пожежовибухонебезпечність паливної системи.

Для оцінки надійності роботи паливної системи літаків важливе значення має процес виділення розчиненого газу з палив в умовах польоту, коли спостерігається інтенсивна вібрація конструкцій літака і палива в його баках.

При наборі висоти маса розчиненого повітря в паливі зменшується пропорційно зменшенню тиску в паливних баках. Об'єм виділеного повітря може досягати кількох сотень літрів на 1000 л палива. У результаті цього на висотах більш ніж 8000 м відбувається «закипання» палива, що супроводжується кавітацією в трубопроводах і коливанням тиску в системі. При розвитку кавітації по всій порожнині проточної частини спостерігається повний зрив роботи насоса, що призводить до перебоїв подачі палива і зупинки двигуна.

Отже, поряд з тиском насиченої пари концентрація розчиненого в паливі повітря, компонентом якого є кисень, впливає на кавітаційні властивості паливної системи.

Вплив кисню на процеси тертя металів у вуглеводневих рідинах досліджувався О.Ф. Аксьоновим [3]. У трибохімічних процесах бере участь розчинений у паливі кисень. Зменшення його концентрації призводить до зниження величини зносу, підвищення критичного навантаження схоплення і, як наслідок, збільшення показника протиспрацьовувальних властивостей. Зі зростанням осьових навантажень процес схоплювання відбувається при більш високих концентраціях кисню.

У разі збільшення його концентрації вище рівновісної спостерігається значне зростання зносів при всіх навантаженнях, причому інтенсив-

ність зносу тим вища, чим більша концентрація кисню. Процес тертя при цьому переходить в область схоплення.

Таким чином, при терті металів у вуглеводневих рідинах з різним вмістом розчиненого кисню існують мінімально і максимально допустимі значення концентрації розчиненого кисню, за межами яких процес тертя реалізується зі схопленням. А глибина окиснення металів визначає характер тертя – силу тертя, знос, схоплення. При низьких концентраціях кисню на поверхні тертя утворюється переважно оксид заліза, і при цьому спостерігається малий знос. При великих концентраціях кисню на поверхнях тертя утворюється комплекс оксидів від  $FeO$  до  $Fe_3O_4$ . Різноманітність складу та великий їх об'єм приводить до утворення дисперсної структури, що легко руйнується силою тертя. У подальшому процес окиснення повторюється, і спостерігається інтенсивний знос та значні коливання сили тертя.

#### Висновки

Отже, дослідження впливу концентрації розчиненого кисню на протиспрацьовувальні властивості палив і можливості застосування знекиснення реактивних палив з метою поліпшення їх експлуатаційних властивостей мають велике практичне і теоретичне значення

#### Список літератури

1. Єфіменко В.В., Іванов С.В., Новікова В.Ф., Полякова О.В. Визначення вмісту розчинених газів в нафтопродуктах // Вісн. НАУ. – 2002. – №2. – С. 199–201.
2. Ледовських В.М., Іванов С.В. Загальна та неорганічна хімія: Підруч. для студентів вищ. навч. закл. – К.: Пед. преса, 2002. – С. 336–339.
3. Аксенов А.Ф. Авиационные топлива, смазочные материалы и специальные жидкости. – М.: Транспорт, 1970. – 255 с.

Стаття надійшла до редакції 14.06.04.

С.В. Иванов, В.В. Ефименко, В.Ф. Новикова, О.В. Полякова  
Влияние кислорода на надежность работы топливных систем

Рассмотрено влияние растворенного кислорода на эксплуатационные свойства реактивных топлив: термоокислительную стабильность, пожаровзрывоопасность, кавитационные и противоизносные свойства.

S.V. Ivanov, V.V. Efimenko, V.F. Novikova, O.V. Polyakova  
Influence of oxygen on stability functional fuels sistem

Consider influence of dissolved oxygen on functional properties of jet fuels: thermooxidativ stability, fire-explosive hazards, cavitation and aniwear.